



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

MATERIÁLY PRO KOSMICKOU TECHNIKU

MATERIALS FOR SPACE TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alena Bačová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Studentka: **Bc. Alena Bačová**
Studijní program: Letecká a kosmická technika
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

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 diplomové práce:

Materiály pro kosmickou techniku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kosmická technika je velmi složitá a navíc pracuje ve zcela specifických podmínkách. Z toho důvodu je třeba klást mimořádný význam nejen na její technické řešení, ale hned v počátku na správnou volbu materiálu. Materiály musí vyhovovat širokému spektru svých vlastností, ale je třeba, aby byly podrobeny také rozsáhlým a poměrně náročným zkouškám. Právě na řešení těchto problémů je zaměřena navrhovaná diplomová práce.

Cíle diplomové práce:

V diplomové práci budou rozebrány vlivy, které na kosmickou techniku působí v průběhu letu a následně pak bude zpracován přehled základních druhů materiálů, které se používají ve výrobě kosmické a raketové techniky. Materiály budou v širokém rozsahu posouzeny z hlediska jejich vlastností a budou uvedeny typické příklady jejich použití. Předpokládá se rozbor zkoušek kosmických materiálů před jejich použitím a návrh a podrobnější analýza zvolené metody zkoušení.

Seznam doporučené literatury:

Fatescue, P., Stark, J.: Space Systems Engineering, Wiley, Third Edition, Great Britain, 2003.

Tříška, V: Konstrukční materiály pro kosmickou a raketovou techniku, Univerzita obrany, Brno, 2013.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22.

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

Abstrakt

Tahle diplomová práce se zabývá analýzou materiálů používaných pro kosmickou techniku. Práce je rozdělena do osmi hlavních částí. V první části jsou definovány kosmické prostředky. Druhá část uvádí obecně do problematiky návrhu umělých družic a plánování vesmírných misí. Ve třetí části jsou rozebrány vlivy, jaké působí na kosmický prostředek před startem, v průběhu startu a letu, při pobytu ve vesmíru a při návratu. Čtvrtá část okrajově zmiňuje nejvíce využívané standardy v Evropě pro kosmický průmysl. Pátá část analyzuje materiály a jejich použití v kosmické technice. V šesté části je zpracován přehled zkoušek materiálů používaných pro kosmický průmysl. Sedmá část se zabývá analýzou materiálu (zvláště hliníkových slitin a kompozitů) při dopadu malého objektu (např. kosmického smetí). Poslední část je věnována okrajově návrhu zařízení pro přesnější analýzu chování materiálu při dopadu malého objektu.

Klíčová slova

Materiály, kosmická technika, kosmonautika, vlivy prostředí, kompozity, lehké vodíkové dělo

Abstract

This master's thesis is dealing with an analysis of materials used for space technology. The thesis is divided into eight main parts. The first part defines space technology. The second part introduces the issue of designing satellites and planning the space mission. The third part describes the effects of the environment on space technology before launch, during launch and flight, in space, and during atmospheric entry. The fourth part introduces the most used standards in Europe for the space industry. The fifth part analyses materials and their application in the space industry. The sixth part provides an overview of aerospace materials tests. The seventh part analyse processes and damage of material during and after the impact of a small object. The last part is devoted to the preliminary design of the device for a more accurate analysis of the behaviour of the material during the impact of a small object.

Keywords

Materials, space technology, cosmonautics, effects of environment, composites, light gas gun

Bibliografická citace

BAČOVÁ, Alena. *Materiály pro kosmickou techniku* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140764>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Miloslav Petrásek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Materiály pro kosmickou techniku* vypracovala samostatně, pod vedením doc. Ing. Miloslava Petráška, CSc.s použitím literatury a dalších podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně

Alena Bačová

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Miloslavu Petráskovi, CSc. za jeho vedení, cenné rady a ochotu. Velké díky také patří mé rodině a blízkým za jejich neustálou podporu během mého studia.

Obsah

Úvod	15
1 Kosmické prostředky.....	16
1.1 Raketa.....	16
1.1.1 Raketový nosič	16
1.1.2 Rakety pro speciální účely	17
1.1.3 Užitečné zatížení	19
1.1.4 Raketoplán.....	23
2 Návrh umělých družic a plán mise.....	25
3 Vlivy prostředí.....	27
3.1 Vlivy působící před startem	27
3.2 Vlivy působící v průběhu startu a letu	27
3.2.1 Hluk a vibrace	27
3.2.2 Zrychlení	30
3.2.3 Gravitační pole Země	31
3.2.4 Atmosféra.....	32
3.2.5 Teplo	32
3.2.6 Záření	33
3.2.7 Tlak	34
3.3 Vlivy působící při pobytu ve vesmíru	36
3.3.1 Kontaminace.....	36
3.3.2 Sluneční záření	36
3.3.3 Vysokoenergetické částice (Van Allenovy pásy).....	37
3.3.4 Hustota atmosféry	38
3.3.5 Elektrostatické nabíjení	38
3.3.6 Atomární kyslík.....	39
3.3.7 Meteority a mikrometeority.....	40
3.3.8 Kosmický odpad.....	41
3.4 Vlivy působící při návratu.....	42
3.4.1 Aerodynamický ohřev	42
4 ECSS standardy	47
5 Materiály pro konstrukci kosmické techniky	50
5.1 Slitiny lehkých kovů	50
5.1.1 Hliník.....	50

5.1.2	Titan	56
5.1.3	Hořčík.....	59
5.2	Oceli.....	60
5.3	Speciální vysokoteplotní slitiny	62
5.3.1	Nikl.....	62
5.3.2	Kobalt.....	64
5.3.3	Berylium.....	65
5.4	Nanomateriály	66
5.5	Smart materiály	69
5.6	Kompozity a sendvičové konstrukce.....	72
5.7	Materiály tepelné ochrany	77
5.8	Porovnání vybraných materiálů a vlastností	81
6	Zkoušení materiálu.....	83
7	Analýza účinku dopadu malého objektu	85
7.1	Střelba do duralového vzorku	87
7.2	Střelba ostrou střelou do kompozitu.....	90
7.3	Střelba plochou střelou do kompozitu.....	91
8	Návrh zařízení pro zkoušení účinků dopadu kosmického smetí	95
	Závěr.....	97
	Seznam použitých zdrojů.....	98
	Seznam použitých zkratk.....	115

Úvod

Kosmonautika je vědecko-technický obor zabývající se létáním do kosmu a v něm. Nezabývá se výzkumem vesmíru, i když to je důvodem, proč vůbec létat do vesmíru. Pozorování jevů na obloze a zájem o zkoumání tady je už od pradávna, ale teprve kosmonautika umožnila kosmický výzkum. Kosmický výzkum je velmi obširná oblast vědy zahrnující spoustu dalších částí vědních oborů. Jedním z mnoha důvodů k létům do vesmíru, je i lepší porozumění jevům na naší planetě – pozorování z vesmíru umožňuje náhled, kterého bychom nedosáhli ze zemského povrchu. Téměř každému z nás je dnes umožněno využívat přímých praktických užitek kosmonautiky (např. globální telekomunikace, navigace). Velmi užitečné jsou i nabitě zkušenosti z tohoto oboru při výskytu a řešení problémů např. v oblasti technologie nebo materiálů nebo například zkoumání účinků podmínek ve vesmíru na lidské tělo. Spoustu těchto zkušeností a poznatků lze dále uplatnit v jiných, většině lidí bližších, odvětvích (např. železniční doprava, zemědělství, bezpečnost, lékařství).

Ovšem kosmonautika a výzkum jsou velmi finančně náročné. Jen Česká republika platí ročně za kosmický výzkum přibližně 1,53 miliardy korun (dle [1]). Proto je zejména zde nutné vše důkladně zvažovat na začátku vývoje, abychom se vyvarovali co nejvíce chyb, jejichž odstranění může být v pozdějších fázích mise mnohonásobně finančně náročnější. V případě letů s lidskou posádkou nároky ještě vzrostou. Jedno z důležitých kritérií v tomhle dlouhém a náročném procesu je výběr materiálu. Cílem této práce je ukázat právě důležitost role, jež hrají materiály v kosmickém průmyslu.

1 Kosmické prostředky

Kosmické prostředky spadají do kategorie umělých kosmických těles. Jedno z možných rozdělení prostředků je rozdělení na nosiče a užitečné zatížení, což je také rozdělení použité v této práci. Dále se prostředky dají rozdělit na motorové a bezmotorové. Do motorových patří raketa, kosmická loď, kosmický tahač, raketoplán, naopak mezi bezmotorové se řadí umělá družice, kosmická sonda, kosmická stanice, sluneční plachetnice.

1.1 Raketa

Raketa má ze všech kosmických prostředků nejdelší historii. První rakety na střelný prach byly vynalezeny v Číně již ve 13. století, v 17. století se začaly vyvíjet rakety pro vojenské použití, avšak teprve na počátku 20. století se začínají podrobněji zkoumat zákonitosti pohybu raket a jejich použití pro výzkum vesmíru. Prvním, kdo publikoval práci na toto téma, se stal Konstantin E. Ciolkovskij a je považován za otce kosmonautiky. Nezávisle na něm o pár let později další vědci přichází s obdobnými výsledky a s dalšími nápady. Goddardu se v roce 1926 jako prvnímu podařilo zkonstruovat a vypustit první raketu na kapalnou pohonnou látku. V roce 1942 byla úspěšně vypuštěna první balistická střela (raketa)V-2. Až v 50. letech se podařilo úspěšně vypustit nosnou raketu, která jako první vynesla první umělou družici na oběžnou dráhu Země. [3]

Raketu lze v dnešní době všeobecně chápat jako složité technické zařízení, které se skládá ze dvou částí, jimiž jsou: raketový nosič a užitečné zatížení. Dále jsou například rakety pro speciální úkoly.

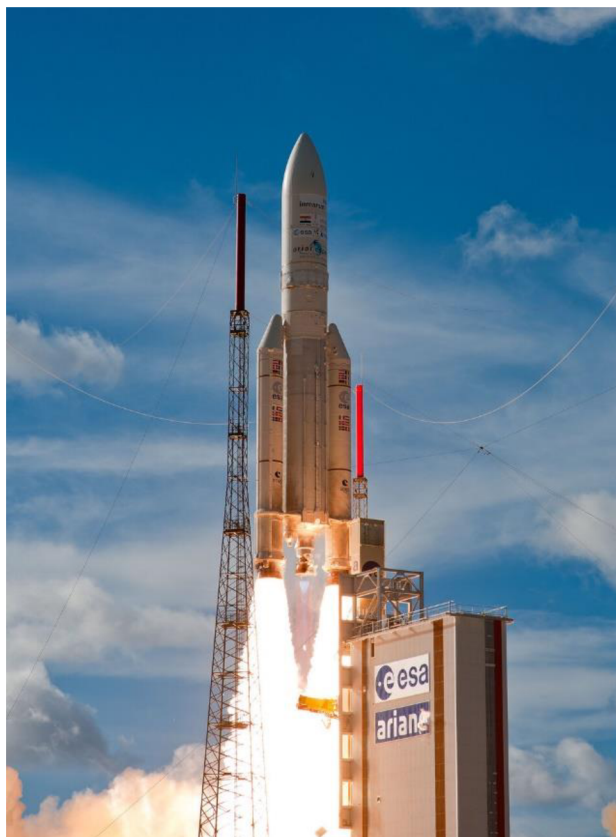
1.1.1 Raketový nosič

Nosná raketa je určena k urychlení na požadovanou rychlost a vynášení užitečného zatížení (umělých družic, kosmických sond a lodí) na požadovanou polohu v prostoru. Skládá se většinou z několika stupňů. Vícestupňové dosahují vyšší konečné rychlosti než jednostupňové při stejných konstrukčních parametrech. Typické současné rakety mají dva až čtyři stupně, kde každý z nich obsahuje motor, palivové nádrže, nosnou a spojovací konstrukci, elektronický řídicí systém. Samotná nosná raketa obsahuje základní soustavy: pohonnou, konstrukční, naváděcí a řídicí. Dále se v ní nachází napájení, adaptéry užitečného zatížení, krytování a jiné. [3][4]

Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno, aby se těleso dostalo do vesmíru, je potřeba dosáhnout první kosmické rychlosti. Této rychlosti jsou schopny dosáhnout pouze raketové motory. V dnešní době se pro nosiče používají pouze chemické pohony, podle kterých dělíme rakety na ty s motorem na tuhé pohonné látky (TPH), rakety s motorem na kapalnou pohonnou hmotu (KPH) a hybridní. Motor na TPH má už smíchané tuhé palivo s okysličovadlem v zásobnících, kde dochází k zážehu. Je to pohon jednoduchý, levný a spolehlivý, problémem je však vyšší hmotnost a nemožnost zastavit hoření či provést opětovný zážeh. Pohon KPH smíchá okysličovadlo a kapalnou pohonnou hmotu ve spalovací komoře, kde dojde k zážehu. Výhodou je možnost regulace a možnost dalšího zážehu. Avšak tento pohon je složitější než TPH a má nižší spolehlivost. Hybridní motor skládá tuhou pohonnou složku ve spalovací komoře, kam

se poté dopraví kapalná složka. Má podobné výhody jako KPH a nevýhodou je vyšší hmotnost. [4][5]

V dnešní době je v provozu téměř 90 nosičů a zhruba dalších 50 je ve vývoji, buď jako náhrada zastaralých nebo zcela nové koncepty. Největšími uživateli jsou USA, Rusko, Čína, Evropa, Indie a Japonsko. Mezi nejvíce užívané nosiče (roku 2018) pro vynášení umělých družic patří Ariane 5 (Obrázek 1.1), Proton M, Falcon 9. [3]



Obrázek 1.1: Nosná raketa Ariane 5 [6]

Rakety se také používají v dalších oblastech, např. v meteorologii, pro vojenské účely nebo pro zábavní účely (ohňostroje).

1.1.2 Rakety pro speciální účely

V meteorologii se využívají sondážní (meteorologické) rakety (Obrázek 1.2). Využívají se k výzkumu v horních vrstvách atmosféry. Jsou schopné dosáhnout mnohem větší výšky než meteorologické balóny, až 750 km. Měřicí přístroje jsou umístěné v hlavici rakety, kde zaznamenávají například tlak, teplotu a složení vzduchu, sluneční spektrum, kosmické záření nebo třeba výškové proudění, které se určí z trajektorie. Po výstupu se hlavice rakety oddělí a na padáku se snese na zem, kde je vyzvednuta a případně může být opět použita. NASA i ESA využívají sondážní rakety i pro další oblasti a experimenty v rozsahu 5-20 minut, například v oblasti mikrogravitace, radioastronomii, nebo jakékoliv měření v této oblasti atmosféry, která je pro satelity nepřístupná (jednoduše je moc nízko).

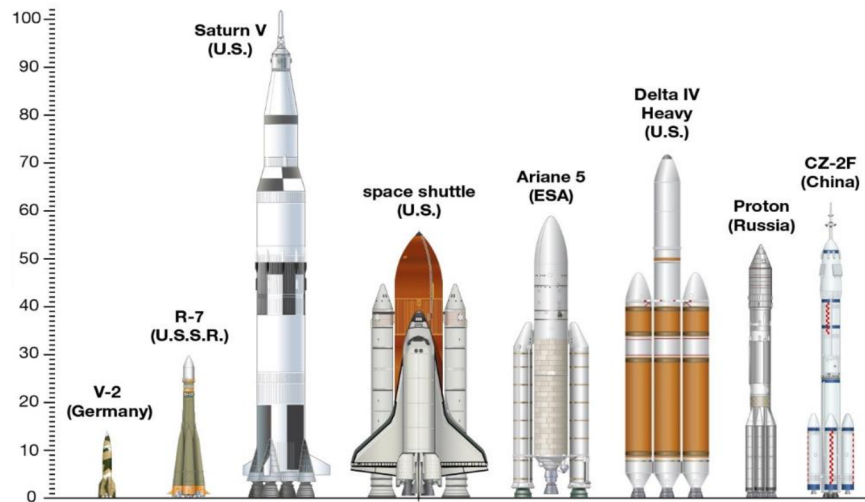
Tyto mise jsou mnohem levnější než ty, při kterých je dosaženo orbit, navíc přípravy na let zaberou mnohem méně času. [7][8][9]



Obrázek 1.2: Sondační raketa [10]

Ve vojenském sektoru najdeme využití raket například v podobě balistických střel nebo u vystřelovacích (katapultovacích) sedadel. Balistická střela, jak už název vypovídá, pohybující se po balistické křivce dokáže s velkou přesností dopravit nálož na místo určení, které dle typu střely může být od kratších vzdáleností (přibližně 150-300 km) až na vzdálenost 12 000 km. Balistické střely velmi krátkého doletu nevystupují z atmosféry, ale střely krátkého, středního doletu a mezikontinentální v určité fázi letu překračují nebo se alespoň velmi blíží smluvené hranici vesmíru (100 km). [11][12]

Na obrázku (Obrázek 1.3) je porovnání vzhledu a velikosti různých typů raket.



Obrázek 1.3: Porovnání původně balistické střely V-2 a balistické mezikontinentální střely R-7 s raketami jako nosiči [13]

1.1.3 Užitečné zatížení

Užitečné zatížení charakterizuje základní cíle, k jimž je raketa určena. Řadíme sem umělé družice, kosmická loď, kosmická sonda, tahač, stanice a sluneční plachetnice.

1.1.3.1 Umělá družice

Družice je objekt, který obíhá jiný objekt (např. Zemi) po kruhové či eliptické dráze. Umělá družice je taková, která je vyrobená člověkem a plní nejrůznější úlohy. První umělá družice byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 1957. Do roku 2020 jich bylo na orbitu skoro 6000, z toho 2666 funkčních. Satelity se staly nedílnou součástí našeho života. Pokrývají velkou část zemského povrchu a tím jej umožňují lépe a rychleji sledovat. Lépe dokáží sledovat vesmír, protože na rozdíl od přístrojů na Zemi nejsou ovlivněny atmosférou (prach, mraky atd.). Přenos signálu je tímto způsobem rychlejší a také je možný na mnohem větší vzdálenosti. Využívají se tedy hlavně pro komunikaci, pro určení přesné polohy, v meteorologii, monitorují různá tělesa, pořizují fotografie různých kosmických těles, které usnadňují vědcům práci. [14][15]

Umělá družice se může skládat z těchto hlavních částí: konstrukce, energetický systém, telemetrie, systém pro orientaci a stabilizaci, navigační systém, systém pro řízení prostředí, systémy pro zabezpečení životních podmínek, systém tepelné regulace, tepelná ochrana a příslušenství pro sbírání potřebných informací (např. fotoaparát, různé senzory). Některé systémy nemusí být vždy přítomny, potřebnost systémů záleží na úkolu družice. Podle hlavních úkolů se tak umělé družice mohou dělit na telekomunikační, navigační, pro dálkový průzkum Země, experimentální, meteorologické, vojenské atd.

Satelit začne Zemi obíhat v případě, že bude gravitační působení s rychlostí družice v rovnováze. V případě malé rychlosti bude družice stáhnuta gravitací do atmosféry. Těleso

potřebuje obíhat rychlostí alespoň 8 km/s, nicméně v případě moc velké rychlosti by satelit odletěl dál do vesmíru. Nejvíce družic obíhá na LEO neboli na nízké oběžné dráze, která je zhruba od 160 km do 2000 km. Komunikační satelity (Obrázek 1.4) využívají geostacionární orbit nebo polární orbit. Geostacionární družice obíhají kolem rovníku stejnou rychlostí a po směru otáčení Země. Satelity na polárním orbitu obíhají okolo obou pólů. Podle druhu umělého satelitu se liší i jeho konstrukce - např. satelity určené na LEO stráví většinu svého pobytu ve stínu, proto musí mít jinak uzpůsobenou napájecí soustavu než geostacionární satelity, které musí být připraveny na dlouhý čas v určitém období roku bez slunečního záření (až 70 minut). [14][15][135]



Obrázek 1.4: Telekomunikační družice [16]

1.1.3.2 Kosmická loď

Kosmická loď je těleso pro dopravu lidí nebo zásob, které je schopno manévrování, většinou na vesmírnou stanici. Do vesmíru je vynesena raketovým nosičem, ale mohou existovat i lodě, které tuto cestou zvládnou samy. Loď se skládá z jednotlivých modulů, což jsou samostatně oddělitelné sekce. K jejich oddělení dochází například při vstupu do atmosféry. Ku příkladu kosmická loď Sojuz (Obrázek 1.5) má 3 moduly: orbitální, přístrojový a návratový. Orbitální modul slouží k obývání kosmonautů v době, kdy jsou na orbitu. Přístrojový modul obsahuje přístroje na podporu života, baterie, solární panely, motory. Návratový modul obsahuje ovládání celé lodi a využívá se při startu a návratu zpět na Zemi. [17][18]



Obrázek 1.5: Kosmická loď Sojuz [17]

1.1.3.3 Kosmický tahač

Kosmický tahač (Obrázek 1.6) by se dal definovat jako prostředek určený pro manipulaci s dalšími tělesy ve vesmírném prostoru. Zejména se toto zařízení dá využít například při vypouštění většího množství družic při sdílených misích, kde se všechny satelity vypustí na jeden orbit. Tahač by tak mohl přemístit jednotlivé umělé družice na jejich správné oběžné dráhy. Tahače by se také mohly využívat i v odstraňování kosmického smetí. Dle dostupných informací se zkoumá odstranění nefungujících družic pomocí magnetů. [19][20]



Obrázek 1.6: Návrh kosmického tahače s jaderným zdrojem energie [21]

1.1.3.4 Kosmická sonda

Kosmická sonda (Obrázek 1.7) je vesmírné těleso bez posádky, jež cestuje vesmírem nebo těleso zkoumající povrch planety. Jejím úkolem je sbírat vědecké poznatky ve Sluneční soustavě (případně i dál), ty jsou pak odesílány zpátky na Zemi. Liší se od umělých družic neuzavřenou křivkou pohybu (hyperbola, parabola). Významnými sondami jsou New Horizon, Voyager 2, Pioneer 11, Pioneer 10 a Voyager 1. [17][25]



Obrázek 1.7: Kosmická sonda Voyager 2 [25]

1.1.3.5 Kosmická stanice

Kosmická stanice je zařízení na oběžné dráze určené pro dlouhodobý pobyt posádky, realizaci vědeckých experimentů a pozorování kosmických těles. První, menší stanice (Saljut, Mir, Skylab atd.) se dopravovaly na orbit celé. Momentálně jediná trvale obydlená stanice ISS (Obrázek 1.8) byla sestavena kvůli svým rozměrům až přímo ve vesmíru. Jednotlivé části byly dopravovány převážně raketoplány a kvůli jejich odstavení stavba nabrala zpoždění. Na rozdíl od kosmických lodí není schopná přistát na Zemi. Jednotlivé části stanice (např. servisní modul, ubytovací, laboratorní) spojují tzv. uzly. Energie se sbírá pomocí solárních panelů, které jsou připojené k stanici příhradovou konstrukcí, jež má na sobě zařízení na regulaci teploty na stanici. [26][27]

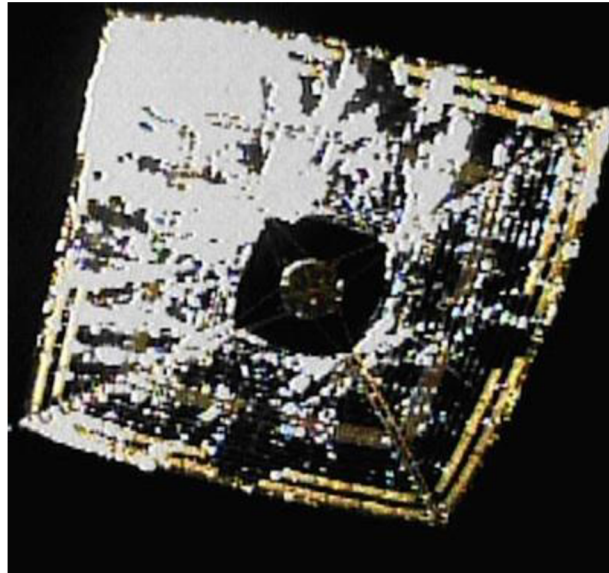


Obrázek 1.8: Mezinárodní vesmírná stanice ISS [26]

1.1.3.6 Sluneční plachetnice

Sluneční plachetnice je kosmická loď s velkou plochou (např. plachtou), která je schopná se natáčet dle potřeby, aby odrazila sluneční záření do vybraného směru. Tlak tohoto záření na plachtu způsobuje urychlení tělesa. Čím dál je těleso od Slunce, tím menší tlak na něj působí. Proto je třeba mít největší možnou plochu plachetnice s co nejlepším odrazivým a

tuhým povrchem. Pokud by plachetnice pohltila veškeré záření, těleso by nemohlo nijak manévrovat a pohybovalo by se jen ve směru dopadajícího záření. Tento druh pohonu má do budoucna velký potenciál. I kdyby při větší vzdálenosti od Slunce pohon nestačil, mohl by se kombinovat s chemickými nebo iontovými motory. Myšlenka sluneční plachetnice existovala už dlouho, ale teprve v roce 2010 se podařilo do vesmíru dostat první plachetnici IKAROS (Obrázek 1.9). Zatím je však tento druh prostředku stále v začátcích. [28][29]



Obrázek 1.9: První fotografie první sluneční plachetnice ve vesmíru IKAROS [30]

1.1.4 Raketoplán

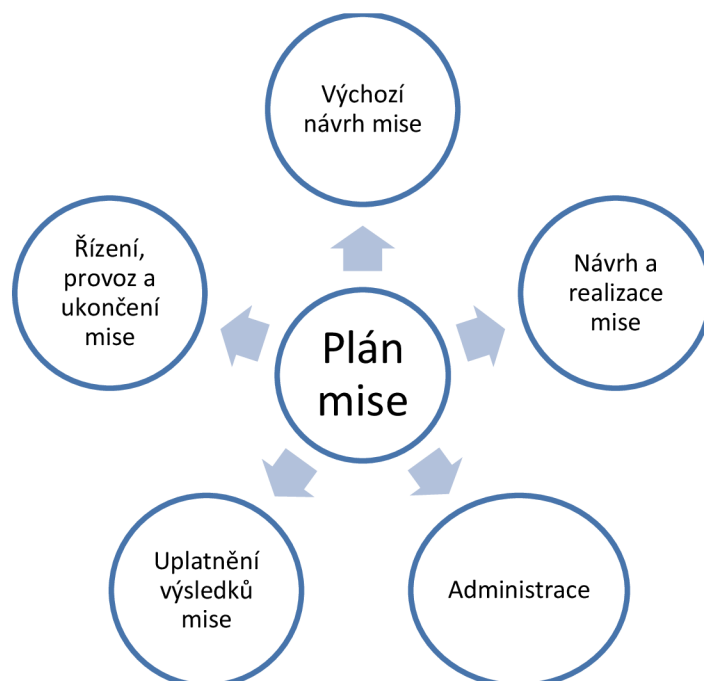
Raketoplán bylo první znovupoužitelné kosmické letadlo, které sloužilo k dopravě osob či nákladu na oběžnou dráhu. Slučuje tak schopnosti raketových nosičů a kosmických lodí. Hlavní myšlenkou, kromě znovupoužitelnosti, bylo vytvořit stroj schopný velmi častých letů do vesmíru (například pro dopravování zásob na vesmírnou stanici a vyvážení odpadu). Startoval ve vertikální poloze jako klasické raketové nosiče, ale přistával horizontálně na přistávací dráhu jako letadlo. Z hlediska výkonů máme dělení na orbitální raketoplány (Space Shuttle program, Buran) a suborbitální (SpaceShipOne, North American X-15), které sotva překročily Karmanovu hranici. Raketoplán by se dal rozdělit na tři hlavní části: raketové motory, vnější palivová nádrž a orbitální letoun. Po výstupu dojde k odhození vnější palivové nádrže a zůstane samotný orbitální letoun. Právě tato část se nazývá raketoplán. Orbitální raketoplány (Obrázek 1.10) provázelo spoustu technických problémů, nehod, a hlavně provoz se ukázal být až příliš drahý, proto byl jejich provoz v roce 2011 úplně zrušen. [22][23][24]



Obrázek 1.10: Start raketoplánu Columbia [23]

2 Návrh umělých družic a plán mise

Kosmický prostředek a jeho mise je náročná a velmi finančně nákladná záležitost. Před návrhem a sestrojením kosmického prostředku je proto nejprve potřeba pečlivě stanovit plán mise (Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: Příklad základních komponentů plánu mise

Na úplném počátku stojí myšlenka. Týmy vědců a inženýrů pracují na konceptu, který bude dále prezentován. Ve výchozím návrhu mise je potřeba si stanovit cíle mise, lidské zdroje, provést studii proveditelnosti, stanovit možné budoucí návazné projekty, určit specifikace mise (družice, konstelace). V první fázi je nejkritičtější zhodnocení financování, nákladnosti a rizik. Dalším potřebným komponentem je uplatnění výsledků.

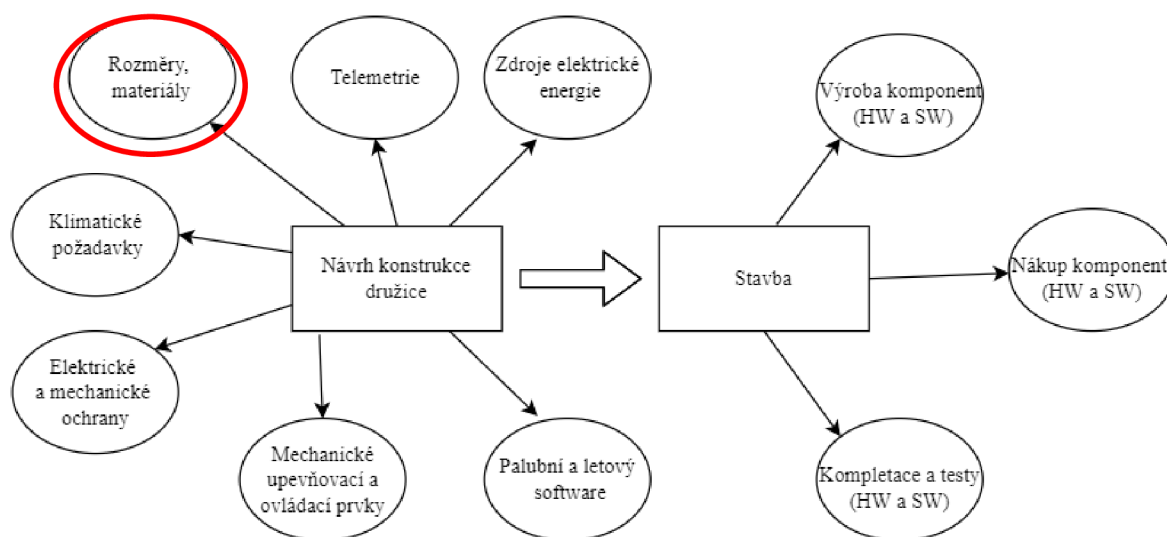
Po schválení se koncept rozvíjí – začíná vývoj částí prostředku a všech dalších potřebných částí až se přechází do detailů vývoje a návrhu. Ve finální fázi návrhu se klade důraz na konečné detaily a začíná se s výrobou. Po výrobě následuje sestavování a testování prostředku, protože prostředek je během svého života vystaven mnoha vlivům, kterým se věnuje následující kapitola 3 této diplomové práce. Kromě stavby a testování prostředku probíhá v této fázi například simulace, vývoj letového softwaru atd.

Dalším důležitým aspektem plánu, aby se mohla umělá družice vůbec dostat na oběžnou dráhu, je administrace. Pro uskutečnění mise je potřeba splňovat určité regulace (např. radiokomunikace ITU-R), registrovat prostředek na příslušných místech (např. UNOOSA) a další.

Mezi poslední fáze mise patří řízení, provoz ve vesmíru, a nakonec ukončení mise, kde je třeba se postarat o řádné a bezpečné odstranění umělé družice z oběžné dráhy.

Uplatnění výsledků mise by se dalo rozdělit na nekomerční, kam spadá například věda či výuka a komerční uplatnění (např. Starlink).

Při návrhu konstrukce družice je potřeba vzít do úvahy spoustu parametrů, které jsou ovlivněny účely mise, umístěním, dobou provozu a mnohými dalšími vlivy. Každý tento parametr se odráží v jednotlivých částech, ze kterých se umělá družice skládá (Obrázek 2.2). Jedním z prvních důležitých rozhodnutí při návrhu je výběr materiálu. Právě materiál může pomoci vyřešit problémy spojené s různými vlivy prostředí, se kterými se družice potýká, a zásadním způsobem tak ovlivňuje celý život jakéhokoliv kosmického prostředku.



Obrázek 2.2: Návrh konstrukce a stavba družice

3 Vlivy prostředí

Každý kosmický prostředek čelí velkému množství vlivů od sestavení až po konec svého života. Všechny uvedené působící vlivy mají negativní dopad na prostředek. Následky mohou být minimální, ale také mohou vést až k úplnému zničení prostředku. To je třeba vzít c potaz už při samotném návrhu.

Největší vlivy působící na kosmické prostředky můžeme rozdělit do tří kategorií: vlivy působící v průběhu startu, v průběhu letu, při pobytu ve vesmíru a ve fázi přistání.

3.1 Vlivy působící před startem

Před startem na konstrukci působí prostředí, ve kterém je skladována. Vzhledem k tomu, že vývoj a výroba je dlouhodobý proces (často trvá i 10 let), je třeba zajistit dobré skladovací podmínky, aby nedošlo ke kontaminaci a degradaci materiálu. Určité riziko představují převozy (Obrázek 3.1) a přesuny prostředků, kde by mohlo dojít k poškození prostředku např. vlivem nerovnosti na vozovce, vlivem počasí nebo lidské chyby.



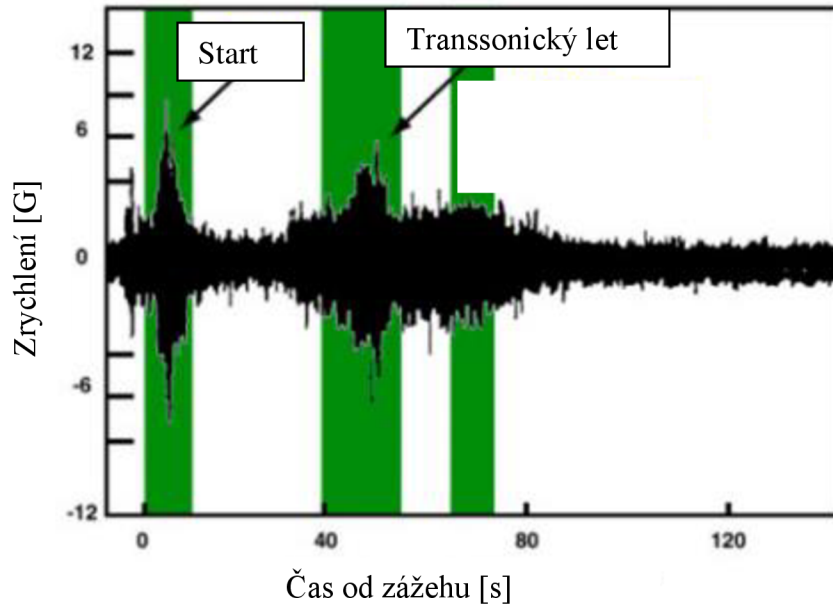
Obrázek 3.1: Převoz rakety Delta IV po částech [117]

3.2 Vlivy působící v průběhu startu a letu

3.2.1 Hluk a vibrace

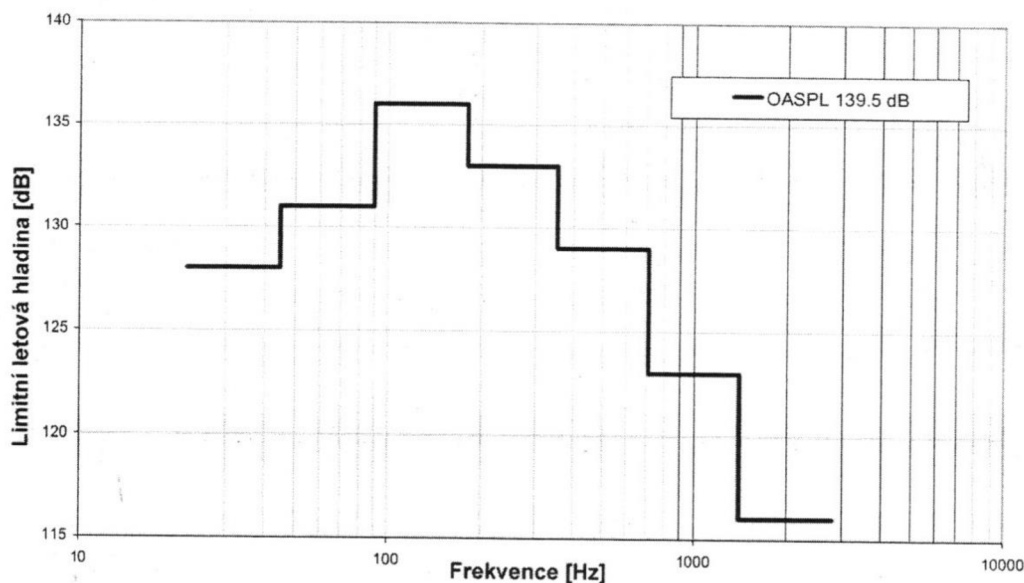
V průběhu startu a za letu čelí prostředek velkému množství hluku a vibrací. Toto zatížení je nebezpečné pro nosnou raketu či raketoplán, ale také pro náklad, posádku, avioniku či pro samotný kosmodrom, ze kterého raketa startuje. Hodnota hluku se pohybuje okolo 120-130 dB. První největší zatížení přichází hned v okamžiku startu motorů díky vyfukování spalin a jejich odražení od země (Graf 3.1). Z mechanických vibrací může dojít k vytvoření sekundárního akustického pole u aerodynamických krytů a nastanou akustické vibrace. Ty bývají více nebezpečné než mechanické, způsobují koncentraci napětí, zvláště pro méně pevné a lehké části konstrukce. Druhé největší akustické zatížení přichází ve chvíli transsonického letu v atmosféře (Graf 3.1) díky výfuku motorů a nestacionárnímu proudění okolo prostředku – vznik turbulentní mezní vrstvy, separace proudění a rázové vlny. Jakmile

nosič přejde do supersonického letu, vliv motorů se sníží na minimální hodnotu oproti zatížení, které způsobuje turbulentní proudění. V průběhu oddělování jednotlivých stupňů rakety navíc ještě přibude pyrotechnický šok a další zatížení, které také mohou způsobit vibrace. [35][39]



Graf 3.1: Vibrace v průběhu startu a letu [41]

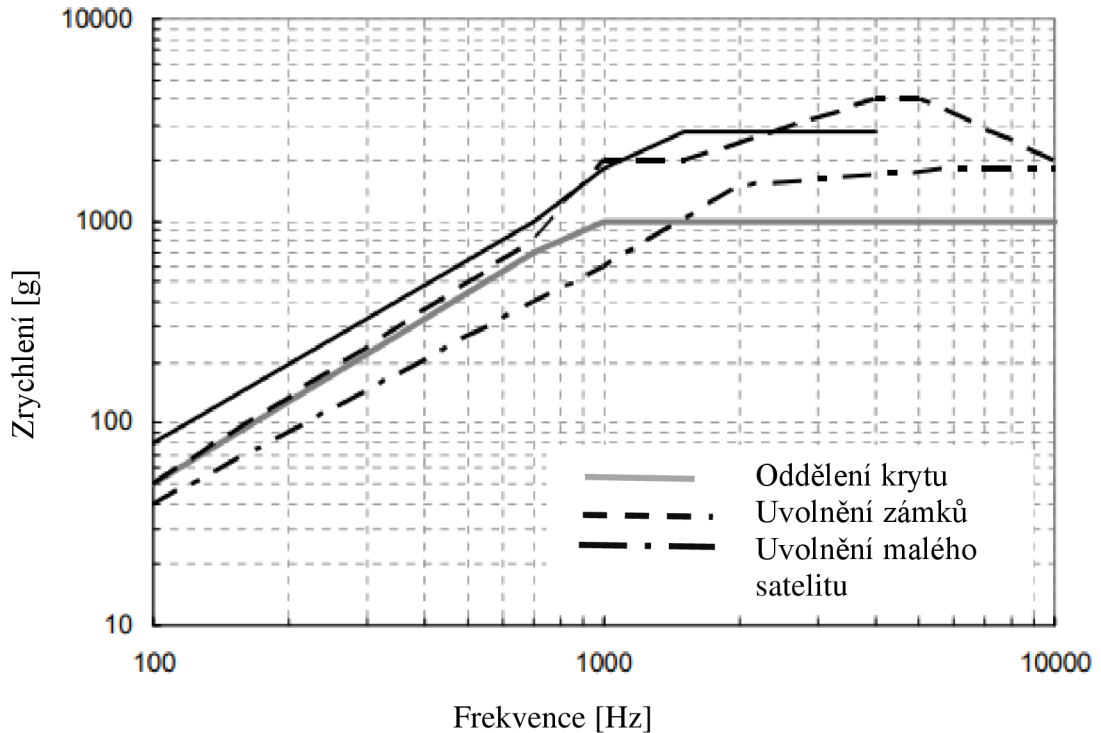
U motorů jsou nejvíce nebezpečné vysoké frekvence akustických vibrací, protože ty způsobují nebezpečná napětí ve struktuře materiálu a mohou vést k únavovému poškození během startu či letu. Motory jsou také největším zdrojem hluku, hlavně při vysokých rychlostech, když se smísí horké spaliny se studeným vzduchem atmosféry. Rozsah frekvencí hluku se ve fázích letu mění, údaje bývají poskytovány výrobcem nosných raket. Příklad spektra hluku je uveden v následujícím grafu (Graf 3.2). [35]



Graf 3.2: Spektrum hluku nosné rakety Ariane 5 s celkovou hladinou akustického tlaku (OASPL) [144]

Únavová poškození patří mezi nejzávažnější. Jsou způsobeny pohybem (skluzem) vrstev atomů. Při delším působení vibrací se vytváří skluzové pásy, které se mohou vzájemně spojit a způsobit tak velké praskliny. Akustická únava může nastat za působení akustické zátěže u součástí, které byly vystavené zatížení od motorů a akustického zatížení od narušení mezní vrstvy při vysokých rychlostech letu. Nejvíce jsou tímto ovlivněny trysky motoru, náběžné hrany křídel u raketoplánů a zadní část trupu. Části, které jsou svařované mají nepravidelnosti, poškození nebo ostré hrany, jsou náchylné na obě únavová poškození. [35]

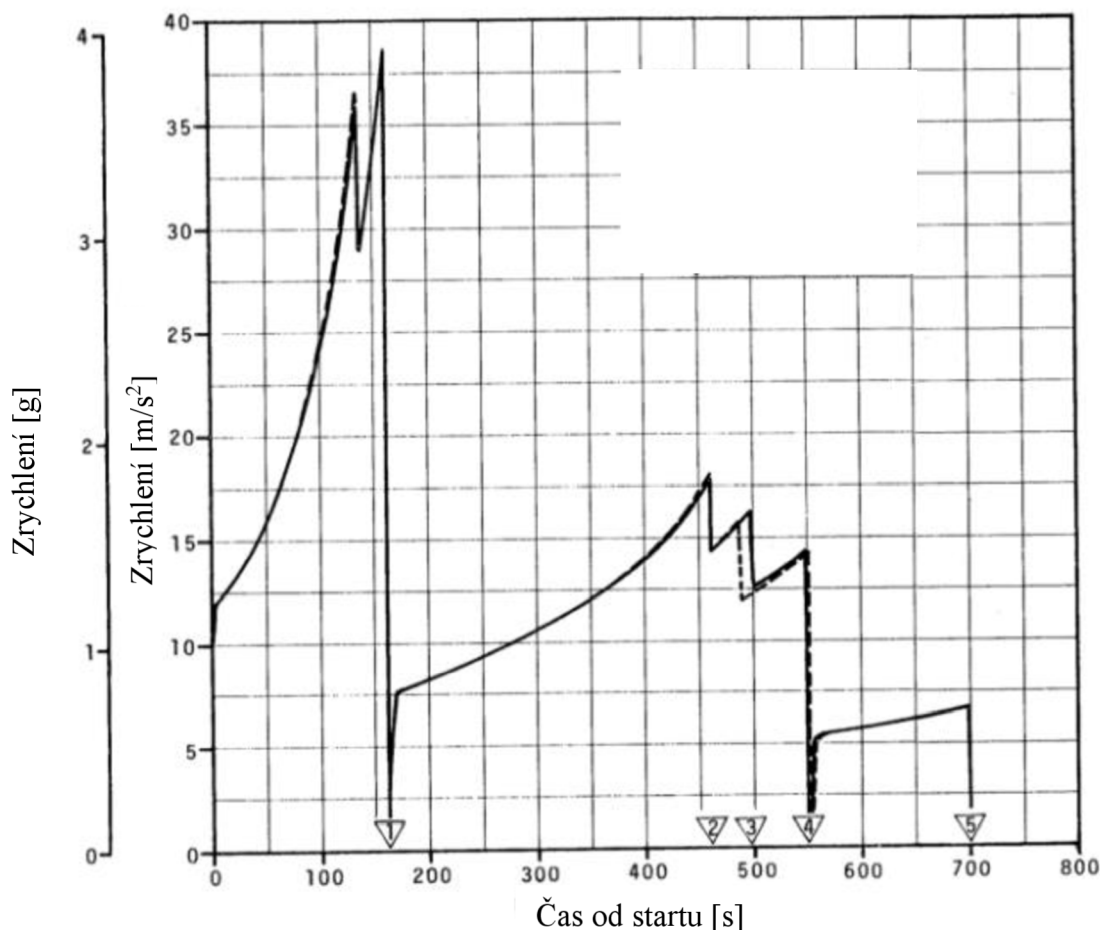
Pyrotechnický šok je odezva konstrukce na zatížení vyvolané zážehem pyrotechnických zařízení, které se používají např. při oddělení modulů. Tento šok bychom mohli zařadit mezi odezvy způsobené mechanickými rázy. Ty vznikají při zmíněném oddělení modulů, zapálení motorů nebo v okamžiku uvolňování zámku atd. Jejich nebezpečí spočívá ve velmi velké hodnotě zrychlení (až 2800 g) po velmi krátkou dobu (zhruba několik milisekund) a ve vysoké frekvenci (až 10 kHz) (Graf 3.3). Mohou se šířit celým prostředkem. Pro ochranu nákladu se používají akustické pokrývky, jež vibrace absorbují. [35][39]



Graf 3.3: Typické hodnoty zrychlení a frekvence při různých zdrojích mechanického šoku [39]

3.2.2 Zrychlení

Kosmický prostředek potřebuje dosáhnout první kosmické rychlosti, aby se dostal na oběžnou dráhu během několika minut. Čelí tak velkému zrychlení, které působí na všechny jeho části a jeho hodnota se během fázi letu mění. Raketa (či raketoplán) je těleso s proměnlivou hmotností za letu – spaluje nesené palivo a stává se lehčí. Při zachování konstantního tahu dle druhého Newtonova zákona se tím pádem musí zvyšovat zrychlení. Tato část zrychlení závisí na hmotnosti paliva a hmotnosti celého prostředku. Hodnoty zrychlení závisí na tom, zda raketa startuje vertikálně nebo horizontálně, z atmosférického nosiče či jiného zařízení. Největší zrychlení u raketoplánu je kolem 3g. U raket s vertikálním startem se nejvyšší hodnota pohybuje okolo 4g (např. Graf 3.4), i když u prvotních startů (např. u nosné rakety Atlas) zrychlení dosahovalo až 8g. Čím nižší hodnota, tím lépe pro posádku. Největší hodnoty přetížení jsou při maximálním tahu a při vypnutí motoru prvního stupně. Rakety vypouštěné z atmosférického nosiče či jiného zařízení bez posádky mají větší zrychlení, až kolem 10-14g. Například na náklad v malé raketě LauncherOne, která je vypouštěna z atmosférického nosiče v atmosféře, působí zrychlení 7g. [36][37][38]



Graf 3.4: Průběh zrychlení v čase u rakety Saturn V [37]

Při návratu mohou být vyšší hodnoty zrychlení (resp. zpomalení), kdy návratový modul (raketoplán) narazí na hustší vrstvy atmosféry a postupně se hodnota zrychlení snižuje, jak modul zpomaluje.

Kvůli změnám zrychlení je potřeba důkladné připoutání posádky a patřičné zajištění nákladu, aby nedošlo k úrazu či poškození.

3.2.3 Gravitační pole Země

Při startu, kdy je kosmický prostředek v blízkosti země, na něj působí gravitační pole a také pole odstředivých sil, které vzniká rotací Země kolem vlastní osy. Velikost gravitační síly je závislá na konstantě, hmotnosti Země, hmotnosti prostředku a na druhé mocnině vzdálenosti obou těles (od jejich středů). Čím dál je těleso od středu Země, tím menší gravitační síla na něj působí. Odstředivá síla je závislá na hmotnosti prostředku, úhlové rychlosti rotace kvadraticky, vzdálenosti prostředku od středu Země a na zeměpisné šířce. Z uvedených závislostí vyplývá, že největší tíhové zrychlení je na pólech a nejmenší na rovníku. To je jeden z důvodů, proč jsou kosmodromy postaveny, jak nejbližže je možné rovníku. Tam se také nejlépe využije další efekt rotace Země, která pomůže k dosažení první kosmické rychlosti, když raketa odstartuje po směru rotace.

3.2.4 Atmosféra

Od startu až po umístění družice na oběžnou dráhu prostředek prolétává několika vrstvami atmosféry. Většinou start probíhá na zemi v troposféře (v případech vypouštění raket z letounů se tak děje na okraji troposféry a stratosféry). Troposféra má zhruba stejné složení: 78 % dusíku, 21 % kyslíku a zbytek jsou argon a další vzácné plyny. Teplota zde s výškou klesá, a hustota také, protože je tato vrstva nejvíce ohřívána přenosem energie od povrchu země. Od cca 11-12 km začíná stratosféra, kde teplota roste kvůli pohlcování UV záření. Mezosféra je zhruba od 45 km do 80 km, teplota zde klesá až k přibližně -93 °C a dochází zde ke shoření většiny meteoritů, které se dostaly do atmosféry. Nad 80 km začíná termosféra. Díky svému složení má nejlepší pohlcování ze všech vrstev a narůstá tu teplota s výškou poměrně lehce, což je dáno velmi nízkou hustotou částic. Do 85 km tlak atmosféry klesá exponenciálně. Vedlejší vrstva atmosféry, ionosféra, která začíná zhruba na 86 km, má vyšší hustotu plazmatu, což ovlivňuje šíření rádiových vln, především těch o nižších frekvencích – jsou plazmatem odráženy. Navíc společně s magnetickým polem Země způsobuje snížení účinnosti komunikace. Poslední vrstva atmosféry, exosféra, začíná zhruba v 500 km a sahá až zhruba do 10 000-70 000 km, která je převážně složena z vodíku, atomárního kyslíku (vzniklý reakcí částic ze Slunce a dvouatomárního kyslíku), hélia atd. Zde jsou částice schopné uletět velké vzdálenosti (až stovky kilometrů) po balistické dráze, aniž by se bály střetnutí s jinou částicí. To způsobuje, že i když se prostředek pohybuje vysokou rychlostí, tak ohřev třením je minimální. Teplota se pohybuje okolo tzv. exosférické teploty, která je 1000 K, její změna závisí na sluneční aktivitě. V posledních dvou zmíněných vrstvách se nachází umělé satelity. [31][136][137]

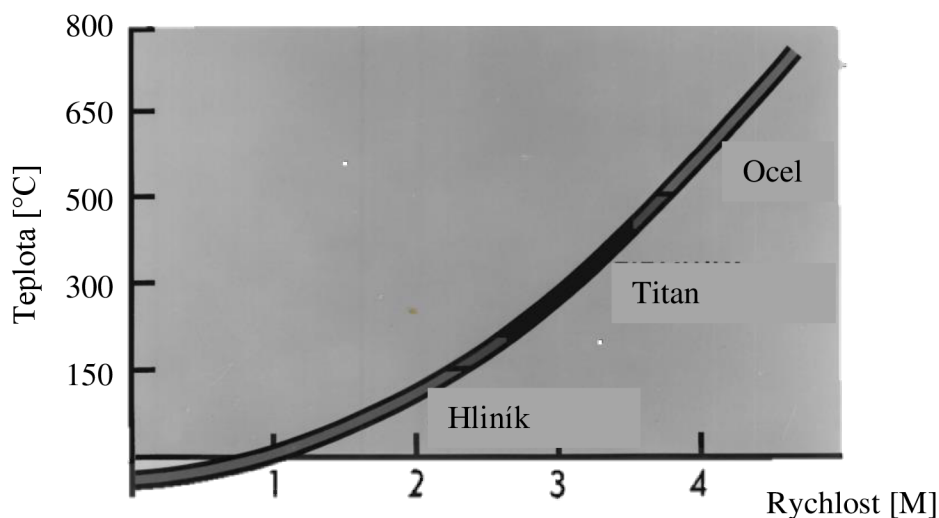
3.2.5 Teplo

Konečná teplota prostředku je dána rovnováhou tepla z prostředku a tepelnými toky, které jsou přímo od Slunce, odražené od Země, vyzařované Zemí a atmosférou, když se prostředek nachází na LEO. Dva poslední zmíněné toky mají čím dál menší vliv v případech vyšších oběžných drah. Tyto tepelné toky jsou, kromě toho, v jaké vrstvě atmosféry se nacházejí, závislé i na tom, v jaké poloze se vůči Slunci nachází (ve stínu Země či nikoliv). Geostacionární družice bývají vystaveny přímému slunečnímu záření mnohem delší dobu než níže obíhající satelity, proto mají jiné požadavky na systém řízení teploty. [137]

Před startem teplota v nákladovém prostoru je udržována zhruba v rozmezí 10-25°C a kontrolní systém pak v průběhu letu udržuje teplotu v nákladovém prostoru pod 50°C. [45]

Při supersonickém letu dochází díky rázovým vlnám k posílení přeměny kinetické energie částic vzduchu na teplo na povrchu. Teplo se přenáší do struktury prostředku, daný jev se nazývá aerodynamický ohřev. Teplota se zvyšuje s rostoucí rychlostí a čím déle tento jev probíhá (Graf 3.5). Působení vysokých teplot má velký vliv na tuhost a pevnost materiálu a může dojít k tečení. Problém je také při rychlém ohřevu, kdy vznikají teplotní rozdíly na struktuře. Celková teplota je dána parametry – ohřevem (konvekcí), ztrátami (radiací) a měrnou tepelnou kapacitou materiálu, ze kterého je aerodynamický kryt vyroben. [42]

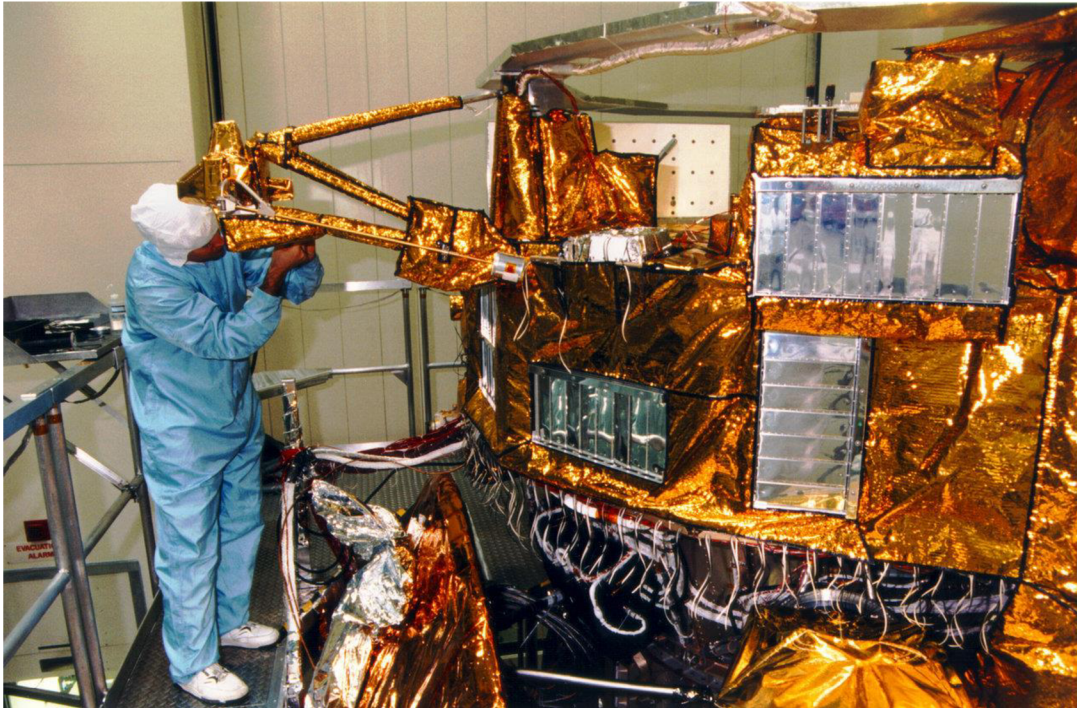
Tepelné zatížení v této fázi není takovým problémem jako při přistání díky krátkému času letu, trajektorii a nízké hustotě atmosféry. Nejvíce je zde zatížené aerodynamické krytování na nejvyšším stupni od aerodynamického ohřevu.



Graf 3.5: Závislost teploty na rychlosti a materiály používané na kryty do určitých teplot [42]

3.2.6 Záření

Po odhození krytu ve vesmíru je družice vystavena slunečnímu záření, infračervenému záření a volnému pohybu částic (reakce mezi přilétávajícími molekulami a povrchem), který odpovídá tepelnému toku o hodnotě zhruba 500-1000 W/m². Je potřeba vybírat materiály s nízkou tepelnou roztažností. Nejkritičtější jsou citlivé součásti jako například anténa, zařízení k určování polohy a orientace atd. K ochraně před vysokými nebo extrémně nízkými teplotami se používají ku příkladu termo pokrývky (Obrázek 3.2). [39][40]



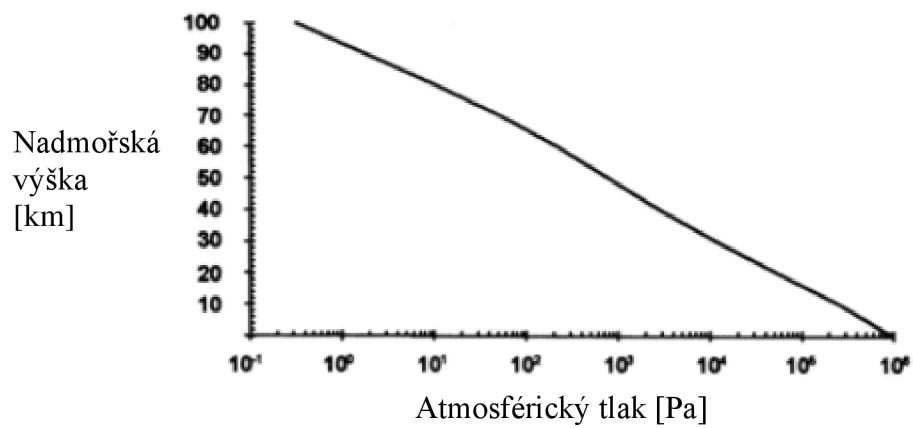
Obrázek 3.2: Sonda Cassini obalená ochrannou pokrývkou [42]

3.2.7 Tlak

S rostoucí výškou klesá atmosférický tlak (Graf 3.6) a v případě kosmických letů je tlakový rozdíl obrovský. Například ve výšce 100 km je tlak zhruba 6x nižší než při nulové nadmořské výšce, odkud raketa startuje. Palivo se skladuje v nádržích pod určitým tlakem a v případech pilotovaných letů ještě musí být prostředek schopen udržet vnitřní tlak kabiny v přijatelných hodnotách – musí být hermeticky uzavřen. O to víc ještě naroste tlakový rozdíl a nároky na konstrukci i materiál ze kterého je prostředek vyroben. Měnící se tlak je také problémem při návrhu raketových motorů, které je třeba vhodně optimalizovat. Kromě samotného rozdílu tlaků je důležitá rychlost klesání okolního tlaku, se kterou se prostředek potýká ve fázi letu. Řešením v případech nepilotovaných letů je odvzdušňování prostřednictvím ventilů či otvorů v nákladovém prostoru (Obrázek 3.3). Tlak závisí na způsobu odvzdušňování, umístění větracích otvorů a jejich průměru (tvaru), objemu vzduchu a trajektorii nosné rakety. Nejvíce se tlakem zatěžuje krytování (zvláště nosový kužel) a přepážky. [31][32]



Obrázek 3.3: Ventilační otvory na nosné raketě Ariane 5 [33]



Graf 3.6: Závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce

3.3 Vlivy působící při pobytu ve vesmíru

3.3.1 Kontaminace

Kontaminace může být problém i při startu či obíhání na oběžné dráze, kde zabraňuje pohlcování a vyzařování tepla. Díky velmi nízkému tlaku ve vesmíru se mohou z materiálu prostředku začít uvolňovat těkavé částice v podobě plynu do okolí, tzv. odplyňování. Těkavé částice jsou přítomné ve všech materiálech, ať už na povrchu nebo rozložené uvnitř. Čím čistější materiál, tím méně jich tam bude, až u nejčistějších materiálů by neměly být žádné. Stejně důležitý jako výběr materiálu je i výrobní proces. Uvolněné plyny se mohou začít shromažďovat u povrchu prostředku a tím jej kontaminuje. Tento tenký film způsobuje problémy na citlivých součástech prostředku např. solární panely či optické přístroje. Některé látky (např. polymerové vrstvy, oxidické povlaky, tradiční maziva) mohou samotným úbytkem hmotnosti při odplyňování ztratit své vlastnosti. U organických materiálů je tato kontaminace větší kvůli jejich schopnosti difúze – částičky unikají z celého objemu prostředku. Ku příkladu zdrojem uvolňování plynů mohou být vrstvy izolace, elektrické součásti, barva na panelech. V případě, že jeden z nákladů (např. družice) začne ještě v nákladovém prostoru uvolňovat plyn, je schopný kontaminovat i okolní náklad. V laboratořích při měření se zjišťuje hlavně celková ztráta hmoty a nashromážděné těkavé kondenzovatelné látky. NASA akceptuje materiály pro své prostředky s celkovou ztrátou hmoty do 1 % a nashromážděné těkavé kondenzovatelné látky do 0,1 %. [31][34][137]

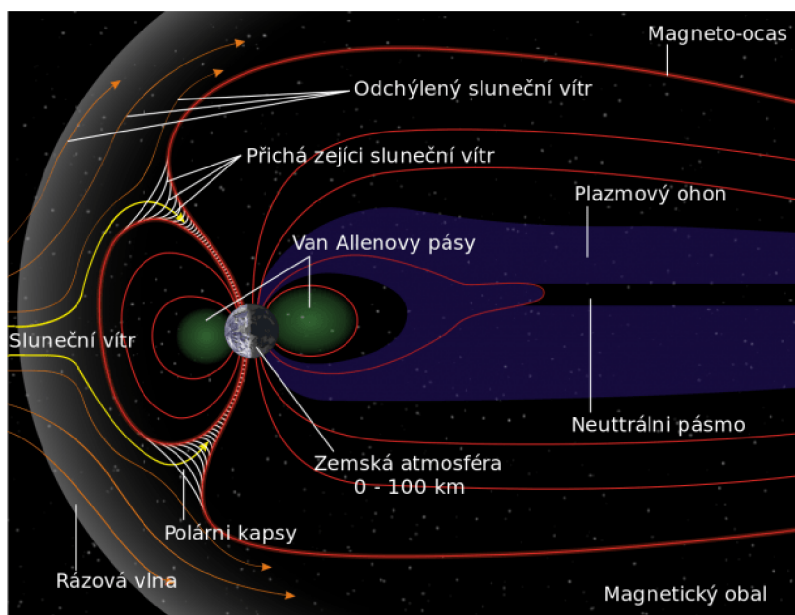
3.3.2 Sluneční záření

Družice obíhající kolem Země nejvíce ovlivňuje kosmické počasí. To jsou jevy, které ovlivňují meziplanetární okolí naší planety a jsou velice proměnné, např. sluneční vítr či sluneční erupce, která je zdrojem magnetických bouří. Všechny tyto jevy vyzařují velké množství vysoce energetických částic, jež mohou družici poškodit. Ovlivňují také změny v magnetosféře, ionosféře a exosféře. Často jsou to předměty monitorovány právě družicemi. [46]

Na povrch Země dopadá asi 21 % slunečního záření se zářením s vlnovou délkou pod 0,3 μm (ultrafialové záření), které zachytí ozónová vrstva. Na nízké oběžné dráze, kde se většinou satelit nachází, je atmosféra už velmi řídká a družici neochrání. UV záření je schopné narušit molekulární vazby a tím velmi znehodnotit materiál, ze kterého je družice vyrobena. Příkladem je zkřehnutí či zhoršení mechanických vlastností – oba tyto příklady postihují zejména polymery. Dále může dojít ke změně vodivosti, postižena je tím především elektronika. Jako ochrana elektroniky z křemíku proti radiaci se v minulosti používal obal z hliníku nebo olova, nebo se to vyřešilo tak, že se na satelit připevnilo několik kusů důležité součástky v případě, že by jedna selhala. U skla a keramiky může vlivem UV záření dojít ke změně průhlednosti, zde konkrétně k ztemnění, tzv. solarizaci. To je problém například u krycích skel solárních článků, kde se ztemněním snižuje výroba užitečné energie, ale zároveň se zvyšuje teplota článku. [31][121][137]

3.3.3 Vysokoenergetické částice (Van Allenovy pásy)

Dalším nebezpečím pro družice na oběžné dráze, kde je řídká atmosféra, jsou Van Allenovy radiální pásy (Obrázek 3.4). V nich jsou částice (protony, elektrony a ionty) slunečního větru o vysoké energii zachycené magnetickým polem Země. Množství částic a tvar pásů závisí na sluneční aktivitě – množství roste, čím silnější je magnetická bouře. Asymetrie u pásů je způsobena tlakem slunečního větru. Oběžná dráha družic do těchto pásů nezasahuje, ale to je neubrání jejich nebezpečí. Elektrony o vysoké energii mohou předat svůj náboj materiálu prostředku. Je to problém především u elektroniky a fotovoltaických panelů. Když bude takhle nabitých elektronů větší množství, může dojít k výboji, přemístění atomů v mřížce, porušení materiálu a zničení součástky. Jak magnetická bouře ovlivňuje vrstvy atmosféry (hlavně ionosféru), ovlivňuje i samotné používání družic, např. zhoršení přenosu nebo nemožnost rádiového signálu, zpoždění či nepřesnosti GPS. V neposlední řadě ovlivňuje také kosmonauty, kteří čelí ještě o něco zvýšené dávce radiace a bez patřičné ochrany může být i smrtelná. [43]



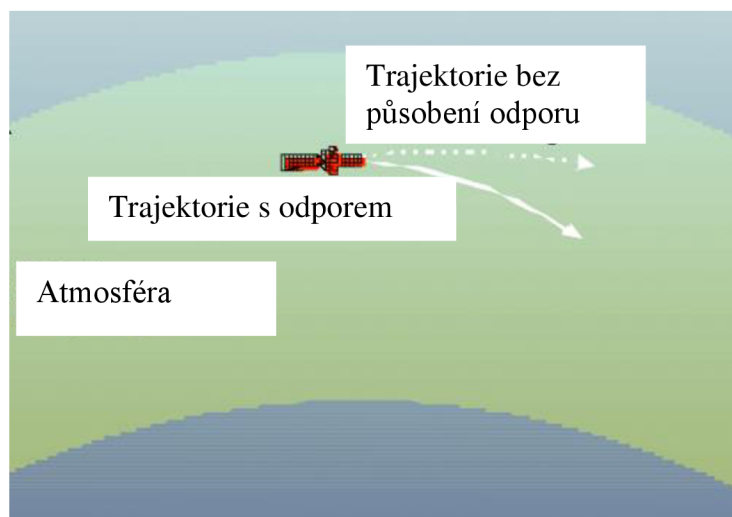
Obrázek 3.4: Magnetické pole Země s Van Allenovy pásy [45]

Vysokoenergetické částice nejsou problémem jen ve Van Allenových pásech. Většina těchto částic, které poškozují ionizujícím zářením, na nízké oběžné dráze jsou protony až na oblasti s výjimkami. Do 300 km je jejich vliv minimální, mnohem větší význam má z hlediska ozáření kosmické záření. U drah s vysokou inklinací většinou převažují částice dané aktuální sluneční aktivitou. U geostacionárních drah je vliv těchto částic téměř zanedbatelný. Poškození materiálů ionizujícím zářením probíhá tak, že částice, která je zdrojem místní ionizace, projde krystalickou mřížkou, tím se přemístí atomy v mřížce, a zanechává za sebou ionizační stopu. Protony a neutrony, jakožto větší a těžší částice, způsobují větší poškození než elektrony. Záření má negativní dopad na polymery, které pod jeho působením ztrácí pevnost, stávající se křehčími, mění elektrické a optické vlastnosti – poškozené tak mohou být izolace elektrického vedení či tepelně ochranné kryty. U dalších materiálů, jako jsou například kadmium a zinek, vlivem záření vznikají v materiálu dlouhá monokrystalická

vlákna (whiskery). Největší poškození tyto částice způsobují polovodičům a biologickým tkáním, kde jednou z možných ochran je použít stínění z vhodnějšího materiálu o potřebné tloušťce podle druhu záření. Proti ionizujícím částicím je nejlepší volbou použít na odstínění materiál o vysoké hustotě a s velkým atomovým číslem, protože zde ztrácejí nejvíce energie. [137]

3.3.4 Hustota atmosféry

Jak již bylo řečeno, satelity obíhají stále v atmosféře, i když zde má atmosféra zcela jiné vlastnosti než její nižší vrstvy, přesto ale stále má nějakou hustotu plynů. Hustota zde závisí na solární aktivitě. Při větší aktivitě se vrchní atmosféra rozpíná a zvyšuje hustotu. V průběhu času oběhu se tak může stát, že družice snižuje výšku své oběžné dráhy (Obrázek 3.5), kde je vyšší hustota plynu. Na této nové dráze má družice vyšší rychlost, ale také větší odpor a může to dojít až do takové stádia, kdy družice je vztažena zpět do zemské atmosféry, kde shoří, nebo spadne na zem. Proto všechny prostředky, které obíhají kolem Země, jednou za čas musí zkorigovat svou dráhu. Při největší sluneční aktivitě, která je přibližně v 11letém cyklu, se musí upravovat dráhy satelitů přibližně každé 2 až 3 týdny [43][47][48]



Obrázek 3.5: Vliv odporu atmosféry na trajektorii oběhu družice [48]

3.3.5 Elektrostatické nabíjení

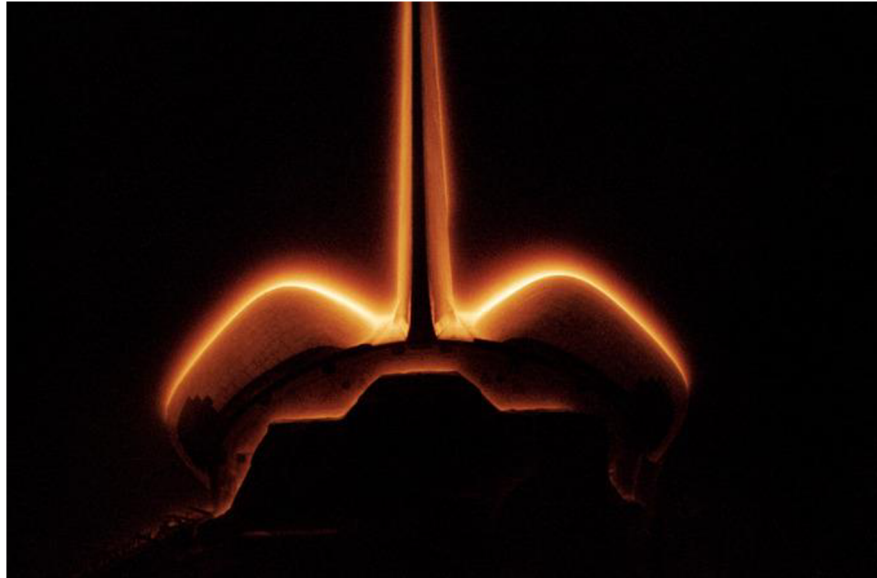
Během pohybu v blízkém okolí Země vznikají proudy mezi prostředkem a plazmatem, to vyvolává vznik náboje a tento náboj se vybije elektrickým obloukem. Tento jev se nazývá elektrostatické nabíjení kosmického prostředku. Prostředek se může nabít třemi způsoby: proudem plazmatu, vyzařováním a rozptýlenými elektrony, fotoemisí. K nabíjení vlivem plazmatu dochází díky tomu, že elektrony z plazmatu, protože jsou lehčí než protony a tím pádem i rychlejší, dopadají na povrch prostředku, kde se tento negativní náboj shromažďuje. Pro vyrovnání náboje prostředek musí nahromadit náboj z plazmatu. Proces je závislý hlavně na vlastnostech plazmatu, ve které vrstvě atmosféry se prostředek nachází, a konstrukci

prostředku. Kromě plazmatu elektrostatické nabíjení ovlivňuje i sluneční záření, zejména krátkovlnné. Na povrch prostředku dopadnou fotony, které z něj vyrazí elektrony. Tím povrch získá kladný náboj a v jeho okolí se může vytvořit plazmatický oblak se záporným nábojem. Problém zde nastane, když není materiál na povrchu vodivý, v tom případě nastane rozdíl potenciálů mezi osvětlenou a neosvětlenou stranou prostředku. V klidné atmosféře kladný potenciál dosahuje přibližně jednotek až desítek voltů. Při magnetosférických bouřích potenciál může vzrůst až do kilovoltů. [134][137]

Tento jev především ovlivňuje telekomunikaci, systém stabilizace – poruchy logických obvodů, systém napájení – kde může dojít k přetížení obvodu, tepelnou ochranu – zvláště u materiálů Teflon a Kapton. Malý rozdíl potenciálů má malý vliv na kosmický prostředek, u velkého rozdílu, například způsobené silnou sluneční aktivitou, hrozí poškození součástí a může dojít až k zničení prostředku. Nejvíce ovlivněné jsou geostacionární družice. Řešením je použití elektricky vodivých materiálů na povrch prostředku, tam kde je to možné, aby výboj šel po této vodivé vrstvě zpět do prostoru místo do prostředku. Jak již bylo zmíněno, jsou velmi negativně ovlivněné tepelné ochranné deky a povrch prostředku pod nimi. Zde je možné použít tepelnou ochranu o sendvičové konstrukci, tím by se zamezilo přenosu náboje na prostředek. [134][137]

3.3.6 Atomární kyslík

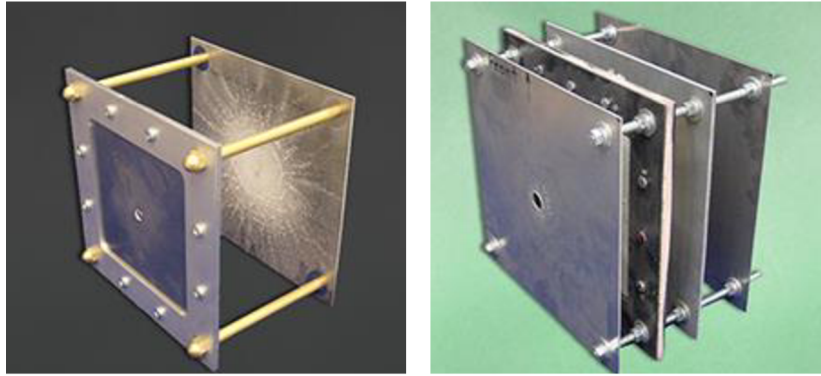
V předchozí kapitole bylo zmíněno, že v posledních vrstvách atmosféry se hojně vyskytuje atomární kyslík, který je schopen uletět po balistické dráze velkou vzdálenost, tak může dosáhnout oproti prostředku až rychlost 8 km/s. Společně s jeho vysokou chemickou reaktivitou tak vytváří pro družice velmi nehostinné prostředí, kde dochází k erozi, vzniku oxidů či chemoluminiscenční záři. Eroze způsobuje degradaci povrchu, což nenávratně zhoršuje tepelné, optické, mechanické a elektrické vlastnosti. Kromě eroze vzniknuté přímým dopadem částic, může dojít i k erozi danou odraženými a atomy kyslíku od přímo zasazených ploch. Nejvíce jsou tak postihnuté povlaky pro řízení teploty, nosná konstrukce, izolace, optika a solární panely. V případě, kdy vznikají na povrchu oxidy, může docházet ke změnám vlastností materiálu, jako například u maziva, které tak ztratí svoje mazací schopnost a místo nich se stane velmi abrazivní. Může docházet i ke změnám rozměru určité části, to vede dále k lámání až odlupování povrchové vrstvy. Chemoluminiscenční záře, spatřena u misi raketoplánu při návratu zpět na zemi (Obrázek 3.6), je dána sloučením atomárního kyslíku s oxidem dusnatým (NO), které vytvoří zářící molekuly oxidu dusičitého (NO₂). Výskyt oxidu dusnatého kolem povrchu raketoplánu může být pravděpodobně způsoben tím, že se nahromadí u povrchu při průchodu atmosférou nebo jako vedlejší produkt při spalování paliva. Na tyto problémy s atomárním kyslíkem je náchylné především stříbro, které se používá v solárních panelech. [136][137]



Obrázek 3.6: Chemoluminiscence způsobena atomárním kyslíkem u raketoplánu [136]

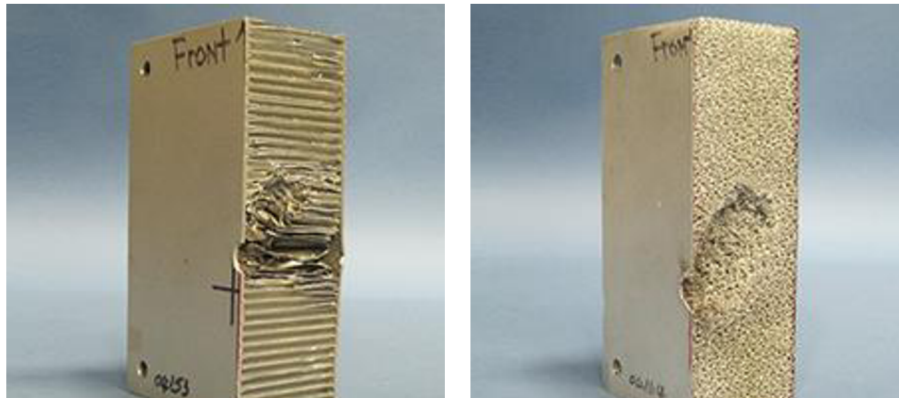
3.3.7 Meteority a mikrometeority

Další hrozbu představují meteority a mikrometeority, jež vznikají rozpadem komet a asteroidů. Větší hrozbě čelí satelity obíhající na nižších oběžných drahách, kvůli gravitačnímu poli Země, které má tendenci meteority přitahovat. Velikost částic se velmi liší – může být od několika mikrometrů až po několik metrů. Rychlost je také různá. Z hlediska pravděpodobnosti je jejich rychlost zhruba 10-30 km/s. Mohou poškodit jednotlivé součástky, izolaci, změnit trajektorii prostředku nebo jej celý vážně poškodit. Sondy při svých cestách mohou narazit na nespočet prachových či jiných částic. Jedním z prostředků ochrany satelitů, lodí a ISS se používá protimeteorický tzv. Whippleův štít (Obrázek 3.7). Skládá se z tenké hliníkové stěny, která čelí přímému nárazu, a případně kevlaru či jiného neprůstřelného materiálu, který je mezi hliníkovou deskou a zadní stěnou. Je nejstarší používanou ochranou. Vrchní vrstva rozbije meteorit na malé částice, které už nejsou tolik nebezpečné. Tím se celková malá koncentrovaná síla meteoritu rozloží do mraku částic, který mimo jiné obsahuje i kousky vrchní vrstvy, a pokryje tak větší plochu ale menší silou. Přidaná neprůstřelná vrstva pomůže rozbít ještě více částice a minimalizovat sílu při dopadu. [49][50]



Obrázek 3.7: Jednoduchý Whippleův štít (vlevo) a vícevrstvý štít (vpravo) [50]

Monolitický štít je nejjednodušším štítem. Je jen z jednoho kusu hliníku, který absorbuje veškerou energii meteoritu. Další možností je použití sendvičových materiálů, konkrétně sendvičů s voštinovým nebo pěnovým jádrem (Obrázek 3.8). U voštinových jader se používá materiál hliník. Kovová pěnová hmota má lepší vlastnosti z hlediska ochrany. [50]



Obrázek 3.8: Sendvičové materiály s voštinovým jádrem (vlevo) a pěnovým jádrem (vpravo) [50]

Pro mise na Mars byl vyvinut speciální štít z vrstev kevlaru, materiálů Mylar, Nextel a pěny. Pěna umožňuje možnost stlačení při startu. [50]

Všechny tyto štíty mají jednu velkou nevýhodu – jakmile jednou je porušen dopadem, je značně omezena jeho další schopnost ochrany. Také slouží jen do určité velikosti meteoritu. Srážce s meteoritem větší velikosti by se satelit mohl vyhnout manévrováním. [51]

3.3.8 Kosmický odpad

Velkým problémem pro kosmické prostředky při výstupu na LEO je stále přibývajícím kosmický odpad. Mezi něj patří prachové částice oxidu hlinitého, nefunkční satelity, vyhořelé části raket, malé kousky barvy z kosmické lodi, úlomky po srážce kosmických zařízení s jinými úlomky. Nebezpečí především spočívá v jeho rychlosti a vysoké kinetické energii, rychlost může dosahovat až přibližně 8 km/s. Taková kinetická energie má při střetnutí s jiným tělesem poškozující účinek, který může být až fatální. Hodnota kinetické energie se odvíjí od výsledné rychlosti v okamžiku dopadu, která je závislá na dráze letu odpadu i

kosmického prostředí. Jak moc bude mít srážka poškozující účinky závisí kromě rychlosti v okamžiku dopadu také na řadě dalších parametrů: velikosti, rozměrech a tvaru tělesa odpadu, úhlu dopadu, materiálu, ze kterého je satelit (případně jiný kosmický prostředek) vyroben, balistické odolnosti materiálu atd. Více v kapitole 7. [44][118]

Kosmický odpad by se mohl rozdělit na tři kategorie podle velikosti na objekty větší než 10 cm, objekty od 1 cm do 10 cm a objekty menší než 1 cm, až do 1 mm. Jako ochranou pro kosmické prostředky před objekty největších rozměrů se používají např. sledovací stanice na Zemi, které monitorují pohyb těles na oběžné dráze, včasně varují před možnou srážkou a zajistí potřebný úhybný manévr. Menší tělesa (mohou to být ale i řádově v decimetry) se odhalují dost obtížně. Zde by právě mohl sloužit jako ochrana samotný materiál kosmického prostředí. [119]

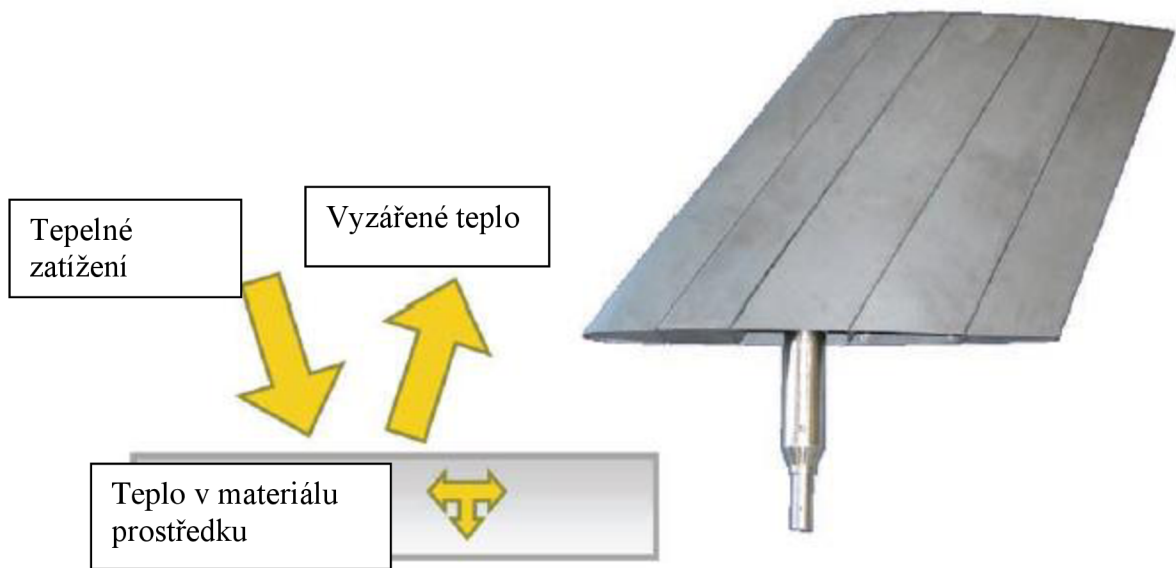
3.4 Vlivy působící při návratu

3.4.1 Aerodynamický ohřev

V případě, že kosmický prostředek je určen pro zpáteční průlet atmosférou, je třeba jej chránit hlavně před aerodynamickým ohřevem. Společně s vhodnou trajektorií a konfigurací prostředí se dnes používá hlavně pasivní tepelná ochrana, kam patří: kapacitní ochrana, ablativní ochrana a radiativní ochrana. [120]

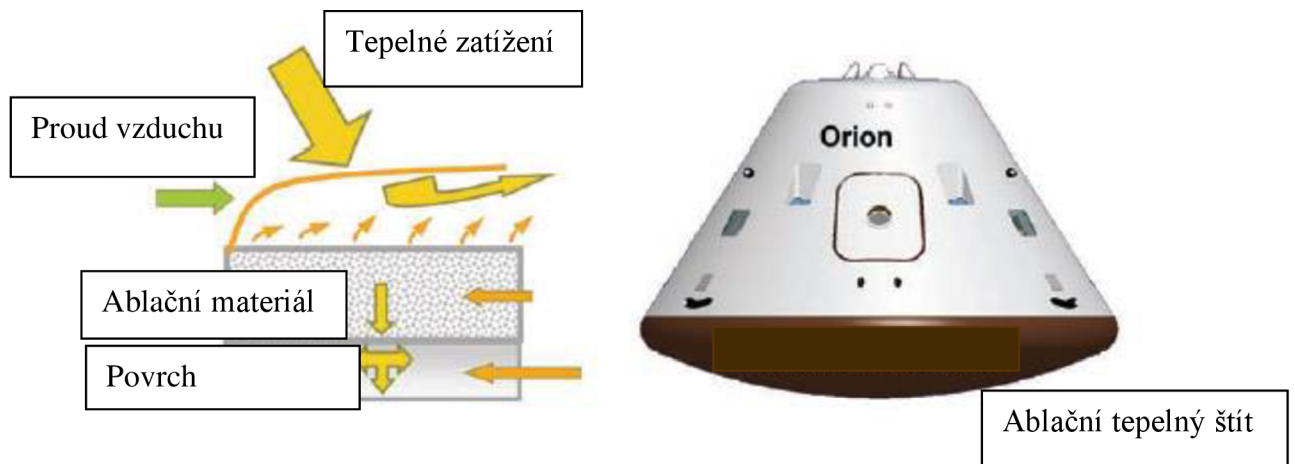
Kapacitní ochrana využívá materiály s vysokou tepelnou kapacitou, vodivostí a teplotou tání jako např. měď, beryllium. Materiál teplo pohltí a následně jej vyzáří. Je nutné použít izolující materiál mezi ochrannou vrstvou a konstrukcí prostředí. [131]

Radiativní ochrana spočívá v použití vysoce tepelně odolných materiálů. Grafit, molybden a keramika patří mezi nejpoužívanější materiály v této oblasti. Mají schopnost okamžitě a velmi účinně vyzářit pohlcené teplo (Obrázek 3.9), proto jsou schopny odolávat tepelné zátěži nejdelší dobu z uvedených typů ochrany. Tento typ ochrany používaly raketoplány. [120][126]



Obrázek 3.9: Schéma radiativní ochrany [126]

Nejpoužívanější je ablační ochrana, jež spočívá v zahřívání a následném tání, odpadávání, vypaření (nebo dalšímu ablačnímu procesu) materiálu (Obrázek 3.10). Tímto procesem se prostředek ochlazuje. Ochrana je schopná snést velké tepelné toky, ale jen po krátkou dobu zatížení a vždy se musí vyměnit před dalším použitím. Na tomto principu fungují tepelné štíty. [126]



Obrázek 3.10: Princip ablační ochrany [126]

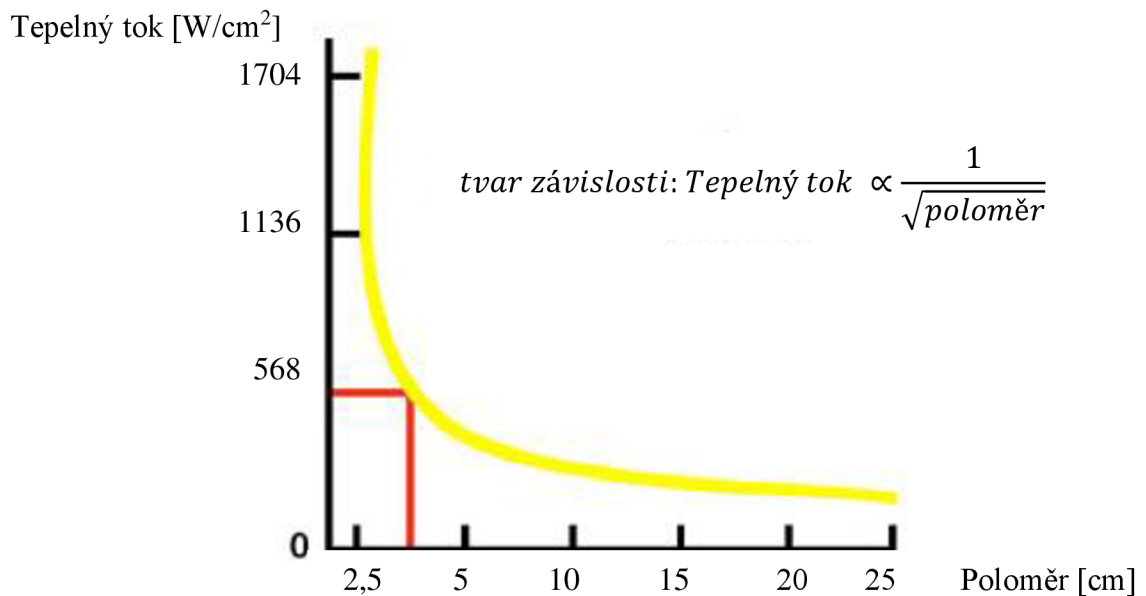
Nejvíce používané materiály na „ablator“ jsou fenolová pryskyřice a uhlík. Příklad takového „ablatoru“ je znám pod zkratkou PICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablator) (Obrázek 3.11). Řadí se mezi novější ablační materiály, které by mohly nahradit ty klasické. I když základní použité materiály jsou stejné, změnila se celková skladba ochrany. Snížila se hustota (až na zhruba $0,27 \text{ g/cm}^3$), zlepšila se robustnost a stále je tato ochrana schopna snášet

velké teplotní zatížení a dokonce poskytuje i určitou lepší ochranu proti mechanickému poškození například při srážce. [125][129]



Obrázek 3.11: Návratový modul zkoušející novou ablační ochranu PICA [125]

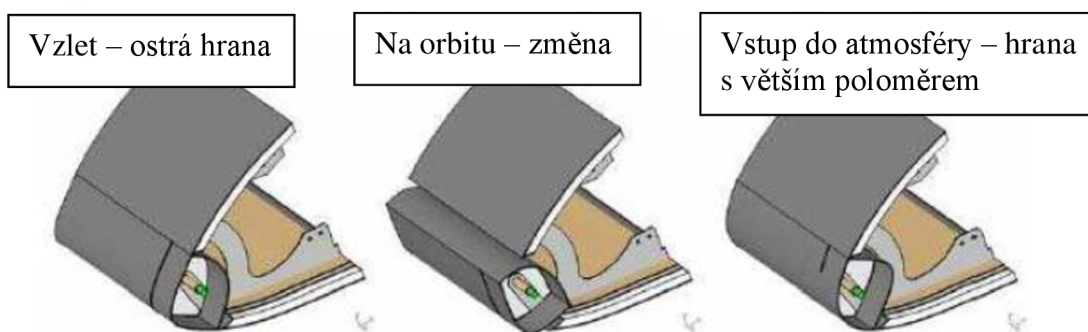
Ablace se při průletu atmosférou může objevit na náběžných hranách, kde mohou nastat potíže. V případě, že bude poloměr náběžné hrany moc malý, hmota se začne vypařovat (Graf 3.7). To nám sice způsobí velmi mírné ochlazení povrchu, ale také se začne zvětšovat poloměr náběžné hrany a měnit se celkový tvar. Tím se změní aerodynamické vlastnosti, což může být pro posádku nebezpečné. [123]



Graf 3.7: Závislost tepelného toku na poloměru náběžné hrany [126]

Za případnou ochranu náběžných hran by se v budoucnu mohl stát mechanismus, kdy se tvar náběžné hrany bude umět měnit podle podmínek. Mechanismus je součástí ESA programu „Smart TPS“.

Z programu vyšly nakonec dva nejpravděpodobnější koncepty: mechanismus využívající slot a „compliant“ mechanismus. V prvním konceptu se slot na náběžné hraně jednoduše otočí dle potřeby (Obrázek 3.12). Nevýhodou konceptu je další přidaná hmotnost na prostředek, protože je třeba přidat motory na pohon hřídele otáčející slot. Důležité také bude těsnění kolem náběžné hrany a otáčejícího se slotu. [124]



Obrázek 3.12: Koncept náběžné hrany s rotujícím slotem [124]

Další mechanismus, tzv. „poddajný mechanismus“, spočívá natáčení propojených tenkých lopatek vyrobených z kompozitu C/SiC, které tvoří náběžnou hranu (Obrázek 3.13). Mezi lopatkami a uvnitř nich je izolace, která utěsňuje a ochlazuje lopatky. Tento mechanismus umožňuje měnit tvar náběžné hrany i v průběhu atmosférického letu a činí jej tak nejlepším řešením z celého projektu. Ve spojení s tzv. smart materiály (kapitola 5.5) by se mohla náběžná hrana sama přizpůsobit v závislosti na podnětech z okolí. [124]



Obrázek 3.13: "Poddajný mechanismus" [124]

Aktivní ochrana se používá v případech velkého tepelného zatížení po dlouhou dobu, například u hlavních motorů raketoplánu. Chladivo se zahřívá a odvádí teplo, udržuje tak

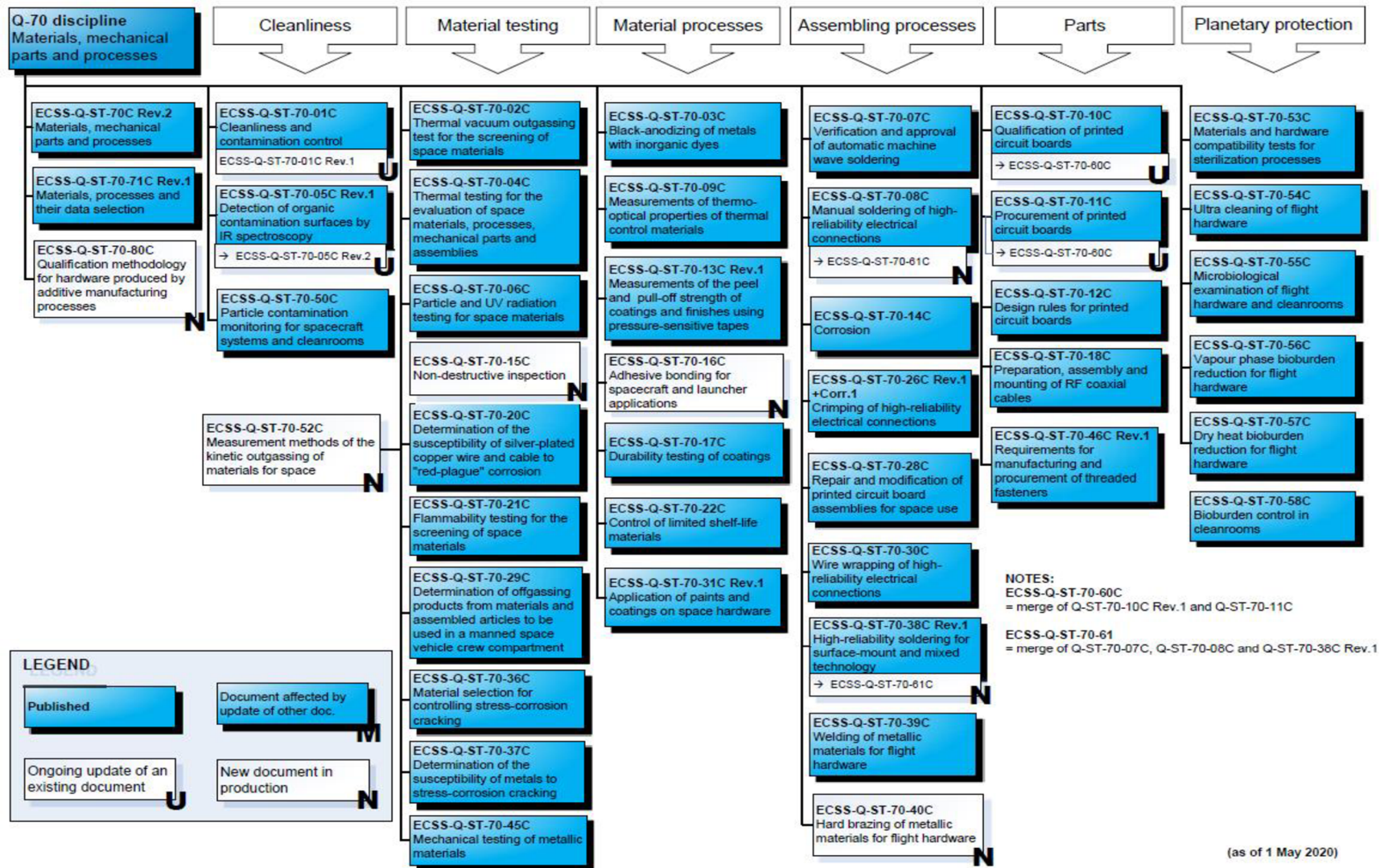
teplotu prostředí v přijatelných mezích. Používá se zřídka a to tam, kde nestačí pasivní ochrana, protože zvyšuje celkovou hmotnost, navíc je komplexnější a dražší. [126]

4 ECSS standardy

Jako každé jiné odvětví se i kosmický průmysl řídí mnoha doporučeními a regulacemi. Tyto doporučení a regulace může stanovit v určité míře zákon, sama společnost či agentura (příklad agentury NASA) a národní či nadnárodní organizace. V rámci Evropy vznikly v 90. letech minulého století společné ECSS standardy. Cílem společnosti bylo vytvořit soubor standardů, které přispívají k efektivnějšímu vedení kosmických programů, zvyšování spolehlivosti a kvality, usnadnění komunikace, kompatibility a celkové spolupráce napříč společnostmi. Společnosti nemají za povinnost se řídit těmito standardy, jsou to doporučení, ovšem jejich plnění může být vyžadováno při uzavírání smluv (např. s ESA). Kromě zmíněných ECSS standardů se společnosti mohou řídit i jinými normami, např. ISO, ovšem ne vždy je to dostačující. Příklad může být ESA, která vyžaduje plnění ECSS standardů, i přesto, že společnost splňuje požadavky jiných norem (např. ISO, AMS). [139]

Standardy zasahují do 4 základních odvětví: „*project management*“, kde standardy pomáhají řídit procesy, které vedou ke zdárnému dokončení projektu, „*product assurance*“, kde pomáhají zajistit správnou a bezpečnou funkci prostředku v požadované kvalitě, ve větvi „*engineering*“ standardy pokrývají celý inženýrský proces a v udržitelnosti („*sustainability*“) se zaměřují na vlivy kosmického prostředí a ochranu planety (např. odstranění prostředku z oběžné dráhy po skončení mise). Kromě standardů ECSS vydává i příručky a memoranda, které poskytují další užitečné informace.

Důležitost materiálu v tomto průmyslu ukazují i tyto standardy. Materiály spadají společně s mechanickými částmi a procesy pod větev „*product assurance*“ s označením ECSS-Q-ST-70-XXX, kde poslední dvoučíslí a písmeno odkazuje na konkrétní dokument. Na následujícím obrázku (Obrázek 4.1) je znázorněno rozdělení standardů, které se týkají právě tohoto oddílu. [139]



Obrázek 4.1: ECSS standardy zabývající se materiály [138]

K samotnému výběru materiálu se vztahuje dokument ECSS-Q-ST-70-71C, tato doporučení jsou zapracována v následující kapitole 5. Dále obsahuje doporučení k povrchovým úpravám, spojování, obrábění a jiné. [140]

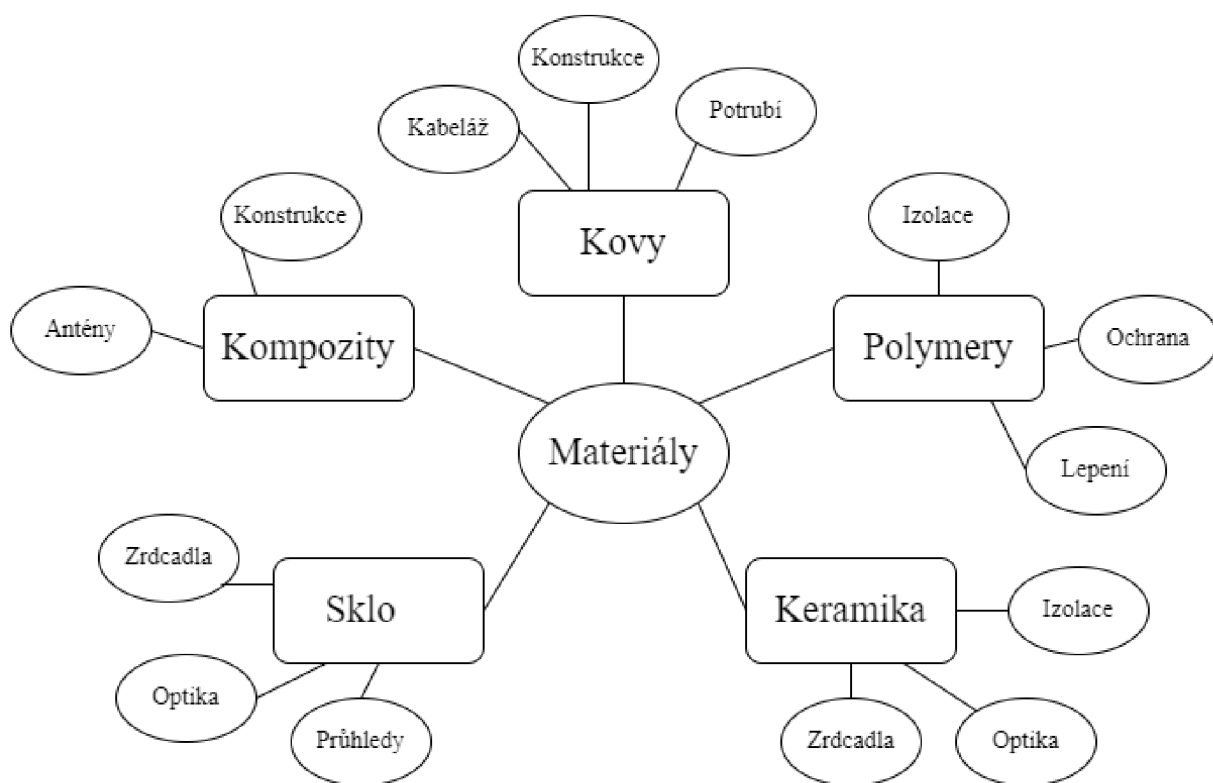
Výběr materiálu se neposuzuje jen s ohledem na vnější působící vlivy, i když hrají velmi důležitou roli. Posuzují se také z technologického hlediska, konstrukce, únavového namáhání, hořlavosti, toxicity, dostupnosti, spolehlivosti, finančního hlediska atd.

5 Materiály pro konstrukci kosmické techniky

Prostředek, jak již bylo dříve uvedeno, musí odolat spoustě vlivům a fungovat bez obtíží po určitou vyžadovanou dobu. Proto jsou kladeny velké nároky jak na konstrukci, tak na samotnou volbu materiálu – v praxi především založenou na zkušenostech. Použití nestandardního materiálu musí být schváleno.

Nejrozšířenějšími materiály pro kosmické aplikace jsou kovy, polymery, keramika, sklo a kompozity (Obrázek 5.1). Materiály, které se naopak nedoporučují: kadmium a zinek, které mají tendenci se vypařovat a kontaminovat povrch, dále pak čistý cín a rtuť kvůli křehnutí, beryllium, PVC a celulóza, která se ve vesmíru rozkládá a způsobuje kontaminaci (to platí i pro PVC), lepicí pásy s křemíkem jako adhesivem a všeobecně materiál, který produkuje nějaké částice.

Tato kapitola se věnuje především materiálům určeným na konstrukci.



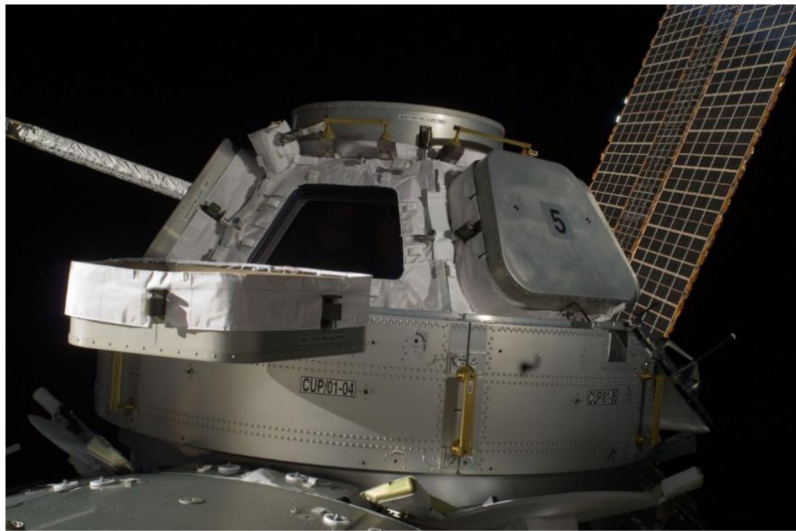
Obrázek 5.1: Nejrozšířenější materiály pro kosmické aplikace a jejich nejčastější použití

5.1 Slitiny lehkých kovů

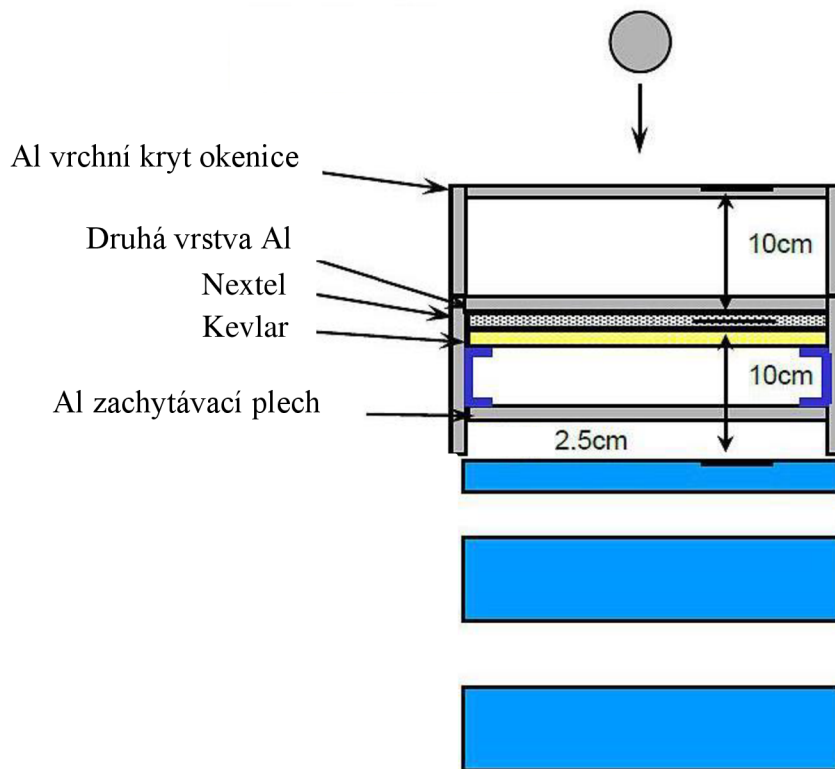
5.1.1 Hliník

Jedny z nejpoužívanějších materiálů jsou slitiny hliníku. Čistý hliník je charakteristický svou velmi nízkou hustotou, $2,7\text{g/cm}^3$, a z toho vyplývající nízkou hmotností, která je v kosmickém průmyslu velmi důležitá. Dále má velmi dobrou korozní odolnost, teplotní a elektrickou vodivost. Nepoužívá se kvůli své nízké pevnosti, která je dána

rozložením atomů v krystalové mřížce, ale je možno ji zvýšit příměsí a precipitačním vytvrzováním, ovšem ne pro potřeby kosmického průmyslu. Precipitační vrstva se vlivem záření ve vesmíru může začít uvolňovat z prostředku. U vysoce pevných slitin hliníku, které jsou náchylné ke korozi, dochází k důlkové korozi, mezikrystalickému koroznímu lomu a koroznímu praskání pod napětím. Je tedy nutná antikorozní úprava, např. povlakováním čistým hliníkem. Obecně všechny používané slitiny nejsou ovlivněny vakuem, teplotou nebo zářením. Používají se ve formě fólií, desek, profilů, odlitků atd. Jejich největší výhodou je nízká hmotnost a cena (např. oproti titanu). Slitiny hliníku najdeme například na rámové konstrukci družice, rám kupole na ISS, ochranný obal elektronických součástí, kloubové spoje, přepážky, části kol roveru (Obrázek 5.5), jako vrstvu pro tepelnou ochranu (odráží teplo ze Slunce a zároveň udržují vnitřní teplo prostředku) a jako reflektory, které opět pomáhají udržovat teplotu prostředku. Vesmírná stanice ISS hliníkové slitiny (konkrétně Al 6061-T6, Al 7075-T7352) používá na své „okenice“ (Obrázek 5.2) (Obrázek 5.3), které chrání před nárazem různého smetí, a poskytuje ještě větší ochranu než samotná okenní skla. [52][57][59][60][61][62]

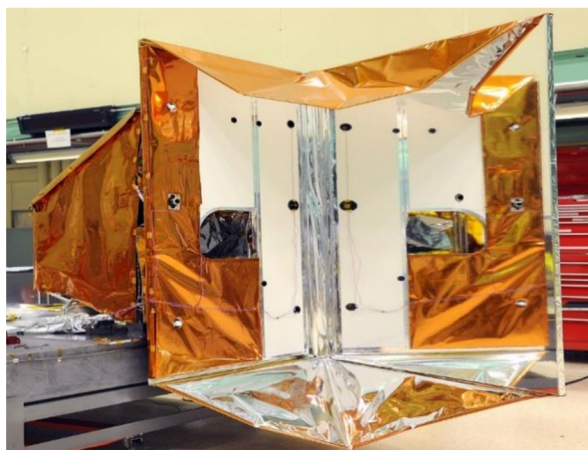


Obrázek 5.2: Kupole ISS [63]



Obrázek 5.3: Jednotlivé vrstvy okenice ISS [62]

Izolační vrstva pro tepelnou a radiační ochranu je z polyimidu, jenž je potažen hliníkovou slitinou (Obrázek 5.4). Hliníková vrstva bývá umístěna směrem k povrchu satelitu, polyimidová, která je specifická svou zlatou barvou, čelí do okolí. Používá se zhruba 40 vrstev. Kromě výše zmíněných vrstev se mohou mezi ně použít ještě vrstvy ze skleněných vláken, beta tkaniny či stříbra. Izolační vrstva má také za úkol chránit před smetím, prachem a odrážet světlo. To ovšem může vadit při pozorování astronomickými přístroji, zvláště když množství satelitů na oběžné dráze přibývá. [64]



Obrázek 5.4: Izolační vrstva z polyimidu potaženého slitinou hliníku [65]

Tabulka 5.1 obsahuje obecné značení sérií slitin hliníku pro kosmické aplikace a jejich vlastnosti.

Tabulka 5.1: Přehled používaných sérií slitin hliníku

Označení	Hlavní legovací prvky	Vlastnosti
1XXX	-	Nízká pevnost, výborná elektrická vodivost, korozní odolnost
2XXX	Cu	Tepelně zpracovatelné, dobrá pevnost ve velkém rozsahu teplot, hůře svařitelné, nutná úprava proti korozi, vhodné pro konstrukci
5XXX	Mg	Svařitelné slitiny, mají dobrou pevnost, ale není možné je tepelně zpracovat, použitelné do 65 °C, vhodné pro jádra kompozitů
6XXX	Mg, Si	Tepelně zpracovatelné, levné, dobrá pevnost, korozní odolnost, možnost povlakování a plátování
7XXX	Zn	Hůře svařitelné, nutná úprava proti korozi, největší pevnost mezi hliníkovými slitinami

Série slitin 7XXX a i 2XXX se používají na nenatlakované struktury. [93]

Speciální slitinou hliníku je NASA-427. NASA-427 je hliníková slitina vyvinutá NASA vhodná pro části, které jsou dále tepelně povlakovány. Slitina tento povlak sama svými vlastnostmi posiluje a také časově zkracuje proces tepelného zpracování. Má oproti dříve používaným slitinám větší pevnost v tahu a tažnost. Díky tomu je sníženo množství potřebného materiálu a hmotnost. Celý proces výroby a zpracování je kratší, což snižuje cenu materiálu. Také má určitou korozní odolnost. Kromě použití v kosmickém průmyslu by mohla mít slitina velké využití v automobilovém průmyslu - např. jako litá kola, různé kloubové spoje a další komponenty. [53]



Obrázek 5.5: Kola roveru Curiosity ze slitiny hliníku a paprsky ze slitiny titanu [77]

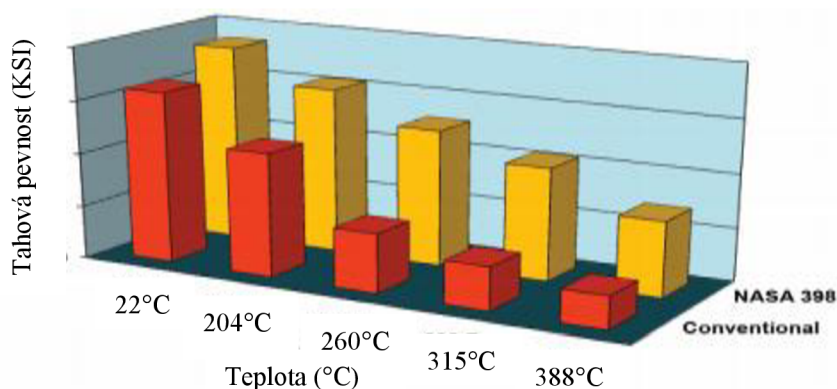
Mezi významné slitiny patří slitiny hliníku a lithia. Hlavní výhodou lithia jako příměsi je jeho schopnost radikálně snížit hustotu slitiny. Přibližně 2-3 hm.% lithia ve slitině způsobí snížení hmotnosti až o 10 %. Ku příkladu původní externí palivová nádrž u raketoplánu měla hmotnost 34 500 kg, po zakomponování Al-Li slitiny nádrž měla konečnou hmotnost 26 650 kg. Mezi další vlastnosti těchto slitin patří zvýšená tuhost, lomová houževnatost za nízkých teplot a odolnost proti růstu únavových trhlin. Ovšem tyto vlastnosti jsou až u třetí generace slitin. První dvě generace měly problémy s lomovou houževnatostí, korozním praskáním pod napětím, anizotropními vlastnostmi. Oproti jiným hliníkovým slitinám jsou slitiny Al-Li dražší. Dalšími příměsi v 3. generaci slitin jsou: hořčík, měď a stříbro pro zpevnění tuhého roztoku a precipitační vytvrzování, zinek pro zpevnění tuhého roztoku a zvýšení korozní odolnosti, zirkon a mangan pro lepší kontrolu rekystalizace, titan pro změnu zrna v průběhu tuhnutí. Sodík, draslík, železo a křemík jako nečistoty ovlivňují lomovou houževnatost, únavu a odolnost proti korozi. Své uplatnění v kosmickém průmyslu slitina našla např. v programu raketoplánů NASA na externí palivové nádrže (Obrázek 5.6), kde slitina (konkrétně slitina 3. generace Al 2195) byla vůbec poprvé svařována v kryogenických podmínkách, a postupně nahrazovala původní části z Al-Cu slitiny (Al 2219). Celkově slitiny 2219 a 2195 se využívají na tlakové nádrže. Kromě problémů s lomovou houževnatostí museli vyřešit problémy po svařování, zvyšovalo se ve svařené oblasti a v okolí vnitřní napětí a materiál se v této oblasti stával křehčím. S počtem oprav svaru se tato křehká zóna rozšiřuje, až bylo nakonec zbytkové napětí ze smršťování svaru větší, než byl svar schopný unést a došlo k prasknutí. To je nevýhoda oproti dalším používaným Al-Cu slitinám, které mají srovnatelnou pevnost poprvé svařeného spoje a spoje po opravě. [54][55][56]



Obrázek 5.6: Nádrž na tekutý vodík, která je součástí externí nádrže u raketoplánu, z Al 2195 [54]

Slitiny Al-Si, též nazývány jako siluminy, jsou nejdůležitější slévárenské hliníkové slitiny. Mají výborné slévárenské vlastnosti, mechanické vlastnosti, korozivzdornost, svařitelnost a hermetičnost. Se zvyšujícím se podílem křemíku se zvyšuje zabíhavost.

Mezi Al-Si slitiny patří slitina NASA 398. Malé polygonální částičky křemíku (16 hm% Si) jsou zde rovnoměrně rozloženy v hliníkové matici. Hlavní výhodou jsou výborné tahové a únavové vlastnosti v oblastech vyšších teplot pro hliník 260-370 °C (Graf 5.1). Má také velkou odolnost proti opotřebení, tvrdost povrchu, tvarovou stabilitu a nižší teplotní roztažnost v porovnání s jinými slitinami hliníku. Jeho vlastnosti umožňují použít při návrhu konstrukce méně materiálu, než by bylo v případě použití klasických materiálů (např. titan, ocel). Tím se snižuje celková hmotnost prostředku a cena. Další využití slitina najde hlavně v automobilovém průmyslu jako písty spalovacích motorů, potrubí, hlavy válců a tepelné výměníky, protože dokáže snížit emise a zlepšit výkon. [58]



Graf 5.1: Porovnání tahové pevnosti v závislosti na teplotě konvenční slitiny a NASA 398 [64]

Slitiny s obsahem mědi jsou velmi náchylné ke korozi a potřebují dostatečnou ochranu. Používá se nejčastěji slitina 2024. Celá řada 2XXX se v historii nejvíce objevovala v konstrukci nádrží. Patří mezi nejlevnější Al slitiny používané pro kosmickou techniku. Objevují se zde intermetalika CuAl_2 , které zpevňují slitinu. Přísady jako Ti, Mn, Si, Li zlepšují kovatelnost a odolnost proti korozi. Konkrétně slitiny 2014, 2024, 2219 se používaly pro motory raketoplánu. [82]

Hliník (či olovo) se používají jako obal křemíkové elektroniky, což zvyšuje celkovou hmotnost prostředku. Náhradním řešením by se dle výzkumu se mohla stát elektronika z nitridu galia a oxidu zinečnatého. Tyto polovodiče mají silnější vazby a jejich elektrony tak jsou mnohem méně náchylné na uvolnění díky záření. I když dojde k vychýlení elektronu, silné vazby jsou schopné elektron vrátit zpět na své místo. Další výhodou těchto materiálů je jejich schopnost lépe snášet teplotní rozdíly než vazby v křemíkových čipech. [121]

5.1.2 Titan

Titan patří mezi lehké kovy s hustotou $4,55 \text{ g/cm}^3$. Používá se především kvůli vysoké pevnosti za teplot 250-500 °C, tam kde nelze použít hliník, za nízkých záporných teplot, odolnosti proti únavě, teplotní a chemické stabilitě a vynikající korozní odolnosti. Chemická a korozní odolnost je dána přilnavým ochranným filmem oxidu, který je stabilní pod zhruba 500°C. Nad touto teplotou se film začíná rozpadat a uvolňovat prvky, které vytváří křehkou vrstvu materiálu. Nečistoty u titanu mohou zvýšit pevnost, ale také sníží korozní odolnost. Při výrobě jsou potřeba speciální opatření, protože titan je náchylný ke kontaminaci. Titan má dvě modifikace – αTi a βTi . Slitiny titanu se rozdělují na α slitiny, pseudo α slitiny, $\alpha+\beta$ slitiny, β slitiny a pseudo β slitiny. Vlastnosti slitin jsou velmi závislé na jejich metalurgické struktuře, která závisí na chemickém složení a předchozím tepelném zpracování. Oproti jiným používaným materiálům jsou slitiny titanu dražší. Jistý podíl na tom má jejich velmi špatná obrobitelnost. Slitiny titanu jsou zatím nejlepším materiálem pro lopatky turbočerpadla a kryty u raketového motoru. [66][82]

Nejpoužívanější titanovou slitinou je Ti6Al4V. Obsahuje jak α , tak i β stabilizátory. Má vysokou pevnost a modul pružnosti, nízkou teplotní roztažnost a odolnost proti vyšším teplotám než hliníkové slitiny. Při zvýšených hodnotách radiace ve vesmíru může docházet ke zkřehnutí. Využívá se v kryogenických podmínkách. Vyrábí se z ní tlakové nádoby na hydraulické kapaliny, sekundární pohonné látky, reakční pohonné látky, hélium pro natlakování systému, dále různá potrubí, malé spojovací součástky. Výhodou, např. oproti kompozitům, je možnost velmi přesného obrábění, kdy se obrábí podle 3D modelu. Další používané slitiny jsou Grade 2 (Obrázek 5.7), které se používají na armatury a ventily u kosmických prostředků. [66][67][93]



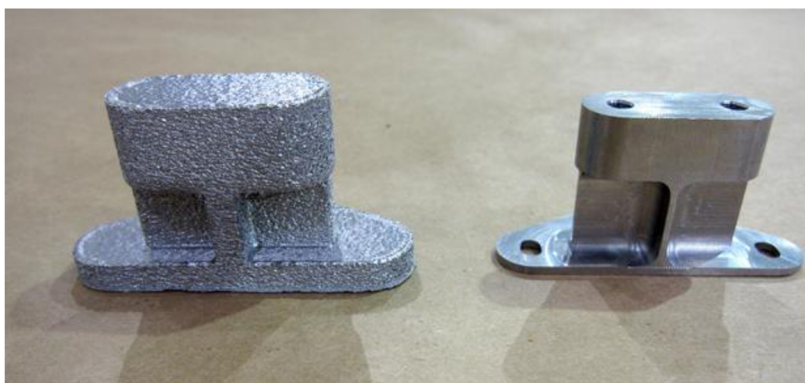
Obrázek 5.7: Ventil ze slitiny Grade 2 [67]

Titan se použil například na část konstrukce sondy Juno, která má za úkol sbírat informace o Jupiteru. Při své cestě a v průběhu oběhu je sonda vystavena velké dávce radiace a bez patřičné ochrany by elektronika přestala fungovat. Byl zhotoven obal z titanových desek, každá o ploše 1 m^2 a tloušťce 1 cm, o celkové hmotnosti 18 kg (Obrázek 5.8). I když se nabízely vhodnější materiály pro stínění radiace (např. olovo), byl zvolen titan kvůli své vlastnosti odolat vibracím při startu, které by například olovo nezvládlo, a kvůli tomu, že se s ním dobře pracovalo při porovnání s jinými materiály. Protože obal nezachytí všechny radiační částice, některé elektronické součástky byly vyrobeny z tantalu či wolframu, které jsou více odolné proti záření. [67][68]



Obrázek 5.8: Obal elektroniky sondy Juno ze slitiny titanu [69]

Juno také jako první kosmický prostředek letělo s 3D vytištěnými součástmi - konkrétně různými podpěrami, úchytkami na vlnovod (Obrázek 5.9). [70]



Obrázek 5.9: 3D tištěné součástky ze slitiny titanu [71]

Využívají se i slitiny na bázi TiNi (známé jako Nitinol) – slitiny s tvarovou pamětí, například jako regulační prvky. V určitém rozmezí teplot, které závisí na přesném složení, je možnost slitinu deformovat (např. 30-130 °C), nad určitou teplotu (cca 500 °C) se materiál vrací do svého původního tvaru. Velké využití slitina může najít v pneumatikách různých vozítek. Pneumatiky na lunárním vozítku se skládaly z drátů pružinové oceli (tkané do síťoviny), která absorbuje veškeré nárazy. Tyto pneumatiky se velmi rychle vlivem drsného povrchu zdeformovaly. I nové pneumatiky na roveru Curiosity ze slitiny hliníku a titanu po určité době vykazovaly značné opotřebení (Obrázek 5.5). Nové bezvzduchové pružinové pneumatiky, které jsou ze slitiny titanu a niklu, přeuspořádají svoje vazby atomů tak, jak se pneumatika deformuje vlivem terénu, a dokáží se navrátit zpátky do svého původního uspořádání (Obrázek 5.10). Slitina se může použít i jako výztuha v této pneumatice a ta je tak schopna unést větší náklad. Bezvzduchové pneumatiky, narozdíl od předchozích, nepotřebují vnitřní rám, tím se nám kolo zjednoduší, což je výhodné z hlediska montáže a kvůli úspore hmotnosti. [77][78][79][80]



Obrázek 5.10: Pneumatika ze slitiny na bázi titanu a niklu [80]

Využití slitina TiNi najde na malých satelitech v podobě aktuátorů a v závěsech pro zlepšení uvolňování důležitých součástí. Speciálně Cubesaty často mění polohu svých součástí a několik částí současně (např. solární panely, antény). Mechanismus se slitinou s tvarovou pamětí je více spolehlivý, lehčí (u malých satelitů velmi důležitá vlastnost), neprodukuje odpad, méně energeticky náročný a je schopný pracovat ve velkém rozmezí teplot (od -140° do 500°C) (Obrázek 5.11). [81]



Obrázek 5.11: CubeSat s mechanismem ze slitiny s tvarovou pamětí [81]

5.1.3 Hořčík

Hořčík je dalším zástupcem lehkých kovů (se svou hustotou $1,74\text{ g/cm}^3$) v kosmickém průmyslu. Hlavní přednosti hořčíkových slitin jsou: nízká hustota, vysoká měrná pevnost (má výborný poměr hmotnost-pevnost), vysoký útlum vibrací, dobré mechanické vlastnosti i při vyšší teplotě ($150\text{-}350^{\circ}\text{C}$), vysoká měrná tepelná kapacita. Nevýhodami jsou hořlavost většiny normálních slitin, vysoká reaktivita nad teploty 450°C , nízká odolnost proti opotřebení a nízká korozní odolnost. Je potřeba slitiny opatřit ochranným nátěrem, které zabraňují i elektrochemické korozi, ke které může dojít při spojování s jiným materiálem. Častými příměsi jsou hliník, zinek, mangan. Používané slitiny: AZ31B (např. pro aplikace tepelné regulace), AZ61A, Electron 21, WE54. [66][72][73][76]

Hořčíkové slitiny začaly nahrazovat některé části kosmické lodě z oceli nebo hliníku, protože je lehčí než obě zmiňované slitiny a poskytuje větší ochranu před radiací. Používá se tak na primární a sekundární konstrukce.[66][74]

Zkoumána je nová nehořlavá slitina hořčíku jako zrcadlo, které by se dalo použít pro teleskopy a optické přístroje (Obrázek 5.12). Optické přístroje musí mít v dnešní době větší rozměry, aby dosáhly vysokého rozlišení, tím pádem jsou i těžší. Zrcadla z tohoto materiálu by tak značně snížila celkovou hmotnost při zachování kvality. [72]



Obrázek 5.12: Zrcadlo ze slitiny hořčíku [72]

V budoucnosti by hořčík mohl hrát velkou roli při stavění na Měsíci (například základny). Hořčík se hojně vyskytuje v měsíční půdě, dobře se s ním pracuje a recykluje a celkově má dobré vlastnosti i v drsném prostředí na Měsíci. Mohl by se využít například pro výrobu potřebných komponentů, vyztužení konstrukce základny atd. [75]

5.2 Oceli

Ocel je slitina železa s uhlíkem do 2hm% a dalšími příměsi. S rostoucím obsahem uhlíku roste pevnost, ale zhoršuje se tažnost a svařitelnost. Podobný vliv jako uhlík má i mangan. Dalšími příměsi mohou být: křemík, nikl (zpevňuje a v kombinaci s Cr zvyšuje únavovou odolnost, rázovou pevnost), molybden (odolnost proti popouštěcí křehkosti a tečení). Hliník, vanad, titan a zirkon zjemňují zrna. V dnešní době jsou konstrukce z oceli většinou nahrazovány slitinami hliníku a titanu, které jsou mnohem lehčí a mají lepší poměr hmotnost-pevnost. Legováním uhlíkových ocelí můžeme zlepšit určité vlastnosti jako je tepelné zpracování, prokalitelnost, svařitelnost, korozní odolnost atd. Ochrana proti korozi plátováním, která se používá na zemi, se nemůže použít pro oceli, které míří do vesmíru. Je třeba dávat pozor v prostředí, kde je vodík (např. palivové nádrže), protože může u oceli dojít k vodíkové křehkosti. [54][66][84]

Velkou skupinou ocelí, které se používají, jsou vysokopevnostní martenzitické oceli s obsahem niklu (typicky 12-18 %) a s dalšími příměsi (např. Cr, Co, Mo, Ti, Al). Martenzitické oceli obsahují uhlík jen do 0,03 %, aby se zabránila tvorba karbidu TiC , který snižuje pevnost a tuhost. Mají velmi vysokou pevnost v tahu, vysokou tuhost i za nízkých teplot, svařovatelné a lehce obrobitelné. Martenzit zde je vytvrzován při cca 500°C. Vzniknou tak precipitáty intermetalických fází, které zpevňují materiál. Mají lepší korozní odolnost než legované oceli, ale také mají nižší modul pružnosti a jsou drahé. Konkrétně používané: Maraging 200, Maraging 250, Maraging 300, Maraging 350. Používají se pro velmi zatížené konstrukce, které vyžadují vysokou úroveň tolerance poškození a také zabírají málo místa.

Velmi využívaná je ocel s vysokým podílem uhlíku tzv. „Music wire“. Má dobré tepelné vlastnosti, vysokou rovnoměrnou pevnost v tahu, výborné únavové vlastnosti, odolnost proti rázům. Je to jedna z nejlepších ocelí pro malé pružiny. [66][84]

Nerezové oceli jsou vysoce legované oceli legovány chromem (alespoň 12 %), který vytvoří na povrchu ochranný přilnavý film. Tento proces, kdy se na povrchu, působením dostatečného množství kyslíků vytvoří ochranná vrstva, se nazývá pasivace a často bývá předepsán ve standardech jako nutná podmínka při použití nerezové oceli (hlavně austenitické a feritické). Nerezové oceli jsou odolné proti tečení a houževnaté za nízkých teplot. Problém může nastat u některých slitin kdy se chrom, který je v ochranném filmu, začne vázat s uhlíkem ve struktuře. To má za následek velké oslabení korozní odolnosti a hrozí korozní praskání. Řešením je stabilizovat ocel legujícími prvky (Ti, Nb, Mo), které naváží uhlík a zabrání tak navázáním vazby s chromem. Nerezová ocel se díky své velké korozní odolnosti používá tam, kde se skladuje a pracuje s kapalinami či odpadem. Dále se z nich vyrábí různé spojovací prvky, komponenty pro systémy tepelné ochrany (Obrázek 5.14), např. vysoce pevné a spolehlivé šrouby.

Nerezové oceli se podle struktury dělí na: austenitické (série 200 a 300), feritické (série 400), martenzitické (série 400), duplexní.

Nerezová ocel 321 se nejčastěji používá pro potrubí, protože je odolná proti korozi a vodíkové křehkosti. Podobné vlastnosti má i ocel A-218, která se používala pro části motoru raketoplánu. [66][82]

I přes spousty výhod hliníkových slitin je v některých případech nerezová ocel stále lepší, kvůli své teplotní odolnosti. Právě z toho důvodu si ji SpaceX vybralo jako hlavní konstrukční materiál pro svůj nový projekt Starship (Obrázek 5.13). Starship bude meziplanetární prostředek, jenž bude čelit velkým rozdílům teplot. Prototyp byl postaven z nerezové oceli 301, která však bude pravděpodobně nahrazena jinou. Další výhodou, kromě větší teplotní odolnosti, oceli oproti uhlíkovým kompozitům je jejich nižší cena. [83][85]



Obrázek 5.13: Prototyp Starship z nerezové oceli [86]



Obrázek 5.14: Apollo velitelský modul jehož vnější konstrukce a tepelný štít byli vyrobeny z nerezové oceli [87]

5.3 Speciální vysokoteplotní slitiny

5.3.1 Nikl

Slitiny niklu se řadí mezi vysokoteplotní slitiny. Jsou specifické svou odolností proti tečení, tepelné únavě, odolností proti oxidaci a korozi vlivem zplodin hoření, statickou pevností, chemickou odolností. Slitiny se dělí podle vlastností na žárovevné slitiny a žáruvzdorné slitiny. Žárovevné slitiny jsou odolné proti oxidaci za vysokých teplot a za těchto teplot jsou schopné odolávat tečení při statickém nebo dynamickém namáhání. Žáruvzdorné

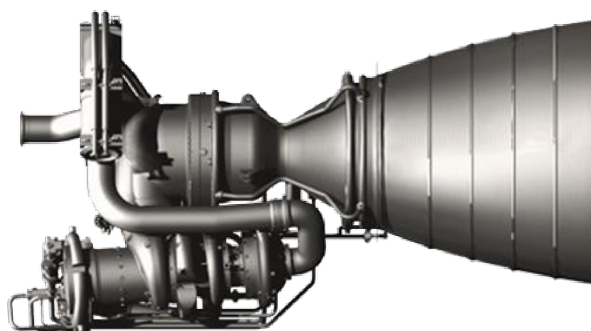
slitiny jsou odolné proti oxidaci za vysokých teplot. Slitiny niklu jsou finančně náročné, proto se používají pouze tam, kde jsou vysoké teploty (např. části motoru). Je potřeba monitorovat i obsah síry v materiálech, protože pod jejím vlivem jsou slitiny náchylné ke zkřehnutí.

Žárovzdorné slitiny obsahují přibližně 15-30 % chromu, ten má zpevňující účinek. Jsou schopné pracovat do teploty přibližně 1100 °C v prostředí, kde jsou oxidy, karbidy a sulfidy.

Žáropevné slitin (superslitiny) jsou na bázi Ni-Cr a příměsi (Co, Mo, Ti, Al). Kobalt a molybden mají zpevňující účinek, titan a hliník zvyšují žáropevnost a schopnost vytvrzování. Se zvyšováním legujících prvků ale zároveň se zhoršuje zpracovatelnost.

Slitiny niklu jsou více známé pod svými obchodními jmény než pod svými specifickými označeními, např. Inconel (Obr. 4.17), Incoloy, Monel, Nimonic, Mumetal atd. [66]

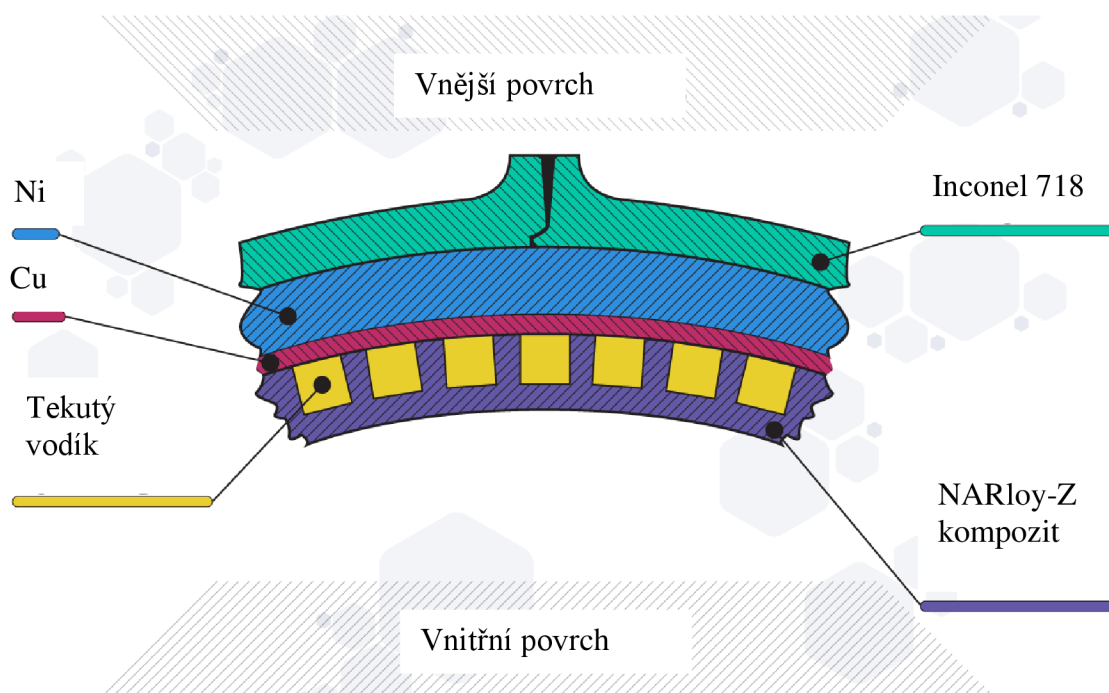
Slitina Monel (s hlavním složením nikl-měď) se použila pro raketový motor BE-4 firmy Blue Origin konkrétně pro všechny stupně hydraulické turbíny, které navíc byly vytištěny 3D tiskárnou (Obrázek 5.15). Tam, kde je potřeba součástka s konstantní roztažností se používají slitiny Invar, Kovar (např. bimetalový proužek, termostat, zařízení s vysokou přesností). [66][90]



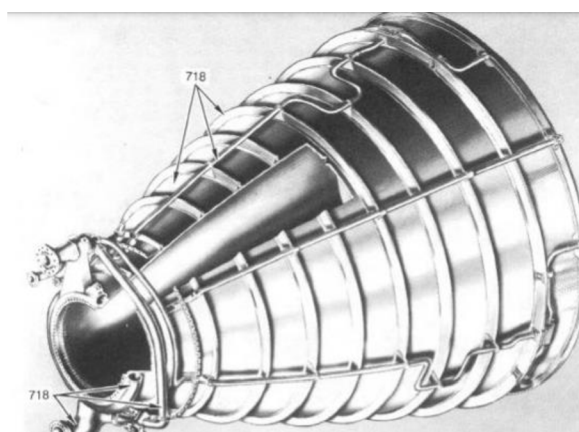
Obrázek 5.15: Motor BE-4 [90]

Slitiny s magnetickými vlastnostmi najdou využití především v elektronických součástech např. v telekomunikaci. Některé slitiny s vysokým obsahem kobaltu a čistého niklu se díky svým magnetostrikčním vlastnostem (tzn. v magnetickém poli mění svoje rozměry) používají v měničích. Pokovování čistým niklem se používá jako ochrana elektronických (ale i jiných) komponentů proti korozi. [66][89]

Superslitiny poskytují ochranu proti oxidaci (do přibližně 550 °C), velmi dobré mechanické vlastnosti za vyšších teplot a spousta z nich si uchovává dobré vlastnosti i v oblasti kryogenických teplot. Superslitina niklu Inconel 718 je vhodná pro potrubí v motoru a používala se ve spalovací komoře raketoplánu (Obrázek 5.16). [88]



Obrázek 5.16: Řez stěnou spalovací komory [82]



Obrázek 5.17: Výfuková tryska raketoplánu s naznačením, kde se používá Inconel 718 [91]

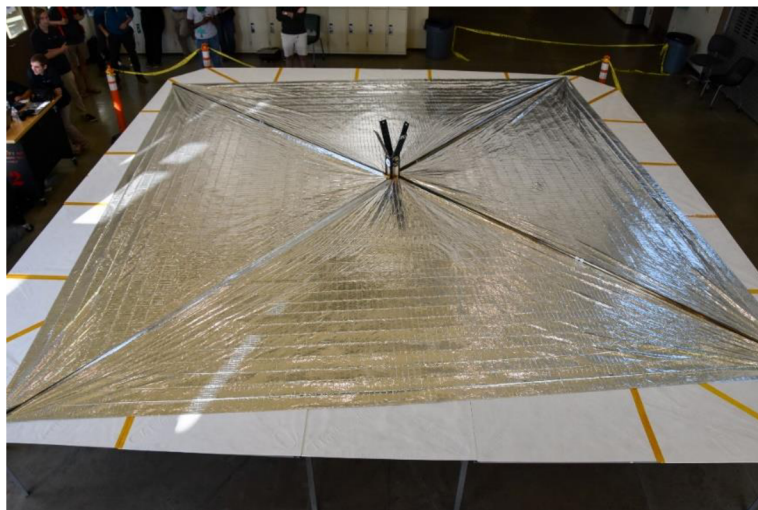
René-41 je vytvrzovaná slitina, která se používá pro vysoce namáhané části pracující v teplotách 650-980 °C, např. pro odlitky turbín, kol, lopatek, šrouby či jiné spojovací prvky. Použila se v programu Mercury na kosmické lodi, kde slitina pokrývala tepelně namáhaná místa. [66][92]

5.3.2 Kobalt

Kobalt se stejně jako nikl řadí mezi speciální vysokoteplotní slitiny. Má větší odolnost proti koroznímu působení síry v palivu, větší odolnost proti tepelné únavě a lepší svařitelnost. Slitiny obsahují chrom, který zlepšuje korozní odolnost za zvýšených teplot, molybden a wolfram pro zpevnění tuhého roztoku a další. Vytvrzují se precipitačně karbidy, důležitý je proto i obsah uhlíku v materiálu.

Použití mají podobné jako slitiny niklu. Využívají se na trysky motoru i stacionární lopatky pro plynové turbíny. [93][94]

Solární plachetnice LightSail 2 používá na rozvinutí plachet 4 ramena vyrobená ze slitiny kobaltu (Obrázek 5.18). [95]



Obrázek 5.18: Sluneční plachetnice s rameny ze slitiny kobaltu [95]

5.3.3 Beryllium

Jako další se řadí mezi speciální vysokoteplotní slitiny beryllium a jeho slitiny (teplota tání 1284 °C), navíc má nízkou hustotu podobnou hořčíku o hodnotě 1,85 g/cm³. Dále má velmi vysoký modul pružnosti (až 4x větší než Al), vysoký poměr pevnost-hmotnost, korozní odolnost za normální teploty, dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, je dobře leštitelný a udrží si tvar i za kryogenických teplot (toho se využívá především u prostředků na průzkum vesmíru). Díky tomu se využívají v přesných optických a elektronických přístrojích v kosmických prostředcích, navíc jim velká tuhost zajišťuje malé deformace při zatížení. Nevýhodou beryllia je jeho toxicita, proto se také moc neobrábí. Kvůli tomu se tento prvek ve standardech řadí mezi nedoporučované. Nejznámější slitinou je AlBeMet 162, obsahuje 62% beryllia a 38 % hliníku, která se používá jako náhrada hliníkových slitin. [96][140]

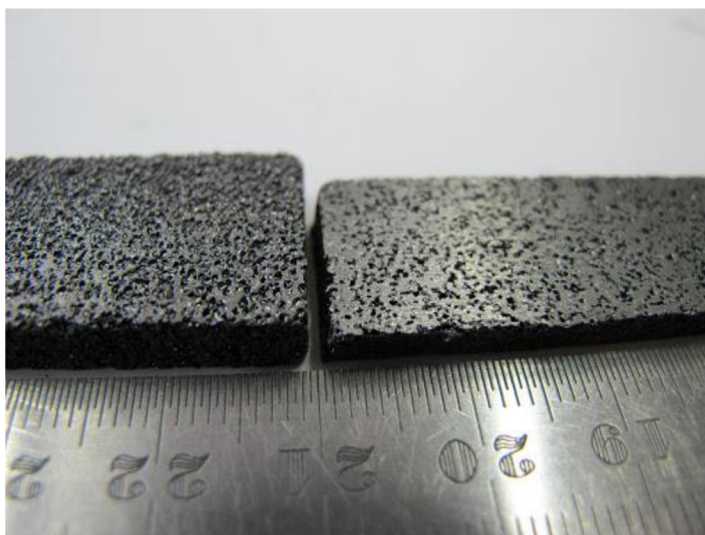
Příkladem použití beryllia je v zrcadlech vesmírného teleskopu Jamese Webba (Obrázek 5.19). Používá se také na spojovací konstrukce mezi externími nádržemi a konstrukci samotného prostředku, adaptéry, trysky motoru, okna a dveřní rámy. [93][96]



Obrázek 5.19: Teleskop Jamese Webba se zrcadli z beryllia [97]

5.4 Nanomateriály

Mezi nejznámější alotropické modifikace uhlíku patří grafit. Za běžných podmínek je velmi stabilní. Má specifickou strukturu v podobě vrstev, které se snadno odštipnou, to mu dává velmi nízkou pevnost (Obrázek 5.22). Dále je velmi měkký, tepelně odolný, nereakční, má malou hustotu, $2,22 \text{ g/cm}^3$. Spojení mezi jednotlivými vrstvami je slabé, zato jednotlivé atomy spojené do hexagonálních mřížek jsou silně vázány. Grafit a uhlík mají velké a široké využití v kosmickém průmyslu. Využívají například tam, kde se dosahuje vyšší teploty. Používají se jako izolace ve formě fólie či plsti, topné články a trubky, nabíjecí systémy, komponenty s horkým plynem, krytování atd. Pěnový grafit (Obrázek 5.20) je lehký a má větší tepelnou vodivost než jiné kovové pěny a grafitová vlákna (3x-9x) a je odolný proti korozi. Narozdíl od vláknových kompozitů je také schopen vést teplo všemi směry. Využití by mohl najít jako chlazení výměníků tepla umělých družic nebo by třeba mohl hrát roli v mezihvězdných letech. [93] [98] [99][100][101]



Obrázek 5.20: Pěnový grafit [102]

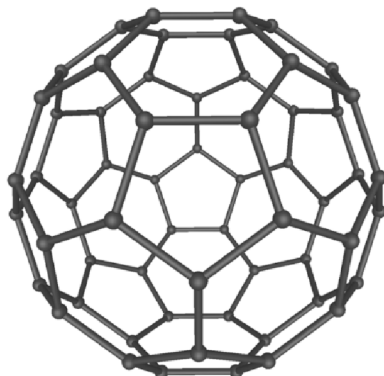
Další modifikace uhlíku, která se skládá jen z jedné vrstvy takhle vázaných atomů, se nazývá grafen (Obrázek 5.22). Grafen je nejpevnější materiál na světě a řadí se mezi nanomateriály.

Nanomateriály (také společně s kompozity) jsou rozsáhlou oblastí přispívající k rozvoji multifunkčních materiálů. Jak název napovídá, u těchto materiálů se rozměr částic pohybuje v rozmezí 1 až 100 nanometrů. S těmito rozměry může mít materiál velmi odlišné vlastnosti a chování než na makroúrovni.

Grafen je relativně nově objevený materiál, jenž má velice unikátní vlastnosti. Jeho pevnost je zhruba 200x větší než konvenční oceli. Díky tomu, že se jedná o jednu vrstvu atomů, je materiál velmi flexibilní – natáhne se bez poškození až o 25 % své původní délky a je lehký. Pro představu o jeho hmotnosti, list grafenu o rozměru standardního fotbalového hřiště by vážil méně než 1 g. Je to výborný tepelný i elektrický vodič, umožňuje vést větší teplo než ostatní modifikace uhlíku. Má také výborné optické vlastnosti, propouští až 98 % světla. V roce 2017 a 2018 proběhly důležité experimenty. První experiment potvrdil, že grafen zlepšil spolehlivost a využití energie v oblasti tepelného management systému družice. Druhý experiment zjišťoval, jestli by se dal grafen použít v pohonném systému. Dle výsledků má potenciál na využití v pohonu sluneční plachetnice, na které se provádělo testování. Další experimenty potvrzují, že použitím grafenu v chladicím systému se prodlužuje životnost prostředku a zlepšuje se jeho autonomie. Velké využití může najít v kritických součástech jako jsou chladiče, antény, elektronika a optika. [103][104]

Další modifikací uhlíku jsou fullereny. Jedná se o kulové molekuly tvořené atomy uhlíku formující svou hexagonální strukturu (Obrázek 5.21). Jen minimálně se vyskytují v přírodě (v částech uhlí a sazí), mnohem častěji je tato modifikace vyráběna v laboratoři

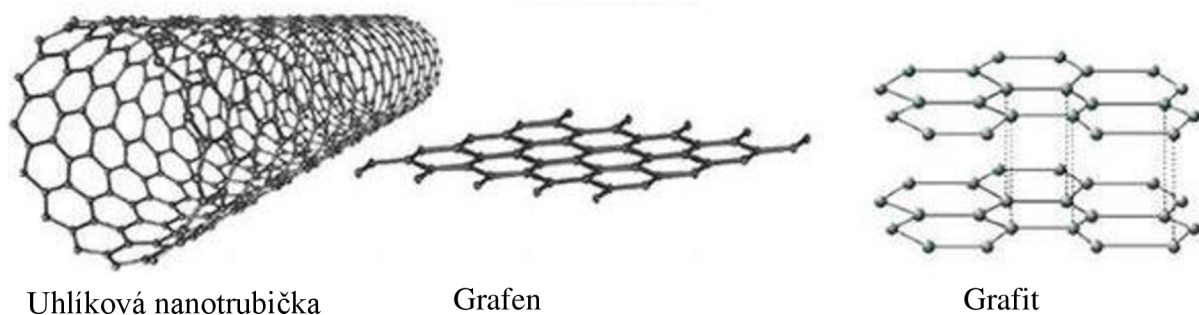
pomocí obloukového výboje mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Nejznámější fulleren nese označení C₆₀, jehož struktura se podobá fotbalovému míči (Obrázek 5.21). Má výborné mechanické vlastnosti a ve své čisté formě je tvrdší než diamant. S příměsí alkalického kovu se z něj stane supervodič s vynikajícími vodivými vlastnostmi i za vysokých teplot. Využívá se zejména v optických přístrojích. Další materiál z fullerenu, jenž byl vytvořen při rostoucí teplotě a tlaku, nese označení AM-III. AM-III je průhledné uhlíkové sklo s amorfni strukturou, jenž je tvrdší než diamant – to jej činí netvrdším a nejpevnějším amorfni materiálem. Kromě toho má skvělé vlastnosti v elektronice a chová se jako polovodič, takže by se mohl stát důležitou součástí fotovoltaiky. [142]



Obrázek 5.21: Fulleren C₆₀ [141]

Velký dopad na konstrukce prostředku by mohly mít uhlíkové nanotrubičky (CNT) vypadající jako stočené grafenové listy (Obrázek 5.22). Vlastnosti materiálu se mění s typem a rozměrem trubiček. Všeobecně však mají velkou pevnost v tahu a mechanickou poddajnost, elektrickou i tepelnou vodivost, tepelnou odolnost, korozní odolnost, antistatické vlastnosti a nízkou hmotnost. Využití by mohly najít jako materiál na ochranu satelitů před dopadem smetů či mikrometeoritů nebo jako samotný konstrukční materiál. Další velký potenciál mají tyto nanotrubičky při přípravě kompozitu, kde zvyšuje tuhost, pevnost, modul pružnosti, tepelnou i elektrickou vodivost atd.

Ve vesmíru může docházet k elektrostatickému nabíjení, prostředky z kompozitů se před tím chrání tak, že je na povrch přidána tenká vrstva hliníku. Jako vhodnou náhradou se ukázala být tenká vrstvička CNT, která splňuje všechny požadavky na ochranu prostředku, navíc je to rychlejší a levnější řešení, protože není vyžadována náročná příprava povrchu kompozitu na aplikování ochranné vrstvy. Toto řešení bylo vyzkoušeno na již zmiňované sondě Juno. Také byl poprvé použit CNT kompozit na části primární struktury, kde vykazoval vynikající integritu dílů a výborné mechanické vlastnosti. [106][107][143]



Obrázek 5.22: Struktura uhlíkových nanotubic, grafenu a grafitu [105]

Dalším nanomateriálem je TiO_2 . Tyto částice jsou schopné absorbovat UV záření, tím se spouští jeho samočistící schopnosti. Toho by se dalo využít například ve vzduchových filtrech. Má dobré optické a katalytické vlastnosti, při ozáření dochází ke změně smáčivosti a místo kapek se na povrchu vytváří souvislý film, takže nedochází k zamlžení. Pro tyto vlastnosti by materiál mohl najít uplatnění v optických přístrojích.

Nejrozšířenějším kovové nanočástice jsou částice stříbra. Nejznámější jsou svými antibakteriálními účinky, ale mají i výborné optické a katalytické účinky. Proto se používají i v katalyzátorech, elektrooptických strukturách a molekulárních senzorech.

5.5 Smart materiály

Smart materiály jsou materiály měnící své vlastnosti, nebo materiály se schopností transformace dodávané energie. Představují tak do budoucna velice perspektivní oblast nejen v kosmickém průmyslu. Jejich největší společnou nevýhodou je vysoká cena. Řadí se sem materiály s tvarovou pamětí, zvláště jejich největší zástupce Nitinol, který je více popsán v kapitole 5.1.2.

Jedním z materiálů se schopností transformace energie jsou piezoelektrické materiály. Mechanická deformace má za následek změnu elektrické polarizace, která se projeví tak, že na povrchu se indukují elektrický náboj (piezoelektrický jev). Když je materiál připojen ke zdroji elektrické energie, tak naopak dochází k deformaci. Využití naleznou hlavně jako aktuátory a senzory. Příklad použití může být jako senzory k monitorování chování materiálu, konkrétně kompozitů, při dopadu kosmického smetí, nebo senzory, které by sloužily k měření okolních prostředí v „poddajném mechanismu“ (viz. kapitola 3.4.1). Piezoelektrické aktuátory našly využití v mikrotryskách na umělých družicích, které stabilizují a upravují polohu. To vyžaduje přesné ovládání tlaku a dávky paliva ve správný čas, oba tyto požadavky piezoelektrické aktuátory dokážou splnit, navíc vyžadují minimum potřebné energie a jsou malé a lehké. [145]

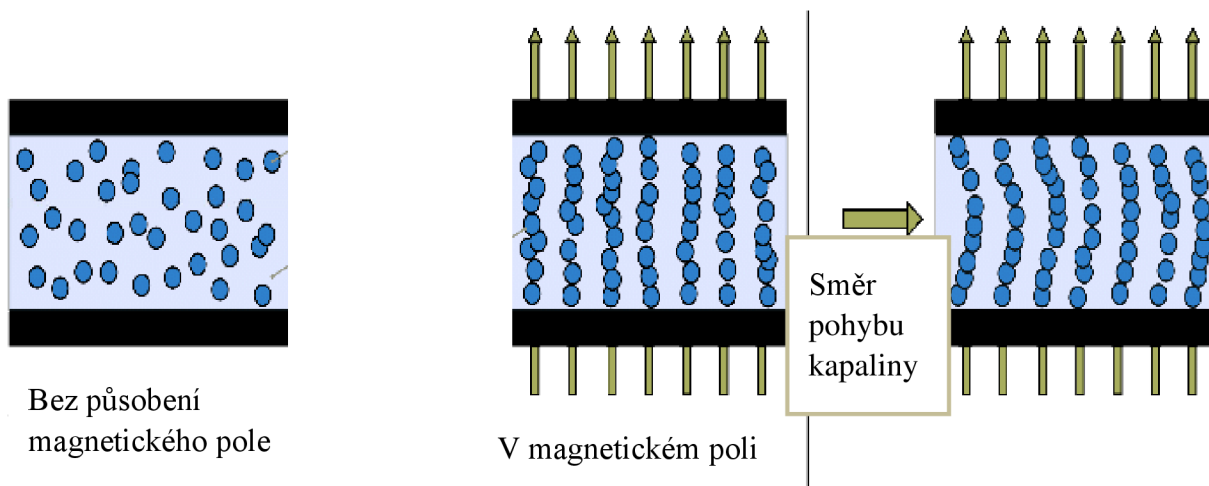
Velkým tématem u různých výzkumů je, jak napodobit mechanismy hojení, aby se materiál dokázal sám opravit. Nejčastěji se jedná o kompozitní polymery skládající se z matrice (pevné nebo elastické) a nanokapslí, které obsahují tekutinu okamžitě tuhnoucí při vylití z kapsle. Kosmické prostředky jsou v průběhu provozu vystaveny různým vlivům, které mohou

vést ke vzniku trhlin v jejich konstrukci. To by bylo pro kosmický prostředek nesporně velmi nebezpečné, a právě proto se samoopravitelné materiály jeví jako významný přínos ke zvýšení spolehlivosti zařízení a k prodloužení bezpečného využití kosmického prostředku.

Výzkum probíhal tak, že se duté křehké vlákno naplnilo dostatečně tekutým lepidlem, které se při rozlomení vlákna rychle vytvrdilo. Tady je kritická správná volba lepidla a kde bude umístěné tvrdidlo v matrici, protože v běžných podmínkách na zemi lepidlo reaguje při vytvrzování s okolním prostředím (vlhkost a vzduch). Na kosmickém prostředku je tedy nutno obě složky umístit tak, aby se tyto složky co nejrychleji spojily a zacelily místo poškození. Další výzkum probíhal tak, že se vlákna vyplnily pryskyřicí a do polymerové matrice s vlákny se přimíchaly mikrokapsle s tvrdidlem. Tak se zajistí potřebné smíchání složek k rychlému zacelení. Mechanické vlastnosti tohoto kompozitu jsou velmi dobré, negativem ale zůstává, že se vytvrzováním zvyšuje i křehkost materiálu. [146]

Častým zdrojem trhlin, zvláště při dynamickém zatěžování a extrémních změnách teplot jsou otvory pro šrouby. V současné době se k jejich odhalování používají nedestruktivní diagnostické metody, zvláště pak metoda ultrazvuková a metoda vířivých proudů. Obě metody však vyžadují alespoň částečné rozebrání spoje, což může být zdrojem dalších poškození. Aby byly tyto komplikace odstraněny, probíhá vývoj tzv. chytrých podložek, které by se budou chovat jako senzor a budou monitorovat vznik a rozvoj trhliny. Princip spočívá v tom, že na podložku je připevněna cívka, která generuje elektromagnetické pole, přičemž změny v tomto, jinak pravidelném magnetickém poli by pak měly označovat nejen existenci trhliny, ale také její okamžitou velikost a směr jejího růstu. Perspektivně se také předpokládá propojení všech těchto senzorů do jednoho diagnostického systému, který bude snímat a vyhodnocovat elektronický systém družice nebo vesmírné stanice. [144]

Smart kapaliny jsou další velkou oblastí výzkumu. Dělí se na magnetoreologické a elektoreologické materiály, které mění své reologické vlastnosti (především viskozitu) při působení magnetického či elektrického pole (Obrázek 5.23). Změna je závislá na intenzitě pole. Při vystavení kapaliny s nano nebo mikro částicemi magnetickému, případně elektrickému, poli způsobuje polarizaci a seřazení částic tak, že tato struktura brání smykové deformaci a tečení. V magnetoreologickém materiálu se jako částice používají částice železa, niklu nebo kobaltu, matrice je neferomagnetická kapalina o velké viskozitě (minerální a silikonové oleje, polyestery aj.). V kosmickém průmyslu se tyto vlastnosti mohou aplikovat v podobě kapalných zrcadel, které nabízí velmi hladký povrch a nižší cenu. Další možnosti využití jsou leštící podložky – proces se nazývá magnetoreologické leštění, které bylo aplikováno na zrcadlech Hubbleova teleskopu. Oproti klasickým dokončovacím metodám kapalina nabízí velkou flexibilitu procesu, což vede k přesnější úpravě povrchu dle potřeby a ve výsledku snižuje cenu. Princip spočívá v odebírání materiálu účinkem volných zrn (obdobný proces jako u lapování), tím, že se magnetickým polem mění reologické vlastnosti kapaliny, je možné při procesu upravovat intenzitu leštění. Síla abraze také závisí na velikosti částic. [149]



Obrázek 5.23: Princip magnetoreologické kapaliny [148]

Fotonická slunečnice je „chytrý“ kompozit z elastomeru s fotonickými krystaly, které reagují na světlo. Materiál by mohl najít uplatnění zvláště ve fotovoltaických panelech, které by se otáčely za sluncem. Další výzkumy se snaží vyvinout vláknité materiály, které by se vlivem elektrické energie, chemického složení či prostředí smršťovaly a protahovaly (např. jsou zkoumány elektroaktivní polymery). Z hlediska konstrukce by mohly najít uplatnění např. v oblasti motorů, protože nemají rotující části a ložiska, čímž vykazují větší životnost.

Mezi další smart struktury patří spojení kompozitu s optickými vlákny, které se snaží co nejvíce přiblížit nervovému systému. Takové senzory mají oproti elektronickým velmi malý průměr (desítky až stovky mikrometrů), tudíž mají minimální dopad na mechanické vlastnosti kompozitu a nenarušují jeho strukturu, jsou schopné fungovat ve velkém rozmezí teplot i tlaků, mohou mít schopnost elektromagnetického rušení, čímž se ušetří na hmotnosti, protože není třeba jiné ochrany. Jsou to pasivní dielektrická zařízení, v organickém nevodivém kompozitu tak zabrání přenosu elektrického náboje dál na strukturu prostředku. Tím se nabízí možnosti aplikace jako izolační vrstva pod vnější vodivou vrstvou na prostředku, aby se zabránilo negativním dopadům elektrostatického nabíjení. Celkově by se tato optická vlákna mohla využívat jako senzory snímající parametry (např. teplotu, tlak), změny v konstrukci (např. poškození), jak okolní prostředí působí na konstrukci a jak na něj konstrukce reaguje.

Vize do budoucna se netýká jen využití smart materiálů v konstrukci a elektronice. Příkladem je probíhající výzkum smart textilií, kterých je mnoho typů a provedení. Vetkáním piezoelektrických vláken do textilie získáme flexibilní materiál, ten vyšle elektrický signál při vystavení mechanickému namáhání, např. dopad kosmického smetí. Zkušební vzorky této látky budou vyslány na ISS k otestování, jak na ně působí vesmírné prostředí. Univerzita v Liberci vyvinula termoizolační smart materiál vhodný pro extrémně nízké teploty, z toho by se mohlo vyrobit oblečení pro kosmonauty např. se snímači snímajícími funkci těla anebo okolní prostředí, podle kterého by se přizpůsobilo. [147][150]

5.6 Kompozity a sendvičové konstrukce

Kompozitní materiál je složen alespoň ze dvou strukturních fází s makroskopicky rozeznatelným rozhraním, které společně vytváří materiál o vlastnostech jiných, než jsou vlastnosti samotných fází. Obecně jsou tvořeny maticí, výztuží ve formě vláken nebo částic a pojivem.

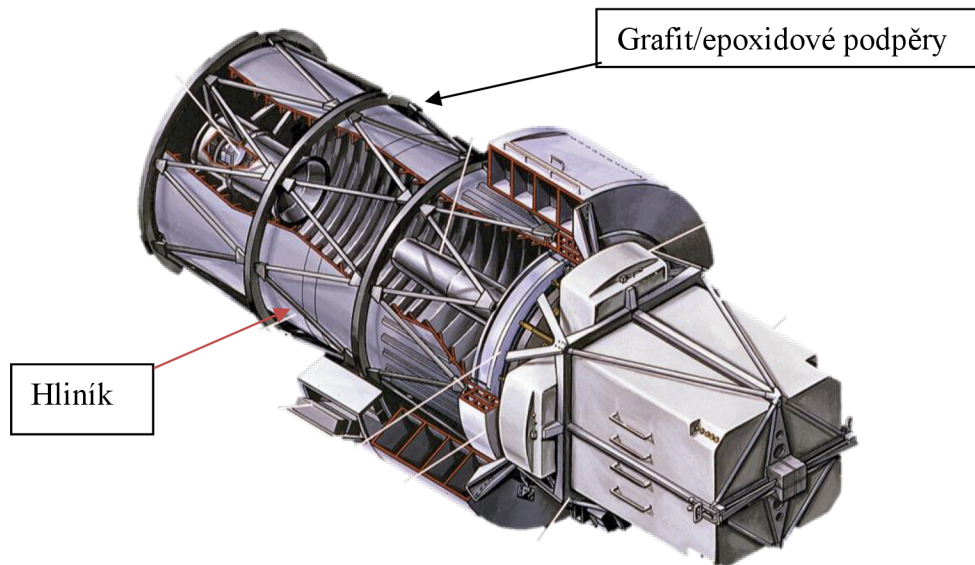
Pro kosmické prostředky se dělí podle jejich skladby na 3 hlavní skupiny: kompozity s polymerní maticí (PMC), kompozity s keramickou maticí (CMC) a kompozity s kovovou maticí (MMC). CMC kompozity jsou blíže popsány v následující kapitole 5.7, protože se díky své specifické stálosti ve vysokých i nízkých teplotách používají hlavně jako tepelná ochrana.

Sendvičové materiály se skládají ze dvou tenkých pevných potahů (nejčastěji hliníkové nebo grafit/epoxidové) a jádra. Jádro se využívá převážně voštinové, protože má výbornou tuhost, nebo pěnové jádro z hliníku. Jejich předními vlastnostmi jsou velká tuhost a pevnost v ohybu při nízké hmotnosti, velmi dobré pohlcování energie (to je činí velmi dobrými kandidáty na ochranu proti vibracím), tepelná izolace. Při velkých koncentracích napětí na malé ploše jsou náchylné k poškození, proto je potřeba při montáži používat vložky, které rozvádí zatížení z bodových spojů na větší plochu. Často se používají jako část konstrukce, na kterou se montují elektronická zařízení. [151]

Důvodem, proč jsou kompozity široce zkoumány pro kosmické aplikace, je minimalizace hmotnosti konstrukce, flexibilita v designu za cenu zachování užitečné hmotnosti prostředku. Především vláknové kompozity jsou výhodné pro aplikace tam, kde se využijí anizotropní přizpůsobitelné vlastnosti – orientace, tuhost, pevnost, nízká teplotní roztažnost a vodivost, stálost rozměrů atd. Uhlíkové vlákno se hojně využívá v různých krytech, výložnicích, solárních panelech aj. Skleněná a kevlarová vlákna mají špatnou elektrickou vodivost a malé ztráty při přenosu, proto se používají v kompozitech určených na antény. [152]

Problémem u kompozitu je, že postupem času se materiál ztrácí vlivem působení atomárního kyslíku ve vesmíru.

Grafit/epoxidové kompozity jsou využívaným materiálem především v konstrukci. Má velmi dobré mechanické vlastnosti, poměr pevnost-hmotnost, tuhost a skoro nulovou teplotní roztažnost, která je důležitá pro optické přístroje. Povrch potřebuje ochranné povlaky proti působení atomů kyslíku v atmosféře, tepelným cyklickým změnám a slunečnímu záření. Zejména vliv slunečního záření a atomů kyslíku se v materiálu akumuluje, proto musí mít určitou ochranu, zvláště materiál přístroje, které budou ve vesmíru delší dobu. Byl použit například při konstrukci satelitu Intelsat IV, vysílače u satelitu Anik a kosmického prostředku Viking, telekomunikační satelity DSCS, Hubbleova teleskopu (Obrázek 5.24), vesmírné stanice ISS atd. [111][112]

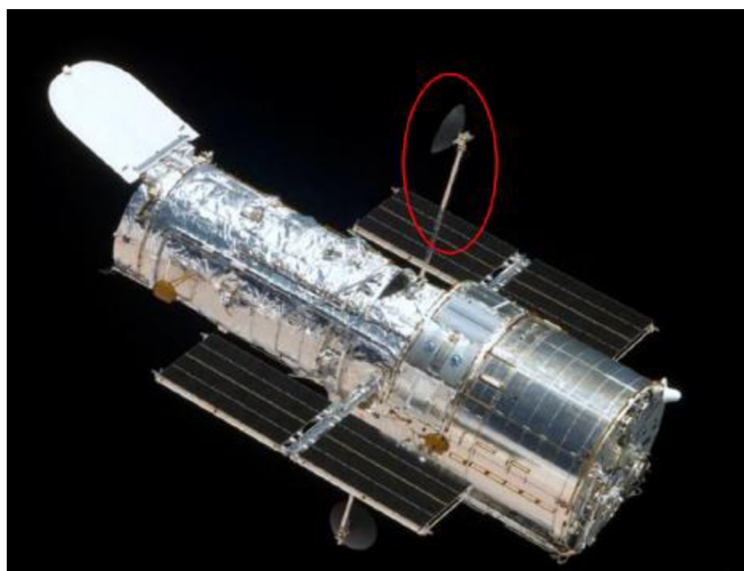


Obrázek 5.24: Konstrukce Hubbleova teleskopu [110]

Kompozit CFRP je kompozitem s vyztuženými uhlíkovými vlákny s polymerní matricí (např. epoxid, polyester, vinylester), i když občas tato zkratka popisuje pouze kompozit, který má uhlíková vlákna jako hlavní složku struktury. Mezi přednosti patří nižší hmotnost než např. při použití skleněných vláken se stejným poměrem vláken, větší pevnost a tuhost v porovnání opět s kompozitem se skleněnými vlákny ale i v porovnání s kovy – váží $\frac{2}{3}$ hmotnosti a dokonce až $\frac{1}{5}$ hmotnosti oceli při stejné pevnosti konstrukce. Vše záleží na výrobním procesu a zvoleném uspořádání vláken. Další výhodou je v některých aplikacích elektrická a tepelná vodivost – pro elektromagnetické stínění, možnost galvanického pokovování, odvod škodlivého tepla. Zlepšení vodivosti se může dosáhnout ku příkladu přidáním uhlíkových nanotrubiček. Nanomateriály zde zvyšují i odolnost proti vesmírnému prostředí. Možnosti aplikace CFRP jsou zatím stále ve fázi výzkumu, velký potenciál je vkládán do využití v oblasti sekundárních strukturálních prvků. [152][153][154]

PMC kompozity se skládají z termoplastických polymerů, elastomerů nebo reaktoplastů, zajišťující materiálu nízkou hmotnost, odolnost proti korozi, tepelnou a elektrickou izolaci, dobré optické vlastnosti, jednoduchou tvarovatelnost, nízké výrobní náklady, a vyztužení v podobě dlouhých vláken S-skla, uhlíku, aramidu aj., které zvyšují jinak nedostatečnou pevnost a tuhost. Společně mají dobrou odolnost proti opotřebení a oděru a únavě. Jejich omezení spočívá ve špatné odolnosti proti vysokým teplotám, při teplotách větších než přibližně 300 °C polymery degradují. Používají se v satelitních systémech a konstrukci, např. i v raketoplánech. [155]

MMC kompozity je složen z kovové matrice a kovového, keramického či jiného vlákna. Příklady používaných kombinací: bórová vlákna v hliníkové matrici (např. rám a žebra ve střední části trupu a podvozku raketoplánu), vlákna z karbidu křemíku v matrici z titanu, hliníková vlákna v matrici z oxidu hlinitého, uhlíková vlákna v hliníkové matrici (např. anténa pro Hubbleův teleskop (Obrázek 5.25)), vlákna karbidu křemíku v hliníkové matrici (v elektronickém systému družic GPS). V porovnání s CMC kompozity má menší tepelnou odolnost, lepší pevnost a tuhost na jednotku hmotnosti, lepší odolnost proti únavovému poškození, horší odolnost proti korozi a vyšší cenu. V kosmickém průmyslu nachází využití i částicové vyztužení MMC, nicméně zde je nejdůležitější správná volba částic/matrice a čistota kovu. Časté kombinace: karbid v křemíku v hliníkové matrici, slitina Al-Fe-V-Si v hliníkové matrici. Nabízí se zde i možnost výroby součástí pomocí 3D tisku. Celkově MMC kompozity jsou atraktivní pro strukturální části, elektronické součástky a nádrže v kryogenním prostředí. I přes veškeré výhody brání rozšířenějšímu použití těchto kompozitů jejich vyšší cena, složitější výroba a spolehlivost. [156]



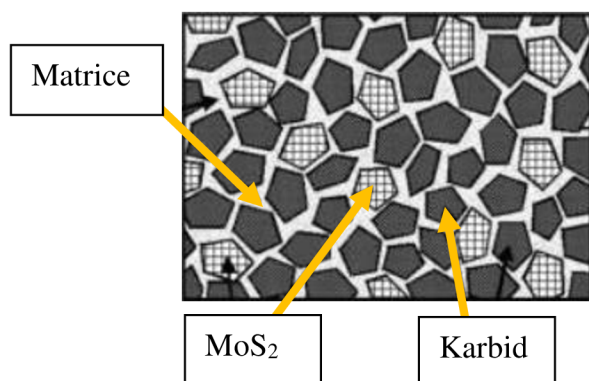
Obrázek 5.25: Anténa z MMC na Hubbleově teleskopu [156]

Lamináty s kovovými vlákny („Fiber Metal Laminates“, zkratka FML) je název pro vyztužené hliníkové plechy střídané se s vlákny vyztuženým adhezivem. Tímto spojením se získá korozní odolnost, pevnost, odolnost, odolnost proti únavovému poškození, tepelná izolace, nízká hmotnost a cena. Jako vhodné vlákno se ukazuje uhlíkové vyztužené epoxidovou pryskyřicí. Lamináty z uhlíkových vláken s pryskyřicí s nízkou absorpcí vlhkosti (např. kyanatany) mají vysokou tuhost a vysokou tepelnou vodivost, proto se využívají tam, kde je za potřebí zachovat tvar kvůli přesnosti – optické přístroje, solární panely a s tím spojené struktury. Hliníko-uhlíkový epoxidový laminát má díky uhlíkovým vláknům větší pevnost v tahu a ohybu, dobrou pevnost i na rozhraní a velmi dobrou odolnost proti poškození, únavě materiálu, než v případě se skleněnými vlákny či běžně používané kovy, ovšem zároveň vzniká problém s galvanickou korozi. Aplikován byl například jako dveře nákladového prostoru. [133][152]

Mezi typicky používané sendvičové materiály patří hliníkové voštinové jádro, které je mezi hliníkovým potahem či potahem s uhlíkovým vláknem. Jedny z největších sendvičových konstrukcí (o průměru až 8 m) se použily pro raketový nosič SLS. Potahové desky jsou tvořeny uhlíkovými vlákny a jádro je voštinové z hliníku. Kvůli své velikosti byla použita speciální systém výroby, která zaručuje méně spojů, které jinak oslabují výhody použití kompozitu. Sendvičová struktura s hliníkovými potahy a hliníkovým jádrem je využívána především díky své schopnosti pohlcování energie a velké ohybové tuhosti, dále např. nízká náchylnost na proces odplyňování (viz. kapitola 3.3.1). Kromě konstrukce ji najdeme i v systému napájení, pohonném systému, systémy tepelné regulace a systémy pro stabilizaci a orientaci. [116][133][152]

Předmětem výzkumů jsou i různé multifunkční povlaky, jedním z nich je i nanokompozitní povlak. Je vyroben procesem vypařování s matricí ze zlata vyztuženou yttriem stabilizovaným oxidem zirkoničitým, dále zapouzdřen s amorfním sulfidem molybdeničitým, který se chová jako suché mazivo a s karbidem se strukturou podobnou diamantu, který dodává pevnost a odolnost proti opotřebení (

Obrázek 5.26). Výsledkem je povlak, který by pomohl kosmickým prostředkům odolat při velmi vysokých i kryogenních teplotách ve vakuu. [152]



Obrázek 5.26: Struktura nanokompozitního povlaku [152]

Další hojně využití kompozity nachází v různých vzpěrách, násadách pro nástroje, na spojovacích součástech mezi jednotlivými stupni rakety a v oblasti motorů. Části, kde je uloženo tuhé palivo pro motory, se vyrábí z velmi pevných uhlíkových vláken. Tlakové nádrže na kapalné palivo mohou být obalené ještě kompozitem s uhlíkovými vlákny v epoxidové pryskyřici. [133]

Kompozit má potenciál také v ochraně prostředí proti dopadu kosmického smetí. Jejich velkou výhodou, kromě dostatečné ochrany, oproti např. kovovým štítům je flexibilita. Jedním z nadějných kandidátů by mohl být kompozit z oblasti ACA. ACA kompozity („Advanced composite armors“) jsou složeny z vrstev keramiky, polymerní matrice vyztužené vlákny, kovového plátu a elastomeru. Vnější vrstva vláknového kompozitu, např. skleněné vlákno v epoxidové matrici, zajišťuje určitou soudržnost materiálu, chrání před vlivy elektromagnetického pole a chrání další vrstvu, keramiku, před opotřebením. Keramické destičky jsou hlavní balistickou ochranou, protože dokáží odolat tlakovému namáhání způsobenému střelou. Zatížení se rozloží na keramické vrstvě a na další vrstvě kompozitu. Ta zároveň tvoří oporu keramické vrstvě a udržuje pohromadě poškozenou destičku. Vrstva musí mít velkou tuhost, aby nedocházelo k ohybu, který by dále mohl poškodit destičky. Mezi tyto vrstvy se vkládá guma (např. EDPM elastomer), která částečně utlumí náraz a ochrání vedlejší destičky od poškození. Kovový plát chrání před elektromagnetickým zářením. Kromě účinnosti jednotlivých vrstev závisí také na celkové struktuře materiálu (rozložení vrstev, přidání dalších podpurných vrstev, tvar destiček, vyztužení vrchní kompozitní vrstvy kevlarovými vlákny atd.). [160]

V pilotovaných letech se kompozity velmi často používají jako materiály tepelné ochrany. Jejich teplotní odolnost a nízká teplotní roztažnost snižují množství potřebného materiálu na ochranu a tím tak snižují celkovou hmotnost prostředí. Tyto speciální vysokoteplotní kompozity se také používají na horké komponenty u trysek raketových motorů.

Kompozity pro tepelnou ochranu se dají rozdělit na hlavní dvě kategorie: ablativní kompozity a kompozity s keramickou matricí. Ablativní kompozity mají často křemíková nebo uhlíková vlákna s fenolickou matricí, které absorbují teplo se změnou svého stavu. Keramické kompozity tvoří buď keramická nebo uhlíková vlákna v keramické nebo uhlíkové matrici. Nejběžnější materiál je zde kompozit s uhlíkovou matricí s uhlíkovými vlákny. [133]

Kevlar je obchodní značka para-aramidového vlákna, které mají větší pevnost v tahu a modul pružnosti. Jde o lehký materiál s hustotou 1,44 g/cm³. Používá se jako ochrana před dopadem kosmického smetí či malých meteoritů, např. na vesmírné stanici ISS (viz. Obrázek 5.3). Aramidová vlákna jsou citlivá na UV záření, ale protože kevlarová vrstva nebývá přímo vystavena slunečnímu záření a ani atomů kyslíku z atmosféry, není třeba jej proti tomu chránit. Do budoucích projektů byl vybrán jako jeden z hlavních materiálů pro flexibilní struktury, což by měly být několikavrstvé systémy z lehkých pružných materiálů, které chrání prostředí před různými vlivy okolí. [114][115]

Nomex je obchodní značka meta-aramidového vlákna, které je specifické svou tepelnou odolností a elektroizolačními schopnostmi. Použil se jako izolace pro některé části raketoplánu (nákladové dveře, ocasní konec atd.). Využívá společně s kevlarom i jako poslední bílá vrstva skafandru pro kosmonauty. [52][115][116]

5.7 Materiály tepelné ochrany

Způsoby tepelné ochrany se věnuje kapitola 3.4.1, tato kapitola obsahuje materiály, které se v minulosti použily a používají v rámci tepelné ochrany.

Jedním z prvních použití kompozitů pro kosmickou techniku byl ablativní štít návratového modulu Apollo (Obrázek 5.27) vyrobený z Avcoat, což je epoxidová novolac pryskyřice s křemíkovými vlákny ve fenolické voštinové matrici se skleněnými vlákny. [116]



Obrázek 5.27: Tepelný štít modulu Apollo [116]

Podobnou strukturu jako Apollo má i ablační štít víceúčelový prostředek Orion. Tepelný štít má sendvičovou strukturu, která je titanového voštinového jádra a potahu z uhlíkových vláken. Štít je dále pokryt ablační vrstvou Avcoat. Orion dále používá pro kompresní podložky speciální 3D tkané křemenné vlákna v pryskyřici („3D Multifunctional Ablative Thermal Protection System“) (Obrázek 5.28), které jsou schopné splnit tepelné i strukturální požadavky. [116]



Obrázek 5.28: Podložky ze speciálního 3D tkaného křemenného materiálu [116]

Pro tepelnou ochranu NASA vyvinula speciální druh keramicko-kompozitního materiálu UHTC (Ultra High Temperature Ceramics). Matrice je převážně tvořena z karbidů nebo diboridů (např. HfB_2 , ZrB_2 , HfC). Má velmi vysokou teplotu tavení, dobrou odolnost proti oxidaci v i za podmínek při návratu do atmosféry a taktéž dobrou odolnost proti tepelným šokům. Její použití by bylo vhodné pro ochranu ostrých náběžných hran, které mají lepší aerodynamické vlastnosti a jsou bezpečnější pro posádku na rozdíl od tupých náběžných hran. Příklady této keramiky jsou HfB_2/SiC a ZrB_2/SiC . [120][122]

Konkrétně ZrB_2/SiC je velmi vhodný kandidát pro ochranu ostrých náběžných hran, které mají menší odpor a větší poměr vztlaku ku odporu než hrany s větším poloměrem, ale také díky aerodynamickému ohřevu jsou více tepelně namáhané. Teplota na hranách při vstupu do atmosféry dosahuje přes 2000°C . Je potřeba najít optimální poloměr, který bude přijatelný jak z hlediska ohřevu, tak z hlediska poměru vztlaku ku odporu. Oxidy vznikající při oxidaci ZrB_2 a SiC pomáhají materiál chránit před ablací. [123]

V rámci programu ESA „Smart TPS“ ve spojení s mechanismy (zmíněným v předchozí kapitole) nejlepších výsledku zatím dosahuje náběžná hrana z kompozitu s keramickou maticí (CMC materiál). [124]

CMC je kompozit s keramickou maticí a keramickou výztuží, díky tomu se dá materiál zařadit mezi kompozity ale také keramiku. Kromě hlavních keramických vláken se jako výztuž mohou použít vlákna s krystalickou strukturou – uhlíková vlákna, vlákna z karbidu křemíku (SiC), oxidu hlinitého (Al_2O_3) atd. Důležité je, aby zůstala stabilní i nad přibližně 980°C . Používají se dlouhá (spojitá) i krátká (nespojité) vlákna, whiskery nebo i v některých případech nanovlákna. Výhodou krátkých vláken je větší odolnost proti šíření trhlin. Dlouhá vlákna přenesou větší zatížení. Typickými materiály pro výrobu matrice jsou karbidy, oxidy, nitridy boridy nebo i UHTC. Kompozit v mnoha ohledech předčí konvenčně používanou keramiku. Společnou mají jen vysokou tvrdost a stabilitu za vysokých teplot. Kompozit má velmi dobrou tuhost, korozní odolnost i za vysokých teplot a výbornou mechanickou, tepelnou i chemickou stabilitu. Na rozdíl od klasické keramiky je kompozit odolný proti teplotním šokům, má větší lomovou houževnatost a lépe snáší dynamické

zatížení. Další velkou výhodou, zvláště pro kosmické použití, je jeho nízká hmotnost, uvádí se až jedna třetina hmotnosti superslitiny niklu, kterou často nahrazuje. Mezi nevýhody se řadí jeho nízká pevnost ve smyku mezi jednotlivými vrstvy a s tím spojená delaminace. [130]

Společně s CMC materiály se v minulosti použily superslitinové panely, izolace a komponenty, které chrání před ablací. Ku příkladu CMC materiály a různé typy izolace byly testovány na prototypu záchranného prostředku NASA X-38. Kombinace CMC a „ablatorů“ otestovala ESA suborbitálním návratovým prostředkem ARD (Obrázek 5.29) a pouzdem MIRKA (Obrázek 5.30). [124]



Obrázek 5.29: Návratový prostředek ARD [127]



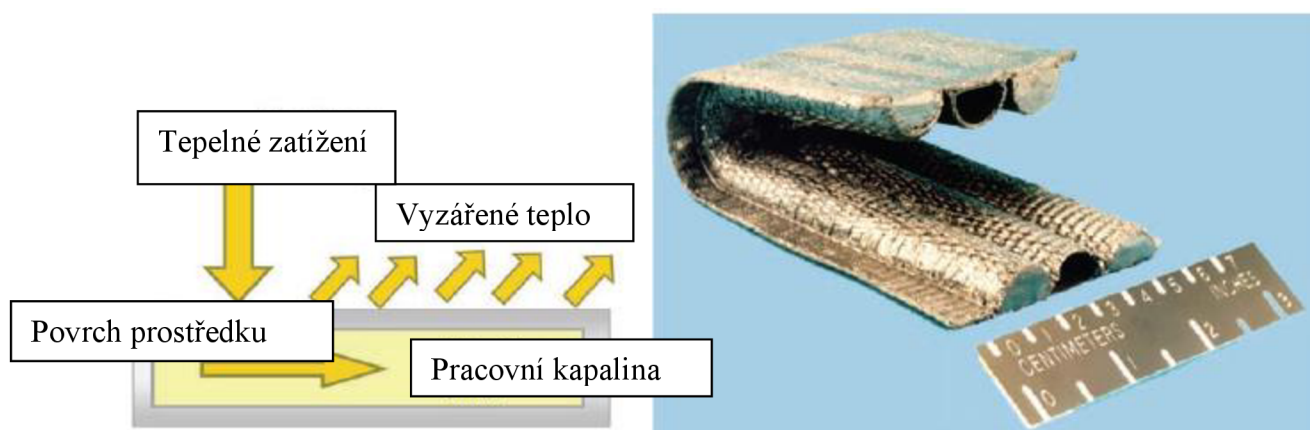
Obrázek 5.30: Návratové pouzdro MIRKA [124]

Návratové pouzdro MIRKA testovalo jednu ze zkoumaných typů ochran SPA (Surface protected ablator). Povrch je z kompozitu s maticí karbidu křemíku vyztužen uhlíkovými vlákny (C/SiC). Tento kompozit je velmi odolný proti teplu, má malou roztažnost a dobré chování v oblasti tribologie (malé tření). V nedávných letech byl upraven proces výroby. Byla upravena výroba matrice z polymerních částic, čím se snížila jejich cena. Pod povrchem se ukrývá „ablator“ a kanály pro únik plynů, které vznikají při zahřívání materiálu na vysoké teploty. V průběhu zpátečního průletu atmosférou „ablator“ pohltí vzniklé teplo a rozpadne

se. Plyny vznikající zahříváním ochladí povrch pouzdra přibližně na 1450 °C a proudí do mezní vrstvy. Nevýhodou této ochrany je, že před každým letem je třeba dát nový „ablator“. [128]

Tento koncept by měl být použitelný pro náběžné hrany s rozměry do 40 mm. [124]

Další mechanismus zkoumaný v projektu od ESA jsou zavedené trubky v náběžné hraně, které rovnoměrně rozvádí teplo z těch nejvíce zahříváných částí do méně zatížených (Obrázek 5.31). Do CMC materiálu by byly zavedeny trubky z alkalického kovu (např. sodík, lithium), které dle výzkumu nejlépe vyhovovali zatížení, tím se ovšem také zvýší celková hmotnost prostředku. Tento systém je schopen přenášet velké tepelné toky po delší dobu. [124][126]



Obrázek 5.31: Princip a příklad kompozitového povrchu se zabudovanými trubkami [126]

Největší zastoupení uhlíku na různých konstrukcích je v kompozitech.

Příkladem takového kompozitu je kompozit uhlík-uhlík neboli RCC (Reinforced carbon-carbon), který se skládá z uhlíkové matrice a uhlíkových vláken. Vyrábí se tak, že epoxidová pryskyřice, se kterou jsou naimpregnována vlákna, pomocí pyrolýzy se přetvoří na uhlík. Hustota materiálu a celkové jeho mechanické vlastnosti se upravují případnou další pyrolýzou. Používá se především kvůli své schopnosti přesouvat teplo z nižších vrstev materiálu nebo i jiných materiálů do vrchní vrstvy, která má nižší teplotu, a snižuje tím celkovou teplotu materiálu. Povrch je potřeba opatřit ochranným povlakem proti korozi, k tomu se například používal karbid křemíku. Karbid se nanáší za vysokých teplot a při chlazení se ve vrstvě objevují praskliny. Tyhle praskliny se sice uzavřou, jakmile se zvýší teplota okolí, ale to nám způsobuje změnu chování materiálu za různých okolních podmínek, což může vést k selhání celé součásti prostředku. Materiál dokáže odolat vysokým teplotám, proto se používal na náběžné hrany a nosový kužel raketoplánů, kde se dosahovalo teplot přes 1200 °C (Obrázek 5.32). Materiál není odolný proti srážkám a snadno se poškodí. Právě poškození RCC od srážky s kouskem izolace stojí za katastrofou raketoplánu Columbia. Přidáním karbidu křemíku do matrice vznikne kompozit s vysokou odolností proti opotřebení a oděru, nízkou hustotou, dobrou odolností proti tepelným šokům v porovnání pouze se

strukturou uhlík-uhlík neobohacenou o křemík. Nabízí se aplikace v brzdách, tryskách, předových krytů nosných raket a také v tepelné ochraně. [52][108][152]

■ Tepelná
ochrana z RCC



Obrázek 5.32: Izolace z RCC na raketoplánu [132]

5.8 Porovnání vybraných materiálů a vlastností

Tabulka 5.2 je přehledem vybraných materiálů zmiňovaných v této kapitole pro porovnání vybraných vlastností. Jak již bylo na začátku zmíněno, v kosmickém průmyslu nestačí porovnávat pouze mechanické vlastnosti, ale je třeba srovnat i vlastnosti fyzikální. Například v tabulce lze vidět, že oceli a vysokoteplotní slitiny mají mnohem větší měrnou hmotnost než slitiny hliníku a hořčíku. Ovšem oceli a vysokoteplotní slitiny mají mnohem větší modul pružnosti v tahu. Pro srovnání je proto výhodnější poměr modulu pružnosti v tahu a hustoty E/ρ . Největší hodnotu poměru má uhlíkovo-epoxidový kompozit s vrstvy [0/+45/90], naopak nejnižší hodnotu má slitina Nitinol, u které je však hlavní vlastností schopnost vrácení původního tvaru. Jaký materiál má tedy nejlepší vlastnosti velmi závisí na jeho konkrétním použití v kosmické technice.

Tabulka 5.2: Přehled vybraných vlastností zástupců hlavních materiálů

	Hustota ρ	Pevnost v tahu	Modul pružnosti v tahu E	Poměr E/ρ
	[g/cm ³]	[MPa]	[GPa]	[GPa*g/cm ³]
Slitiny hliníku				
7075-T7352	2,8	460	71	25,36
6061-T6	2,71	290	68	25,09
Slitiny titanu				
Ti6Al4V	4,43	900	110	24,83
NiTi	6,45	960	75	11,63
Slitiny hořčíku				
AZ31B	1,77	270	45	25,42
AZ61A	1,8	310	44,8	24,89
Oceli				

Maraging 200	8	1380	181	22,63
Maraging 350	8,1	2413	200	24,69
Speciální vysokoteplotní slitiny				
Inconel 718	8,22	1280	203	24,70
Rene 41	8,25	1400	218	26,42
Kompozity - vrstvy [0/+45/90]				
T800H/epoxid (uhlík/epoxid)	1,6	820	60	37,5
Kevlar 49/epoxid	1,4	500	30	21,43

6 Zkoušení materiálu

V praxi se výběr materiálu kromě předchozích zkušeností zakládá i na výsledcích testování vzorku materiálu. Výsledky testů pak pomohou rozhodnout, který materiál se pro daný účel v daném prostředí hodí nejlépe. Včasným odhalením problémů se zvýší účinnost, ušetří se a zlepší se bezpečnost, což je důležité především u letů s lidskou posádkou.

U testování materiálů se nejvíce pozoruje: chování materiálu v závislosti na různých vnějších vlivech, schopnost odolávání nárazům, únava, koroze, reaktivita, tepelná vodivost, tepelná roztažnost a vyzařování tepla. Jednotlivé procesy testování jsou popsány v příslušných standardech, např. ISO, ASTM, AMS, SAE, DPS, ECSS aj. a garantují tak určitou úroveň.

Jedním z prvních testů může být chemická analýza. Ukazuje přesné složení vzorku materiálu, odhalí a identifikuje nečistoty, slouží k ověření požadovaného materiálu pro výrobce. Provádí se různými zařízeními a technikami, např. XRD (rentgenová difrakce), FTIR (infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací), SEM/EDX (energeticky disperzivní spektroskopie rastrovým elektronovým mikroskopem).

Mechanické testování se řadí do destrukčních metod zkoušení, kterými se zjišťuje chování materiálu při statickém a dynamickém zatěžování. Patří sem únavové zkoušky, smykové, tahové, zkoušky zjišťující zbytkové napětí, tvrdost povrchu, zkoušky vrubové houževnatosti atd. Metody závisí na součásti, pro kterou je testovaný materiál určen.

Metalurgické testy zjišťují vlastnosti kovů společně s chemickou analýzou mechanickými zkouškami. Nejčastěji se určuje typ materiálu, velikost a kvalita zrn, mikrostrukturní analýza, poruchová analýza. Slouží také k certifikaci nově použitého materiálu. Při makroskopické analýze se zjišťují ku příkladu kontaminace, drsnost povrchu a případné poškození povrchu, hmotnost povrchové úpravy, pasivace, teplota tavení atd. Mikroskopická analýza využívá rastrový elektronový mikroskop, čímž se dá zjistit např. velikost zrna, koroze na hranicích zrn, možnosti svařování, pórovitost, fraktografie a mnoho dalších.

Při termální analýze se měří mechanické, chemické, fyzické a termodynamické změny v materiálu pomocí změn teplot. Pomáhá zjistit další detaily o materiálu – jeho krystalické nebo amorfní strukturu, koeficient roztažnosti, teplotu tavení, specifické teplo, teplota skelného přechodu, další specifické teploty při změnách aj. Používají se metody DSC („Diferential scanning calorimetry“), která měří teplotu skelného přechodu, přechodné fáze aj., DMA („Dynamic mechanical analysis“), která měří viskózní elastické chování materiálu a z toho vyvozující další vlastnosti, TGA („Thermogravimetric analysis“), měří změny v hmotnosti, TMA („Thermomechanical analysis“), která je společně s TGA určena pro polymerní materiály.

Výše uvedené zkoušky společně s enviromentální zkouškou, která může ověřit, zda je jedná o hazardní materiál a různé regulace s tím spojené, se mohou nabízet i v rámci jednoho balíčku testů ke zjištění vlastností materiálu. [157]

Nedestruktivní metody jsou nezbytnou součástí zkoušek v kosmickém průmyslu. Používají se i pro součástky, sestavy, svary, celý produkt, při kterých se vzorek nepoškodí. Metody zkoušek: počítačová tomografie, rentgen, vizuální inspekce, EC („Eddy current testing“), která měří změny v magnetickém poli, které vzniklo připojením kovového materiálu k elektrickému proudu, LPI („Liquid penetrant inspection“) zkoušky těsnosti, pomocí ultrazvuku, akustické metody.

Průmyslový tomograf pracuje podobně jako lékařský (úroveň pohlcování rentgenového záření podle hustoty a tloušťky materiálu), pouze s rozdílem, že skener je zde nehybný a otáčí se zkoumaným objektem. Vznikne 3D model, který umožňuje detekovat vnitřní vady, kontrolovat svarové spoje a elektronické komponenty. Vhodnými materiály pro tento typ zkoušek jsou plasty, CFRP, hliník, hořčík.

Radiografie umožňuje testování širokého rozsahu materiálu. Zahrnuje různé metody, nejčastěji používanou metodou je digitální radiografie, kde je rentgenový obraz přenesen na obrazovku přímo a odpadá úkony spojené s vyvoláváním filmu. Obraz má vyšší kvalitu a stačí menší dávka rentgenového záření. Aplikuje se pro zjištění koroze např. pod izolací, vad ve svarovém spoji, ke kontrole kompozitů atd.

LPI spočívá v aplikaci penetrantu na očištění povrch zkoumaného objektu. Po určitém čase se přebytek kapaliny setře a aplikuje se prášek reagující s penetrantem, který barevně zvýrazní defekty např. ve svarech nebo odlitku. Zkouška je určena pro nekovové materiály.

Inspekce pomocí ultrazvuku využívá zvukových vln k detekci vad nebo ke zjištění tloušťky materiálu. Elektronické převodníky vysílají vysokofrekvenční signál. Odraz vln od materiálu utváří nějaký obraz, ze kterého lze vyčíst vlastnosti materiálu. Podle různých požadavků se vybere vhodná metoda. Kontaktní ultrazvuková zkouška se používá tam, kde nelze použít radiografii, protože nejsou přístupné všechny strany zkoumaného objektu. Metoda ICT („Immersion ultrasonic inspection“) spočívá v ponoření objektu do vody a následném vysílání zvukových vln ze sondy. Využití nachází tam, kde nemusí dobře fungovat kontaktní metoda, např. povrch s větší drsností.

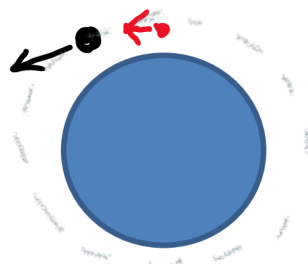
Zkouška magnetickými částicemi je nejrychlejší testování kontroly povrchu u feromagnetických kovových materiálů, protože se využívá materiálem generované magnetické pole. [157]

7 Analýza účinku dopadu malého objektu

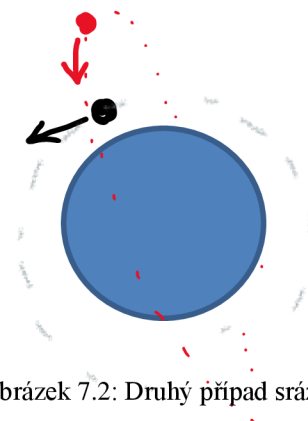
Kompozitní materiály, které dnes nacházejí významné uplatnění v letectví, se postupně začínají využívat také v konstrukci kosmických zařízení jako jsou umělé družice Země, kosmické stanice, kosmické sondy, ale také v raketové technice. Jejich přednosti v konstrukcích letadel jsou nesporné a stejně příznivě se projevují i v oblasti kosmické techniky, byť specifické podmínky provozu těchto zařízení přinášejí i řadu problémů, se kterými se v provozu letadel obvykle neseťkáváme. K velmi závažným problémům, které mohou mít pro kosmickou techniku fatální následky, nebo mohou vést k rozsáhlému a nebezpečnému poškození, je střet kosmického prostředku s takzvaným kosmickým smetím. Pod tímto pojmem rozumíme hmotné elementy přírodního nebo umělého původu od hmotnosti několika gramů až po několik desítek, případně i stovek kilogramů, které se pohybují, stejně tak jako například umělé družice Země, po různých oběžných drahách (viz kapitola 3.3.8). Vzhledem k vysokým rychlostem, kterými se pohybují, se vyznačují mimořádně vysokou hodnotou kinetické energie a jakýkoli střet s kosmickým tělesem může vést k rozsáhlému poškození kosmické lodi. Jako příklad je možno uvést výsledky výpočtů amerických vědců kteří uvádějí, že kosmické smetí o hmotnosti několika gramů o rozměrech řádově v milimetrech může vést k celkovému zničení kosmické sondy New Horizons, která opustila Sluneční soustavu a letí do vzdálených hlubin vesmíru.

Takovému poškození jsou samozřejmě vystaveny také družice, které mají některé části vyrobené z kompozitních materiálů. Uvědomíme-li si skutečnost, že částice kosmického smetí se pohybují rychlostmi řádově v km/s, pak nejen kompozitové části družic budou, i přes své nesporné kvality, jen velmi obtížně odolávat nárazům těles s tak vysokou kinetickou energií, která mnohonásobně překračuje i energie střel vystřelovaných z hlavnových zbraní. Jen pro ilustraci uvádím, že tyto střely mají v okamžiku výstřelu rychlost řádově ve stovkách metrů za sekundu (přibližně 500-1000 m/s), přičemž tato rychlost se při pohybu v atmosféře velmi rychle a významně snižuje, důležitou roli zde hraje tedy vzdálenost mezi hlavní a testovacím objektem.

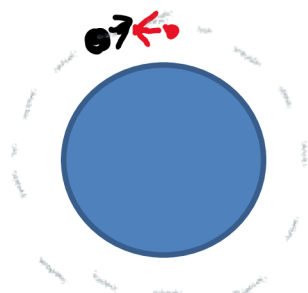
Účinek dopadu tělesa závisí na mnoha parametrech – velikost a tvar tělesa, úhel dopadu, materiál prostředku, balistické vlastnosti materiálu prostředku a rychlost v okamžiku dopadu. Velmi důležitý je tu aspekt oběžných drah obou těles. Nejmenší efekt by pravděpodobně měl první případ (Obrázek 7.1), kde smetí dobíhá prostředek, k tomu nebude docházet často. V druhém případě (Obrázek 7.2), jenž je ve vesmíru nejběžnější, se dráhy křížují. Při kolmé srážce (Obrázek 7.3) se díky vysokým rychlostem na oběžné dráze přenesou do prostředku nejvíce energie z těchto tří případů.



Obrázek 7.1: První případ srážky



Obrázek 7.2: Druhý případ srážky



Obrázek 7.3: Třetí případ srážky

Při balistické střelbě je vyvinuta velká síla v krátkém časovém úseku, to má často větší zničující účinky než proporcčně menší síla aplikovaná po delší časový úsek. Parametry, na kterých závisí celkový odpor materiálu z pohledu testovaného vzorku, jsou tvrdost, pevnost, mikrostruktura a tloušťka vzorku.

Dříve, než jsou kompozitní materiály použity na jakémkoliv druhu kosmické techniky, jsou podrobeny mimořádně náročným a mnohdy i poměrně nákladným testům, které mají za úkol prověřit jejich chování a jejich možnosti v takovém nestandardním prostředí, jako je oběžná dráha Země. Jednou z těchto zkoušek jsou samozřejmě zkoušky, které mají za úkol prověřit schopnosti materiálu odolat nárazům kosmického smetí. Tyto zkoušky se při prvním

posouzení jeví jako relativně snadno zvládnutelné. Realita je však výrazně jiná, právě z důvodu, jak bylo již výše uvedeno, že srážka může proběhnout za rychlostí výrazně větších, než jaké jsme schopni v běžných pozemských podmínkách a běžnou zkušební technikou realizovat. Příprava a realizace takové zkoušky probíhá v širokém kolektivu pracovníků na specializovaných pracovištích a je nesmírně technicky náročná a v podmínkách leteckého ústavu je tedy prakticky nemožná.

Aby bylo alespoň částečně naznačeno, jak taková zkouška probíhá, jaké jsou její výsledky a jak se projevuje odolnost materiálu, jsou v první fázi uvedeny přípravy, postupy zkoušení a analýza výsledků v případě poškození vzorku střelbou z běžně dostupných hlavnových zbraní, ráže 7,62 a 20 mm, kde rychlost střely je, jak již bylo uvedeno, mezi 600 až 800 m/s. To je asi desetkrát méně než kontaktní rychlosti kosmického smetí a umělé družice na oběžné dráze Země.

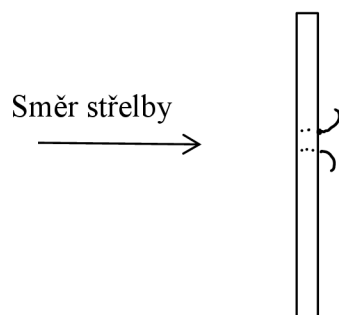
Jedním ze způsobů, jakým by se dalo zabránit vnitřnímu poškození prostředku na zemi, je zvolit volba větší tloušťky materiálu ochranného pláště. To je ovšem u kosmických prostředků, kde záleží na každém gramu, nepřístupné, proto je kladen větší důraz na správnou volbu materiálu. Tato kapitola není pojata jako pevnostní analýza, ale řeší schopnost struktury materiálu ovlivnit průchod cizího tělesa.

7.1 Střelba do duralového vzorku

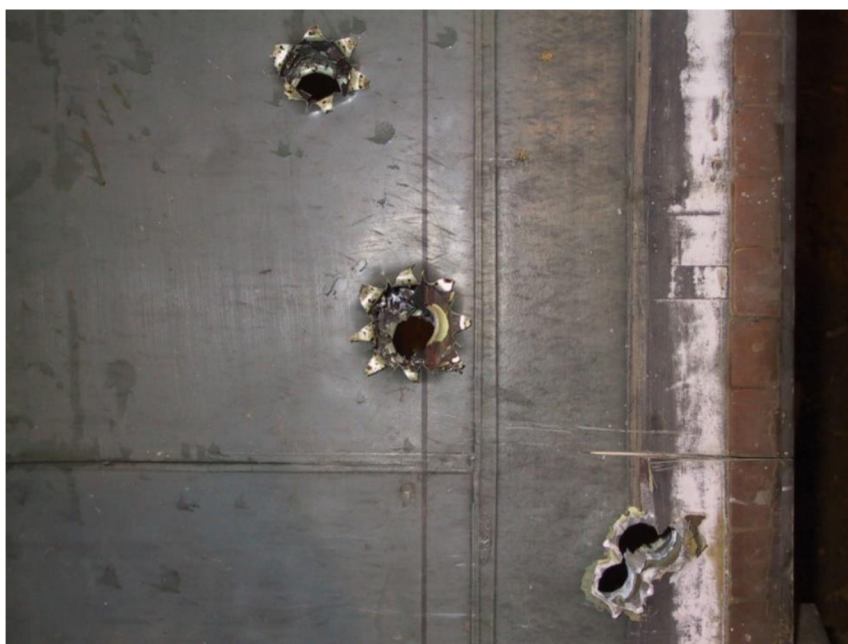
Poznatky v kapitole 7 vychází z výzkumných zpráv z experimentů prováděných v předchozích letech na Univerzitě obrany a rovněž byly konzultovány s odborníky z Katedry zbraní a munice. Vlastní experiment nemohl být proveden kvůli vysoké technické a finanční náročnosti.

V této kapitole se provádí rozbor duralových vzorků, jelikož jsou slitiny hliníku nejpoužívanější materiály v kosmickém průmyslu.

Tloušťka materiálu je kritickým parametrem, jak se bude materiál chovat při průstřelu. K ověření této myšlenky byly prováděny experimenty se vzorky z duralu. Za tenké vzorky se považují takové, které mají poměr tloušťky ku průměru ráže menší než 1. Charakter poškození tenkých vzorků o rozměrech 1 až 2 mm je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 7.4). Na výstupu materiál vytvoří takový „hvězdicový“ tvar s ostrými hranami (Obrázek 7.5), ty jsou potom zdrojem trhlin, které se časem dál rozvíjí. Tato fáze se u kosmického prostředku neřeší, protože při úplném průniku ochranného pláště velmi často dojde k fatálnímu poškození prostředku. Při průstřelu tenkého vzorku platí, že průměr otvoru je vždy větší než průměr střely, ku příkladu při střelbě ráže 7,62 mm vznikne otvor 8-8,5 mm.



Obrázek 7.4: Schématické znázornění výstupu po střelbě do tenkého duralového vzorku



Obrázek 7.5: Typické poškození tenkého vzorku na výstupu

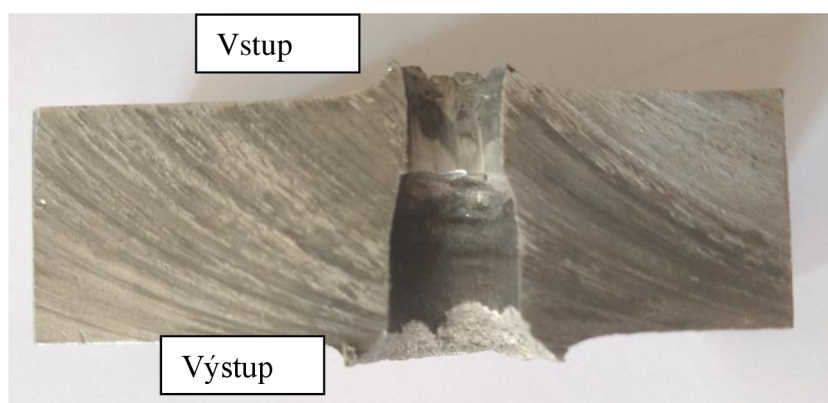
Při větší tloušťce, v případě duralových vzorků 10-20 mm, se charakter poškození změnil. V krátkém úseku po dopadu, se působením tlaku od střely materiál vytlačuje na povrch, kde vytvoří útvar znázorněný na obrázku (Obrázek 7.6). Materiál, který nebyl vytlačen posouvá střela před sebou a stlačuje, to vede k utržení části materiálu na obvodu výstupního otvoru (Obrázek 7.7). Průměr otvoru ve vzorku je zde vždy menší než průměr střely kvůli působení elastických sil při průchodu střelou, které vrací materiál zpět. Na jednom z obrázků (Obrázek 7.8) je vidět, jak v počáteční fázi docházelo k vytlačování přebytku materiálu, následně k lomu a ke konečnému utržení materiálu u povrchu. Na dalším obrázku (Obrázek 7.9) lze vidět porovnání dvou různých vzorků – vzorek vpravo, s tloušťkou 1,5 cm, byl prostřelen střelou ráže 20 mm, vzorek vlevo, s tloušťkou 1,9 cm, prostřelen ráží 7,62 mm. Na pravém vzorku je na vstupu mnohem více vytlačeného materiálu.



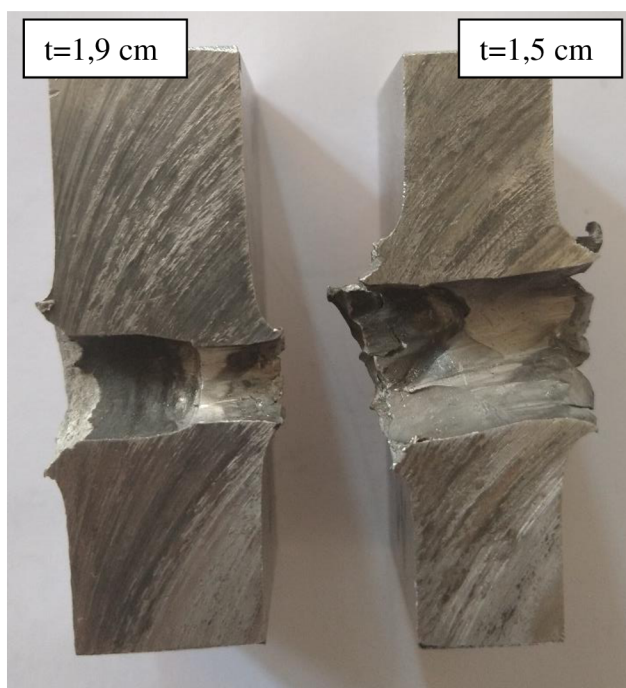
Obrázek 7.6: Vstup po střele v tlustém duralovém vzorku



Obrázek 7.7: Výstup po střele v tlustém duralovém vzorku



Obrázek 7.8: Řez tlustým duralovým vzorkem



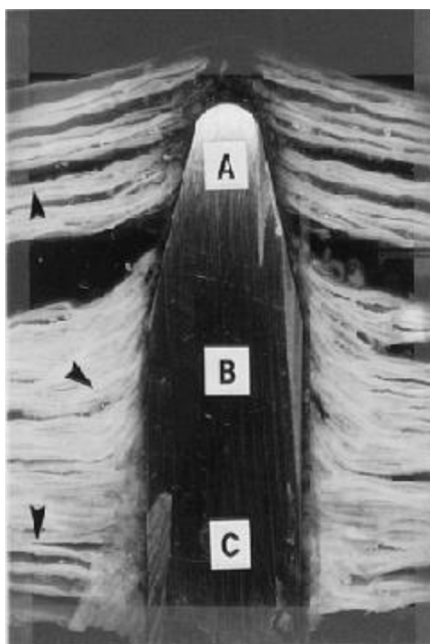
Obrázek 7.9: Řezy vzorku 1,5 cm (vpravo) a vzorku 1,9 cm (vlevo)

Pro kosmický průmysl z experimentu vyplývá, že samotný dural (podobně i hliník) při tloušťce až 2 cm neposkytuje žádnou ochranu před účinky srážky s kosmickým smetím, které se pohybují desetinásobnou rychlostí, než byla rychlost střely.

7.2 Střelba ostrou střelou do kompozitu

Jak již bylo řečeno, při dopadu záleží také na tvaru smetí. Proto byly experimenty prováděny klasickou střelou a plochou střelou (válečkem). Opět tyto experimenty byly prováděny v zahraničních pracovištích. Tato kapitola a kapitola 7.3 z těchto poznatků čerpají. Střelba ostrou střelou do kompozitu má podobný charakter jako do tenkého duralu popsany v kapitole 7.1. Na výstupu vznikne podobný hvězdicovitý útvar z roztřepených vláken, matrice se při průletu rozdrtí a vyletí ven. Na obrázku (Obrázek 7.10) jsou zaznačeny oblasti různých procesů při poškození vzorku ostrou střelou při rychlosti 200 m/s. Ve vstupní oblasti C je patrná delaminace pouze v malé oblasti u povrchu, vlákna se zde viditelně nevychylují jako v dalších oblastech. V oblasti B je nejvýraznější velké vychýlení vláken, přizpůsobují se tak expanzi, kterou způsobuje střela. U vrstev v oblasti A je patrná velmi rozsáhlá delaminace. Tendence vláken, lehce se protahovat před špičkou střely, značí membránový typ namáhání.

Charakter poškození z pohledu střely závisí i na tom, jestli se jedná o jednosměrný vláknový kompozit nebo vícesměrnou tkaninu. Při průchodu střely jednosměrným vláknovým kompozitem dojde k roztažení vláken okolo střely, zvláště okolo klasické střely. Poškození tohoto kompozitu je tak snadné i při větším počtu vrstev. Poškození vícesměrné tkaniny je více rozebráno v kapitole 7.3.

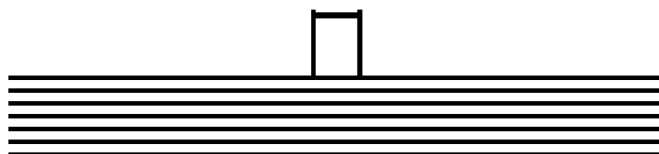


Obrázek 7.10: Vzorek kompozitu při průstřelu ostrou střelou [159]

7.3 Střelba plochou střelou do kompozitu

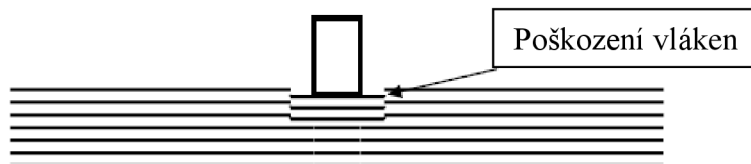
Střelba plochou střelou je zde popsána podrobněji, kvůli pravděpodobně větší podobnosti s tvarem kosmického smetí.

Průnik střely do vláknového kompozitu o větší tloušťce se může rozdělit na 5 fází. První fází je dopad, střela narazí na povrch vzorku s určitou rychlostí, čímž dojde v té oblasti ke vzrůstu napětí (Obrázek 7.11).



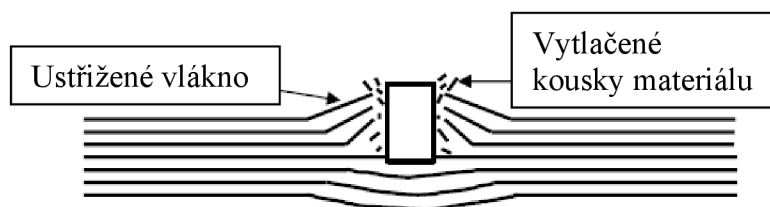
Obrázek 7.11: První fáze průstřelu kompozitu [158]

Druhá fáze – hydrostatická komprese – projektil ztrácí část kinetické energie a dochází k hydrostatické kompresi vrstev kompozitu (Obrázek 7.12). Po obvodu plochého projektilu dochází ke značné koncentraci napětí, které způsobuje primární poškození vláken. Důležitým parametrem je hustota vzorku zkoumaného materiálu.



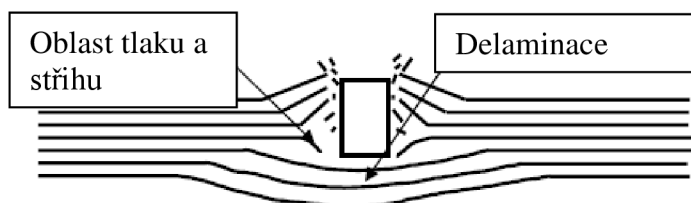
Obrázek 7.12: Druhá fáze průstřelu kompozitu [158]

Ve třetí fázi dochází dále k poškození tlakem-stříhem, přebytek materiálu je tlačěn k porušenému povrchu (Obrázek 7.13).



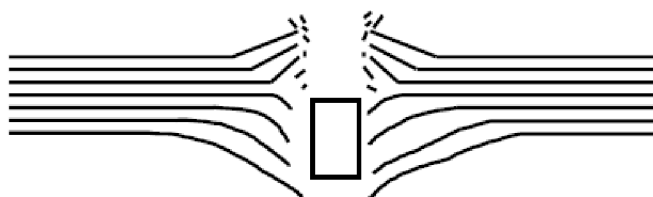
Obrázek 7.13: Třetí fáze průstřelu kompozitu [158]

Při čtvrté fázi dochází k membránovému napětí, jelikož projektil tlačí na druhou polovinu kompozitu (Obrázek 7.14).



Obrázek 7.14: Čtvrtá fáze průstřelu kompozitu [158]

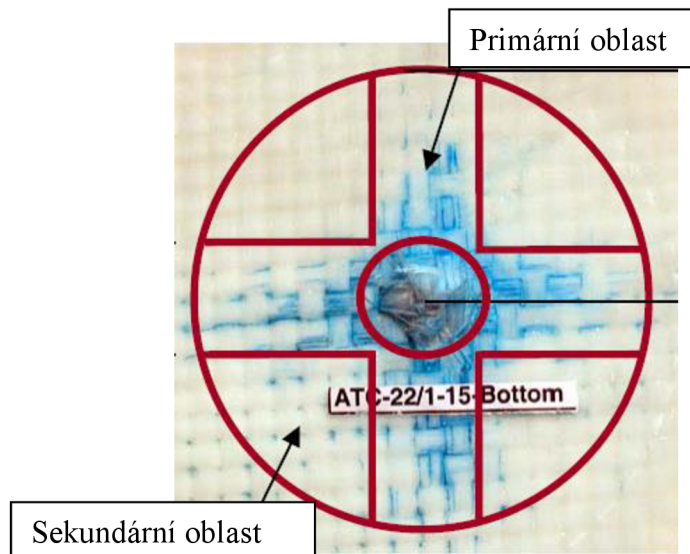
V poslední fázi střela vychází ze vzorku pod určitým dynamickým napětím, které se projeví vibrační strukturou (Obrázek 7.15).



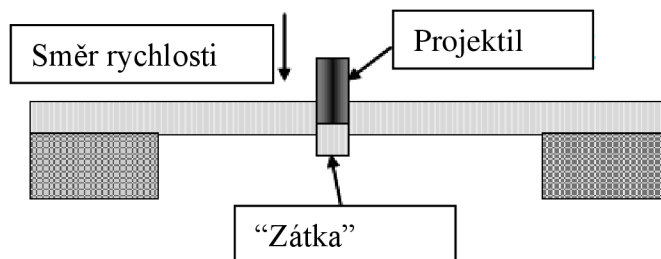
Obrázek 7.15: Pátá fáze průstřelu kompozitu [158]

Při nárazu dochází k přenosu energií. Část energie zůstane projektilu, část jde do úlomků materiálu a část způsobuje poškození materiálu v podobě delaminace, porušení matrice, poškození primární oblasti vlákna, deformace sekundární oblasti vlákna, tření mezi střelou a vzorkem.

U tkaného kompozitu chování vláken v okolí střely lze popsat rozdělením na dvě oblasti: oblast primárních vláken a oblast sekundárních vláken (Obrázek 7.16). Primární vlákna jsou při dopadu střely největším zdrojem odporu. Celková energie absorbovaná primárními vlákny se skládá z objemu primárního vlákna a z energie dané selháním, ta je dána průběhem tahového napětí a deformací od dopadu až po lom. V oblasti sekundárních vláken je hlavní deformace. Míra deformace je závislá na tom, v jaké vzdálenosti se vyšetřovaný bod nachází – čím blíže místu dopadu, tím je deformace větší. Celková energie sekundárních vláken je přímo úměrná modulu pružnosti střely a deformaci v daném bodě. Zpočátku tření není moc podstatné, jelikož hlavním odporem jsou vlastnosti především vláken. Až při porušení všech vláken tvoří největší odpor tření, kdy jeho velikost závisí na vlastnostech materiálu a střely. Vědci vyzorovali, že důsledkem vysokých rychlostí a smykového napětí po obvodu střely se vytvoří před výstupem střely tzv. zátka (Obrázek 7.17), do které přechází část kinetické energie. [158]



Obrázek 7.16: Naznačení oblastí primární vláken a sekundárních vláken [158]



Obrázek 7.17: "Zátka" z materiálu [158]

Při přesunech energie závisí na typu materiálu. Výše uvedený případ, kde se většina energie přemění na poškození primárních vláken a deformaci sekundárních vláken, platí pro houževnatější kompozity. U křehkých kompozitů se nejvíce energie spotřebuje při tvorbě „zátky“ a při deformaci sekundárních vláken. [158]

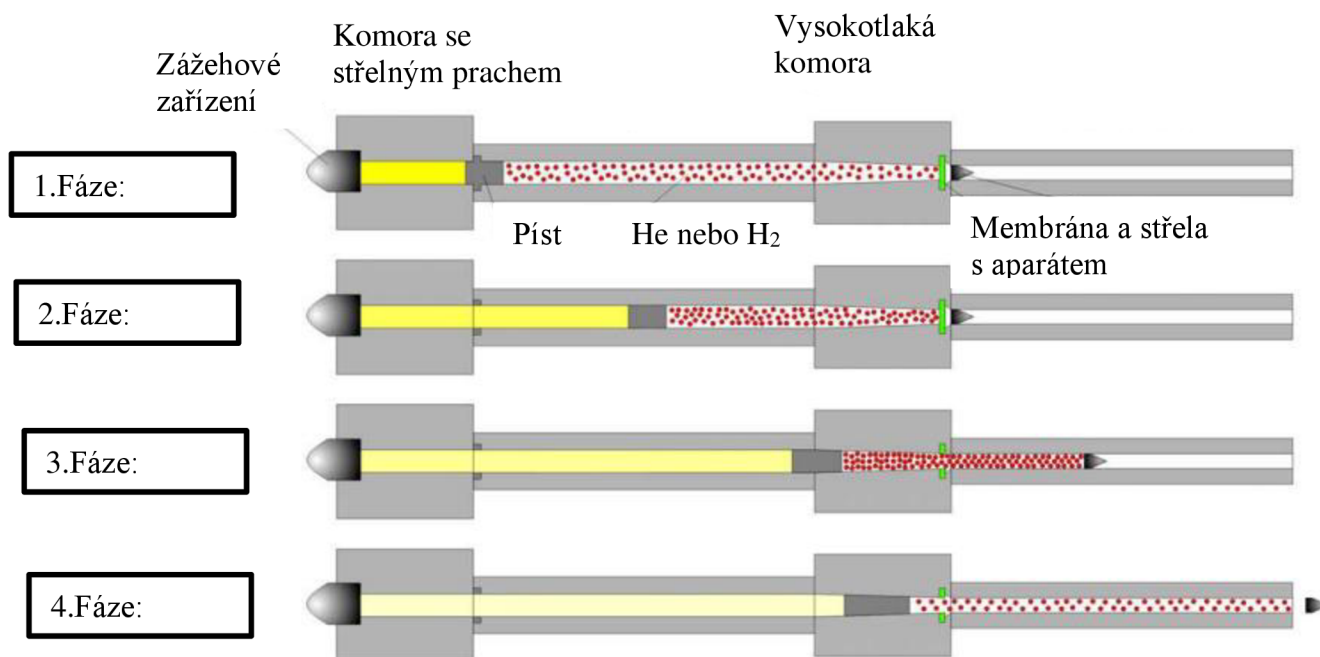
Toto byl případ, kdy váleček narazí do vzorku přímo plochou stranou a kolmo na směr vláken, kde mají vlákna největší šanci poškození odolat. K tomu ale v reálných situacích spíše docházet nebude. Řešením může být použití více vrstev tkaniny s kolmo orientovanými vlákny. Při dopadu tělesa se energie odvede při možném menším poškození vláken a vlákna jedné vrstvy budou bránit roztažením vláken druhé vrstvy. Nejlepším řešením se jeví použití více vrstev tkaniny nejen s kolmo orientovanými ale i diagonálně protkanými vlákny, kde by mělo dojít k nejlepšímu rozložení napětí. Ve výsledku by se také mohlo jednat o úsporu hmotnosti, protože na ochranu prostředku by byla potřeba menší tloušťka materiálu, než se stejnými ochrannými vlastnostmi např. u jednosměrného kompozitu. Zde pak je nejdůležitější správný výběr materiálu. Další možností rozložení napětí na štítu je zvolením vhodné vrchní vrstvy, aby se smetl po nárazu roztránilo na nejmenší možné kousky.

Jevy popisované v kapitolách 7.2 a 7.3 vychází z výzkumných zpráv zabývajících se střelbou pouze do kompozitu o větší tloušťce, jelikož experiment střelby do tenkého kompozitu nebyl realizován z důvodu vysoké technické a finanční náročnosti.

8 Návrh zařízení pro zkoušení účinků dopadu kosmického smetí

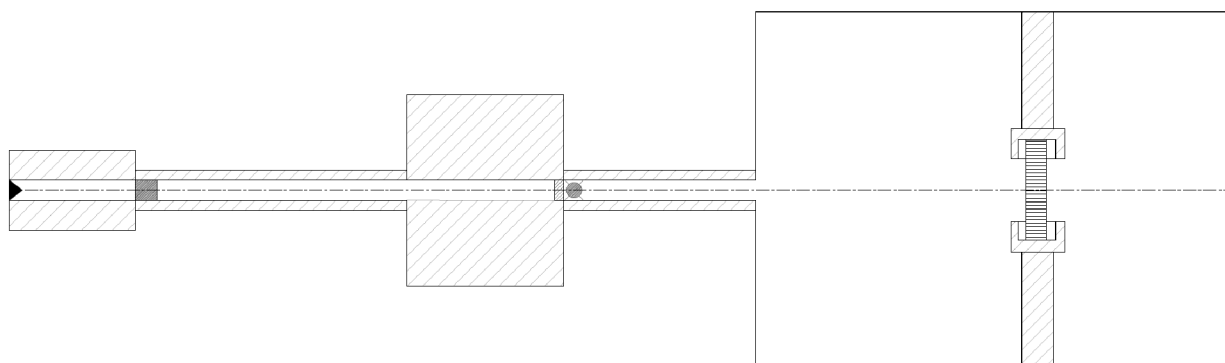
Jak se ukázalo v předchozí kapitole, zkoušení odolnosti materiálu balistickou střelbou je nedostatečné pro vesmírné aplikace, jelikož jsme schopni dosáhnout maximálně desetin rychlostí, které jsou na oběžných drahách běžné. Počítačové modely a simulace nám umožňují přiblížit účinky dopadu, ale stále je vše potřeba podpořit experimentálním průkazem. K tomuto účelu v zahraničí slouží dvoustupňové lehké vodíkové dělo, které by bylo možné navrhnout a vyrobit v menším provedení i na Leteckém ústavu.

První stupeň pracuje podobně jako klasická zbraň vystřelující projektil. Na konci komory, kde je stlačen střelný prach, který neprodukuje kouř, je umístěn píst (Obrázek 8.1- 1.Fáze). Při elektronickém zážehu dojde k rozpínání výbušné směsi, která tlačí píst trubicí, jež je součástí druhého stupně (Obrázek 8.1- 2.Fáze). V trubici je plyn s velmi nízkou molekulární hmotností, nejčastěji vodík nebo helium, protože jsou velmi dobře stlačitelné. Tím, že snížíme hmotnost plynu, jsme schopni dosáhnout větších rychlostí při zachování stejné kinetické energie například oproti klasickým střelným zařízením, které využívají spalovací plyny obsahující CO₂, CO atd. Po zážehu píst tlačuje lehký plyn a zároveň těsní (např. O-kroužkem), aby nedošlo k úniku expandujícího plynu do stlačované části. Na konec trubice je umístěna vysokotlaká sekce uzavřená membránou, na jejíž druhé straně je umístěn projektil. Tato část je namáhána vysokým tlakem, jenž je způsobený stlačeným plynem, ale i tlakem daným nárazem pístu, který se zde zastaví. Tlak může dosahovat hodnot i přes 10 GPa. Sekce má vnitřní otvor ve tvaru kuželu, čímž napomáhá stlačování a také zpomaluje píst. Po zastavení pístu dojde k protržení membrány a expandující plyn urychlí projektil s podpurným aparát, který zajišťuje rovný let projektilu (Obrázek 8.1- 3.Fáze a 4.Fáze). V expanzní nádrži dojde k oddělení aparátu od střely. V druhé části expanzní nádrže se nachází vzorek a musí zde být připojeno zařízení na vytvoření vakua pro nepřesnější možnou simulaci vesmírného prostředí. [161]



Obrázek 8.1: Princip urychlení projektilu ve vodíkovém dělu [162]

Obrázek 8.2 je schématické znázornění lehkého vodíkového děla. Návrh vychází ze schématu pro malé vodíkové dělo ESA „The Baby Light Gas Gun“. [162]



Obrázek 8.2: Schéma lehkého vodíkového děla

Dělo je vhodné pro projektily o různých rážích a tvarů díky použití pomocného aparátu, tudíž dovoluje provést důkladnější studii o chování materiálu při srážce s kosmickým smetím.

Největšími omezeními výkonnosti děla v dnešní době jsou tvar projektilu a celková odolnost každé součástky stroje.

Závěr

Kosmické prostředky, ať už raketové nosiče nebo užitečné zatížení (viz. kapitola 1), jsou i v dnešní době finančně nákladná zařízení a celý proces (viz. kapitola 2), než se z konceptu stane prostředek použitelný v praxi, je časově náročný. Proto je potřeba už v prvotních fázích návrhu vzít v potaz, tolik faktorů, kolik jen bude možné. Od výroby až po konec svého funkčního života prostředek čelí mnoha vlivům prostředí, které mají negativní dopad a při podcenění mohou vést až k úplné destrukci prostředku (viz. kapitola 3). Jedno z možných řešení, jak tomu předejít, je správná volba materiálu. Po letech zkušeností existují různá doporučení, která pomáhají se správným výběrem. V České republice jsou nejpoužívanější ECSS standardy (viz. kapitola 4). Pokud výrobce použije nestandardní materiál, je důležité provést nezbytné zkoušky materiálu (viz. kapitola 6), které pomohou identifikovat možný problém již v počátečních fázích návrhu, čímž se zvýší bezpečnost a ve výsledku to vede i k nižším nákladům.

Nejpoužívanějšími standardními materiály pro konstrukci jsou slitiny lehkých kovů, jako je hliník, titan a hořčík, hlavně z důvodu výborného poměru pevnosti a hmotnosti. Dříve hojně využívané oceli dnes spíše nahrazují hliníkové slitiny, právě kvůli tomu, že jsou lehčí. Speciální vysokoteplotní slitiny se obecně využívají na částech, které jsou vystaveny vysokým teplotám. Nanomateriály, smart materiály a kompozity mají velký potenciál do budoucna v různých oblastech využití. Kompozity našly využití v minulosti převážně jako tepelná ochrana, ale probíhající výzkum nasvědčuje tomu, že zde jejich působnost zdaleka nekončí. Díky různým kombinacím stavebních materiálů kompozitu, kombinacím uspořádání a neustále se zlepšujících technologií výroby může mít nejrůznější vlastnosti.

Jedním z možných potenciálních využití je ochrana proti kosmickému smetí, které neustále přibývá, a zvyšují se tak pravděpodobnosti srážky s funkční umělou družicí. Součástí této práce je rozbor chování materiálu ze střeleckých testů (viz. kapitola 7) prováděných na vzorcích z duralu v dřívějších letech na Univerzitě obrany, protože slitiny hliníku patří mezi nejvyužívanější materiály. Z těchto zkoušek vyplývá, že i při desetině rychlosti, kterou se běžně pohybují tělesa na oběžné dráze, dural neposkytuje vůbec žádnou ochranu proti účinkům srážky. V zahraničí byly prováděny podobné zkoušky se vzorky kompozitu o větší tloušťce s různými tvary střely. Zde velmi záleží na správné volbě materiálu kompozitu a jeho stavbě. Aby došlo k nejlepšímu možnému přenosu napětí, je vhodné použít více vrstev tkaniny, nejen s kolmo orientovanými ale i diagonálně protkanými vlákny. Pro nejlepší možný výsledek můžeme mít vrstvy dalších materiálů (např. keramika), které pomohou roztržít smetí na co nejmenší kousky. Všechny tyto zkoušky probíhaly s rychlostmi projektilů mnohem menšími, než jsou ve vesmíru běžné, tudíž nejsme přesně schopni zjistit, jak se skutečně bude materiál při srážce na oběžné dráze chovat. Pro lepší studium chování materiálu po dopadu kosmického smetí je vhodné lehké vodíkové dělo (viz. kapitola 8), které dokáže urychlit střelu na rychlost 8 km/s a dovoluje provést test ve vakuu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Na kosmický výzkum jde v Česku 1,5 miliardy korun. Přispívá ministerstvo dopravy i školství. ČT24 [online]. 2021, 14.10.2019 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2948900-na-kosmicky-vyzkum-jde-v-cesku-13-miliardy-korun-prispiva-ministerstvo-dopravy-i>
- [2] HOUŠKA, Lukáš a Ondřej ŠAMÁREK. Vesmírné osudy. Brno: CPress, 2017. ISBN 978-80-264-1692-0.
- [3] The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018 [online]. FAA Office of Commercial Space Transportation: Federal Aviation Administration, 2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/2018_AST_Compendium.pdf
- [4] HOLUB, Aleš. Kurz kosmonautiky: Rakety a kosmodromy. Malá encyklopedie kosmonautiky [online]. 2021, 30.12.2001 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://mek.kosmo.cz/zaklady/kurz/kurz3.htm>
- [5] Pohonné systémy. Malá encyklopedie kosmonautiky [online]. 2021, 24.7.2007 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/motory.htm>
- [6] ESA potvrdila, že teleskop JWST poletí na raketě Ariane 5. ESA [online]. 17.12.2015 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/ESA_potvrdila_ze_teleskop_JWST_poleti_na_rakete_Ariane_5
- [7] Raketa meteorologická. Elektronický meteorologický slovník [online]. ČMeS, 2017, 1993 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3189>
- [8] Sounding Rockets Overview: About Sounding Rockets. NASA [online]. 2021, 4.8.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/sounding-rockets/missions/index.html
- [9] Sounding rockets. ESA [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Sounding_rockets

- [10] Sondážní raketa. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sond%C3%A1%C5%BE%C3%AD_raketa
- [11] Ballistic missile: rocket. Britannica [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/ballistic-missile>
- [12] Balistická raketa. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Balistick%C3%A1_raketa
- [13] Launch vehicle. Britannica [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/launch-vehicle/Launch-vehicles-of-the-world>
- [14] WOOD, Therese. Who owns our orbit: Just how many satellites are there in space? World Economic Forum [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.weforum.org/agenda/2020/10/visualizing-earth-satellites-space-spacex/>
- [15] HOWELL, Elizabeth. What is a Satellite? Space.com [online]. Future US, 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.space.com/24839-satellites.html>
- [16] Telekomunikační družice. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Telekomunika%C4%8Dn%C3%AD_dru%C5%BEice
- [17] MAJER, Dušan. Raketa, raketoplán, kosmická loď – jak se v tom snadno vyznat? Kosmonautix [online]. 18.3.2013 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/2013/03/raketa-raketoplan-kosmicka-lod-jak-se-v-tom-snadno-vyznat/>
- [18] What Is the Soyuz Spacecraft? NASA [online]. 7.8.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-the-soyuz-spacecraft-58>
- [19] HADAČ, Jiří a Petr MELECHIN. Blíží se první vyhrazená sdílená mise SpaceX, při které budou vyneseny desítky menších družic. ElonX [online]. 23.1.2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.elonx.cz/blizi-se-prvni-vyhrazena-sdilena-mise-spacex-pri-ktere-budou-vyneseny-desitky-mensich-druzic/>

- [20] Magnetický kosmický tahač míří na vysloužilé družice. ESA [online]. 19.6.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Magneticky_kosmicky_tahac_miri_na_vyslouzile_druzice
- [21] MAJER, Dušan. Pracuje Rusko na jaderném kosmickém tahači? Kosmonautix [online]. 6.10.2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/2020/10/pracuje-rusko-na-jadernem-kosmickem-tahaci/>
- [22] Space Shuttle Era. NASA [online]. 4.8.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/index.html
- [23] SHARP, Tim. Space Shuttle: The First Reusable Spacecraft. Space.com [online]. 2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.space.com/16726-space-shuttle.html>
- [24] KALAŠ, Václav. Kolik bylo vyrobeno amerických raketoplánů? Česká astronomická společnost: Astronomický informační server astro.cz [online]. 2.7.2009 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.astro.cz/clanky/kosmonautika/kolik-bylo-vyrobeno-americkyh-raketoplanu.html>
- [25] MAJER, Dušan. Voyager 2 je také v mezihvězdném prostoru. Kosmonautix [online]. 12.12.2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/2018/12/voyager-2-je-take-v-mezihvezdnem-prostoru/>
- [26] Salyut 1: the first space station. Britannica [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/space-station/Salyut-1-the-first-space-station>
- [27] What Is the International Space Station? NASA [online]. NASA Educational Technology Services, 30.10.2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-the-iss-58.html>
- [28] Sluneční plachetnice. Malá encyklopedie kosmonautiky [online]. 12.12.2002 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/solsail.htm>
- [29] Sluneční plachetnice - motivace. Aldebaran.cz [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/lab/plachetnice/>

- [30] VOPLATKA, Michael. Fotografie historicky první úspěšné sluneční plachetnice IKAROS na cestě do meziplanetárního prostoru. Kosmonautix [online]. 6.7.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/2017/07/top5-kandidati-na-mezihvezdne-pohony/3-93/>
- [31] The Vacuum Environment and Its Effects. TRIBBLE, Alan. The Space Environment: Implications for Spacecraft Design - Revised and Expanded Edition [online]. Princeton University Press, 2003, s. 29-74 [cit. 2021-5-10]. ISBN 0-691-10299-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=39zQDwAAQBAJ&pg=PA29&hl=cs&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false
- [32] MEHTA, R. C. Analysis of payload compartment venting of satellite launch vehicle. In: Advances in Aircraft and Spacecraft Science [online]. 4. 2017, 2016, s. 437-447 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://www.techno-press.org/fulltext/j_aas/aas4_4/aas0404005.pdf
- [33] Ariane 5 User's Manual [online]. 2020. Arianespace, 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2016/10/Ariane5-users-manual-Jun2020.pdf>
- [34] What Is Outgassing And When Does It Matter? Microwave Journal [online]. 19.11.2010 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.microwavejournal.com/blogs/1-rog-blog/post/16667-what-is-outgassing-and-when-does-it-matter>
- [35] ARENAS, Jorge P a Ravi N MARGASAHAYAM. NOISE AND VIBRATION OF SPACECRAFT STRUCTURES. In: Ingeniare. Revista chilena de ingeniería [online]. 2006 [cit. 2021-5-10]. ISSN 0718-3305. Dostupné z: doi:10.4067/S0718-33052006000200009
- [36] Space Shuttle Ascent. NASA [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/466711main_AP_ST_ShuttleAscent.pdf
- [37] Launch Accelerations: Values, history. Stack Exchange [online]. 2015 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://space.stackexchange.com/questions/7829/launch-accelerations-values-history>
- [38] LauncherOne Service Guide. Virgin Orbit [online]. Virgin Orbit, 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://virginorbit.com/wp-content/uploads/2020/09/LauncherOne-Service-Guide-August-2020.pdf>

- [39] Rocket User's Guide. Eurockot [online]. Eurockot Launch Service Provider, 2011 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.eurockot.com/wp-content/uploads/2012/10/Ch5UsersGuideIss5Rev0.pdf>
- [40] YASAKA, Tetsuo a Junjiro ONODA. Aerodynamic Heating: Spacecraft Structures. Encyclopedia of Physical Science and Technology [online]. 3. 2003 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/aerodynamic-heating>
- [41] Thermal Blankets. NASA [online]. 25.9.2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/thermal-blankets/>
- [42] ROSEN, Walter. Structural Effects of Aerodynamic Heating: Part I - The Nature of Aerodynamic Heating Effect's. NASA [online]. Langley Aeronautical Laboratory, 1954 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www1.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/Langley-Aerodynamic-Heating-Research-1954.pdf>
- [43] Space Weather: Effects on satellites. Britannica [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/space-weather/Effects-on-satellites>
- [44] Kosmický odpad. Třídění odpadu CZ [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/kosmicky-odpad>
- [45] SKÁLA, Mikuláš. To musíte vědět: Co se děje s magnetickým polem Země? EPOCHAPLUS [online]. 19.12.2016 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://epochaplus.cz/to-musite-vedet-co-se-deje-s-magnetickym-polem-zeme/>
- [46] Kosmické počasí. Pozorování Slunce: informace a aktuality o Slunci, sluneční aktivitě a pozorování [online]. Hvězdárna Valašské Meziříčí [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.pozorovanislunce.eu/slunce-aktualne/kosmicke-pocasi.html>
- [47] Space Weather and You. Exploratorium.edu [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.exploratorium.edu/spaceweather/sway.html>
- [48] Satellite drag. Space Weather Prediction Center: National Oceanic and Atmospheric Administration [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-drag>
- [49] Protection of spacecraft from meteoroids and orbital debris [online]. In: . Oak Ridge National Laboratory, 1986 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2172/5868942>

- [50] Shield Development. NASA: Astromaterials Research & Exploration Science Hypervelocity Impact Technology [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://hvit.jsc.nasa.gov/shield-development/>
- [51] Dangers from space: How we can protect ourselves from asteroid impacts. OHB [online]. 18.10.2019 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.ohb.de/en/magazine/dangers-from-space-how-we-can-protect-ourselves-from-asteroid-impacts>
- [52] What Materials Can Survive in Space? NTS.com [online]. 7.6.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nts.com/ntsblog/materials-survive-in-space/>
- [53] NASA-427: A New Aluminum Alloy. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://ntts-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/MFS-TOPS-8.pdf>
- [54] Materials and Manufacturing. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584729main_Wings-ch4c-pgs200-225.pdf
- [55] PETERS, M. a C. LEYENS. Aerospace and Space Materials. Materials Science and Engineering [online]. Institute of Materials Research, 3 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-36-05-03.pdf>
- [56] RIOJA, Robert a John LIU. The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications. SpringerLink [online]. 31.3.2012 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-012-1155-z>
- [57] How Does NASA Use Aluminum? Avion Alloys [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.avionalloys.com/nasa-use-aluminum/>
- [58] Aluminum Alloy for High Temperature Applications. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/MFS-TOPS-6>
- [59] Aluminium alloy research could benefit manned space missions [online]. 7.12.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/12/201207124110.htm>
- [60] Materials. Brown.edu [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.brown.edu/Departments/Joukowsky_Institute/courses/13things/7661.html

- [61] WASSMER, William. The Materials Used in Artificial Satellites and Space Structures. AZO Materials [online]. 12.5.2015 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12034>
- [62] ISS Utilization: Cupola Observation Module of the ISS. EoPortal Directory [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-cupola>
- [63] Cupola's 'eyes' open, its window shutters are moved. ESA [online]. 18.2.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2010/02/Cupola_s_eyes_open_its_window_shutters_are_moved2
- [64] DANYLENKO, Marta. How Aluminium and Gold Are Used for Multi-Layer Insulation and Metal Plating on Satellites. Matmatch [online]. 29.11.2017 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://matmatch.com/blog/how-aluminium-and-gold-are-used-in-aerospace-industry/>
- [65] Silicon Oxide Coated Aluminized Polyimide Film Radiator Coating. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/GSC-TOPS-249>
- [66] [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.spacematdb.com/spacemat/>
- [67] BROWNALL, Waverley. Titanium Used On Juno SpaceCraft. WAVERLEY BROWNALL [online]. 7.7.2016 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://waverleybrownall.co.uk/blog/titanium-used-on-juno-spacecraft/>
- [68] Juno Armored Up to Go to Jupiter. NASA [online]. 7.12.2010 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/news/juno20100712.html
- [69] Installing Juno's Radiation Vault. NASA [online]. 9.7.2010 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/multimedia/pia13258-4x3.html
- [70] Juno, the first spacecraft to fly 3D printed titanium parts, successfully enters Jupiter's orbit. 3ders.org [online]. 5.7.2016 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20160705-juno-the-first-spacecraft-to-fly-3d-printed-titanium-parts-successfully-enters-jupiters-orbit.html>

- [71] ALBRIGHT, Brian. Juno Launches with 3D-Printed Parts. DE247 [online]. 8.7.2016 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/juno-launches-with-3d-printed-parts/>
- [72] ENYA, K., O. KIRINO a H. NAKAGAWA. A lightweight mirror made of a magnesium alloy for space-borne telescopes and instruments. SPIE. [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10690/106902L/A-lightweight-mirror-made-of-a-magnesium-alloy-for-space/10.1117/12.2312612.full?SSO=1>
- [73] AVERSENTI, Edmund V. Synergistic Coatings Meet Demanding Aerospace Challenges. General Magnaplate [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.magnaplate.com/pdfs/white-papers/GM_WP_Aerospace.pdf
- [74] UF ENGINEERS DEVELOP LIGHTWEIGHT METAL FOR NASA. HERBERT WERTHEIM COLLEGE OF ENGINEERING [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://mse.ufl.edu/lightweight_metal_reduce_radiation/
- [75] BENAROYA, Haym, Sohrob MOTTAGHI a Zachary PORTER. Magnesium As an ISRU-Derived Resource for Lunar Structures. ASCE Library [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784412190.020>
- [76] PARIDA, Benudhar a Uma RANI. Studies on chrome free galvanic conversion coating on magnesium alloy AZ31B for space applications. ResearchGate [online]. 2010 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233490741_Studies_on_chrome_free_galvanic_conversion_coating_on_magnesium_alloy_AZ31B_for_space_applications
- [77] NASA's Perseverance Mars Rover Gets Its Wheels and Air Brakes. NASA [online]. 3.4.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-perseverance-mars-rover-gets-its-wheels-and-air-brakes>
- [78] DANYLENKO, Marta. Shape Memory Alloy Features in NASA Tires. Matmatch [online]. 12.1.2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://matmatch.com/blog/shape-memory-alloy-features-nasa-tires/>

- [79] LISZEWSKI, Andrew. NASA's New Titanium Airless Tires Are Nearly Indestructible. Gizmodo [online]. 24.11.2017 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://gizmodo.com/nasas-new-titanium-airless-tires-are-nearly-indestructi-1820721473>
- [80] Superelastic Tire: A viable alternative to the pneumatic tire. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99>
- [81] Shape Memory Alloy Mechanisms for CubeSats. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-135>
- [82] SPILKER, Benjamin. Metals in Space: How Superalloys Changed the Rocket Landscape. Matmatch [online]. 26.3.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://matmatch.com/blog/metals-in-space-how-superalloys-changed-the-rocket-landscape/>
- [83] BOUCHARD, Anthony. Here's Why SpaceX is Using Heavy Stainless Steel to Make Starship. Labroots [online]. 24.5.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.labroots.com/trending/space/17708/why-spacex-using-heavy-stainless-steel-starship>
- [84] Maraging Steel: Steels for aircraft structures. Science Direct [online]. 2012 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/maraging-steel>
- [85] WALL, Mike. SpaceX's Starship will soon be made of different stuff. Space.com [online]. 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.space.com/spacex-starship-new-stainless-steel-alloy.html>
- [86] WALL, Mike. Why Elon Musk Turned to Stainless Steel for SpaceX's Starship Mars Rocket. Space.com [online]. 2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.space.com/43101-elon-musk-explains-stainless-steel-starship.html>
- [87] ABOUT THE SPACECRAFT. Smithsonian National Air and Space Museum [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://airandspace.si.edu/exhibitions/apollo-to-the-moon/online/apollo-11/about-the-spacecraft.cfm>
- [88] Apollo Manufacturing. NASA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.hq.nasa.gov/alsj/CSM25_Apollo_Manufacturing_pp245-252.pdf
- [89] Princip magnetostrické. Alpha International s.r.o. [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/slovník/princip-magnetostrické/>

- [90] SAUNDERS, Sarah. Blue Origin's Liquid-Fueled BE-4 Rocket Engine Utilizes Additive Manufacturing to Make Boost Pump Components. 3Dprint.com [online]. 2.2.2017 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://3dprint.com/163811/additive-manufacturing-blue-origin/>
- [91] JEWETT, R. P. a J. A. HALCHAK. THE USE OF ALLOY 718 IN THE SPACE SHUTTLE MAIN ENGINE [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_749_760.pdf
- [92] Program Mercury. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 6.6.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Program_Mercury
- [93] Heritage Materials for Launch Vehicles and Spacecraft. NASA [online]. 31.8.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/211016354.pdf>
- [94] Superalloys. Cobalt Institute [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.cobaltinstitute.org/superalloys.html>
- [95] What is Solar Sailing? The Planetary Society [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.planetary.org/articles/what-is-solar-sailing>
- [96] The "Not So Heavy Metal Video": James Webb Space Telescope's Beryllium Mirrors. NASA [online]. 13.1.2011 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/webb-beryllium.html>
- [97] NASA: James Webb Space Telescope [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://webb.nasa.gov/content/features/downloads.html>
- [98] Graphite. Geology.com [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://geology.com/minerals/graphite.shtml>
- [99] GRAPHITE & CARBON USES IN HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS. Olmec Advanced Materials [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.olmec.co.uk/services/graphite_and_carbon_use_in_aerospace_industry/
- [100] CHOI, Charles Q. Could carbon-foam probes bring interstellar flight within reach? Space.com [online]. 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.space.com/interstellar-spacecraft-carbon-foam-alpha-centauri.html>

- [101] Tepelně vodivý pěnový grafit. MM Průmyslové spektrum [online]. 31.1.2001 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-vodivy-penovy-grafit>
- [102] Carbon Foams - Poco-foam, HTC, 0.25 mg/cc [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://dpnc.unige.ch/atlas/upgrade/IBL/StaveLoading/CarbonFoam/FoamPictures.html>
- [103] V čem je grafen tak unikátní? Mowement.cz [online]. 14.8.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.mowement.cz/blog/5-duvodu-proc-je-grafen-tak-unikatni/>
- [104] Graphene Used Successfully in Space [online]. 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nro.gov/Portals/65/documents/news/articles/2018/2018-03.pdf>
- [105] BÎRU, Eliana Iuliana a Horia IOVU. Graphene Nanocomposites Studied by Raman Spectroscopy [online]. 26.1.2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/raman-spectroscopy/graphene-nanocomposites-studied-by-raman-spectroscopy>
- [106] Nanotubes morphed into tougher carbon for spacecraft, satellites. Science Daily [online]. 6.9.2016 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/09/160906131130.htm>
- [107] NASA Looking to Tiny Technology for Big Payoffs. NASA [online]. 29.10.2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/langley/nasa-looking-to-tiny-technology-for-big-payoffs>
- [108] PIROLINI, Alessandro. Materials Used in Space Shuttle Thermal Protection Systems. AZO Materials [online]. 10.10.2014 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11443>
- [109] KUMAR, Rahul. SPACE SHUTTLES: The Ultimate Vehicles. Cutting edges visionaries [online]. 20.4.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.cevgroup.org/space-shuttles-the-ultimate-vehicles/>
- [110] Observatory - Optics. NASA [online]. 8.9.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-space-telescope-optics-system>
- [111] LUKEZ, Rudy. THE USE OF GRAPHITE/EPOXY COMPOSITE STRUCTURES IN SPACE APPLICATIONS [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2354&context=smallsat>

- [112] FINCKENOR, Miria M. Chapter 6: Materials for Spacecraft. NASA [online]. 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160013391>
- [113] DESTEFANIS, R., E. AMERIO, M. BRICCARELLO, M. BELLUCO a M. FARAUD. SPACE ENVIRONMENT CHARACTERISATION OF KEVLAR® : GOOD FOR BULLETS, DEBRIS AND RADIATION TOO. ESA [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: http://esmat.esa.int/materials_news/isme09/pdf/3-ground/s3%20-%20destefanis.pdf
- [114] Aramidová vlákna. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [115] Spacesuits that astronauts wear. Tenlangana Today [online]. 20.12.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://telanganatoday.com/spacesuits-that-astronauts-wear>
- [116] FRANCIS, Scott. Composites in the race to space: Advanced materials use in current and upcoming NASA missions. Composites World [online]. 31.3.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: [https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-space\(2\)](https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-space(2))
- [117] ULA Delivers Delta 4 Cores To Fla. for Orion Test Flight. SpaceNews [online]. 10.3.2014 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://spacenews.com/39788ula-delivers-delta-4-cores-to-fla-for-orion-test-flight/>
- [118] Space Debris. NASA [online]. 1.7.2019 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/centers/hq/library/find/bibliographies/space_debris
- [119] Space debris by the numbers. ESA [online]. 15.4.2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers
- [120] Thermal Protection (TPS) and Materials. NASA [online]. 29.3.2008 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/ames/research/humaninspace/humansinspace-thermalprotectionsystem.html>
- [121] TONN, Shara. How do we build electronic materials that can survive radiation? Stanford: Engineering [online]. 7.12.2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://engineering.stanford.edu/magazine/article/how-do-we-build-electronic-materials-can-survive-radiation>

- [122] Ultra High Temperature Ceramics (UHTC) Coatings. ESA: ESA Broker Italy [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://spacesolutions.esa.int/technology-transfer/esa-broker-italy/technology/ultra-high-temperature-ceramics-uhtc-coatings>
- [123] JIN, XinXin, Rujie HE, Xinghong ZHANG a Ping HU. Ablation behavior of ZrB₂–SiC sharp leading edges. In: Journal of Alloys and Compounds [online]. 566. 2013, s. 125-130 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838813005987>
- [124] KELLER, K., L. LAMPANI, H. RITTER, E. PFEIFFER a P. GAUNDENZI. Smart Thermal Protection Leading Edges [online]. 2006 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234460101_Smart_Thermal_Protection_Leading_Edges
- [125] Low Density Ablators. NASA [online]. 20.5.2019 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/ames/thermal-protection-materials/tps-materials-development/low-density-ablators.html>
- [126] GLASS, David E. Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. NASA [online]. NASA Langley Research Center [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080017096/downloads/20080017096.pdf>
- [127] ARD integration at Aerospatiale Bordeaux. ESA [online]. 1.1.1998 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/1998/01/ARD_integration_at_Aerospatiale_Bordeaux4
- [128] KRENKEL, W. Carbon Fibre Reinforced Silicon Carbide Composites (C/SiC, C/C–SiC). Handbook of Ceramic Composites [online]. Springer, Boston, MA, s. 117-148 [cit. 2021-5-10]. ISBN 978-0-387-23986-6. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-23986-3_6
- [129] Surface Densification Of Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA). NASA [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/TOP2-183>
- [130] What Are Ceramic Matrix Composites? L&L Special Furnace [online]. 30.8.2018 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://llfurnace.com/blog/what-are-ceramic-matrix-composites/>

- [131] Tepelná ochrana kosmických lodí při letu atmosférou. Malá encyklopedie kosmonautiky [online]. 19.2.2006 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://mek.kosmo.cz/zaklady/technika/ochrana.htm>
- [132] What Keeps Spaceships from Burning Up During Reentry ? Interesting Engineering [online]. 24.1.2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/what-keeps-spaceships-from-burning-up-during-reentry>
- [133] SAMPE @ 75 - Composites Applications for Space. SAMPE North America [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nasampe.org/page/CompositesApplicationsforSpace>
- [134] FRANCIS, C.R. Electrostatic charging problems of spacecraft. Journal of Electrostatics [online]. 1982, 1982, 11(3) [cit. 2021-9-1]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304388682900171>
- [135] STARK, John a Graham SWINERD, FORTESCUE, Peter, ed. Spacecraft systems engineering. 3. Wiley, 2004. ISBN 0-471-61951-5.
- [136] Glow of Space Shuttles. Lumen Learning: Introduction to Chemistry [online]. Pressbooks [cit. 2021-9-6]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/glow-of-space-shuttles/>
- [137] TRÍSKA, Václav. Konstrukční materiály pro kosmickou a raketovou techniku. Brno, 2013. Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra letecké a raketové techniky.
- [138] Document Tree: ECSS Disciplines. ECSS [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://ecss.nl/standards/ecss-document-tree-and-status/>
- [139] ECSS: European Cooperation for Space Standardization [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://ecss.nl/>
- [140] ECSS-Q-ST-70-71C Rev.1 – Materials, processes and their data selection (15 October 2019). ECSS: European Cooperation for Space Standardization [online]. 15.10.2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-70-71c-rev-1-materials-processes-and-their-data-selection-15-october-2019/>

- [141] Fullereny a deriváty fullerenů. Web o chemii, elektronice a programování [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/chemie-aktuality/priprava-hec60-a-he2c60-pomoci-exploze/>
- [142] ZHANG, Shuangshuang, Zihe LI, Kun LUO, Julong HE, Yufei GAO a Alexander V SOLDATOV. Discovery of carbon-based strongest and hardest amorphous material. NSR: National Science Review [online]. National Science Review, 2022, 5.8.2021 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://academic.oup.com/nsr/article/9/1/nwab140/6342164>
- [143] RAWAL, Suraj, James BRANTLEY a Nafiz KARABUDAK. Development of Carbon Nanotube-based Composite for Spacecraft Components [online]. In: . Istanbul: IEEE, 2013 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: doi:10.1109/RAST.2013.6581186
- [144] Electromagnetic Smart Washer for Detecting Bolthole Cracking [online]. Marshall Space Flight Center, Alabama, 1.5.1998 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/briefs/mechanics-and-machinery/32283?m=1128>
- [145] Micro-thrusters for satellites. In: Noliac [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/applications/item/show/micro-thrusters-for-satellites/>
- [146] Enabling self-healing capabilities - a small step to bio-mimetic materials: Materials Report Number: 4476 [online]. In: . 1. Materials Physics and Chemistry Section Materials and Processes Division, 12.1.2006 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: https://esamultimedia.esa.int/docs/gsp/materials_report_4476.pdf
- [147] NOVÁK, Jan. Aerokosmický průmysl nabízí nové supermateriály. Dosud je znali jen čtenáři sci-fi. In: Hospodářské noviny [online]. 15.4.2021 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66909720-aerokosmicky-prumysl-nabizi-nove-supermaterialy-dosud-je-znali-jen-ctenari-sci-fi>
- [148] DUONG, Minh Trung. Fig 1. In: ResearchGate [online]. 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Ferromagnetic-particles-distribution-of-a-magnetorheological-fluid-without-and-with_fig1_343456015
- [149] Smart Fluids: Why are they "Smart"?. In: Technology.org: Science & Technology News [online]. 22.9.2021 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.technology.org/2021/09/22/smart-fluids/>

- [150] UDD, Eric. Fiber Optic Smart Structures. IEE [online]. 1996, 1996, 84(1) [cit. 2022-04-13].
- [151] BOUDJEMAI, A., M.H. BOUANANE, A. MANKOUR, H. SALEM, R. HOCINE a R. AMRI. Thermo-mechanical design of honeycomb panel with fully-potted inserts used for spacecraft design. IEE. 2013.
- [152] TOOR, Zaigham Saeed. Space Applications of Composite Materials. Journal of Space Technology [online]. 2018, 8.(1) [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.ist.edu.pk/downloads/jst/previous-issues/july-2018/09.-space-applications-of-composite-materials1.pdf>
- [153] JOHNSON, Todd. Understanding CFRP Composites: The Amazing Capabilities of Carbon Fiber Reinforced Polymers. In: ThoughtCo. [online]. 31.3.2019 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/understanding-cfrp-composites-820393>
- [154] DAVEY, Reginald. Using Carbon Fiber Reinforced Polymers in Space. In: AZO Materials [online]. 9.3.2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.azom.com/news.aspx?newsID=58491>
- [155] Polymer Matrix Composites: Properties, Production, and Applications. In: Matmatch [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/polymer-matrix-composites>
- [156] MAY, Michael, Ganesh Deepak RUPAKULA a Pascal MATURA. Non-polymer-matrix composite materials for space applications. In: Elsevier [online]. Composites Part C, 2020 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682020300578>
- [157] Aerospace Materials Testing: Our Aerospace Materials Testing Services. In: Element Materials Technology [online]. 2022 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.element.com/aerospace/aero-materials-testing>
- [158] RAHMAN, Mostafezur. Ballistic Damage Analysis of Thick-Section Composites. In: 2005 Research Reviews [online]. University of Delaware Center for Composite Materials, 2005, 2.3.2005 [cit. 2022-05-01].
- [159] ZAVATTIERI, Pablo D., Hung-Chen LU, Sunil K. DWIVEDI a Horacio D. ESPINOSA. Energy Dissipation in Ballistic Penetration of Fiber Composites.

[160] MA, Zheng-Dong, Hui WANG, Yushun CUI, Douglas ROSE, Adria SOCKS a Donald OSTBERG. Designing an Innovative Composite Armor System for Affordable Ballistic Protection.

[161] Two Stage Light Gas Guns. In: NASA [online]. 14.6.2016 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:

https://www.nasa.gov/centers/wstf/site_tour/remote_hypervelocity_test_laboratory/two_stage_light_gas_guns.html

[162] PUTZAR, Robin a Frank SCHAEFER. Experimental Space Debris Simulation at EMI's Calibre 4 mm Two-Stage Light Gas Gun. In: ESA [online]. 5th European Conference on Space Debris: ESA, 2009 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:

<https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc5/paper/74/SDC5-paper74.pdf>

Seznam použitých zkratk

ACA	Advanced composite armors
AMS	Aerospace Materials Specification
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymers
CMC	Ceramic matrix composite
CNT	Carbon nanotube
DMA	Dynamic mechanical analysis
DPS	General Directorate of Standardization
DSC	Diferential scanning calorimetry
EC	Eddy current testing
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EDPM	směs Etylen-propylen-dienového kaučuku
ESA	The European Space Agency
FML	Fiber Metal Laminates
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy
GPS	Global Positioning System
ICT	Immersion ultrasonic inspection
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
KPH	Kapalné pohonné hmoty
LEO	Nízká oběžná dráha
LPI	Liquid penetrant inspection
MMC	Metal matrix composite
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OASPL	Overall Sound Pressure Level
PICA	Phenolic Impregnated Carbon Ablator
PMC	Polymer matrix composite
PVC	Polyvinylchlorid
RCC	Reinforced carbon-carbon
SAE	Society of Automotive Engineers
SEM/EDX	Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Analysis

SLS	Space Launch System
SPA	Surface protected ablator
TGA	Thermogravimetric analysis
TMA	Thermomechanical analysis
TPH	Tuhé pohonné hmoty
TPS	Thermal Protection Leading Edges
UHTC	Ultra High Temperature Ceramics
UNOOSA	The United Nations Office for Outer Space Affairs
USA	Spojené státy americké
UV	Ultrafialové záření
XRD	X-ray diffraction