VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

INTELIGENTNÍ MATERIÁLY V LETECTVÍ

SMART MATERIALS IN AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Rostislav Riger
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Josef Klement, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	**Rostislav Riger**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Josef Klement, CSc.**
Akademický rok:	2018/19

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

Inteligentní materiály v letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Inteligentní systém v sobě kombinuje senzory a adaptivní schopnosti s inteligentní řídící smyčkou pro okamžitou odezvu na provozní vlivy.
Inteligentní systém může existovat ve třech úrovních:
Úroveň 1 – Konstrukce má zabudované pouze snímače pro měření fyzikálních parametrů (teplota, tlak, deformace, napětí).
Úroveň 2 – Konstrukce má zabudované ovladače, které dávají okamžitou odezvu na signály stimulované zvenčí.
Úroveň 3 – Snímače jsou zařazeny do řídící smyčky, která přes ovladač způsobí příslušnou odezvu konstrukce v reálném čase. Potenciálními aplikacemi jsou např. inteligentní potahy letadel s možností detekce nárazů na povrch a indikací poškození, záznam skutečných deformací při statickém i dynamickém zatížení, přetížení při manévrech, monitorování vzniku a růstu únavových trhlin., změna aerodynamických charakteristik, např. úhlu zkroucení kýlové plochy.

Cíle bakalářské práce:

Cílem je zpracování nejnovějšího přehledu současných a perspektivních aplikací inteligentních materiálů a systémů na letecké technice.

Seznam doporučené literatury:

Structural Materials Handbook, Vol.2, New Advanced Materials. ESA PSS-03-203, Paris, 1994.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá inteligentními materiály a jejich aplikacemi v letectví. V teoretické části je vysvětleno, co rozumíme pod pojmem inteligentní materiály a čeho chceme s jejich použitím dosáhnout. Dále jsou tyto materiály seřazeny podle principu fungování a popsány. V praktické části je práce zaměřena na konkrétní aplikace inteligentních materiálů v letectví. Někdy se jedná pouze o teoretické aplikace, které nebyly ještě použity.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with smart materials and their applications in aviation. The theoretical part explains what we mean by the term smart materials and what we want to achieve with their use. Further, these materials are sorted according to the principle of their function and described. The practical part is focused on specific applications of smart materials in aviation. Sometimes these are only theoretical applications that have not yet been used.

KLÍČOVÁ SLOVA

inteligentní materiály, aktuátory, senzory, řídící systém, inteligentní struktury

KEYWORDS

smart materials, actuators, senzors, control systems, smart structures

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RIGER, Rostislav. *Inteligentní materiály v letectví.* Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116676. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Klement, CSc..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za ochotu, čas a cenné rady, které mi pomohly při řešení této práce.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Klementa, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 20. 5. 2019 ……

Rostislav Riger

OBSAH

ÚVOD **11**

1 INTELIGENTNÍ SYSTÉM **12**

2 PRVKY INTELIGENTNÍHO SYSTÉMU **13**

2.1 Senzory 13
2.1.1 Druhy senzorů 13
2.1.2 Piezoelektrické senzory 14
2.1.3 Senzory na bázi optických vláken 15
2.2 Aktuátory 16
2.2.1 Slitiny s tvarovou pamětí 16
2.2.2 Piezoelektrické materiály 18
2.2.3 Elektrostrikční materiály 18
2.2.4 Magnetostrikční materiály 19
2.2.5 Elektroreologické kapaliny 19
2.2.6 Magnetoreologické kapaliny 19
2.2.7 Polymery s tvarovou pamětí 20
2.3 Řídící systémy 21
2.4 Inteligentní struktury 21
2.4.1 Auxetické voštinové struktury 21
2.4.2 Trubice s proměnnou tuhostí 22
2.4.3 Vlnitá struktura 23
2.4.4 Struktura o více stabilních stavů 23
2.5 Přehled inteligentních materiálů 23

3 APLIKACE INTELIGENTNÍCH MATERIÁLŮ **24**

3.1 Kosmonautika 25
3.1.1 Detekce poruch a sebediagnostika: 25
3.1.2 Tlumení vibrací 25
3.1.3 Aktivní kompenzace a přizpůsobení 26
3.1.4 Rozvinutí a spojování konstrukčních prvků 26
3.2 Atmosférické letectví 27
3.2.1 Inteligentní potahy letadel 27
3.2.2 Detekce námrazy na náběžných hranách 28
3.2.3 Monitorování vytvrzování u kompozitů 28
3.2.4 Sebeoprava poškozeného materiálu 29
3.2.5 Řídící systém 29
3.2.6 Kontrola vibrací 30
3.2.7 Omezení hluku na palubě 30
3.2.8 Keramické tepelné štíty a čelní skla 30
3.2.9 Inteligentní klapky 30
3.2.10 Použití u pneumatik letadel 31
3.2.11 Energeticky úsporné vrtulníky 31
3.2.12 Proměnná křídla 32

4 BUDOUCNOST INTELIGENTNÍCH MATERIÁLŮ **34**

ZÁVĚR **35**

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY **36**

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá inteligentními materiály a jejich aplikacemi v letectví. V počáteční části této práce je vysvětleno, co rozumíme pod pojmem inteligentní materiál, a dále je zde rozřazen inteligentní systém do třech úrovní. Následující část je věnována prvkům inteligentních systémů. Hlavní pozornost je věnována senzorům a aktuátorům, u kterých jsou inteligentní materiály využity. Poté následují jednotlivé aplikace inteligentních materiálů v kosmonautice a atmosférickém letectví.

Práce slouží k získání obecného přehledu o jednotlivých inteligentních systémech, ve kterých jsou v různých prvcích zakomponovány inteligentní materiály. Některé aplikace jsou pouze potenciální a ve skutečnosti se ještě nepoužívají.

1 Inteligentní systém

Za rok 2018 se uskutečnilo okolo 37,8 milionů komerčních letů a z toho pouze 15 skončilo smrtelnou nehodou. Co se týče počtu nehod, jedná se o třetí nejbezpečnější rok v historii. Rok 2017 byl vůbec ten nejbezpečnější [1]. Letecká doprava se dlouhodobě považuje za jednu z nejbezpečnějších metod cestování. Jedním z důvodů jsou neustále se zdokonalující materiály, ze kterých se letadla staví. Je až neuvěřitelné, že pouze jedno století trval lidstvu přechod z dřevěných na téměř dokonalá kompozitní letadla. Ať už se jedná o vojenské či civilní letectví, vždy se pilot musí na svůj stroj plně spolehnout. Proto se vymýšlejí čím dál tím propracovanější způsoby, jak zabránit jakékoliv závadě na letadle. Jedním z nich jsou inteligentní materiály (smart materiály) a inteligentní struktury, které by se v budoucnu mohly vyskytovat na letadlech čím dál častěji.

Mezi inteligentní materiály řadíme materiály, které mají vlastnost kontrolovaně reagovat na vnější podněty jako jsou napětí, teplota, vlhkost, pH, elektrická a magnetická pole. Některé materiály mohou například měnit svůj tvar a velikost pouze při mírném ohřevu nebo vlivem magnetu. Jiné zase dokáží přejít z kapalného skupenství na tuhé, pouze vlivem magnetického či elektrického pole. Důležitou vlastností inteligentních materiálů je schopnost vrátit se do původního stavu. Nemůžeme tedy mezi ně zařadit materiály, které se vlivem ohřevu zdeformují nenávratně. Konkrétně mezi inteligentní materiály řadíme materiály piezoelektrické, magnetostrikční, elektrostrikční, dále elektroreologické a magnetoreologické kapaliny, slitiny s tvarovou pamětí a optická vlákna. Mezi inteligentní struktury řadíme auxetickou voštinovou strukturu, vlnité struktury, trubice s proměnnou tuhostí a struktury o více stabilních stavech. Inteligentní materiály mohou být zahrnuty do jednoho či více inteligentních systémů. [2,3]

Inteligentní systém může být tvořen senzory, inteligentní řídící smyčkou, aktuátory, a také v některých případech je schopen adaptace. [2]

Inteligentní systém může existovat ve třech úrovních [2]:

Úroveň 1 (Pouze senzorický systém) – V konstrukci jsou zabudovány pouze senzory, které měří fyzikální parametry (teplota, tlak, deformace, napětí). Mezi klasické senzory se řadí například tenzometry, termočlánky nebo akcelerometry. Díky inteligentním materiálům můžeme používat senzory tvořené optickými vlákny či piezoelektrické senzory.

Úroveň 2 (Systém založený na aktuátorech) – V konstrukci jsou zabudovány aktuátory (ovladače), které mají schopnost dávat okamžitou odezvu na signály stimulované zvenčí. Mezi aktuátory řadíme, jak jednoduché mechanické aktuátory, tak také propracovanější technologie, jako například aktuátory se slitinou s tvarovou pamětí nebo piezoelektrické aktuátory.

Úroveň 3 (Plně inteligentní systém) - Jedná se o nejvyšší formu inteligentních systémů. Obsahuje senzory, aktuátory a řídící systém schopný učit se. Senzory jsou spojeny s řídící smyčkou, která iniciuje chod aktuátorů a dostává příslušnou odezvu konstrukce v reálném čase. Systém dokáže měnit svou geometrii v závislosti na vnějších podmínkách. U plně inteligentních systému je naprosto klíčová integrita požadovaných schopností, které jsou závislé na frekvenci a čase.

2 Prvky inteligentního systému

Inteligentní systémy se mohou skládat ze spousty složek. Častokrát se využívá materiálů a struktur, které vykazují jedinečné fyzikální vlastnosti. Díky fyzikálním vlastnostem, které tyto materiály a struktury mají, je nazýváme inteligentní i bez nutnosti ovládání pomocí řídícího systému. Mohou být použity pro měření (u senzorů) nebo pro příslušnou odezvu na dané situace (u aktuátorů). [2]

2.1 Senzory

Senzory jsou zařízení, která detekují a měří určité fyzikální veličiny, a poté je převádí na signál, který se dále přenáší a zpracovává v řídících systémech. Síť senzorů je vložena do konstrukce nebo je na konstrukci připevněna. Využívají se například pro měření deformace, teploty, vibrací, elektrických veličin, magnetických veličin a dalších. [2]

2.1.1 Druhy senzorů

V letectví se nejčastěji využívá těchto senzorů:

Tenzometry

Tenzometry jsou senzory, které mohou sloužit k měření síly, tlaku nebo materiálové deformace.

Tenzometry se používají již od roku 1938. Princip fungování tenzometru je založen na změně odporu při jeho deformaci. Vlivem zatížení vzniká deformace materiálu i na povrchu tělesa, na kterém je umístěn kovový vodič (tenzometr). Změna tvaru součásti způsobuje změnu elektrického odporu vodiče, která je lineární s prodloužením na povrchu. Přeměna odporu na deformaci je následně lehce vyčíslitelná. Díky tenzometrům získáváme informaci o namáhání konstrukce při návrhu i ve skutečném provozu. Tenzometry vyžadují elektrické napájení dvěma dráty u každého měřidla. Tento fakt limituje množství použitelných měřidel na konstrukci. [2,4]

Běžně se používají miniaturizované tenzometry a tenzometrické růžice. Tenzometry se na konstrukci lepí a mohou měřit deformaci pouze v dané rovině a směru. [2]

Termočlánky

Termočlánky slouží k přesnému měření teploty v určitém místě konstrukce. Základním principem je využití termoelektrického jevu. Základem je obvod tvořený dvěma vodiči z různých kovů, které mají ve spojích rozdílnou teplotu. Do obvodu je přiváděn elektrický proud, díky čemuž se dá následně změřit elektrické napětí. Termočlánky se používají v mnoha odvětvích. Vhodné jsou zejména tam, kde je možné měření v ustálených teplotních podmínkách. Při kolísavé teplotě termočlánky neposkytují dostatečně přesné informace, jelikož je měření ovlivněno tepelnou setrvačností samotného senzoru. [5]

Akcelerometry

Akcelerometry jsou senzory, které slouží k měření změny rychlosti. Díky nim je tedy možné získat informace o zrychlení nebo zpomalení. Akcelerometry se převážně využívají ke zjištění informací o velikosti a frekvenčním spektru vibrací. U vibrací se zjišťuje frekvence, amplituda, fázový úhel nebo tvar. Jelikož je zrychlení vektor, je ideální, aby akcelerometr dokázal měřit ve více osách. Existují však i akcelerometry jednoosé. Z inteligentních materiálů zde nachází své uplatnění piezoelektrické akcelerometry. Piezoelektrické akcelerometry vykazují napětí úměrné proměnnému silovému působení vibrující hmoty. [2]

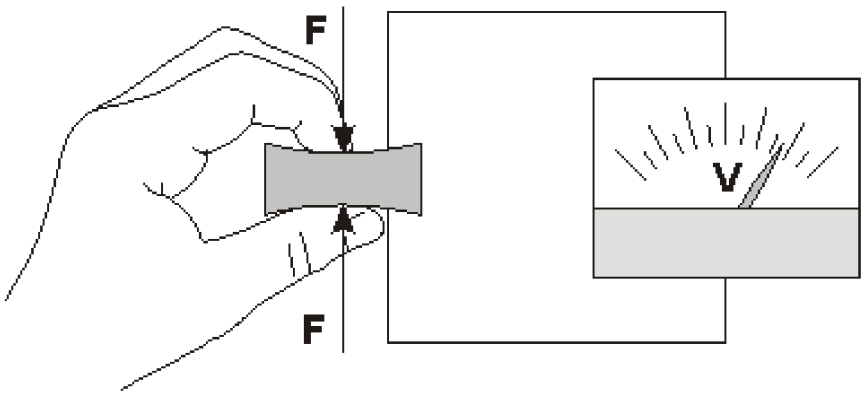
Mikrosenzory

Toto označení popisuje skupinu zařízení, která jsou specifická svými malými rozměry a zpravidla se vyrábí mikro-obráběním. Mikrosenzory jsou schopny měřit napětí, vibrace a zrychlení. Jejich výhodou oproti ostatním senzorům je redukovaná hmotnost a objem, mohou být tedy použity na méně přístupných místech. [2]

2.1.2 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické materiály jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Piezoelektrický jev je schopnost vytvoření elektrického napětí v důsledku mechanického namáhání, a to například vlivem tahu, tlaku, krutu či ohybu. Zároveň tento jev může platit i obráceně. Pokud je tedy aplikováno elektrické pole, pak se materiál pružně deformuje (nepřímý piezoelektrický jev). Znázornění přímého piezoelektrického jevu lze vidět na obrázku 2.1.2. [2,6]

Piezoelektrické senzory se používají pro detekci mechanického namáhání. Konkrétně se měří zrychlení, síla či napětí. Při působení elektrického napětí se výrazně mění tvar, což je možné řídit pomocí aktuátorů. Může tedy sloužit jako senzor i jako aktuátor. Důležitým parametrem je Curieova teplota, při které materiál ztrácí nevratně své piezoelektrické vlastnosti. Piezoelektrické materiály jsou velmi využívané, zejména díky rychlé elektromechanické odezvě či nízkým požadavkům na napájení. [2,6]



Obrázek 2.1.2 Piezoelektrický jev [7]

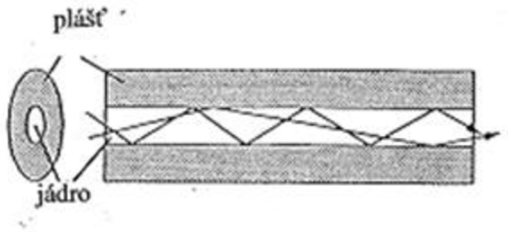
Nejpoužívanějšími piezoelektrickými materiály jsou:

- přírodní materiály: krystal SiO_2, topaz [6]
- syntetické materiály: krystal $LiNbO_3$ [2]
- polykrystalické keramické látky: $BaTiO_3$, Na_2WO_4 [6]
- polymery: PVDF (musí být pro elektrické připojení pokovený), PVF2 [2,6]

2.1.3 Senzory na bázi optických vláken

Při použití senzorů na bázi optických vláken je možné získat všestrannější informace o konstrukci než při zavedení klasických bodových senzorů. Měření senzoru s optickým vláknem funguje na principu ovlivnění světla, které prochází vláknem. Index lomu vlákna se mění při axiálním namáhání či při změně teploty. Ovlivnění světla může být například v podobě změny amplitudy, fáze, polarizace nebo frekvence záření. Při použití senzoru s optickým vláknem je možné měřit jak bodově, tak spojitě po celé délce vlákna. Pro přenos signálů se používá polarizované světlo, které může být buď pulzující nebo kontinuální. [2]

Optická vlákna se dají rozdělit na [2]:
Jednovidová – Průměr jádra je v rozmezí od 5 do 10 μm, přičemž je obklopeno pláštěm, který má vnější průměr okolo 150 μm. Světelný paprsek polarizovaného světla se šíří ve směru osy vlákna kontinuálně, bez odrazů od jádra nebo pláště.
Vícevidová – Průměr jádra je v rozmezí od 50 do 100 μm a plášť má podobný průměr jako u jednovidových optických vláken. Šíření světelného paprsku probíhá mnohonásobným odrazem od vysoce reflexního rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Vícevidové optické vlákno je zobrazeno na obrázku 2.1.3 a).



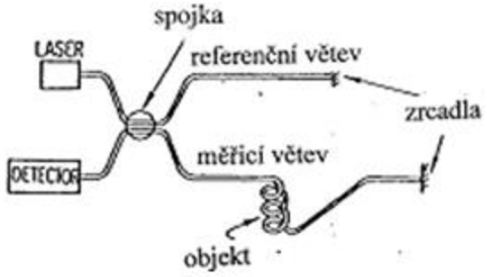
Obrázek 2.1.3 a) Přenos světla vícevidovým optickým vláknem [2]

U většiny aplikací je optické vlákno tvořeno z jádra, pláště a ochranného obalu, který má tloušťku okolo 100 μm. Celkový průměr optického vlákna se pohybuje v rozmezí 250 až 500 μm. Jádro optického vlákna je z pravidla tvořeno sklem nebo plastem [8]. Výhodou optických vláken je, že se dají dobře zabudovat do kompozitního materiálu již při jeho výrobě, a díky tomu jsou tyto senzory vhodné pro podpovrchová měření. Také jsou imunní vůči elektromagnetickému záření, což se využívá v leteckých a kosmických konstrukcích. [2]

K měření deformace jsou vhodné senzory, které jsou založeny na interferenční metodě. Výhodou interferometrů je jejich kompaktní velikost. Interferometry jsou složeny ze dvou větví. Jedna větev je měřící a druhá je referenční, neovlivněná deformací materiálu. Vlivem

deformace materiálu se mění délka měřící větve interferometru, což ovlivňuje průchod světla. Následně se pomocí detekčního zařízení vyhodnocuje rozdíl mezi měřící a referenční větví, která nebyla deformací ovlivněna. Pokud dojde k velkému poškození materiálu, které vede až k přerušení optického vlákna a světelného paprsku, pak je detekce velmi jednoduchá. Kvantifikování menších poškození, jako například delaminace, může být obtížné, ale častokrát je však dostačující vědět o existenci vady. [2]

Interferometry s optickými vlákny mají několik typů. Mezi nejdůležitější se řadí: Mach-Zehnderův, Fabry-Perotův a Michelsonův, který je na obrázku 2.1.3 b).



Obrázek 2.1.3 b) Princip Michelsonova interferometru [2]

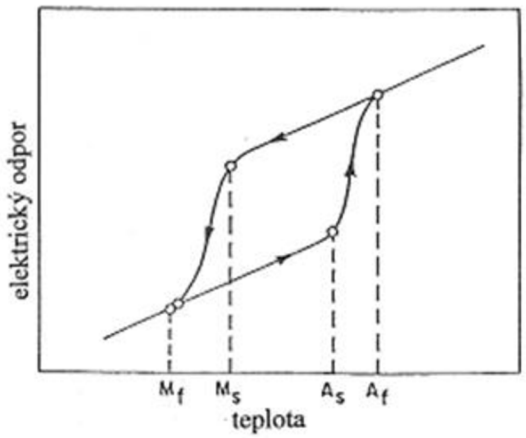
2.2 Aktuátory

Aktuátory, neboli reaktivní ovladače, jsou akční členy mechatronického systému, které převádí energii tlakovou nebo elektrickou na energii mechanickou. Provozní parametry aktuátoru (rychlost, aplikovaná síla) můžeme řídit podle požadavků dané aplikace. První aktuátory byly na letadlech použity již v období druhé světové války. Letoun Douglas DC-3 měl zabudované aktuátory, díky kterým se ovládaly vztlakové klapky, některé chladící klapky a vysunování podvozku. Inteligentní materiály vhodné pro využití u aktuátorů mají akční elektrickou, magnetickou nebo tepelnou veličinu. [9,10]

Elektrická veličina – Piezoelektrické, Elektrostrikční, Elektroreologické
Magnetická veličina – Magnetosrikční, Magnetoreologické
Tepelná veličina – Slitiny s tvarovou pamětí

2.2.1 Slitiny s tvarovou pamětí

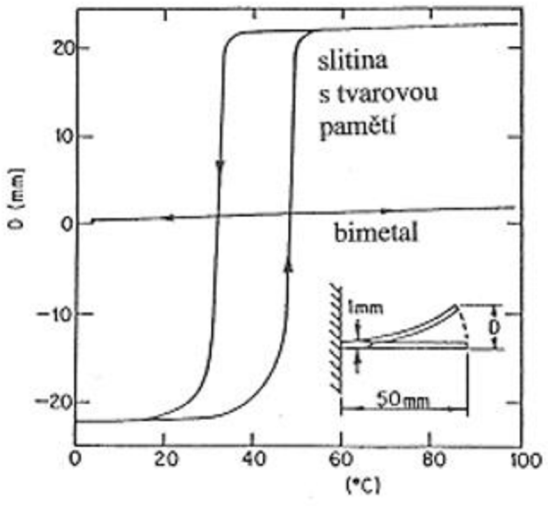
Jedná se o slitiny se speciální vlastností, díky které se deformovaný vzorek po zahřátí na určitou teplotu vrátí do svého původního tvaru. Tvarová paměť materiálu je založena na přeměně martenzitické fáze na fázi austenitickou, což kromě změny struktury ovlivňuje i fyzikální vlastnosti. Například elektrický odpor, což je znázorněno na obrázku 2.2.1 a). Slitiny s tvarovou pamětí mají vlastnost super-elasticity, což znamená, že dokáží pracovat i při vysokém zatížení a snesou výraznou elastickou deformaci (ocelová pružina snese 10krát menší elastickou deformaci), přičemž nedochází k porušení materiálu ani k plastické deformaci. [3]



Obrázek 2.2.1 a) Teplotní závislost elektrického odporu slitiny s tvarovou pamětí [2]

Efekty tvarové paměti mohou mít tyto podoby [2]:
Jednocestný efekt – Pokud jednocestnou slitinu zdeformujeme při nižší teplotě, tak při následném ohřevu se jí navrátí původní tvar.
Dvoucestný efekt – Taktéž, jako jednocestné slitiny si dvoucestné slitiny pamatují svůj tvar při ohřátí. Jednocestným slitinám však při následném ochlazení zůstává původní tvar, zatímco dvoucestné slitiny se vrací do deformovaného tvaru. Zpětné ochlazování však nemusí být tak přesné, jako zpětný ohřev. Může se tedy stát, že se tvar slitiny bude lišit od původního tvaru.
Všestranný efekt – Pokud je dvoucestná slitina pečlivě kontrolována během určitých podmínek, můžeme dosáhnout ideálního stavu. Po zpětném ochlazení dosáhneme stejného tvaru jako před ohřevem. Na obrázku 2.2.1 b) je znázorněno chování slitiny s tvarovou pamětí a bimetalu v závislosti na teplotě.

Nejčastěji se využívají slitiny:
Ni-Ti (Nitinol) [2]
Cu-Zn-Al [2]
Cu-Al-Ni [3]



Obrázek 2.2.1 b) Teplotní závislost deformace bimetalu a slitiny s tvarovou pamětí [2]

Výhodou slitin s tvarovou pamětí je svoboda v určení teploty martenzitické přeměny, jelikož je závislá na struktuře slitiny. V letectví se nejčastěji používá slitina nitinol. Jedná se o slitinu niklu a titanu. Vlastnosti této slitiny jsou uvedeny v tabulce tab. 2.2.1. [2]

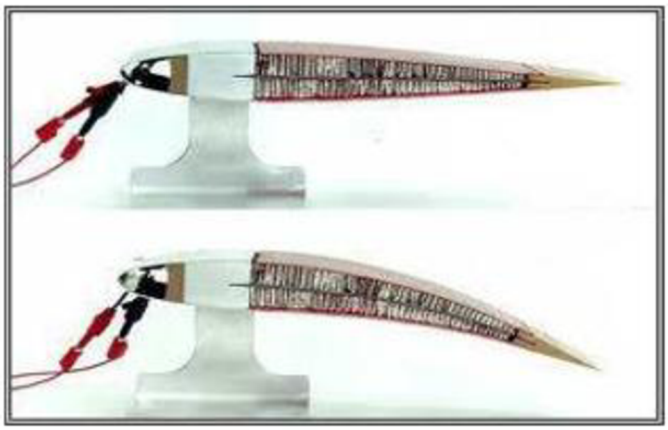
Tab. 2.2.1 Typické vlastnosti slitiny NITINOL [2]

Hustota [g.cm^{-3}]	transformační teplota [°C]	smykový modul [GPa]		mez kluzu [MPa]		součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	
		martenzit	austenit	martenzit	austenit	martenzit	austenit
6,5	100	7,5	22	80	620	10×10^{-6}	$6,6\times10^{-6}$

2.2.2 Piezoelektrické materiály

Jak již bylo zmíněno výše, piezoelektrické materiály mohou být využity jako senzory a také jako aktuátory. U aktuátorů je využito nepřímého piezoelektrického jevu. Materiál se tedy deformuje v elektrickém poli. Oproti slitinám s tvarovou pamětí nemají piezoelektrické materiály takové deformační schopnosti (0,25% - 0,5%). Na obrázku 2.2.2 je zobrazena funkce piezoelektrického materiálu. Tento druh materiálů dělíme na piezoelektrické keramiky a piezoelektrické kompozity. [2,3]

Piezoelektrické keramiky – používají se pro pohon hydraulických čerpadel nebo u pohonů rotorových vrtulníků. [3]
Piezoelektrické kompozity – vznikají kombinací piezoelektrických vláken a pryskyřice. Používají se ke snížení vibrací a hluku u rotorů vrtulníků. [3]



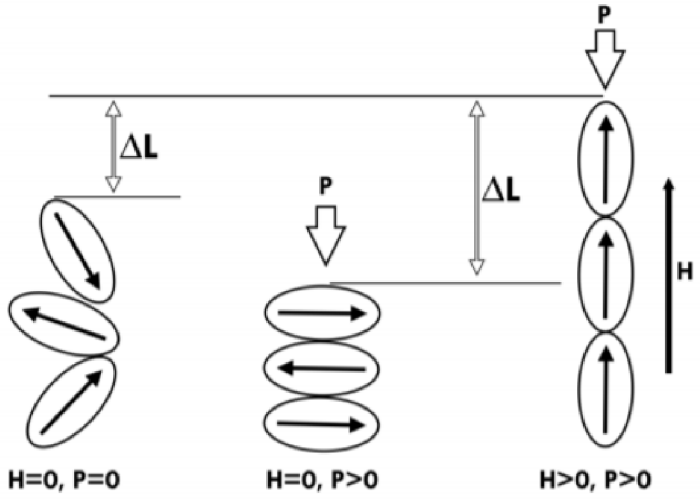
Obrázek 2.2.2 Změna tvaru piezoelektrického materiálu [11]

2.2.3 Elektrostrikční materiály

Elektrostrikce je jev, při kterém se materiál mechanicky deformuje pod vlivem elektrického pole. Na rozdíl od nepřímého piezoelektrického jevu, který se objevuje pouze u piezoelektrických materiálů, se elektrostrikce vyskytuje u všech dielektrických materiálů. Příkladem elektrostrikčního materiálu je keramická sloučenina na bázi Pb-Mg-Nb. Tento typ materiálů vykazuje menší ztrátu hystereze než piezoelektrické materiály. [3]

2.2.4 Magnetostrikční materiály

Magnetostrikce funguje na principu změny tvaru ferromagnetické látky vlivem působení magnetického pole. Tato vlastnost platí i obráceně, čili deformace od vnějšího zatížení způsobí změnu v magnetické bilanci. Magnetostrikce může být využita u senzorů, avšak častěji se s ní setkáváme v případě aktuátorů. Odezva u magnetostrikčních aktuátorů je v řádech mikrosekund. Oproti piezoelektrickým materiálům může generovat mnohem vyšší aktivační napětí. Typickými příklady jsou Terfenol-D a Galfenol. Terfenol-D je složen z terbia, železa a dysprosia, zatímco Galfenol pouze z galia a železa. Terfenol-D se pod vlivem magnetického pole dokáže deformovat až o 0,12%, což je asi čtyřikrát více, než Galfenol (asi 0,03%). Bylo také objeveno, že schopnost magnetostrikce materiálu roste při zavedení napětí před použitím magnetického pole. Toto napětí se směřuje paralelně s magnetickým polem. Při zavedení předpětí se Terfenol-D dokáže deformovat až o 0,2%. Efekt zavedení napětí před použitím magnetického pole lze vidět na obrázku 2.2.4. [12]



Obrázek 2.2.4 Efekt napětí před použitím magnetického pole [12]

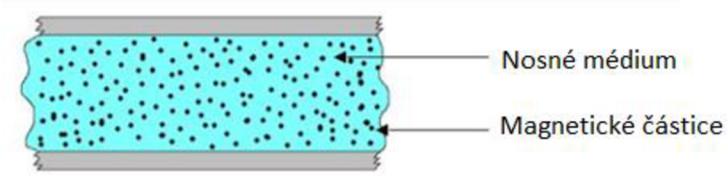
2.2.5 Elektroreologické kapaliny

Jedná se o kapaliny, u kterých dochází k elektroreologickému efektu. Rozptýlené kovové částice se mění na elektrický dipól při zavedení elektrického proudu do kapaliny. Částice jsou řazeny do řetězců ve směru siločar elektrického pole. Tento jev se projeví změnou viskozity a meze kluzu. Při působení elektrického pole se kapalina již nedá popsat jako Newtonská, ale jako viskoplastická. Má ideální vlastnosti na využití u tlumičů. Skládá se z nosného média a částic. Možné kombinace jsou kerosin-SiO_2, olej-uhlík, olej-škrob. [2,13]

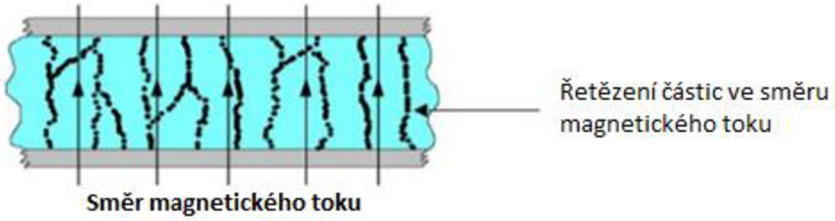
2.2.6 Magnetoreologické kapaliny

Jedná se o kapaliny, které využívají magnetoreologického efektu. Skládají se z nosného média (olej, voda) a částic (hematit, práškové železo, magnetit). Při působení homogenního magnetického pole se mikročástice, které byly původně rovnoměrně rozptýlené stanou magnetickým dipólem. Částice se řadí do řetězců ve směru siločar magnetického pole.

Tento jev se projeví například změnou viskozity či meze kluzu. Po tomto seřazení částic má vlastnosti viskoplastické kapaliny. Dokáže však fungovat i obráceně. Mohou se jí tedy vrátit původní vlastnosti, při kterých se dá popsat jako Newtonovská kapalina. Magnetoreologické kapaliny se nejčastěji využívají tam, kde je potřeba tlumení. Jedná se o materiál, který by mohl být v budoucnu velice využívaný. Nasvědčuje tomu i fakt, že se výzkumem magnetoreologických materiálu zabývá NASA. Na obrázcích 2.2.6 a) a 2.2.6 b) je zobrazeno řazení magnetických částic v nosném médiu. [13]



Obrázek 2.2.6 a) Volně rozptýlené částice v magnetoreologické kapalině [13]



Obrázek 2.2.6 b) Řetězení částic v magnetoreologické kapalině [13]

2.2.7 Polymery s tvarovou pamětí

Polymery s tvarovou pamětí, podobně jako slitiny s tvarovou pamětí, jsou schopny významného makroskopického zotavení po obdržení podnětu zvenčí. Například v podobě tepla, elektrické energie nebo magnetu. Během tohoto procesu materiál přechází mezi skelným a pružným stavem. Skelný stav se vyznačuje vysokým Youngovým modulem, který může přesáhnout 3 GPa. Materiál se stává tvrdým. Naopak v pružném stavu je materiál měkký a Youngův modul se pohybuje v rozsahu 1-10 MPa. Kromě proměnné tuhosti jsou výhodou těchto polymerů i nízké obnovovací síly. V kompozitech se vyskytují ve formě pryskyřice. [3]

Polymery s tvarovou pamětí nachází své uplatnění jako aktuátor u vesmírných konstrukcí vyžadující rozvinutí. Potenciálně by se daly také využít u letadel s proměnnými křídly, kde je využita jejich proměnná tuhost. Ve skelném stavu dobře odolává aerodynamickému zatížení a v pružném stavu jsou schopny deformace až 100%. Rozvinutí vzorku, tvořeného polymerem s tvarovou pamětí, je zobrazeno na obrázku 2.2.7. [3]

Obrázek 2.2.7 Rozvinutí kompozitu, tvořeného polymerem s tvarovou pamětí [3]

2.3 Řídící systémy

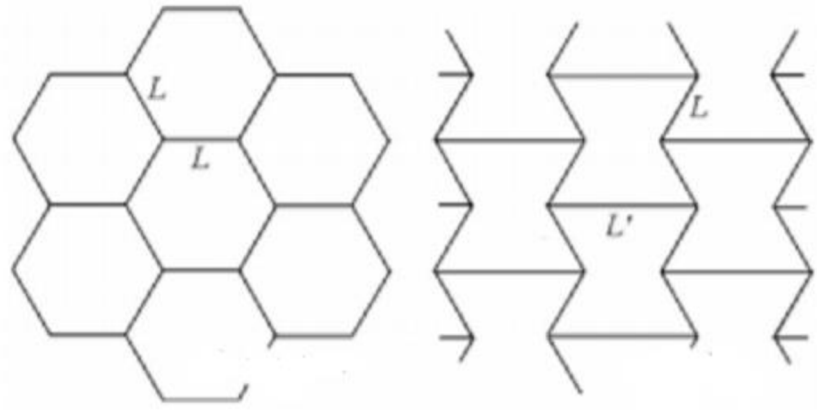
Řídící systémy ovládají chování aktuátorů a senzorů pomocí řídících smyček. Samotné inteligentní materiály, bez řídícího systému, nemusí zcela plnit svou funkci. Řídící systém může pracovat na několika úrovních, záleží na jeho sofistikovanosti a komplexnosti. Záleží, které z těchto úkonů dokáže [2]:

- jednoduché zapnutí/vypnutí aktuátoru
- ukládání dat z jednotlivých senzorů
- interpretace signálu z různých míst konstrukce
- posouzení významnosti výstupu ze senzorů v porovnání se stanovenými limity
- implementace řídícího algoritmu pro odezvu aktuátoru na výstup senzoru v reálném čase

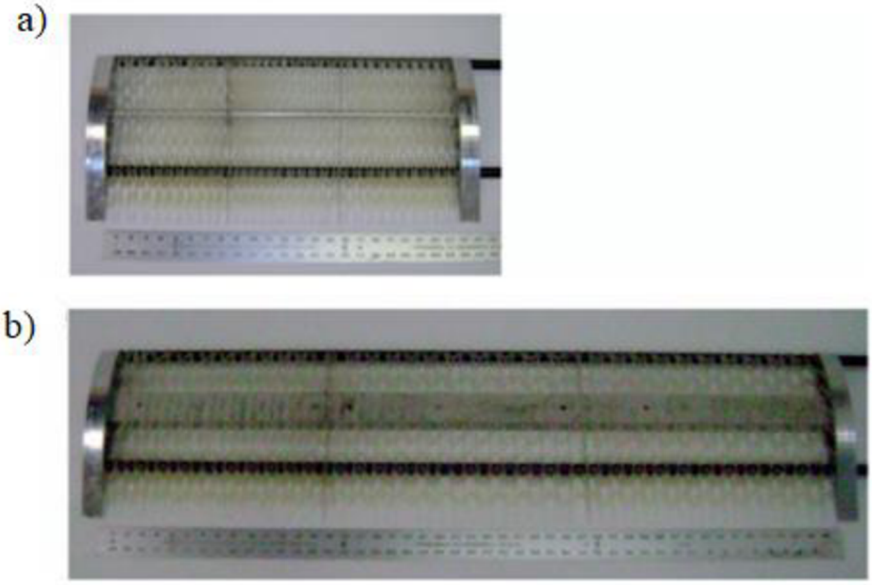
2.4 Inteligentní struktury

2.4.1 Auxetická voštinová struktura

Obecně platí, že auxetické materiály mají záporné Poissonovo číslo (poměr mezi relativním prodloužením materiálu a jeho příčným zkrácením). Tento fakt ve výsledku znamená, že pokud se materiál roztahuje v jednom směru, bude se roztahovat i ve směru kolmém. Jedná se o speciální vlastnost, která se u běžných materiálů nevyskytuje. Navíc experimenty ukazují, že auxetické materiály lépe absorbují hluk a vibrace [14]. Voštinová struktura má podobnou konstrukci jako včelí plástve, mezi kterými je prázdný prostor. Díky tomu jsou voštinové materiály velice lehké a přitom pevné. Rozdíl mezi voštinovou strukturou klasickou a auxetickou je na obrázku 2.4.1 a). Auxetické voštinové struktury se dají využít například u proměnných křídel, které mohou měnit své rozpětí. Na obrázku 2.4.1 b) je zobrazena část křídla, která dosáhla prodloužení 100 %. [3,15]



Obrázek 2.4.1 a) Rozdíl mezi klasickou a auxetickou voštinovou strukturou [14]



Obrázek 2.4.1 b) Křídlo s proměnným rozpětím založené na voštinách se záporným Poissonovým číslem: a) Smrštěný stav b) Prodloužený stav [3]

2.4.2 Trubice s proměnnou tuhostí

Struktura musí být speciální, kombinuje totiž dvě protichůdné vlastnosti. Je nutné, aby byla silná a přitom deformovatelná. Tomuto požadavku nejlépe vyhovují polymery s tvarovou pamětí. Existují tři druhy trubic s proměnnou tuhostí [3]:

Pneumatické trubice – Mění tvar a tuhost při zatížení vzduchem. Dá se využít u proměnných povrchů jako aktuátor.
Kompozitní trubice s polymerem s tvarovou pamětí – Jedná se o trubici, která je vinutá z uhlíkových vláken a je vytvrzena polymerem s tvarovou pamětí.
Fluidní kompozitní trubice – Tuhost trubice je řízená tlakem kapaliny uvnitř trubky. Natlakováním nestlačitelné kapaliny se rapidně zvyšuje tuhost.

2.4.3 Vlnité struktury

Jedná se o strukturu, která je schopna velkého roztažení nebo kontrakce v jednom směru. Při určitém rozsahu Reynoldsových čísel se na vlnitém povrchu vytvářejí víry, podobné aerodynamickým profilům. Může se využít u morfujících obtokových hran na letadle. [3]

2.4.4 Struktura o více stabilních stavech

Jedná se o strukturu, která má dva nebo více stabilních stavů a může rychle přecházet z jednoho do druhého. Hlavní uplatnění by tento typ struktury měl najít u morfujících letadel. Bylo již provedeno několik testů u bezpilotního letounu. Například už byla využita pro strukturu náběžných hran, které dokáží přecházet do čtyř různých stavů změnou tuhosti. Test dále prokázal funkčnost u proměnných šípových křídel, které dokáží přejít z rovného do šípového tvaru. [3]

2.5 Přehled inteligentních materiálů

Shrnutí jednotlivých druhů inteligentních materiálů a jejich vlastností je uvedeno v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5 Jednotlivé druhy inteligentních materiálů

Druh materiálu	Příklad	Vlastnost	Použití
Piezoelektrický materiál	SiO_2 $LiNbO_3$ $BaTiO_3$	Vznik elektrického napětí vlivem deformace, nebo obráceně.	Senzory, Aktuátory
Optická vlákna	SiO_2, plast	Vláknem prochází světlo, ne kterém lze určit dané veličiny.	Senzory
Slitiny s tvarovou pamětí	Ni-Ti (Nitinol) Cu-Zn-Al Cu-Al-Ni	Kontrolovaná změna tvaru vlivem ohřevu.	Aktuátory
Magnetostrikční materiály	Terfenol-D Galfenol	Změna tvaru vlivem magnetického pole.	Aktuátory
Elektrostrikční materiály	Pb-Mg-Nb	Změna tvaru vlivem elektrického pole.	Aktuátory
Elektroreologické kapaliny	Nosné médium (olej, kerosin) + Částice (SiO_2, uhlík)	Změna skupenství vlivem elektrického pole.	Aktuátory
Magnetoreologické kapaliny	Nosné médium (cykloalkany) + Částice (hematit, magnetit)	Změna skupenství vlivem magnetického pole.	Aktuátory
Polymery s tvarovou pamětí	Pryskyřice	Kontrolovaná změna tvaru vlivem ohřevu.	Aktuátory

3 Aplikace inteligentních materiálů

Většina aplikací v letectví je zaměřena na pohodlí, bezpečnost nebo snížení spotřeby. Inteligentní materiály nacházejí uplatnění v každém sektoru letectví. Hlavní příležitosti na trhu, a tedy i pro případný rozvoj, jsou [16]:

Komerční letectví – Jedná se o sektor, kde nejvíce záleží na komfortu cestujících, proto je cílem snížit hluk a vibrace v letadle. Důležitá je také bezpečnost, proto je vhodné monitorovat stav konstrukce. Je to ovšem sektor, kde se pracuje s omezeným rozpočtem a každá letecká společnost nemusí mít potřebu investovat do drahých technologií. Díky snaze omezit náklady, mohou své uplatnění najít i opatření, která snižují spotřebu.

Vojenské letectví – Ve vojenském letectví inteligentní materiály nachází hlavní uplatnění v podobě monitoringu stavu konstrukce, zejména u náběžných hran. Kvůli terorismu rozpočty armád po celém světě stoupají a dá se předpokládat, že pozornost bude věnována i výzkumu inteligentních materiálů.

Bezpilotní letadla – Využití bezpilotních letadel v poslední době rapidně narůstá. Jednou z příčin je rozsáhlé využití v armádě a kosmu. Použití inteligentních materiálů je určitě vhodné, jelikož jde o stroje, kde není pilot, který by dokázal reagovat na podmínky letu.

Vrtulníky – U vrtulníků bude vždy hlavní pozornost věnována snížení vibrací a hluku. Inteligentní materiály, které mohou být použity v tlumičích zde nacházejí uplatnění.

Kosmické prostředky – Jelikož společnosti jako NASA mají téměř neomezené finanční prostředky, rozvoj je orientován do mnoha oblastí. Od inteligentních materiálů se očekává, že pomohou prodloužit životnost satelitů.

Konkrétní aplikace inteligentních materiálů:

V kosmonautice:

1. Detekce poruch a sebediagnostika
2. Tlumení vibrací
3. Aktivní kompenzace a přizpůsobení
4. Rozvinutí a spojování konstrukčních prvků

V atmosférickém letectví:

1. Inteligentní potahy letadel
2. Detekce námrazy na náběžných hranách
3. Monitorování vytvrzování u kompozitů
4. Sebeoprava poškozeného materiálu
5. Řídící systém
6. Kontrola vibrací
7. Omezení hluku na palubě
8. Keramické tepelné štíty a čelní skla
9. Inteligentní klapky
10. Použití u pneumatik letadel
11. Energeticky úsporné vrtulníky
12. Proměnná křídla

3.1 Kosmonautika

3.1.1 Detekce poruch a sebediagnostika:

V případě satelitů, kosmických lodí, vesmírných stanic či jiných umělých vesmírných těles, které mají velice dlouhou životnost, potřebujeme stále monitorovat integritu konstrukčních prvků. Z pravidla se jedná o monitorování kompozitních a kovových dílů konstrukce. [2]

Mezi nejčastější typy poškození vesmírných konstrukcí řadíme [2]:
1. Iniciace a šíření delaminace a únavových trhlin v kompozitních dílech
2. Šíření trhlin v kovových přetlakových trupech a tlakových nádobách
3. Nárazy mikrometeoritů na kosmická tělesa
4. Námraza na konstrukci
5. Přetížení prvků konstrukce při manévrech.

U některých vesmírných těles nemusí být manuální prohlídka proveditelná během celého provozního života, což může být i více než 30 let. V těchto případech je na místě zavedení systému, díky kterému se konstrukce dokáže sama diagnostikovat. Takto můžeme získat potřebnou jistotu, že je konstrukce v pořádku. Při použití senzorů, obsahujících inteligentní materiály, můžeme tento systém zařadit mezi inteligentní systémy úrovně 1. Výzkum je orientován do oblasti samoopravy poškozeného materiálu a také do prodlužování životnosti. [2]

3.1.2 Tlumení vibrací:

Tlumení vibrací je velice důležité u satelitů. Během dopravy satelitu na určité místo je vystaven nadměrnému dynamickému zatížení a otřesům, což může způsobit trvalé poškození některých křehkých dílů. Proto je nutné zavedení pasivního, nebo aktivního vibroizolačního systému, který zabraňuje přenosu vibrací a rázů z nosiče na náklad. Tyto systémy se umísťují mezi adaptér kosmického nosiče a užitečný náklad. [2,17]

Potenciálně by systém úrovně 3 dokázal kvantitativně určit sílu vibrací a podle toho by vyvolával proti-impulsy k potlačení těchto vibrací a kmitů. [2]

Možné alternativy systému pro aktivní tlumení vibrací [2]:

Piezokeramické aktuátory a senzory, které mohou být zabudovány do kompozitu nebo připevněné na povrchu konstrukce. Takovýto systém by byl zdrojem vibrací s opačnou fází, než jsou vibrace konstrukce.

Dráty ze slitiny s tvarovou pamětí vložené do kompozitu, které po spuštění změní tuhost. Rozdílná tuhost vede ke změně vlastní frekvence dílu, a tedy potlačení vibrací.

Povrchové vrstvy polymeru PVDF, které jsou použity ve struktuře. Bez elektrického pole PVDF poskytuje pasivní tlumení. Při zavedení elektrické energie vzniká aktivní tlumení, které má dvě části. Zaprvé se mění vlastní frekvence struktury a zadruhé se vytváří vibrace s opačnou fází, než jsou vibrace konstrukce.

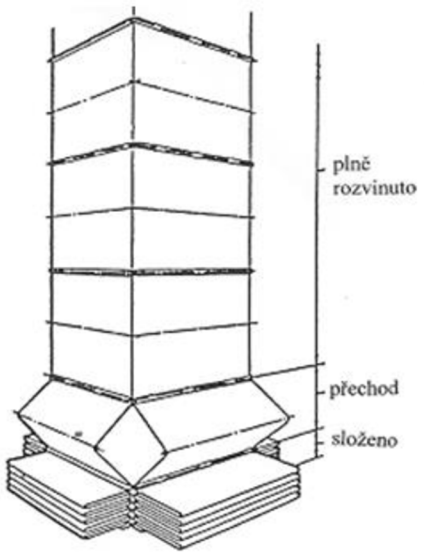
Optická vlákna s elektrostrikční povrchovou vrstvou zabudovaná do kompozitu, která snímají a působí proti napětí, které způsobují vibrace.

3.1.3 Aktivní kompenzace a přizpůsobení:

Přísné rozměrové tolerance u velkých antén nemusí být splnitelné pouze volbou materiálu a konstrukčním návrhem. V podmínkách kosmu může docházet, vlivem nestálých teplot, k rozměrovým změnám, a to i u materiálů s nulovou teplotní roztažností, jako jsou například některé uhlíkové kompozitní materiály. Potenciálně, zavedením systému úrovně 3 by byla použita aktivní kompenzace, jakmile by byla zjištěna změna tvaru antény způsobená cyklickými teplotními podmínkami. [2]

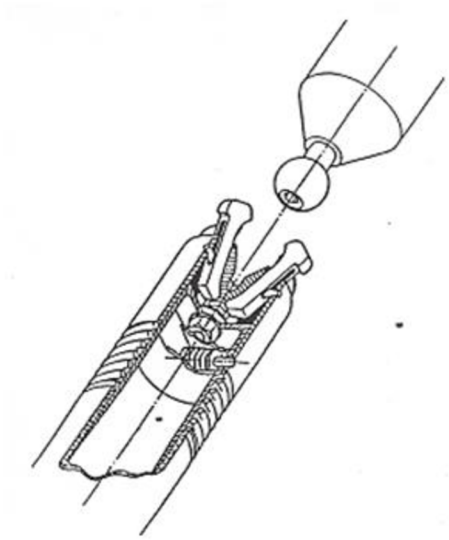
3.1.4 Rozvinutí a spojování konstrukčních prvků

Materiály s tvarovou pamětí nacházejí využití u velkých anténních kosmických konstrukcí, kde je nezbytná technika rozvinutí, případně spojení jednotlivých strukturálních sekcí. Rozměrné antény se dopravují do vesmíru složené a podchlazené, následně se vlivem slunečního záření rozvinou. Rozvinutí složené konstrukce pomocí aktuátoru ze slitiny s tvarovou pamětí ukazuje obrázek 3.1.4 a). Takovýto systém by byl založený na funkčních aktuátorech a dal by se tedy považovat za systém úrovně 2. Převládají případy, kdy je rozvinutí zapotřebí pouze jednou. V takovém případě se používají jednocestné slitiny. Aktuátory na bázi slitin s tvarovou pamětí jsou oproti klasickým elektromechanickým či hydraulickým aktuátorům, výkonnější a lehčí. [2]



Obrázek 3.1.4 a)
Rozvinutí konstrukce s využitím slitiny s tvarovou pamětí [2]

Koncept spoje pro montáž kompozitních trubek s využitím slitiny s tvarovou pamětí je na obrázku 3.1.4 b). Princip je založen na sevření objímky jedné části kolem kulového čepu druhé části vlivem jednorázové deformace slitiny. Dvě trubky jsou v tomto případě spojeny převlečeným pouzdrem ze slitiny s tvarovou pamětí, které bylo za studena deformováno na větší průměr. Pouzdro se jednoduchým ohřevem vrátí do původního stavu a vytvoří pevný těsný spoj trubek. [2]



Obrázek 3.1.4 b)
Spoj vytvořený slitinou s tvarovou pamětí [2]

3.2 Atmosférické letectví

3.2.1 Inteligentní potahy letadel

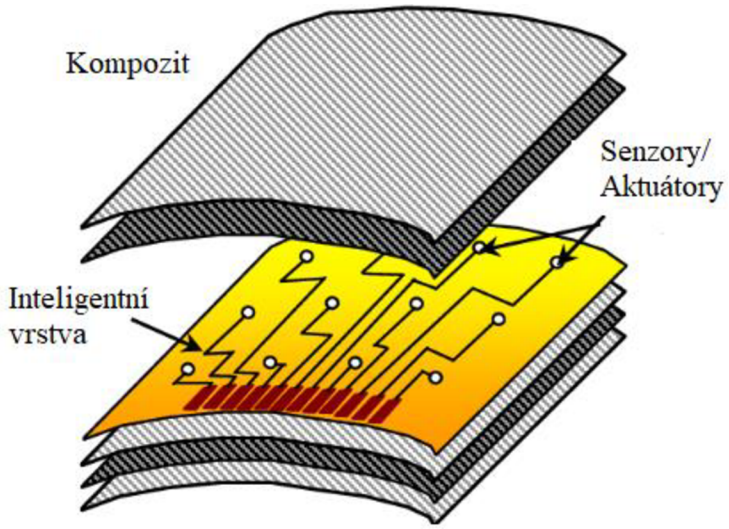
Aplikováním inteligentní vrstvy, složené ze sítě senzorů a aktuátorů do kompozitního povrchu letadla, můžeme získat velice užitečné informace o stavu konstrukce. Například [2]:

1. Mohou indikovat vzniklé poškození povrchu po nárazech zvenčí.
2. Mohou monitorovat vznik a šíření únavových trhlin, které způsobují okolo 55% všech poruch na letadlech [18].
3. Mohou kontrolovat změnu aerodynamických charakteristik. Jakákoliv změna tvaru letadla vede k jiným aerodynamickým vlastnostem. Piezoelektrický aktuátor však dokáže kontrolovat stav povrchu přímo.

Pokud by byl zaveden přímý monitorovací systém, bylo by možné omezit pravidelné prohlídky letadel, což by vedlo ke snížení výdajů a zlepšení flexibility. Inteligentní vrstvy v kompozitech mohou obsahovat kromě aktuátorů a senzorů i jiné prvky, které se dají využít k jiným funkcím [2]:

- komunikační linky z optických vláken
- elektromagnetická funkce – radiokomunikační prvky v potahu namísto hmotově a aerodynamicky nevýhodných vnějších antén
- radar – směrovaný dolů a nahoru v dolním a horním potahu křídla

Potah tvořený inteligentní vrstvou, složenou ze senzorů a aktuátorů lze vidět na obrázku 3.2.1.



Obrázek 3.2.1 Složení inteligentního potahu se zabudovanou sítí senzorů/aktuátorů [19]

3.2.2 Detekce námrazy na náběžných hranách

Další aplikací inteligentních materiálů je detekce námrazy na náběžných hranách. Jedná se o opatření, které zvyšuje bezpečnost letadel, poněvadž námraza na náběžných hranách křídel ovlivňuje aerodynamické charakteristiky a může zavinit havárii. Lidský posudek, založený pouze na počasí, nemusí být správný, proto se zavádějí měřící systémy. Své využití zde nachází bodové PDVF piezoelektrické senzory, které detekují zatížení námrazou a dávají možnost posádce k příslušné reakci. Podobné piezoelektrické senzory by se taktéž daly využít u listů rotoru vrtulníků. [2]

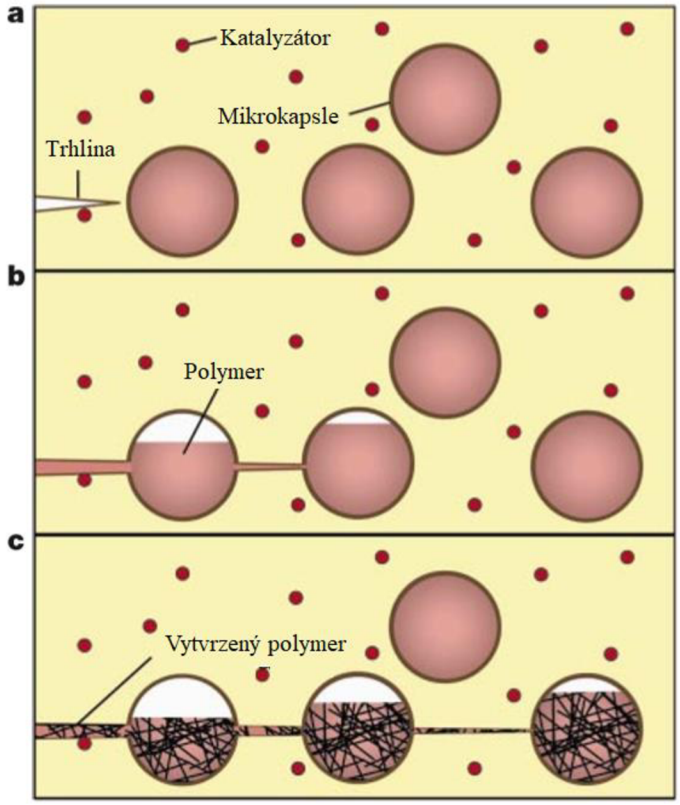
Potenciálně by mohly být zavedeny aktuátory, které by reagovaly na kritické hodnoty zatížení námrazou, jenž by byly změřeny pomocí senzorů. Samy by spustily ohřev náběžné hrany či rozstřik odmrazovací kapaliny. Takovýto komplexní systém by byl na úrovni 3. [2]

3.2.3 Monitorování vytvrzování kompozitu

Jak již bylo zmíněno výše, optická vlákna se dají využít k podpovrchovým měřením. Další potenciální aplikací by mohlo být monitorování vytvrzování kompozitu. Díky pulzujícímu světelnému paprsku v optických vláknech by mohlo být možné během vytvrzování pozorovat rozložení teplot a zbytkového napětí. Ve výsledku bychom mohli, díky optickým vláknům, kontrolovat kvalitu. Pokud by bylo toto monitorování podporováno tvarovací dovedností, pak bychom mohli dosáhnout aktivní změny podmínek při vytvrzování kompozitu. Nevýhodou jsou však vysoké náklady, navíc funkčnost této aplikace nebyla potvrzena. [2]

3.2.4 Sebeoprava poškozeného materiálu

Únavové trhliny jsou velice nebezpečné a mohou vést ke katastrofě. Potenciální aplikací, která by mohla zabránit šíření trhlin je sebeoprava poškozeného materiálu. Principem této aplikace by bylo vyztužení kompozitních materiálů polymery, které by byly tvořeny z disperzního katalyzátoru a mikrokapslí obsahující tekutý monomer. Jakmile by došlo ke vzniku a šíření trhliny základním materiálem, mikrokapsle by se porušila a uvolnil by se tekutý polymer, který by díky účinku kapilárních sil vyplnil trhlinu a kontaktem s katalyzátorem by následně došlo k jeho vytvrzení. Princip sebeopravy lze vidět na obrázku 3.2.4. Tento postup lze využít i pro opravu vláknového kompozitu. [20]



Obrázek 3.2.4 Schéma opravy poškozeného materiálu [20]

3.2.5 Řídící systém

Piezoelektrické materiály, konkrétně piezoelektrická keramika, se používá v letectví u transduktorů. Například mohou sloužit jako akcelerometry, díky kterým se dají měřit vibrace. Dále nacházejí uplatnění jako gyroskopy, s jejichž pomocí se dá zjistit zrychlení a náklon letadla nebo rakety. Také se dá využít jako senzor hladiny, což může být využito například pro měření paliva v nádrži. Piezoelektrické materiály jsou zastoupeny i u velice úspěšného Boeingu 777 a to v podobě šedesáti ultrazvukových palivových sond. Ultrazvukové transduktory jsou umístěny různě v palivových nádržích a zachycují zvukové vlny, které se odráží od povrchu paliva. Tyto zvukové vlny se vyvolávají kmitáním piezoelektrické keramiky. Toto kmitání vzniká reakcí na impulsní elektrické pole. Díky vyvolaným signálům, které zaznamenává digitální procesor, se dá poté zjistit, kolik je v nádrži paliva. Tento typ měření hladiny paliva se používá také u stíhacích letounů. Výhodou je velice přesné měření bez ohledu na orientaci letadla. [11]

3.2.6 Kontrola vibrací

Všeobecně platí, že vibrace u strojů přispívají k negativním vlivům. Jedná se o faktor, který může výrazně snížit bezpečnost a pohodlí letadla. Kvůli vibracím se zvyšuje nebezpečí týkající se například koncentrace napětí, únavy materiálu nebo zkrácení životnosti. Dále se snižuje účinnost a zvyšuje hluk, což je hlavně u dopravních letadel nežádoucí. Proto se výrobci letadel snaží vibrace co nejvíce minimalizovat. Je tedy nutné zavést tlumení, které vytváří vibrace s antirezonanční frekvencí, což je velmi složité. Piezoelektrický materiál může pracovat najednou jako senzor i jako aktuátor. Díky tomu dokáže kontrolovat vibrace a vyvolat dostatečně rychlou odezvu pro vytváření vibrací s antirezonanční frekvencí. Piezoelektrické materiály jsou navíc flexibilní, díky čemuž se mohou použít na mnoha částech letadla. [11]

3.2.7 Omezení hluku na palubě

Komfort při letu je pro cestující velice důležitý. Ať už se pasažéři rozhodnou let využít k práci nebo se pouze snaží o spánek, ani v jednom případě není hluk letadla žádoucí. U běžných pasivních tlumících systémů není možné měnit charakteristiku tlumení a jsou účinné převážně u vysokofrekvenčních zvuků. Hluk na palubě letadla, způsobený převážně motory, je však nízkofrekvenční, kde pasivní tlumení nedosahuje uspokojivých výsledků. [11]

Proto je zapotřebí aktivní tlumící systém, který může být zajištěn použitím piezoelektrické keramiky. Piezokeramický materiál je využit jako aktuátor a pracuje společně s pasivní vibrační isolací. Tento systém se nazývá ASAC (aktivní strukturální akustická kontrola). Byl testován u letounu Bombardier Dash-8 a dopadl velice dobře, jelikož došlo ke snížení hluku o více než 20dB u frekvence 61Hz. [11]

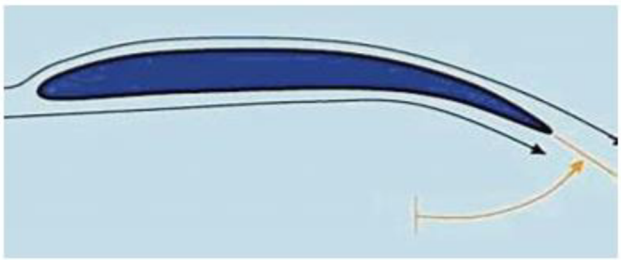
3.2.8 Keramické tepelné štíty a čelní skla

Keramická vlákna mají mnoho velice užitečných vlastností. Jsou lehká, nekorodují, taví se až při vysokých teplotách, jsou chemicky inertní, jsou pevná v tahu, jsou pružná a výborně odolávají vysokým teplotám. V letectví se používají jako tepelná izolace a tepelné štíty, které slouží jako ochrana proti ohni. Také se vyskytují ve formě průhledných, elektricky vodivých vrstev, zabudovaných u čelních skel letadel. Díky keramické vrstvě je čelní sklo vyhřívané a lépe odolává mlze a ledu. [11]

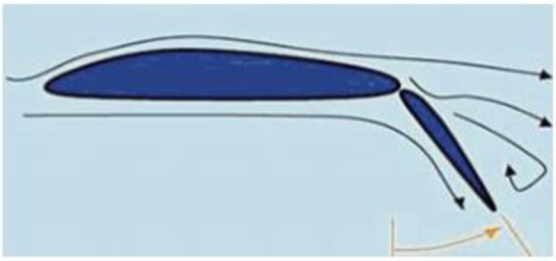
3.2.9 Inteligentní klapky

Ke zvýšení vztlaku se na křídlech nacházejí klapky. Pro pohyb klapek se běžně používá hydraulika a elektromotor, kvůli čemuž se letadlo zatěžuje a je hlučnější. Tento systém se dá však nahradit inteligentními materiály, se kterými se manipuluje pomocí tepla, které může být přivedeno například elektrickým proudem. Při použití elektrického proudu se ohřívá pružina, která se následně smršťuje, a tím zatahuje klapky. Tento systém dokáže nahradit hydrauliku a elektromotory. [11]

Potenciálně by se mohl dát použít i materiál s tvarovou pamětí, díky kterému by se dokázalo křídlo vlivem tepla tvarovat tak, že by byla nahrazena funkce klapek. Při použití této aplikace bychom mluvili o morfujícím letounu. Stále je však věcí výzkumu. Rozdíl mezi klapkami z inteligentních materiálů a klasickými klapkami lze vidět na obrázcích 3.2.9 a) a b). [11]



Obrázek 3.2.9 a)
Křídlo využívající inteligentní materiály [6]



Obrázek 3.2.9 b)
Křídlo využívající běžné materiály [6]

3.2.10 Použití u pneumatik letadel

Piezoelektrické materiály se také dají využívat k výrobě elektřiny vlivem mechanického napětí. Piezoelektrický článek se umísťuje do pneumatik letadel, jelikož při vzletu a přistání je vyvíjeno takové mechanické napětí, při kterém se může vyrábět elektrická energie. Příklad takového materiálu je křemen. Na obrázku 3.2.10 je zobrazen proces umístění piezoelektrických článků do pneumatik. [11]

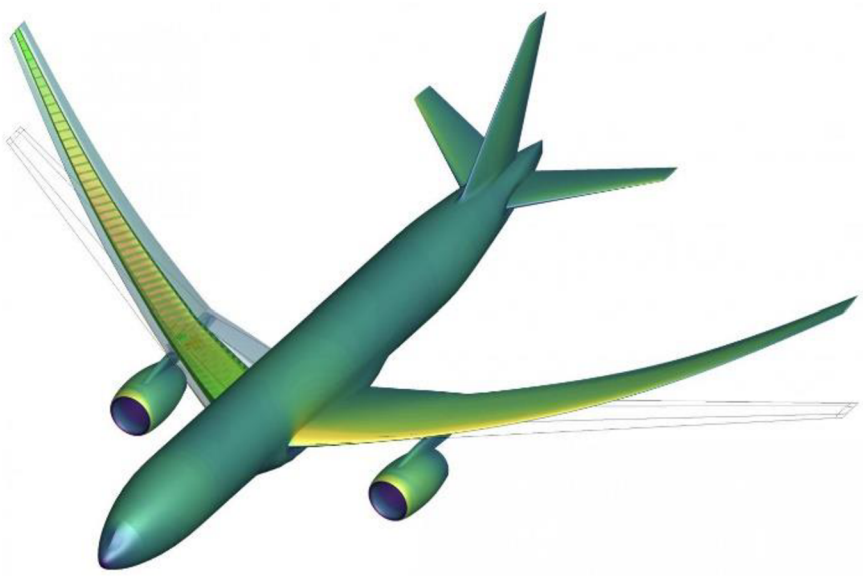
Obrázek 3.2.10 Příprava pneumatik pro umístění piezoelektrického článku [11]

3.2.11 Energeticky úsporné vrtulníky

Vrtulníky jsou díky výborné manévrovatelnosti velice důležité v mnoha odvětvích. Jejich značnou nevýhodou je však hluk, vratkost a nákladnost. Proto se začaly vyvíjet listy hlavního rotoru, u kterých je použit inteligentní materiál, který dokáže měnit tvar. Mohlo by to vést k tiššímu, úspornějšímu a plynulejšímu letu. Listy by pracovaly jako piezoelektrický aktuátor. Reagovaly by tedy změnou tvaru na elektrické pole. Bylo by možné měnit aerodynamický profil jednotlivých listů, což by zvýšilo účinnost. Při zavedení uzavřené smyčky by se daly listy kontrolovat tak, aby bylo dosaženo tlumení vibrací, které vznikají v rotoru. [11]

3.2.12 Proměnná křídla

Jedna z nejdiskutovanějších leteckých inovací posledních let jsou proměnná (morfující) křídla, která by obsahovala inteligentní materiály. Jednalo by se o křídla, která by dokázala měnit svůj tvar a profil během různých fází letu. Hlavní výhodou morfujících křídel by bylo zvýšení účinnosti a snížení spotřeby. Celkové úspory by mohly dosáhnout až deseti procent, což by vedlo nejen k ušetřeným nákladům, ale také by se snížila hmotnost letounu a hlučnost. Na obrázku 3.2.12 a) lze vidět model letadla s proměnlivými křídly. [21]

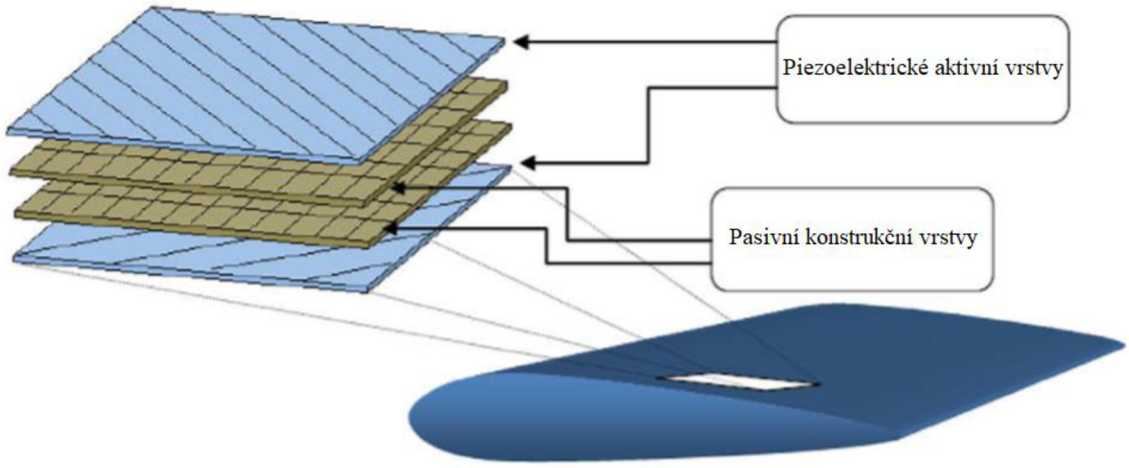


Obrázek 3.2.12 a) Letadlo s proměnnými křídly [22]

Využití by zde našly slitiny a polymery s tvarovou pamětí nebo piezoelektrické materiály. Použití slitiny s tvarovou pamětí u morfujících wingletů již bylo testováno v aerodynamickém tunelu. Výsledek byl velice pozitivní. Aerodynamická čistota bezpilotního letounu se zvětšila o 5,8 procenta. Polymery s tvarovou pamětí se využívají ke zlepšování povrchu letounu. Morfující povrch dokáže odolávat vysokému aerodynamickému zatížení a zároveň měnit svůj tvar. Tyto vlastnosti jsou velice užitečné při odletu a přistání. Nevýhodou slitin s tvarovou pamětí je snížení únavové životnosti při přehřátí a působení dlouhodobého vysokého mechanického napětí. [23]

Při použití piezoelektrických aktuátorů se může měnit úhel zkroucení po délce profilu. Konstrukce povrchu profilu je složena z pasivního kompozitního materiálu a aktivních vrstev piezokeramického materiálu. Aplikováním elektrického pole se profil zkroutí a změní se aerodynamika letounu. Hlavní výzvou konstruktérů je najít optimální konstrukční konfiguraci, která by dosahovala vysokých úhlů zkroucení, ale zároveň by dokázala odolávat aerodynamickému zatížení. [24]

Návrh aplikace inteligentního profilu je zobrazen na obrázku 3.2.12 b).



Obrázek 3.2.12 b) Návrh aplikace inteligentního profilu bezpilotního prostředku [24]

4 Budoucnost inteligentních materiálů

Co se týče inovací nových technologií, člověk vždy hledal inspiraci v přírodě. U letadel jasně vidíme analogii s ptáky. Už odjakživa se snažíme přiblížit jejich dokonalé technice letu. S inteligentními materiály se jednou třeba dočkáme situace, kdy se podíváme v letadle z okénka a uvidíme plynulé změny tvarů křídel, přizpůsobené aktuálním podmínkám letu. Podobně, jak to můžeme sledovat u ptáků. Díky vlastnosti změny tvaru je možno očekávat celou řadu vylepšení.

Je však zapotřebí poznamenat, že stále existují určité nedostatky inteligentních materiálů. V civilním letectví je nutné hledět na náklady spjaté s použitím inteligentních materiálů, častokrát se totiž jedná o velice drahá řešení. Proto je nutné vyhodnotit, zda se nákladné zavedení těchto materiálů vyplatí z dlouhodobého hlediska. To je důvod, kvůli kterému je výzkum spíše orientován do použití v kosmu, jelikož velké vesmírné organizace na výdaje tolik nehledí.

Dalším problémem mohou být zhoršené mechanické vlastnosti konstrukce. Přidání senzorů a aktuátorů do struktury vede k ovlivnění vlastností materiálu, což omezuje použitelnost inteligentních materiálů. [3]

Nevýhodou také může být nutné ovládání uzavřené smyčky, bez které přesnost aktuátorů a senzorů, které používají inteligentní materiály, nemusí být optimální. Dále některé materiály potřebují zvláštní zdroj pohonu, což znamená zvýšení složitosti a hmotnosti konstrukce. Například piezoelektrické materiály a elektrostrikční materiály je třeba řídit vysokým proudem. [3]

Stále je tedy potřebný rozvoj, aby byl uplatněn potenciál, který tento typ materiálů má. Na světě je celá řada organizací, které se zabývají výzkumem inteligentních materiálů. Co se týče inteligentních materiálů v letectví, tak se na výzkumu nejvíce podílí velké kosmické organizace jako jsou ESA a NASA. Také se uskutečňují konference, kde se podávají informace o nejnovějších výzkumech. Například BIT´s Annual World Congress of Smart Materials měl v roce 2019 již pátý ročník [25]. Inteligentní materiály mohou být využity samozřejmě také jinde než v letectví. Například pro spoření, skladování či vytváření energie. Dále nachází své uplatnění u tlumičů dopravních prostředků (vlaky), nebo také v lékařství v podobě implantátů a rovnátek. [26]

Až se podaří překonat nedostatky inteligentních materiálů, mohlo by se jednat o velký posun vpřed, a to nejen v letectví. V horizontu desítek let bychom se s nimi mohli setkávat, čím dál častěji. Ač se jedná o velice nákladné technologie a je zapotřebí spousta let výzkumu, bez pochyb je to oblast, ve které můžeme vidět budoucnost letectví.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracování přehledu současných a potenciálních aplikací inteligentních materiálů v letectví. V práci bylo na začátku vysvětleno, co to je inteligentní materiál a v jakých podobách se může vyskytovat v inteligentním systému. Dále byly rozřazeny prvky inteligentního systému, přičemž byla u daných prvků popsána funkce inteligentních materiálů. Poté následoval výčet jednotlivých aplikací v atmosférickém letectví a v kosmickém letectví. Na závěr byly shrnuty nedostatky inteligentních materiálů, a kde je prostor pro rozvoj do budoucích let.

Inteligentní materiály jsou stále věcí budoucnosti. U zmíněných aplikací si můžeme všimnou, že je část z nich stále ve fázi testování, nebo se dokonce jedná pouze o aplikace teoretické. Myslím si, že se s inteligentními materiály budeme postupem času setkávat čím dál častěji, a to nejen v letectví, ale také v lékařství, energetice, textilním průmyslu, stavebnictví či v železniční dopravě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] RANTER, Harro. *Aviation Safety Network releases 2018 airliner accident statistics* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://news.aviation-safety.net/2019/01/01/aviation-safety-network-releases-2018-airliner-accident-statistics/

[2] Structural Materials Handbook, Vol.2, New Advanced Materials. ESA PSS-03-203, Paris, 1994.

[3] Sun, J., Guan, Q., Liu, Y., & Leng, J. (2016). Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *27*(17), 2289–2312.

[4] WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/krystek/exm2/soubory/HBM_tenzometry.pdf

[5] HYRŠ, Jan. Měření teploty termočlánky. Brno, 2012. 32 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

[6] VALENOVÁ, L. Smart materiály. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D.,Paed IGIP.

[7] KRÁLOVÁ, Magda. *PYROELEKTRICKÝ A PIEZOELEKTRICKÝ JEV* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev

[8] KOŘÍNEK, M. Fyzikální principy přenosových médií v oblasti počítačových sítí, Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Josef Horálek Ph.D.

[9] JETELA, V. Letecké aktuátory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karol Bencalík.

[10] HRADIL, A. Návrh mikroaktuátoru s využitím SMART materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 52s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

[11] Jincy, P., Litty, J. (2012). Impact of Smart Materials in Aero Industry. *Industrial Engineering and Management studies* (stránky 440-446). Koimbatur, Tamilándu: International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering.

[12] Yang, Peng, "Phase Sensitive Thermography of Magnetostrictive Materials Under Periodic Excitations" (2016).Theses and Dissertations.Paper 1323.

[13] NOVÁČEK, V. Technologie výroby Magnetoreologických kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.

[14] Sparavigna, Amelia Carolina. (2007). Phonons in conventional and auxetic honeycomb lattices. Phys. Rev. B. 76. 10.1103/PhysRevB.76.134302.

[15] *Inovativní materiály pro moderní letectví* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/453

[16] *Smart Structures in Aerospace: Market Opportunities: 2016-2025* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/NanoMarkets/smart-structures-in-aerospace-and-aviation

[17] ŠVÁBÍK, R. Vibroizolační plošina pro kosmonautiku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

[18] Why aircraft fail, Review Article, Materials Today, Volume 5, Issue 11, November 2002, Pages 18-25 S.J Findlay, N.D Harrison

[19] Lin, Mark et al. "SMART Layer and SMART Suitcase for structural health monitoring applications." (2001).

[20] WHITE, S, N SOTTOS, P GEUBELLE a J MOORE. Autonomic healing of polymer composites. *Nature* [online]. London: Nature Publishing Group, 2001, **409**(6822), 794-7 [cit. 2019-05-10]. DOI: 10.1038/35057232. ISSN 00280836. Dostupné z: http://search.proquest.com/docview/204496070/

[21] GROHMANN, Jan. *Proměnlivá křídla zanesou letadla dále a levněji* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/technika/morfujici-kridla.A171027_133103_veda_mla

[22] DUBROW, Aaron. *Aircraft of the Future Has Morphing Wings* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.ien.com/product-development/news/20854183/aircraft-of-the-future-has-morphing-wings

[23] Bashir, Musavir & Lee, Chih Fang & Rajendran, Parvathy. (2017). Shape memory materials and their applications in aircraft morphing: An introspective study. Journal of Engineering and Applied Sciences. 12.

[24] NIR, Adi a Haim ABRAMOVICH. Design, analysis and testing of a smart fin. *Composite Structures*[online]. Elsevier, 2010, **92**(4), 863-872 [cit. 2019-05-10]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.017. ISSN 0263-8223.

[25] *Conference Report* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://www.bitcongress.com/wcsm2019/

[26] ANDRLE, Michal. *Technologie a budoucnost: Chytré materiály, které mění svět* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://21stoleti.cz/2011/03/23/technologie-a-budoucnost-chytre-materialy-ktere-meni-svet/