

Návrh modelu pro simulaci dynamického zatížení kompozitové vrtule

Bc. Pavel Stánek



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Pavel Stánek
Osobní číslo:	T23497
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh modelu pro simulaci dynamického zatížení kompozitové vrtule

Zásady pro vypracování

- Literární přehled
- Návrh numerického modelu
- Řešení modelu
- Vyhodnocení výsledků

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BOWER, Allan F. *Applied mechanics of solids*. Boca Raton: CRC Press, 2010, xxv, 794 s. ISBN 978-1-4398-0247-2.

EHRENSTEIN, G.W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia Praha, 2009. ISBN 978-0521841887.

BARBERO, E. J. *Introduction to composite materials design*. Third edition, CRC Press, 2018. ISBN-13: 978-1138196803.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením numerické simulace s dynamickou povahou v podobě nárazu ptáka na dvoulistou vrtuli tvořenou z kompozitu z uhlíkových vláken, jenž nachází aplikaci v oblasti dronů.

V teoretické části je detailně popsána problematika kompozitních materiálů a jejich chování z hlediska odezvy na dynamické zatížení a následné selhání. Pozornost je taktéž věnována mechanice kompozitních materiálů a samotných vrtulí včetně metody konečných prvků.

Praktická část se zabývá provedením dvou individuálních konečněprvkových analýz, které se vzájemně liší rozdílným místem dopadu ptáka na kompozitovou vrtuli. Součástí vytvoření těchto simulací je přiřazení materiálových vlastností, okrajových podmínek, definice nárazových parametrů, nastavení výpočetní analýzy a taktéž následné zobrazení, diskuze a porovnání výsledků na základě šíření napětí a deformací jednotlivých komponent vrtule.

Klíčová slova: kompozit, uhlíková vlákna, vrtule, dron, dynamika, náraz, deformace, napětí, FEM, metoda konečných prvků, nelinearita

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create a dynamic numerical simulation of a bird impact on a two-blade propeller made of carbon fiber composite used for drones.

The theoretical part provides a detailed description of composite materials, their behaviour under dynamic loading, and upcoming failure. It also covers the mechanics of composite materials, the structure of propellers and the finite element method.

The practical part involves the creation of two separate finite element analyses, differing in the impact location of the bird on the composite propeller. These simulations include the assignment of material properties, boundary conditions, impact parameters, set up of the computational analysis and also visualisation, discussion and comparison of results based on stress distribution and deformation of individual components of the propeller.

Keywords: composite, carbon fibers, propeller, drone, dynamics, impact, deformation, strain, stress, FEM, finite element method, nonlinearity

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval panu doc. Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, ochotu, vstřícnost, trpělivost a vždy milý přístup, který mi po celou dobu vypracování práce věnoval. Mé poděkování také směřuje k mým rodičům Miroslavě a Pavlovi a bratru Tomášovi, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli mi nesmírnou oporou.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	15
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	15
1.1.1 Rozdělení podle tvaru disperze	16
1.2 KOMPOZITNÍ STRUKTURA	17
1.2.1 Mechanické zaklínění.....	17
1.2.2 Smáčivost vláken a adsorpce	18
1.2.3 Chemická vazba	18
1.3 STAVBA VRSTVENÉHO KOMPOZITU	19
1.3.1 Orientace vláken.....	20
1.3.2 Uspořádání vrstev.....	20
1.3.3 Vyztužující vlákna	21
1.3.4 Vláknová kompozice.....	25
1.3.5 Matrice	26
1.4 PREPREGY	27
1.4.1 Výroba prepregů s termosetickou matricí	27
1.4.2 Lisování v autoklávu	28
2 MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	30
2.1 MIKROMECHANIKA	30
2.1.1 Objemové a hmotnostní zlomky	31
2.1.2 Reprezentativní objemový element.....	32
2.2 JEDNOSMĚRNÁ VYZTUŽENÁ VRSTVA	32
2.3 KLASICKÁ LAMINÁTOVÁ TEORIE	35
3 DYNAMIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	37
3.1 PRINCIP DYNAMIKY	37
3.2 SRÁŽKA DVOU TĚLES.....	38
3.2.1 Nárazová síla	38
3.3 NAPĚŤOVÉ VLNY	39
3.3.1 Elastické napěťové vlny	39
3.3.2 Plastické napěťové vlny	41
3.4 ODEZVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ NA DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ	42
3.4.1 Nízkorychlostní nárazy	42
3.4.2 Vysokorychlostní nárazy.....	43
3.5 SELHÁNÍ KOMPOZITNÍ STRUKTURY PŘI NÁRAZU	43
3.5.1 Nárazové poškození	45
4 KOMPOZITOVÁ VRTULE	47

4.1	KONSTRUKCE KOMPOZITOVÉ VRTULE	49
4.1.1	Technologie výroby.....	50
4.2	GEOMETRIE VRTULOVÉHO LISTU	50
4.2.1	Aerodynamické faktory	52
4.3	SÍLY PŮSOBÍCÍ NA VRTULI.....	53
4.4	VLIV STRUKTURY KOMPOZITOVÉ VRTULE NA NÁRAZOVÉ ZATÍŽENÍ	54
4.4.1	Vliv materiálových vlastností.....	54
4.4.2	Vliv geometrie vrtulového listu.....	55
4.5	NÁRAZOVÉ ZATÍŽENÍ.....	57
5	FEM – METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	58
5.1	TVORBA FEM MODELU	58
5.1.1	Uzly	59
5.1.2	Elementy.....	59
5.1.3	Konečně prvková síť	61
5.2	FEM ANALÝZA	61
5.2.1	Simulace kontaktu	62
II	PRAKTICKÁ ČÁST	63
6	CÍL PRÁCE	64
7	3D MODEL Y	65
7.1	KOMPOZITNÍ VRTULE	65
7.1.1	Vnější plášť	66
7.1.2	Náboj	69
7.1.3	Jádro	69
7.1.4	Výztuhy	70
7.1.5	Optimalizovaný model vrtule.....	71
7.2	PTÁK	72
8	FEM MODEL Y	73
8.1	KOMPOZITNÍ VRTULE	73
8.1.1	Vnější plášť	74
8.1.2	Náboj	75
8.1.3	Jádro	75
8.1.4	Výztuhy	76
8.2	PTÁK	76
9	FEM SOFTWAREY POUŽITÉ PRO ZHOTOVENÍ ANALÝZY	78
9.1	MSC PATRAN.....	78
9.2	MSC DYTRAN	78
10	SIMULACE 1 – KONCOVÁ ČÁST VRTULOVÉHO LISTU	79
10.1	ZALOŽENÍ ANALÝZY	79

10.2	PŘÍPRAVA FEM MODELŮ	79
10.3	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	80
10.4	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	84
10.5	VÝPOČETNÍ ANALÝZA	86
10.6	ŘEŠIČ – MSC DYTRAN.....	87
11	SIMULACE 2 – STŘED VRTULOVÉHO LISTU	89
12	VÝSLEDKY SIMULACÍ	90
12.1	SIMULACE 1	92
12.1.1	Kompozitní plášť.....	93
12.1.2	Výztuhy	96
12.1.3	Jádro	99
12.1.4	Sestava vrtulového listu	102
12.2	SIMULACE 2	103
12.2.1	Kompozitní plášť.....	103
12.2.2	Výztuhy	106
12.2.3	Jádro	106
12.2.4	Sestava vrtulového listu	107
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	108
13.1	KOMPOZITNÍ PLÁŠŤ	108
13.2	VNITŘNÍ KOMPONENTY VRTULOVÉHO LISTU	113
	ZÁVĚR	116
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	119
	SEZNAM OBRÁZKŮ	122
	SEZNAM TABULEK.....	126
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	127

ÚVOD

Kompozitní materiály v dnešní době mají velké využití a jsou náhradou běžných konvenčních materiálů především díky nízké hmotnosti a vynikajícím mechanickým vlastnostem typicky v leteckém, kosmickém, automobilovém a lodním průmyslu. Jedná se o spojení dvou či více materiálů za účelem získání nového materiálu, který kombinuje výhody vlastností dílčích složek. Mezi ty nejrozšířenější kompozitní materiály patří kombinace polymerní pryskyřice a vyztužujících vláken.

Chování kompozitních materiálů při statických způsobech zatížení je v dnešní době obsáhle popsáno, naproti tomu dynamické zatížení je stále ve fázi výzkumu a jelikož je použití těchto materiálů využíváno právě v oblastech, kde dochází k dynamickému typu zatížení (ať už se jedná o aplikaci, kde je tento typ zatížení pouze vedlejší či nikoli), jako jsou např. havárie automobilů nebo právě nárazy leteckých komponent s cizími tělesy, je nutná znalost jejich dynamického chování.

Práce se zaměřuje nejen na zhotovení numerické analýzy dynamického zatížení kompozitové vrtule, ale také na podrobný popis odezvy těchto materiálů na tento druh zatěžování a z něj plynoucích mechanismů selhání, díky čemuž práce pozitivně přispívá k prohloubení informací týkajících se této problematiky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V praxi je vždy nutné zvolit pro konkrétní druh aplikace vhodný materiál, který bude splňovat požadované vlastnosti. Možnosti homogenního materiálu jsou však díky jeho vlastnostem omezené a často nelze vyhovět požadavku materiálových vlastností na daný typ použití. V takovém případě dochází k uplatnění kompozitních materiálů, které jsou z hlediska své vnitřní struktury tvořeny kombinací dvou nebo více odlišných materiálů – složek na makroskopické úrovni, které jsou vzájemně nerozpustné, za účelem vytvoření nového modifikovaného produktu (materiálu) se zlepšenými vlastnostmi. U některých materiálů je možné docílit tzv. synergického efektu, kdy výsledné mechanické i fyzikální vlastnosti kompozitního materiálu jsou oproti vlastnostem dílčích složek lepší (větší) než je jejich poměrný součet. [1,2]

Dílčí složky se dělí na vyztužující (pevnou) fázi a matici (pojivo), v níž je vyztužující fáze vložena. Materiál vyztužující fáze přenáší zatížení a je typicky ve formě vláken, příp. částic nebo vloček – kvůli vyšší pevnosti a menšímu počtu defektů se upřednostňuje vyztužení vlákny. Matici tvoří materiály kontinuální (polymerní, keramická, kovová matrice) a jejím úkolem je přenos zatížení na vlákna, zajištění jejich polohy a ochrana před okolními vlivy. [2]



Obrázek 1 Stavba kompozitního materiálu [3]

Nejdůležitější jsou kompozity s polymerní maticí, které kombinují nízkou hmotnost s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. [1,2,4]

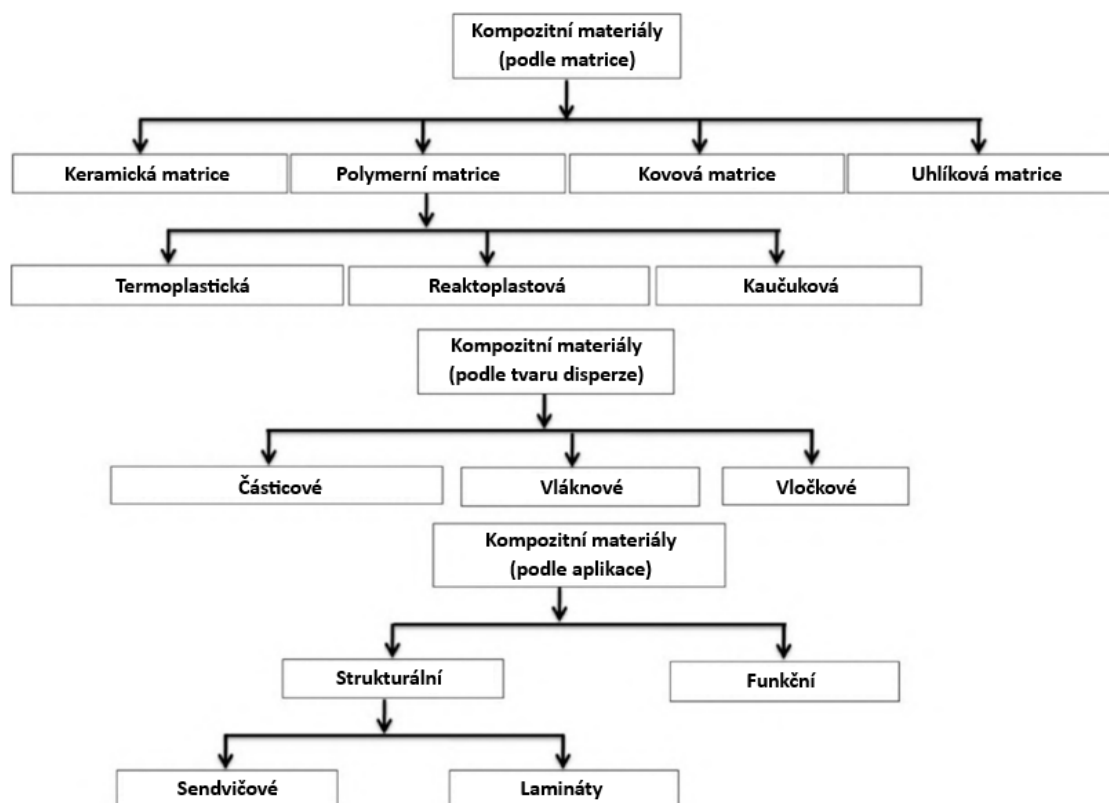
1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze obecně klasifikovat různými způsoby. Podle použité matrice se tradičně dělí do čtyř kategorií – kompozity s polymerní, kovovou, keramickou nebo uhlíkovou

matricí. Kompozity využívající polymerní matrici je dále možné dělit na kompozity s termoplastickou, reaktoplastovou, kaučukovou nebo elastomerovou matricí. [5]

Dalším typem dělení kompozitních materiálů je podle tvaru jejich výztuže (disperze) na částicové, vločkové a vláknové kompozity. Na základě velikosti výztuže je možné provést dělení na makrokompozity, mikrokompozity, a nanokompozity. [5]

Podle aplikace se kompozity dělí na strukturální, funkční a případně na tzv. inteligentní kompozity. Samotné strukturální kompozity jsou dále rozděleny do dvou kategorií: sendvičové a laminátové kompozity. V praxi je však nejdůležitější rozdělení právě podle tvaru disperze. [2,5]



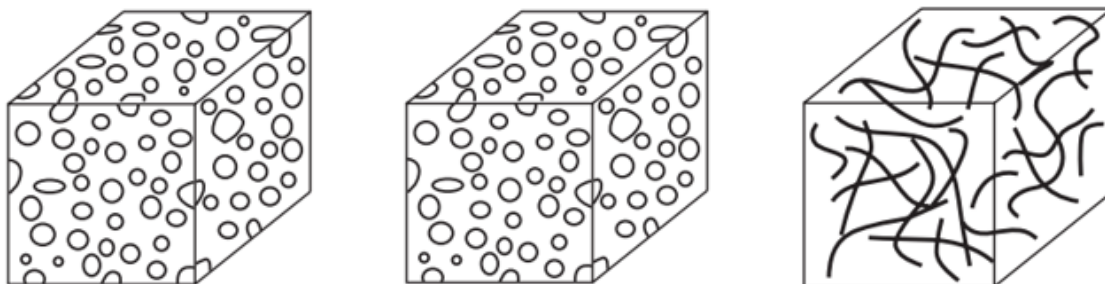
Obrázek 2 Obecné rozdělení kompozitních materiálů [5]

1.1.1 Rozdělení podle tvaru disperze

Na rozdíl od matrice nemá pevná fáze spojitý charakter (nespojité charakter nese označení disperze) a je potřeba rozlišovat její tvar: [2]

- Částicové kompozity – Skládají se z částic ponořených do matrice. Obvykle jsou izotropní. [2]

- Vločkové kompozity – Vločky jsou ploché výztuhy, jejichž materiálem je hliník, sklo, slída nebo stříbro. [2]
- Vláknové kompozity – Podstatou je matrice vyztužená buďto krátkými nebo dlouhými vlákny. [2]



Obrázek 3 Částicový, vločkový, vláknový kompozit [6]

1.2 Kompozitní struktura

Výsledné vlastnosti matrice se v kompozitním materiálu neprojeví, pokud adheze mezi matricí a vláknem není dostatečně silná. Díky silné adhezi je totiž zajištěna celistvost materiálu až do selhání a lze jí dosáhnout vhodně zvolenou matricí, výztuží, splněním dodatečných podmínek (např. požadovaná viskozita matrice) a především adhezními mechanismy. [7,8]

1.2.1 Mechanické zaklínění

Mechanické zaklínění neboli zámkový efekt je druh spojení, kde k pevnosti rozhraní značně přispívá drsnost povrchu, která způsobí vzájemné mechanické zajištění vlákna a matrice, tedy tvorbu mechanické vazby. [2]

Předpokládá se, že účinky vazby budou významnější při smykovém zatížení než při dekohezi v důsledku tahových napětí. [8]

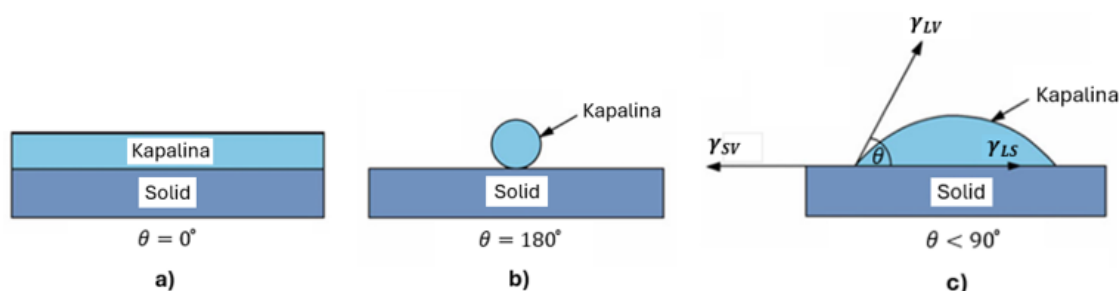


Obrázek 4 Mechanické zaklínění [8]

1.2.2 Smáčivost vláken a adsorpce

Nejdůležitějším mechanismem na rozhraní vlákna a matrice je tzv. smáčivost povrchu vláken, která vypovídá o schopnosti kapaliny (matrice) navlhčit či smáčet vlákna. [7]

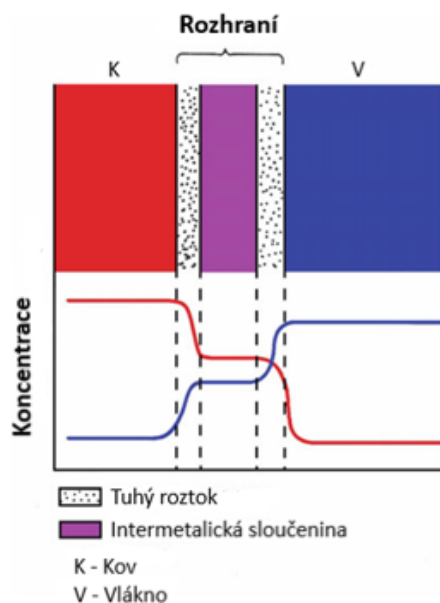
Rozhodnutí, zda je smáčivost vláken dobrá nebo špatná je v zásadě jednoduché. Pokud se kapka kapaliny začne šířit po pevném povrchu, je smáčivost dobrá. Jakmile však kapka na povrchu zůstává, označuje se smáčivost jako špatná, tedy látky jsou vzájemně nesmáčivé a matematicky nám toto rozhodnutí popisuje tzv. úhel smáčivosti θ . Čím nižší je úhel θ , tím lepší je smáčivost daných látek. [7,9]



Obrázek 5 a) Ideální smáčivost, b) Nesmáčivost, c) Částečná smáčivost [7]

1.2.3 Chemická vazba

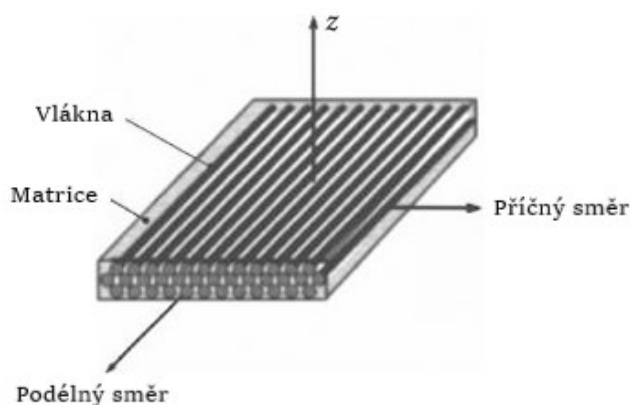
Vytváří se mezi povrchem vlákna a matricí. Zatímco některá vlákna jsou schopna se k matrici vázat přirozeně, jiná toho schopna nejsou a k vytvoření chemické vazby se využívají spojovací činidla (nejčastěji silany). [2,7]



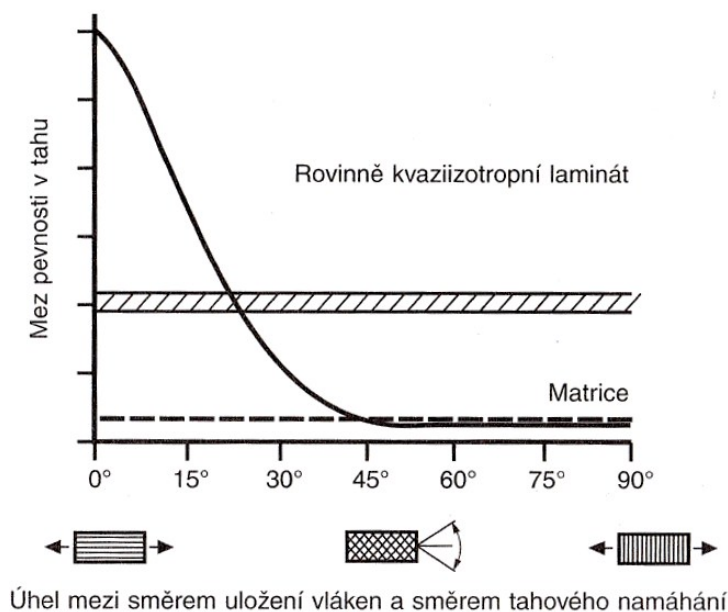
Obrázek 6 Chemická vazba [7]

1.3 Stavba vrstveného kompozitu

Vlákna přebírají většinu zatížení a jsou nositelem pevnosti a tuhosti v podélném směru, ve směru kolmém však k pevnosti nepřispívají a odolnost v příčném směru závisí na matrici (převážně polymerní). Pevnost matrice je obecně velmi nízká a její odolnost vůči zatížení nedostačující, tudíž jsou jednovrstvé kompozitní materiály pro většinu technických aplikací nevyhovující. Je tak zapotřebí provádět vrstvení jednotlivých vrstev zvaných lamin, aby byla dosažena požadovaná odolnost pro různá zatížení. Samotné vrstvy mohou mít různou orientaci vláken a taktéž mohou být tvořeny různými materiály, díky čemuž je možné přizpůsobit vlastnosti konkrétnímu směru a druhu zatížení (především při zatížení v tahu ve směru vláken). Vrstvení může být symetrické nebo asymetrické. [1,10,11]

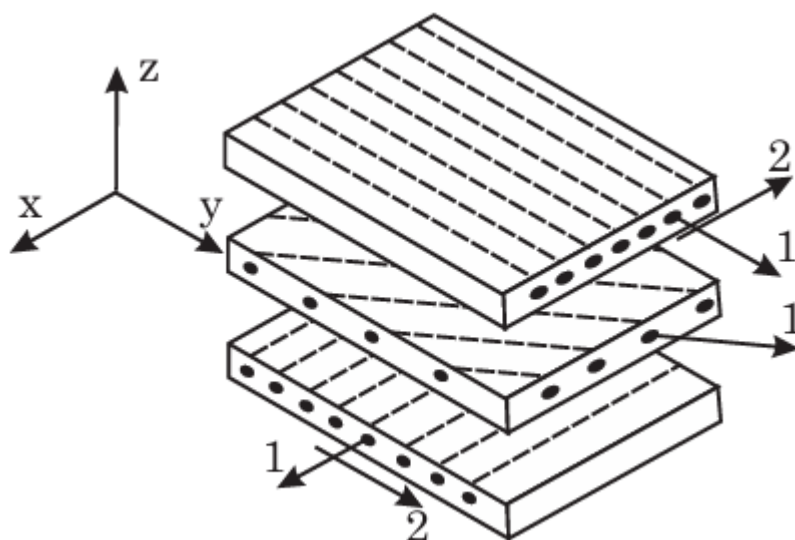


Obrázek 7 Kompozit s dlouhými vlákny [12]



Obrázek 8 Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého kompozitu na úhlu orientace vláken [10]

Výsledným produktem zmíněného vrstvení je tzv. laminát, což je nejčastěji používaná forma kompozitních materiálů. Výhodami laminátu jsou vysoká pevnost, tuhost, tvarová přizpůsobivost, odolnost vůči dynamickému zatížení, stárnutí, korozi a možnost kombinace různých materiálů matrice a vláken, čímž lze zhotovit materiál s přesně požadovanými vlastnostmi pro konkrétní aplikaci. Lamináty však přináší i jisté nevýhody, např. neobvyklé chování, tzn. vlastnosti kompozitního materiálu není možné jednoduše odvodit součtem vlastností jednotlivých složek. [1,3,10]



Obrázek 9 Laminát složený z vrstev s různou orientací vláken [1]

Pro výsledné vlastnosti laminátů je rozhodující řada kritérií, těmi nejdůležitějšími jsou např. orientace vláken, uspořádání jednotlivých vrstev, druh vlákna a matrice apod. [2]

1.3.1 Orientace vláken

Podle orientace vláken se lamináty dělí na jednosměrné a vícesměrné. U jednosměrných laminátů mají všechny vrstvy stejnou orientaci (směr) vláken, čímž je pevnost a tuhost zajištěna pouze v tomto směru. Vícesměrné lamináty mají rozdílnou orientaci vláken jednotlivých vrstev a je tak zajištěno rozložení pevnosti a tuhosti v různých směrech. [2]

1.3.2 Uspořádání vrstev

Vrstvy laminátu s konkrétní vláknovou orientací mohou být vzájemně libovolně uspořádány a podle tohoto uspořádání jsou členěny na lamináty symetrické a asymetrické. V případě

symetrického uspořádání jsou vrstvy laminátu symetricky poskládány kolem roviny symetrie, kterou v případě lichého počtu vrstev zastupuje prostřední vrstva a v případě sudého počtu vrstev středová rovina (plocha mezi dvěma středovými vrstvami). [1,2]

0	0
-45	-45
60	60
-45	60
0	-45
	0

Obrázek 10 Symetrické uspořádání – vlevo s lichým, vpravo se sudým počtem vrstev [2]

Aby se jednalo o symetrické uspořádání, musí být kromě symetrické orientace vláken jednotlivých vrstev symetrické i jejich materiálové vlastnosti a tloušťky. [2]

Uhlíková vlákna - Epoxidová pryskyřice	0	0
Borová vlákna - Epoxidová pryskyřice	45	-45
Borová vlákna - Epoxidová pryskyřice	-45	90
Borová vlákna - Epoxidová pryskyřice	-45	60
Borová vlákna - Epoxidová pryskyřice	45	30
Uhlíková vlákna - Epoxidová pryskyřice	0	

Obrázek 11 Uspořádání vrstev – vlevo symetrické, vpravo asymetrické [2]

U laminátů se symetrickým uspořádáním vrstev nedochází k tzv. propojení (coupling) ohybu a prodloužení, tzn., že vlivem ohybové deformace nedochází k prodloužení (ani zkrácení), tedy ohybová tuhost je maximální a koeficienty spojení jsou nulové. [1,11]

1.3.3 Vyztužující vlákna

Vyztužující vlákna se v kompozitních materiálech používají pro svou pevnost, tuhost a zároveň nízkou hmotnost. Jako výtzuže ve strukturálních aplikacích může být použita velká škála vláken, které je možné dělit na základě jejich: [1]

- Délky – Dlouhá a krátká vlákna. [1]
- Modulu pružnosti v tahu – LM – Nízko modulová, MM – Středně modulová, HM – Vysoko modulová, UHM – Ultra vysoce modulová. [1]
- Chemického složení – Organické, anorganické. [1]

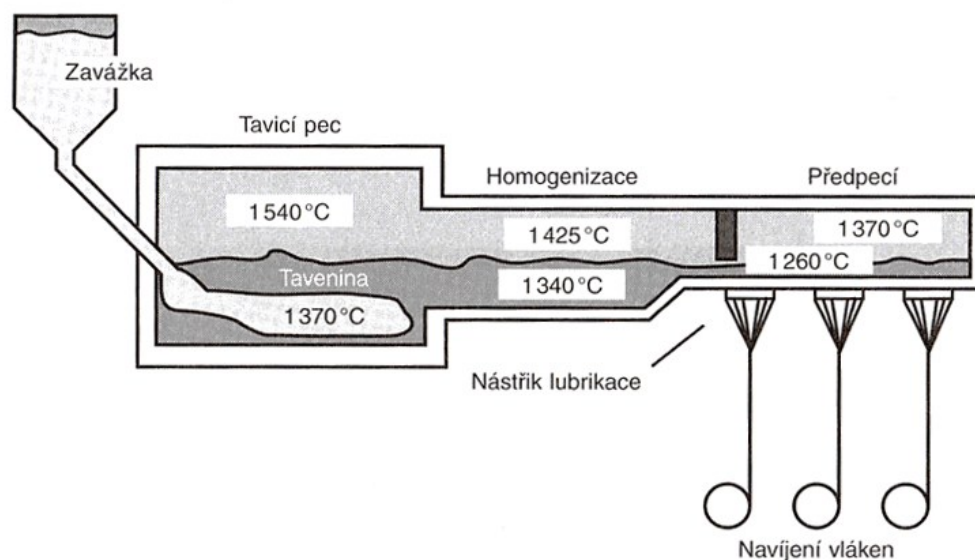
Mezi nejpoužívanější patří skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. [7]

1.3.3.1 Skleněná vlákna

Jsou to tenká vlákna o průměru 3,5 až 24 μm s pravidelným kruhovým průřezem, která se používají v různých odvětvích. Zpracovávají se z objemného skla a vyrábějí se tažením z platinových trysek. U většiny skleněných vláken je hlavní složkou křemičitý písek SiO_2 (dále kaolin, vápenec apod.), který se roztaví v peci. Řízením chemického složení a výrobního procesu lze získat rozmanitou škálu vláken pro různé aplikace, nicméně tato vlákna budou stále vykazovat typické vlastnosti skla jako je tvrdost, odolnost proti korozi, inertnost, flexibilita, nízká hmotnost a cena, díky čemuž jsou tato vlákna nejběžnějším typem používaným v levných průmyslových aplikacích. [1,8,10]

Skleněná vlákna získaná z bezalkalické skloviny mají vynikající elektroizolační vlastnosti, zároveň vysokou prostupnost záření a pevnost v tahu a označují se jako E-vlákna (elektrická, zastupují 90 % celého trhu). Sklovina obsahující větší množství SiO_2 , MgO , a Al_2O_3 má až o 70 % vyšší pevnost a označuje se jako R-resistence. Dalším typem je C-sklovina, která se vyznačuje velmi vysokou odolností proti kyselinám, chemicky agresivním látkám a pevností. C sklovina s velmi vysokou chemickou odolností a bez boru se pak označuje jako ECR-sklovina. [1,10]

Skleněná vlákna mají amorfnní strukturu a z tohoto důvodu jsou izotropní, na rozdíl od vláken uhlíkových či aramidových. [10]



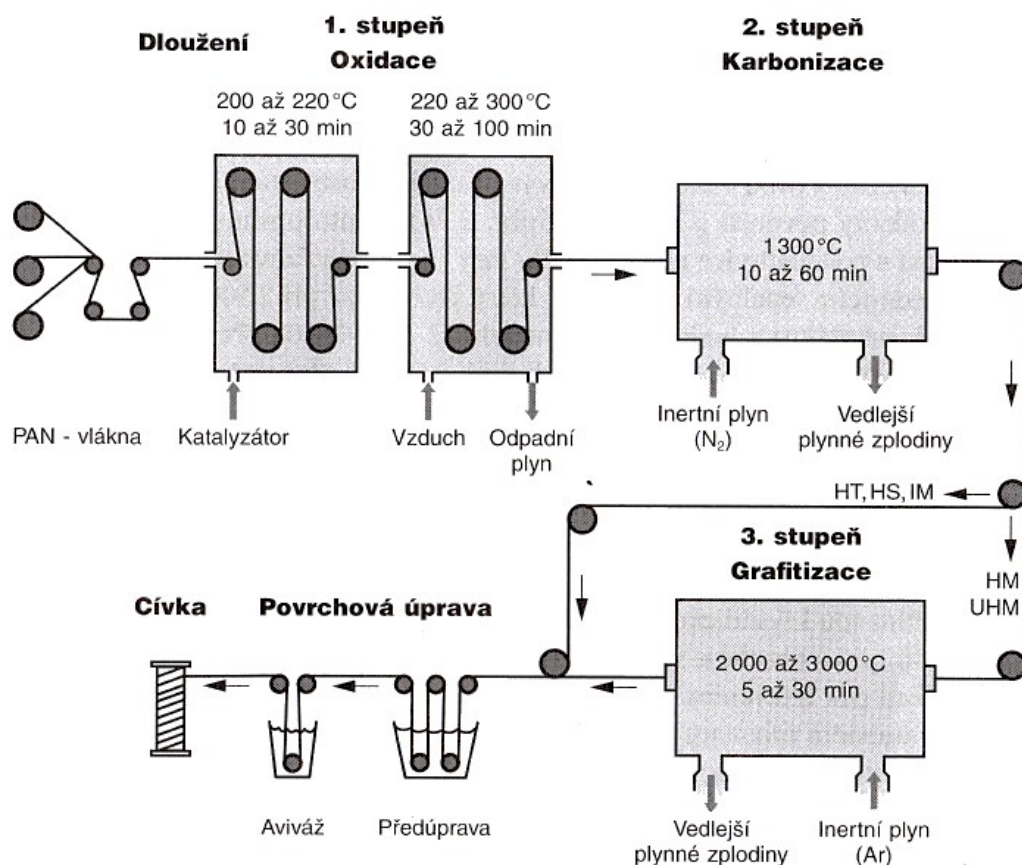
Obrázek 12 Výroba skleněných vláken tažených z trysek [10]

Princip výroby skleněných vláken spočívá v tažení z trysek, kdy se ve sklářské peci při teplotě přibližně 1 400 °C roztaví křemičitý písek (SiO_2), vápenec, kaolin a další složky na E-sklovinu, která se několik dní číří a následně je již v tekutém stavu vedena kanálky před-pecí do spřádacích platinorhodiových trysek (200 až 4 000 trysek), kterými sklovina pomalu vytéká a rychle tuhne do požadovaného tvaru vláken, jejichž tloušťka činí přibližně 2 mm a dlužením vláken na velmi rychle rotujícím navíjecím zařízení se dosahuje požadovaného průměru vláken a prodloužení až o 40 000násobek. Sdružením těchto elementárních vláken vzniká vlákno spřádací. [10]

1.3.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna, která se vyznačují extrémně vysokou pevností, tuhostí, odolností vůči chemikáliím, nízkou hmotností, ale nízkou tažností. Výchozí suroviny, jež se používají pro výrobu uhlíkových vláken a od nichž se odvíjí výsledné vlastnosti jsou PAN (polyakrylonitril), celulóza a smola. Nejčastější způsob výroby uhlíkových vláken uvažuje PAN jako tzv. prekurzor a tuto výrobu lze rozdělit do tří základních stupňů: [1,10]

- **1. Stupeň – Stabilizace:** PAN je nejprve dlužen a poté následuje samotná stabilizace vláken zahřátím na teplotu v rozmezí 200 až 300 °C, čímž se PAN dehydruje a zároveň přemění na žebříčkový polymer. [7,10]
- **2. Stupeň – Karbonizace:** Dochází k tzv. karbonizaci – žebříčkovitá struktura polymeru se přemění karbonizací (dochází k odstranění vodíku a snížení obsahu dusíku a kyslíku jako plynných odpadních produktů) při teplotách až do 1 600 °C v inertním prostředí (čistý dusík) po dobu až jedné hodiny na grafitickou strukturu. Vzniká mikrostruktura s velmi vysokou pevností a modulem pružnosti. [7,10]
- **3. Stupeň – Grafitizace:** Jedná se o tepelné zpracování při teplotách až do 3 000 °C v inertním prostředí tvořeném argonem, čímž dochází k dlužení vláken a zvětšení tuhosti. Zvýšení tuhosti je však provedeno na úkor poklesu pevnosti, podle které jsou tato vlákna rozdělena na ultra vysoko modulová (UHM – Ultra High Modulus), kdy modul pružnosti dosahuje hodnot až 400 GPa. Pevnost standardních uhlíkových vláken je přibližně 3,5 GPa, modul pružnosti zhruba 230 GPa a označují se jako HM. [7,10,13]

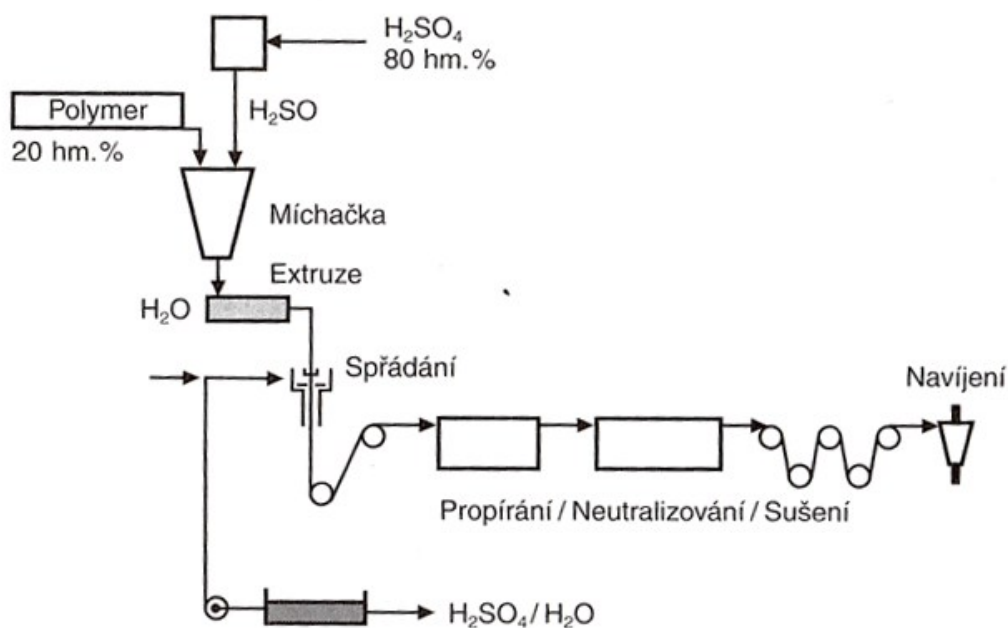


Obrázek 13 Výroba uhlíkových PAN-vláken [10]

Produkty tvořené z uhlíkových vláken dominují především v letectví a kosmonautice, využití nachází taktéž v automobilovém průmyslu, sportovním odvětví (vybavení), zdravotnictví, vojenském průmyslu apod. Oproti skleněným vláknům mají tato vlákna tzv. progresivní deformační chování – se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota modulu pružnosti. Velkou nevýhodou je, že jsou tato vlákna za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. [1,7,10]

1.3.3.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna, taktéž zvaná jako kevlarová, jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž předností je vysoká pevnost a tuhost, taktéž jsou silně anizotropní. Jedná se o nejlehčí vyztužující vlákno – hustota činí 1,45 g/cm³ z čehož plyne vysoká měrná pevnost v tahu. Při využití těchto vláken v různých konstrukcích je potřeba uvažovat velmi nízkou mez pevnosti v tlaku, tzn. jejich citlivost na tlakové zatížení, nicméně pevnost v tahu je velmi vysoká, a proto je vhodné tato vlákna využívat u konstrukcí, které jsou vystavovány právě tomuto druhu zatížení. [7,10]



Obrázek 14 Výroba aramidových vláken [10]

1.3.4 Vláknová kompozice

Jednotlivá vlákna jsou označována jako vlákna elementární, která se v praxi zpravidla nepoužívají a dochází k jejich úpravám a zhotovení určitých produktů, kterými jsou: [1,10]

- Pramen – Spojení přibližně 200 elementárních vláken, bez jakéhokoli kroucení. [10]
- Roving (pramenec) – Sdružení určitého množství pramenů bez jejich zkrucování. [10]
- Příze – Jedná se o kroucená nebo nekroucená vlákna, která nacházejí využití u textilního zpracování. [10]
- Rohož – plošná výztuž, která je tvořena buďto z nekonečných, sekaných, nahodile orientovaných pramenců vláken, které jsou spojeny příslušným pojivem. [10]
- Roving (pramenec) – Sdružení určitého počtu pramenů bez jejich zkrucování. [10]
- Jednosměrná vrstva – Vrstva s vlákny, která jsou jednosměrně orientována. [10]
- Tkaniny – Plošná výztuž s dobrou zpracovatelností. Skládá se z křížících, propletených vláken. [10]
- Prepregy – Částečně vytvrzená lisovací hmota (polotovary). [10]

1.3.5 Matrice

Jedná se o pojivo, které slouží k prosycení vláken, čímž dochází ke vzniku kompozitního materiálu. Samotná matice má mnoho funkcí, např. drží vlákna pohromadě, a tak přenáší zatížení na výztužná vlákna z vnějších zdrojů (zejména příčné napětí), chrání vlákna před okolními vlivy a zaručuje tvarovou stabilitu a geometrickou stálost (polohu vláken). Zajišťuje také vlastnosti výsledného kompozitu, kterými jsou především příčná tuhost a pevnost a taktéž charakterizuje i vnější vzhled výsledného produktu. [1,6,10]

Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí za účelem úplného smočení vláken bez vzniku bublin. Pro kvalitu výsledného materiálu je rovněž zásadní adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. [10]

Nejběžnějšími matricemi jsou polymerní matrice s nízkými náklady na potřebné nástroje a nízkými investičními výrobními náklady. Kompozity využívající polymerní matici označujeme jako polymerní kompozitní materiály a matrice se v tomto případě dělí na termoplastické a termosetické. [1,10]

1.3.5.1 Termosetická matrice

Většina polymerních kompozitních materiálů využívá v dnešní době reaktivní pryskyřice (polyesterové, epoxidové apod.). Hlavním důvodem je jejich nízkomolekulární výchozí forma a tekutý stav i při běžných teplotách, díky čemuž vykazují velmi nízkou viskozitu (hodnoty dosahují řádově stovek MPa · s, na rozdíl od termoplastických matric, kde se hodnoty pohybují v rozmezí 10^3 až 10^5 MPa · s). Nízká viskozita zaručuje snadnější zpracování termosetů, lepší smáčivost a prosycení vláken. Zpracovatelské procesy taktéž probíhají při nižších teplotách, což výrazně snižuje energetickou náročnost na prosycení vláken. Vlastnosti kompozitního materiálu při využití termosetické matrice se vyznačují vyšší pevností, tuhostí, chemickou a tepelnou odolností, nicméně mají nižší tažnost, houževnatost a jsou křehké. [10]

1.3.5.2 Termoplastická matrice

Termoplasty vyžadují vysokou zpracovatelskou teplotu, což způsobuje zkrácení vláken až o stonásobek jejich původní délky, zvyšuje energetickou náročnost procesu a zhoršuje smáčivost a prosycení vláken (prosycení vláken probíhá v roztavené fázi, kdy tavenina má výrazně vyšší viskozitu než v případě termosetů). Výhodou oproti termosetům je především vysoká houževnatost a povaha zpracování, při kterém dochází pouze k jejich roztavení

a opětovnému ztuhnutí, nikoli k chemickému procesu, který může negativně ovlivnit jakost výrobku. [1,10]

1.4 Prepregy

Prepregy (předimpregnované výztuže) jsou polotovary, sestávající z částečně vytvrzené vysoce viskózní matrice a kontinuálních výztužných vláken. Jsou hojně využívány pro výrobu vysoce výkonných leteckých dílů a složitých geometrií lisováním nebo pomocí autoklávu. [1,10,14]

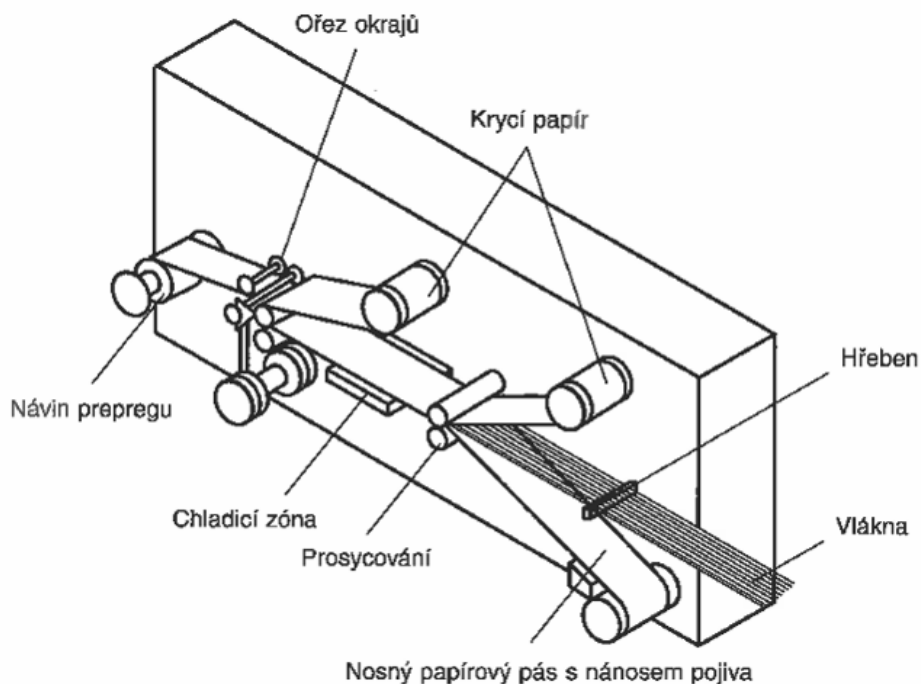
Za účelem výroby prepregu se vlákna smáčejí matricovým materiálem, což vede k získání předimpregnovaného polotovaru. Většina prepregů je zhotovena z epoxidových pryskyřic a výztuhu obvykle tvoří skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna. Poměr obsahu výztužných vláken a matrice je pro každý prepreg přesně definován velmi malými tolerancemi, běžně $\pm 2,5$ % – záleží na konkrétní aplikaci, někdy dokonce ± 1 %. Pro zhotovení se běžně volí kombinace plošné hmotnosti vlákna a obsahu pryskyřice, kde hmotnost výztuže zpravidla činí 60 %. Během vytvrzování ve vakuových procesech však dochází ke ztrátě pryskyřice, a proto se při zhotovování polotovaru volí větší množství. Ztráta materiálu matrice taky může způsobit menší tloušťku vytvrzené vrstvy, než je hodnota vypočítaná pomocí patričních vztahů, takže je opět nutné návrh provést s větší tloušťkou dané vrstvy, nicméně pokud se během vytvrzování ztratí velmi malé množství pryskyřice, může být výsledná tloušťka ještě větší než vypočítaná. [1,14]

Prepregy jsou obvykle dodávány v rolích vhodných šířek (30-60 cm), řezou (stříhají) se do požadovaných tvarů a do formy se vkládají vrstvu po vrstvě, dokud se nedosáhne požadované tloušťky daného výrobku. Vzhledem k tomu, že je pryskyřice částečně vytvrzená, mají prepregy omezenou trvanlivost, a proto se skladují v mrazácích. [1]

1.4.1 Výroba prepregů s termosetickou matricí

Při výrobě jednosměrně vyztužených prepregů s termosetickou matricí dochází k odvíjení pramence výztužných vláken ze stojanu s cívkami a jsou rovnoběžně vyrovnávány pomocí stavitelného hřebenu. Tím se získává připravený pás vláken a ukládá se na papírový nosič, jenž je opatřen silikonovou vrstvou, na které je již nanесena pryskyřice. Pás je dále veden na vytápěný válec kalandru, kde vlivem tlaku dochází k prosycení výztuže pojivem (pryskyřicí). Již prosycený pás prepregu oboustranně chráněný nosným papírovým pásem prochází

chladicí zónou, kde se zastaví vytvrzovací reakce a pokračuje přes ořezávací ústrojí na navíjecí zařízení. [10]



Obrázek 15 Výroba jednosměrných prepregů s termosetickou matricí [10]

1.4.2 Lisování v autoklávu

Jedná se o nejběžnější způsob vytvrzování součástí z prepregů se značně složitou geometrií. Při tomto zpracování jsou tlaky a teploty potřebné pro lisování zajištěny autoklávem, což je v podstatě spojení lisování pomocí vakuového a tlakového vaku. Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, u které je stabilizace a vytvrzení požadovaných kompozitních dílů dosažena díky přesnému řízení teplotních, tlakových a také vakuovacích cyklů. [10]

Lisování v autoklávu umožňuje výrobu tvarově složitých a vysoce kvalitních dílů především pro letectví a kosmonautiku, nicméně vyžaduje vysoké investiční náklady a umožňuje pouze malosériovou výrobu. [10]



Obrázek 16 Autokláv [14]

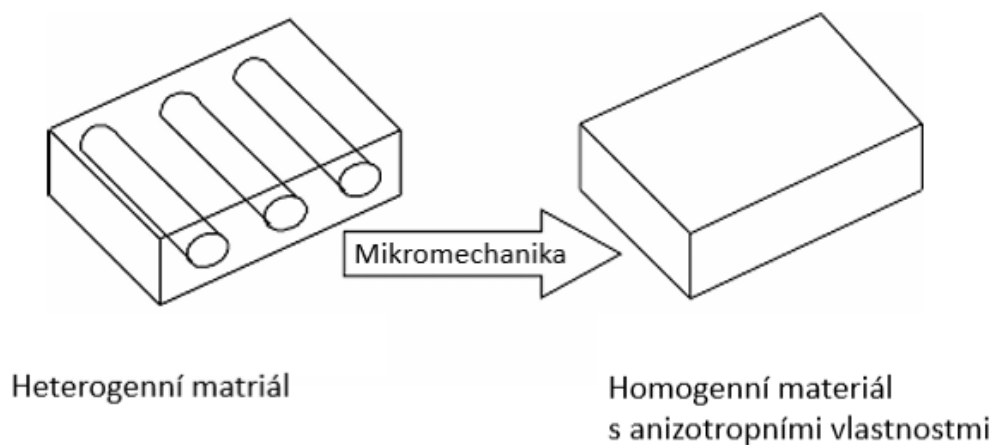
2 MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály mají mnoho charakteristik mechanického chování, které se od vlastností konvenčních technických materiálů (kovy – ocel) liší. Některé z těchto vlastností jsou pouze modifikacemi konvenčního chování a jiné jsou naopak zcela nové a vyžadují vlastní analytické a experimentální postupy. Nejběžnější technické materiály vykazují izotropní, homogenní chování, tedy těleso má v celém rozsahu jednotné vlastnosti. V případě kompozitních materiálů se však jedná o anizotropní (a často heterogenní) chování, kdy se vlastnosti v jednotlivých směrech liší. Některé kompozitní materiály mají velmi jednoduché formy heterogenity, nicméně v případě kompozitních materiálů s vlákny je situace mnohem komplexnější a jsou tak studovány na základě dvou hledisek: [15]

- Mikromechanika – Studuje interakci jednotlivých složek materiálu v mikroskopickém měřítku, za účelem určení vlivu na jednotlivé vlastnosti výsledného materiálu. Tato část je zásadní pro výběr požadovaných složek kompozitního materiálu a správné konstrukci laminátové struktury a v této kapitole je tak detailně vysvětlena. [1,15]
- Makromechanika – Zabývá se chováním kompozitního materiálu, při kterém se předpokládá, že materiál je homogenní a účinky jednotlivých složek jsou určeny pouze jako zprůměrované zdánlivé, již makroskopické vlastnosti kompozitního materiálu. [15]

2.1 Mikromechanika

K určení vlastností slouží vztahy mezi napětím a deformací, inženýrské konstanty a teorie týkající se porušení struktury. Pro lamináty existuje celkem třináct parametrů, které popisují veškeré vlastnosti a lze je zjistit experimentálně provedením několika zkoušek a testů. Toto vyhodnocení je však velmi nákladné a časově náročné, jelikož zmíněné parametry jsou funkcí několika proměnných (vlastnosti a objemový podíl vláken, matrice apod.). K určení hlavních parametrů, které definují výsledné vlastnosti laminátu jako jsou pevnost, tuhost jednotlivých složek a objem vyztužujících vláken slouží zjednodušený model, u kterého je chování heterogenního materiálu vyjádřeno jako chování homogenního materiálu s anizotropními vlastnostmi, tzn. vlastnosti se liší v různých směrech, ale v různých místech v daném směru zůstávají stejné. [1,2]



Obrázek 17 Podstata mikromechaniky [1]

2.1.1 Objemové a hmotnostní zlomky

Před výpočtem parametrů (především vztahy mezi deformací a napětím), které definují hlavní vlastnosti kompozitního materiálu (je uvažováno jednosměrné uložení vláken) jako pevnost a tuhost je nutné odvodit objemové a hmotnostní zlomky, jelikož právě tyto veličiny jsou funkcí zmíněných parametrů. [2]

Objemový zlomek výztuže je vyjádřen jako: [1]

$$V_f = \frac{\text{Objem vláken (výztuže)}}{\text{Celkový objem}} \quad (1)$$

Objemový zlomek matrice: [1]

$$V_m = \frac{\text{Objem matrice}}{\text{Celkový objem}} \quad (2)$$

Celkový objem je definován jako součet objemu výztuže a objemu matrice: [1]

$$V_f + V_m = 1 \quad (3)$$

Obdobně jsou vyjádřeny i hmotnostní zlomky. Hmotnostní zlomek výztuže: [1]

$$W_f = \frac{\text{Hmotnost vláken (výztuže)}}{\text{Celková hmotnost}} \quad (4)$$

Hmotnostní zlomek matrice: [1]

$$W_m = \frac{\text{Hmotnost matrice}}{\text{Celková hmotnost}} \quad (5)$$

Celková hmotnost: [1]

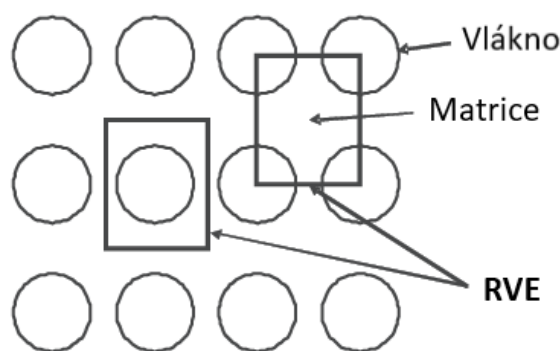
$$W_f + W_m = 1 \quad (6)$$

Hmotnost jakéhokoli materiálu, ať už vlákna, matrice nebo celého kompozitu, se rovná součinu hustoty a objemu. Celkovou hustotu tak můžeme vypočítat jako: [1]

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (7)$$

2.1.2 Reprezentativní objemový element

Zohlednění všech vláken při odvozování veškerých rovnic by bylo velmi obtížné. Z tohoto důvodu využívá mikromechanika koncept reprezentativního objemového elementu (RVE). Jedná se o nejmenší část (element) kompozitního materiálu, která obsahuje všechny jeho složky (matrici a vlákno/vlákna obklopené matricí), a tudíž reprezentuje materiál jako celek. [1,16]



Obrázek 18 Příklad reprezentativního objemového elementu [1]

2.2 Jednosměrná vyztužená vrstva

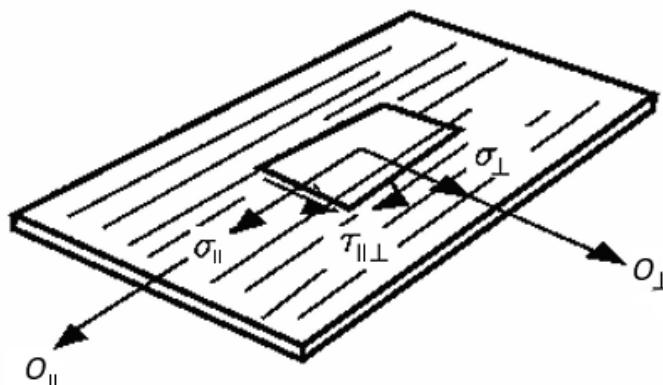
Před obecným studiem mechaniky vrstveného kompozitu (laminátu) a určení vztahů mezi napětím a deformací, je nutné nejdříve představit konstitutivní rovnice prosté elementární

vrstvy. Výsledný laminát, je tvořen z několika elementárních vrstev, které se podle výztuže dělí na tří základní druhy: [1,10]

- Jednosměrně vyztužená vrstva. [10]
- Vrstva vyztužená tkaninou. [10]
- Vrstva vyztužená rohoží. [10]

Tyto vrstvy lze společně kombinovat s libovolnou orientací a jelikož tkanina a rohože jsou tvořeny svazky (případně pramenci) jednosměrných vláken, chovají se podobně jako samotná jednosměrně vyztužená vrstva, a proto jednosměrně vyztužený element tvoří základ elementární výztuže s jehož pomocí je možné určit vlastnosti laminátu jako celku. [10]

V případě jednosměrně vyztužené vrstvy jsou vlákna uložena v jednom směru a pevnost a tuhost jsou v tomto směru mnohem větší než ve směru příčném. V takové situaci se hovoří o ortotropii, která je zvláštním typem anizotropie. [10]



Obrázek 19 Roviny symetrie jednosměrně vyztužené vrstvy [10]

Pro vysvětlení chování této vrstvy je nutné uvážit elastické konstanty v podélném směru vláken $E_{\parallel}$ a ve směru kolmém na vlákna $E_{\perp}$ (směry vyjadřují souřadnice $O_{\parallel}$ a $O_{\perp}$). Modul pružnosti ve smyku $G_{\parallel\perp}$ a Poissonova čísla $\nu_{\parallel\perp}$, $\nu_{\perp\parallel}$. Během zatížení v příčném směru $\sigma_{\perp}$ je $\nu_{\perp\parallel}$ znatelně větší než $\nu_{\parallel\perp}$ a naopak. [10]

Vztah mezi elastickými konstantami a Poissonovými čísly vyjadřuje Maxwell-Betiho věta: [10]

$$E_{\perp}\nu_{\perp\parallel} = E_{\parallel}\nu_{\parallel\perp} \rightarrow \frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} = \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} \quad (8)$$

Poměrné deformace $\varepsilon_{\parallel}$, $\varepsilon_{\perp}$ a úkos $\gamma_{\parallel\perp}$ u pravoúhlého elementu, na který působí napětí $\sigma_{\parallel}$, $\sigma_{\perp}$, $\tau_{\parallel\perp}$ jsou vyjádřeny pomocí Hookeova zákona: [10]

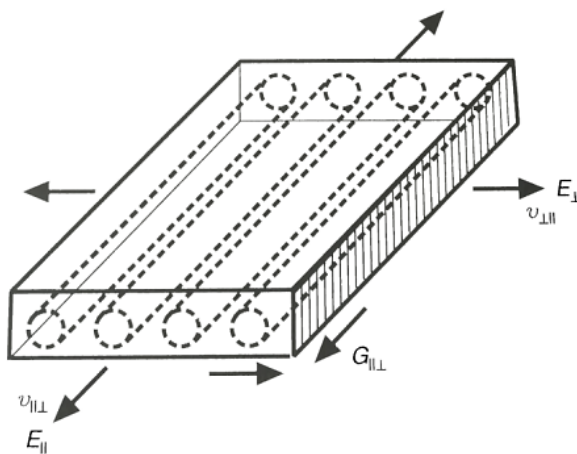
$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\sigma_{\parallel}}{E_{\parallel}} - \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} \sigma_{\perp}; \varepsilon_{\perp} = -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} \sigma_{\parallel} + \frac{\sigma_{\perp}}{E_{\perp}}; \gamma_{\parallel\perp} = \frac{\tau_{\parallel\perp}}{G_{\parallel\perp}} \quad (9)$$

Ve tvaru matice:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\parallel}} & -\frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{\parallel\perp}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Matice poddajnosti (značena jako S) je symetrická podle hlavní diagonály a napětí tak nezpůsobují zkosity, a proto při rovinné napjatosti vyjadřují mechanické chování jednosměrně vyztuženého kompozitu pouze čtyři elastické konstanty, které lze stanovit za těchto podmínek: [10]

- Matrice je izotropní. [10]
- Vlákná jsou izotropní nebo anizotropní. [10]
- Dokonalá adheze mezi vláknem a matricí. [10]



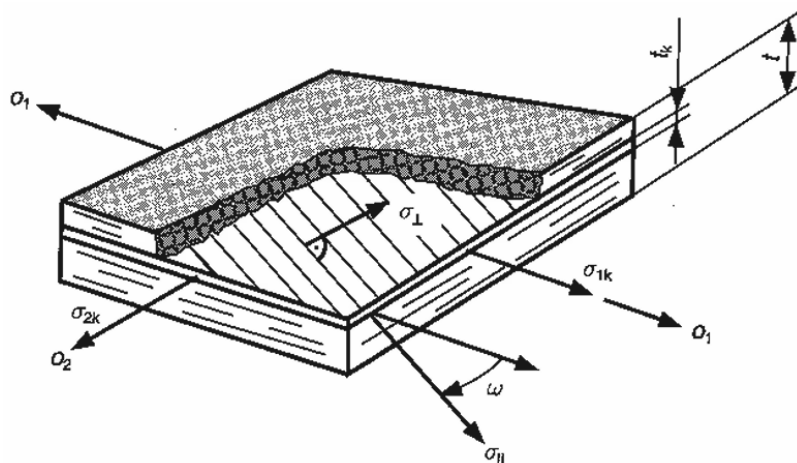
Obrázek 20 Elastické charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy [10]

2.3 Klasická laminátová teorie

Klasická laminátová teorie je přístup, díky kterému je možné stanovit napětí σ_1 , σ_2 , τ_{12} a uvažují se následující předpoklady: [10]

- Tloušťka desky (skořepiny) je malá ve srovnání s ostatními rozměry. [10]
- Jednotlivé vrstvy lamináty jsou vzájemně pevně spojeny a při zatížení rovinným napětím se deformují stejně. [10]

Princip této problematiky je možné popsat pomocí rovinného elementu vícevrstvého kompozitu, který se skládá z n počtu jednosměrně vyztužených vrstev s různou orientací vzhledem k danému souřadnicovému systému (značen o_1 , o_2). [10]



Obrázek 21 Souřadnicový systém a rozložení složek elementu laminátu [10]

Díky stejné deformaci všech vrstev ve směru zmíněných os souřadnicového systému platí pro jakoukoli (k -tou) vrstvu tzv. podmínka kompatibility: [10]

$$\varepsilon_{1k} = \bar{\varepsilon}_1 ; \varepsilon_{2k} = \bar{\varepsilon}_2 ; \gamma_{12k} = \bar{\gamma}_{12} \quad (11)$$

(Hodnoty s pruhem vyjadřují přetvoření celého laminátu ve směru osy o_1 a o_2).

Tuhost (značena Q) každé vrstvy umožňuje stanovit napětí, které v dané vrstvě působí:

$$\begin{aligned} \sigma_{1k} &= Q_{11k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{12k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{16k} \bar{\gamma}_{12} \\ \sigma_{2k} &= Q_{12k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{22k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{26k} \bar{\gamma}_{12} \\ \tau_{12k} &= Q_{16k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{26k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{66k} \bar{\gamma}_{12} \end{aligned} \quad (12)$$

Podmínka rovnováhy je pro všechny tři případy vyjádřena silami na jednotku šířky:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \bar{\sigma}_1 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{1k} t_k \\
 f_2 &= \bar{\sigma}_2 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{2k} t_k \\
 f_{12} &= \bar{\tau}_{12} \cdot t = \sum_{k=1}^N \tau_{12k} t_k
 \end{aligned} \tag{13}$$

kde:

f_1, f_2, f_{12} – Síly na jednotku délky,

t – Celkové tloušťka stěny

t_1 – Tloušťka jedné vrstvy

$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$ – Střední napětí

Dosazením vztahů z rovnice č.12 do rovnice č.13 lze obdržet Hookeův zákon vícevrstvého elementu: [10]

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_1 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{11k} \frac{t_k}{1} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{1} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{1} \\
 \bar{\sigma}_2 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{1} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{22k} \frac{t_k}{1} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{1} \\
 \bar{\tau}_{12} &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{1} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{1} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{66k} \frac{t_k}{1}
 \end{aligned} \tag{14}$$

3 DYNAMIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Problematika dynamického chování materiálů je vědou na souběhu několika oborů, která z pohledu dynamické odezvy, odolnosti, ochrany proti nárazu a schopnosti absorpce energie různých materiálů a konstrukcí přitahuje v inženýrství stále více pozornosti. [17,18]

Procesy, ke kterým dochází, když jsou materiály vystaveny rychlému zatížení se výrazně odlišují od procesů ve statických nebo kvazistatických situacích. V inženýrských aplikacích může být vnější zatížení velmi intenzivní a rychle se měnící s časem – během krátké doby je distribuováno velké množství energie do celého objemu materiálu, což je označováno jako intenzivní dynamické zatížení, v jehož důsledku je intenzivní i deformace daného materiálu (konstrukce) související s tímto zatížením. Aby bylo zabráněno destrukci konstrukce a vyloučilo se pronikání předmětu do struktury, musí být tato energie absorbována. [17,19]

Pochopení dynamického chování materiálů zahrnuje mechaniku vysokorychlostní deformace (napěťové vlny) a dynamické odezvy materiálů (konstitutivní modely, smykové nestability, dynamické lomy apod.). [17,18]

V průmyslu se stále více používají kompozitní materiály kvůli jejich vysokému výkonu, kterým je myšlena kombinace dobrých mechanických vlastností (pevnost) a nízké hmotnosti. To platí zejména v letectví a kosmonautice kvůli zásadní důležitosti dosažení nízké hmotnosti se zachováním vysoké pevnosti, tuhosti apod. Nicméně tyto typy materiálů mají hlavní nevýhodu v tom, že jsou křehké, a zvláště citlivé na nárazy dopadajících objektů, kdy tato sensitivita vede k jejich předimenzování. [20]

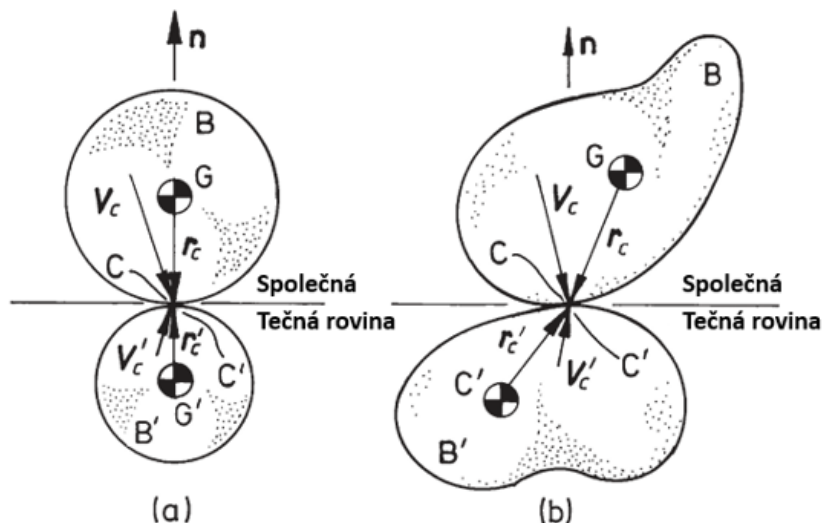
3.1 Princip dynamiky

Základní forma dynamických principů je vysvětlena pomocí dynamiky prosté částice, resp. hmotného bodu. Částice o hmotnosti m pohybující se rychlostí v má momentum mv , tedy tzv. hybnost. Pokud na částici působí výsledná síla F , dojde ke změně hybnosti. V případě, že hybnost mv je lineární a hmotnost částice m konstantní, platí tento vztah: [21,22]

$$F = m \cdot a \quad (15)$$

3.2 Srážka dvou těles

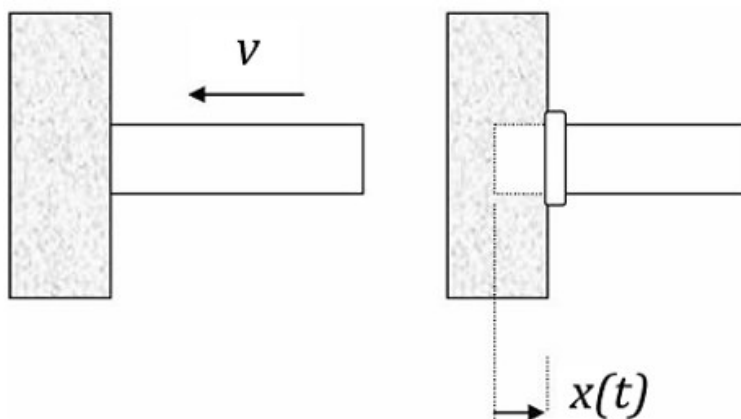
Ve chvíli, kdy se dvě tělesa srazí, spojí se s určitou relativní rychlostí v místě nazývaném počáteční bod kontaktu. Reakční síla, vznikající v místě kontaktu deformuje tělesa do kompatibilní konfigurace ve společném povrchu, který obklopuje počáteční bod kontaktu. [21]



Obrázek 22 a) kolineární konfigurace dopadu,
b) nekolineární konfigurace dopadu [21]

3.2.1 Nárazová síla

Síla vznikající při nárazu tělesa na cílovou strukturu pochází ze dvou zdrojů. Na jedné straně se jedná o deformační sílu předmětu, který na strukturu dopadá a na straně druhé existuje impuls (napěťová vlna), který musí struktura poskytnout, aby vyrušila nebo absorbovala pohyb deformované hmoty. Tuto situaci si lze představit na jednoduchém příkladu střely, jenž dopadá na cíl (střelu a její náraz si můžeme představit jako trubku při stlačování). [23]



Obrázek 23 Příklad nárazu projektilu na koncový cíl [23]

3.3 Napět'ové vlny

Šíření napět'ových vln je možné pochopit na příkladu úderu kladívka na povrch pevného tělesa. Úderem, tedy působením nárazové síly na jeho povrch dochází ke vzniku napětí (deformací), které se šíří ve formě strukturních impulzů – napět'ových vln, které si lze představit jako běžné akustické vlny, jenž se šíří strukturou tělesa. V deformovatelném tělese je narušení mechanické rovnováhy reprezentované změnou rychlosti částic a odpovídajícími změnami stavů napětí a deformace. Když jsou některé části pevné látky poprvé rozmístěny, je kvůli deformovatelným vlastnostem tělesa vyžadována konečná doba trvání, aby tato nerovnováha byla pociťována ostatními částicemi tělesa. Tento druh šíření v důsledku narušení napětí a deformací pevného tělesa označovaného jako napět'ová vlna rozlišujeme podle povahy na dva hlavní druhy: [18,20]

- Elastické napět'ové vlny. [18]
- Plastické (Elasticko-plastické) napět'ové vlny. [18]

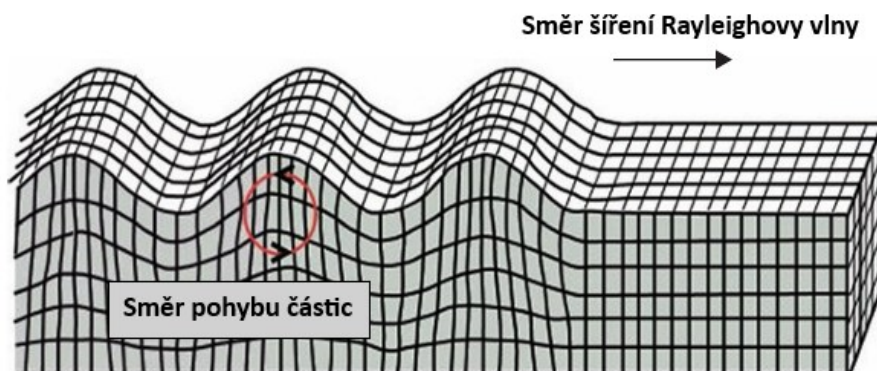
Problematika napět'ových vln a jejich šíření je poměrně komplexní. Např. vlny vzniklé dopadem předmětu na hladinu vody se budou tímto médiem šířit bez jeho změny. Při interakce vlny v mechanickém prostředí – pevném tělese (s trhlinami) dochází při nárazu k tvorbě dalších vln. Stejně tak se generují nové vlny v případě kompozitních materiálů, které díky anizotropii vlastností vykazují rozdílné dynamické chování. [24]

3.3.1 Elastické napět'ové vlny

Jak již bylo zmíněno, při nárazu tělesa na strukturu dochází k působení nárazové síly, která vyvolá ve struktuře napětí, resp. napět'ovou vlnu. V případě, kdy je takto vzniklé napětí menší, než je hodnota meze pružnosti materiálu dané struktury, jedná se o elastickou napět'ovou vlnu. Z pohledu pevných těles může docházet při nárazech k šíření různých elastických vln, které jsou klasifikovány stejně, jako obecné napět'ové vlny a nejběžnějšími typy jsou: [18]

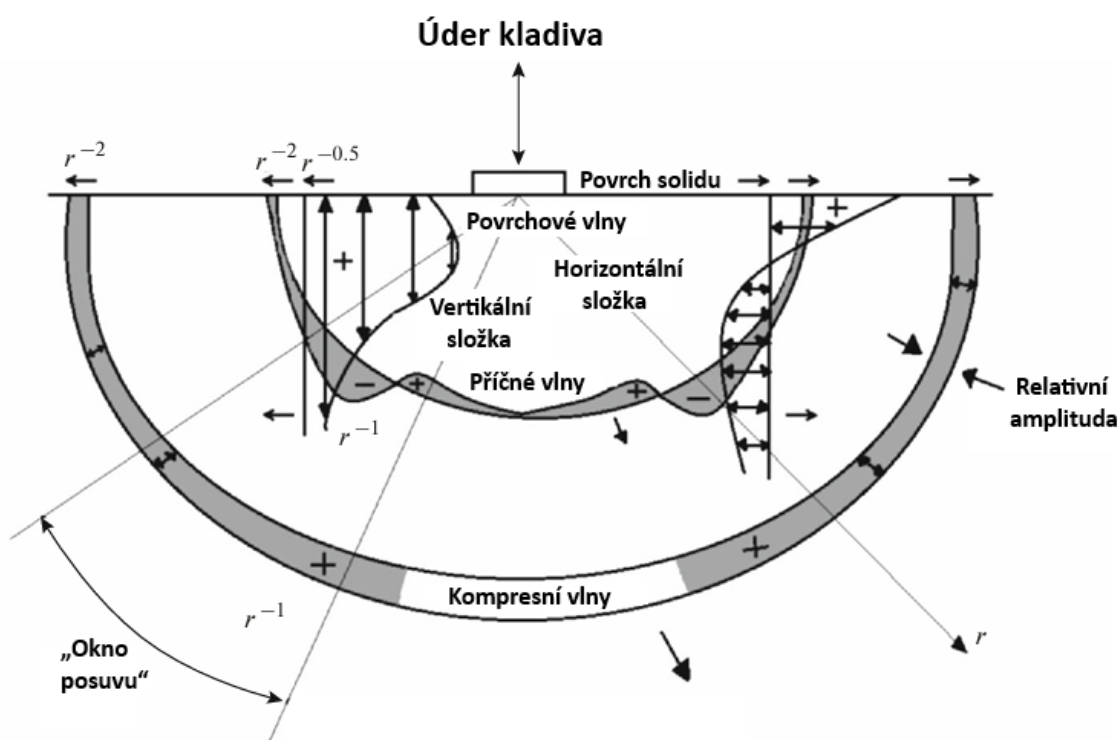
- Podélné (nevířivé) vlny – Vlny, u kterých je směr rychlosti částic rovnoběžný se směrem pohybu vlny. Pokud jsou tyto směry stejné, vytváří tyto vlny kompresi a označují se jako kompresní vlny. V případě pohybu v opačném směru dochází ke vzniku tahových napětí a vlny jsou pak označovány jako tahové. [18]
- Příčné (smykové) vlny – Směr rychlosti částic je v tomto případě kolmý na šíření vln a dochází tak ke vzniku smykových napětí. [18]

- Povrchové (Rayleighovy) vlny – Jedná se o obdobu gravitačních vln, které se vyskytují na hladině vody. Jak je znázorněno na Obr. 24, částice materiálu se pohybují směrem nahoru a dolů a také tam a zpět a sledují eliptické dráhy. [18]



Obrázek 24 Povrchové (Rayleighovy) vlny [18]

- Mezifázové (Stoneleyovy vlny) – Při kontaktu dvou médií s rozdílnými materiály vznikají na jejich rozhraní v případě poruchy speciální mezifázové vlny. [18]

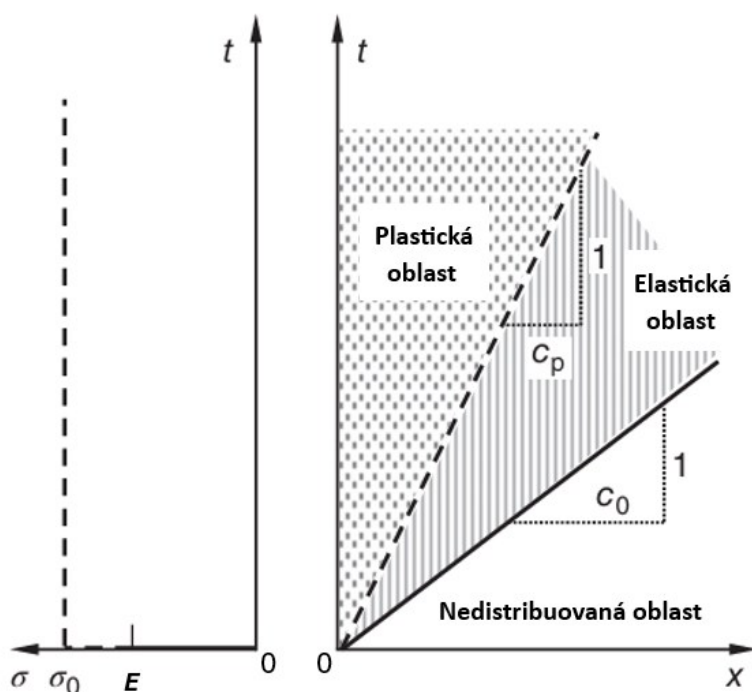


Obrázek 25 Šíření elastických vln v pevném tělese [19]

3.3.2 Plastické napět'ové vlny

Překročením meze pružnosti dochází k šíření elasticko-plastických vln. Je zřejmé, že v případě existence plastické vlny se musí objevovat i vlna elastická, jejíž rychlost je větší než rychlost vlny plastické, a tudíž je během šíření impulzů v čele vlna elastická. V tomto důsledku může být těleso – např. tyč, rozdělena do tří oblastí: [18]

- Nedistribovaná oblast – Nenarušená oblast před čelem elastické vlny s nulovým napětím. [18]
- Elastická oblast – Elastická oblast. Čelo elastické vlny prošlo oblastí s napětím, které je rovno mezi pružnosti. Elastická vlna se šíří rychlostí c_0 . [18]
- Plastická oblast – Napětí přesahuje hodnoty meze pružnosti – oblastí prošly elastické i plastické vlny. Plastická vlna se šíří rychlostí c_p . [18]



Obrázek 26 Časoprostorový diagram vývoje oblastí při šíření elasticko-plastických napět'ových vln [18]

Ze znázorněného diagramu vyplývá, že nedistribovaná oblast se s časem zmenšuje, zatímco u elastické a plastické oblasti dochází ke zvětšování. Zóna, kdy je zatěžující napětí větší než mez pružnosti, ale zároveň menší, než mez kluzu označujeme jako Elasticko-plastickou oblast, a proto plastické vlny zároveň označujeme jako Elasticko-plastické. [18]

3.4 Odezva kompozitních materiálů na dynamické zatížení

S rostoucím používáním polymerních kompozitů vyztužených vlákny jako primárních komponentů přenášejících zatížení je pro konstruktéry a koncové uživatele zásadní pochopení jejich chování při nárazu. Vzhledem k vysoce heterogenní mikrostruktuře a anizotropním vlastnostem jsou pohyby ve všech směrech souřadnic vzájemně propojeny tzn., že axiální náraz vyvolá ohybový nebo torzní pohyb v závislosti na míře a povaze anizotropie. [20,24]

Z pohledu napěťových vln činí tento vzájemný pohyb jejich šíření velmi složitým, což vede ke vzniku více mezních frekvencí a různých charakteristik šíření a kompozitní materiály tak vykazují četné mechanismy poškození. [24]

Kompozitní struktury jako takové se vyznačují velmi nízkou odolností vůči nárazu. Od výroby až po celou dobu jejich životnosti jsou tyto struktury náchylné ke krátkodobým zatížením, jako je například pád nástroje nebo jiné druhy nárazů. Vliv nárazu na laminátové kompozitní struktury je především v posledních letech zásadní otázkou. Hlavním důvodem je způsob konstrukce těchto struktur, které přispívají k vysokým poměrům podélného a příčného modulu pružnosti a projevu výrazné anizotropie v jednotlivých vrstvách v důsledku orientace vláken. Jedním z kritických aspektů je, že prudký a nespojitý gradient ohybového napětí na rozhraní vrstev může vést k případné delaminaci, což zpochybňuje integritu celé struktury. Další důležitou vlastností, která chybí u běžných izotropních struktur, je přítomnost tuhosti a setrvačných vazeb, které jsou běžně způsobeny nesymetrickým ukládáním vrstev. [24]

Zkoumání nárazové odezvy a dynamického zatěžování je u kompozitních materiálů velmi složité a pro lepší porozumění je možné rozlišit nárazové děje na nízkorychlostní a vysokorychlostní. [20]

3.4.1 Nízkorychlostní nárazy

Za nízkorychlostní nárazy, tedy nárazy s nízkou nárazovou energií, lze označit děje, při kterých je rychlost nárazujícího tělesa na cílovou strukturu v rozmezí od přibližně 1-10 m/s a obecně tyto nárazy označujeme jako kvazistatické. [20]

Mezi tyto děje spadají převážně nárazy různých úlomků, či volný pád nástrojů na strukturu během montáže. V takovém případě dochází k poškození, které není snadno zjištělné vizuální kontrolou a může způsobit podstatné snížení strukturální pevnosti součásti – poškození v rovině, jako je lámání vláken a praskání matrice, a poškození mimo rovinu, jako

jsou např. delaminace, patří mezi nejnebezpečnější mechanismy selhání, jež vedou k předčasnému snížení pevnosti celé konstrukce. [20,25]

Při těchto nárazech je důležitá strukturální reakce cílového materiálu, protože doba kontaktu je dostatečně dlouhá na to, aby celá struktura reagovala na náraz, a následně je energie pohlcována elasticky (elastické vlny). Způsoby selhání při těchto nárazech silně závisí na velikosti, tuhosti vzorku (cílové struktury) a okrajových podmínkách. [20]

3.4.2 Vysokorychlostní nárazy

Režim vysokorychlostního nárazu je definován jako jev, při kterém je poměr rychlosti tělesa dopadajícího (nárážejícího) na cílovou konstrukci a příčné napěťové vlny větší než deformace, která způsobí trvalé porušení ve směru nárazu dopadajícího tělesa a zároveň je hmotnost tohoto tělesa velmi malá. V této situaci dochází k šíření napěťové vlny skrze celou tloušťku cílové struktury, přičemž struktura nemá dostatek času na reakci k tomuto šíření a dochází tak k lokálnímu poškození. Během těchto nárazů jsou okrajové podmínky méně důležité (na rozdíl od nízkorychlostního nárazu). [20]

Pro kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny jsou tyto nárazy mnohem škodlivější, než nárazy těles s nízkou rychlostí a větší hmotností. Obecně můžeme hovořit o vysokorychlostním nárazu, pokud je rychlost dopadajícího tělesa o minimálně 10 % větší, než je rychlost šíření příčné vlny v cílové struktuře nebo ve chvíli, kdy je rychlost nárážejícího tělesa v rozmezí 50-1 000 m/s. [20]

Je zřejmé, že hranice rychlostí dopadajícího tělesa se mezi jednotlivými typy nárazů liší poměrně výrazně a tato oblast je označována jako nárazy se střední rychlostí, nicméně nelze říct, že do této kategorie spadají nárazové rychlosti 10-50 m/s, jelikož velmi záleží na hmotnosti, velikosti zatížení a energii, která při nárazu vzniká. [20]

3.5 Selhání kompozitní struktury při nárazu

Nástup poškození při vystavení kompozitní struktury dynamickému zatížení je ovlivněn heterogenní povahou kompozitních materiálů, fyzikálními parametry dopadu, okolním prostředím, tvarem a materiálovými vlastnostmi nárážejícího předmětu a samotnou strukturní konfigurací. [20,25]

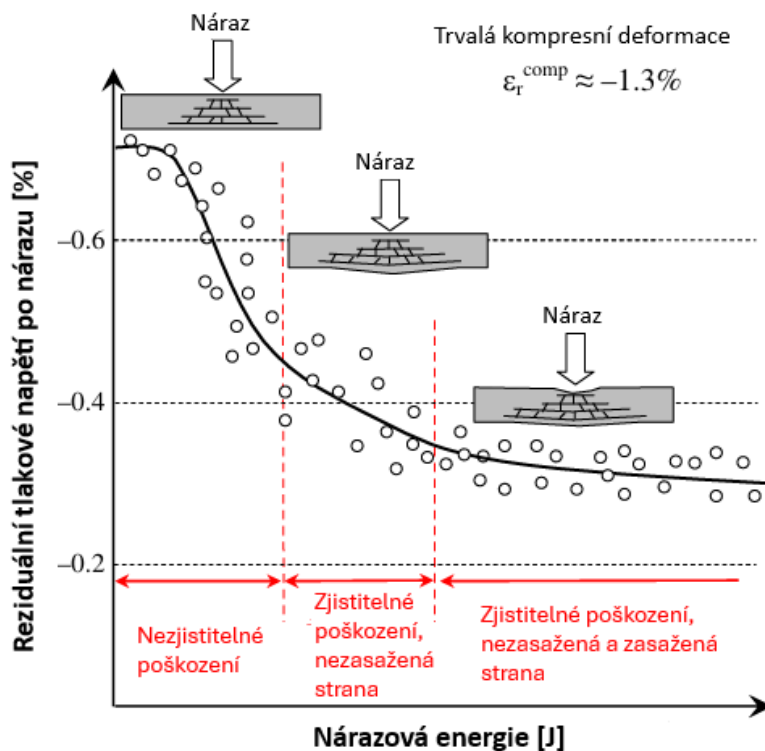
Kompozitní laminátové struktury obvykle vykazují složitý model poškození, které se vyvíjí uvnitř struktury a je obtížně zjištěitelný (pokud se nejedná o náraz s velmi vysokou

rychlostí). Selhání laminátů v zásadě zahrnuje intralaminární (uvnitř vrstvy) a interlaminární (mezi vrstvami) poškození: [20]

- Intralaminární poškození – Nastává v jedné vrstvě ve formě lomu vlákna nebo poškození matrice (tahem či tlakem), případně rozpojením mezi vlákny a matricí (štěpení). [20]
- Interlaminární poškození – Je reprezentováno delaminací, ke které dochází mezi sousedními vrstvami, což je běžně pozorováno při nárazových událostech. [20]

Tyto způsoby selhání mohou také společně interagovat během vývoje poškození, čímž dochází k praskání matrice ve směru orientace vláken. V případě rozšíření počáteční trhliny v matrici na rozhraní vrstev dojde k delaminaci v důsledku koncentrace napětí, které se generuje na rozhraní a může způsobit přetržení vláken, která jsou v tomto případě jedinou nosnou složkou. [20]

Studium různých poškození a jejich vzájemného působení má u kompozitních laminátů velký stupeň důležitosti, jelikož je nutné maximalizovat odolnost a tolerance těchto struktur vůči nárazům. [20]



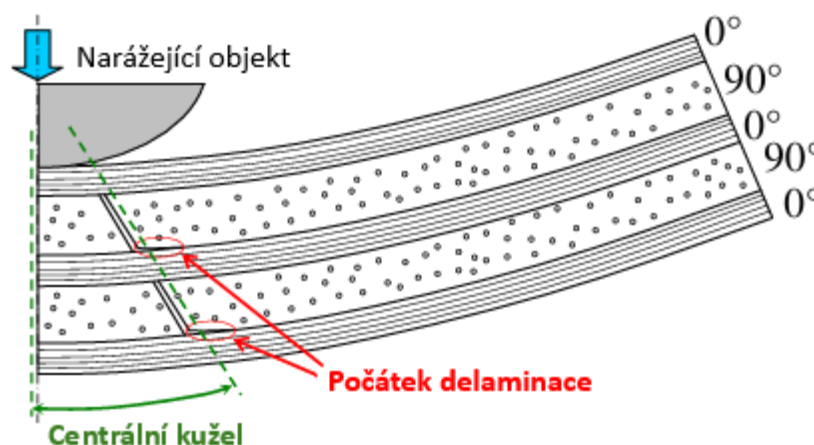
Obrázek 27 Závislost reziduálního tlakového napětí po nárazu na nárazové energii dopadajícího tělesa a rozčlenění poškození [20]

3.5.1 Nárazové poškození

Dopad tělesa na kompozitní laminát vyvolá tři základní mechanismy poškození: [20]

- Praskání matrice.
- Lámání vláken.
- Delaminace – Oddělení vláken, příze nebo jednotlivých vrstev od matrice.

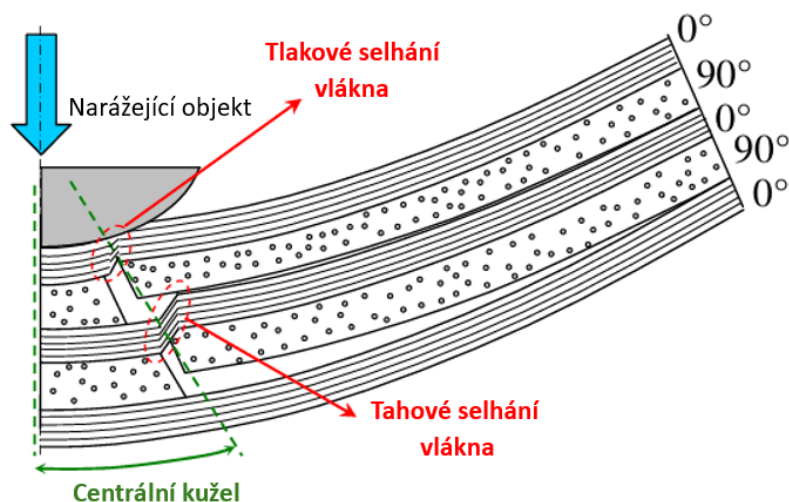
První poškození, které se při nárazu na kompozitní strukturu objeví, je obvykle praskání matrice, jehož růstem dochází poměrně rychle i k delaminaci (interakce mezi těmito dvěma jevy poškození je jasně viditelná během nárazových zkoušek). Nárazové poškození začíná tvorbou trhlin v matrici v zóně nárazu pod narážejícím tělesem a jejich šíření během zatěžování roste ve směru vláken. Tímto dojde k oddělení segmentu vláken a pryskyřice v jednotlivých vrstvách, což způsobí jejich posunutí (klouzáni) ve směru kolmém na konkrétní vrstvu. Tento oddělený segment vytváří interlaminární oblast tahového napětí mezi dvěma sousedními vrstvami a může v tomto místě vyvolat delaminaci. Zóna tahového napětí (jenž je ohraničena nesouvislými segmenty dvou sousedních vrstev) má trojúhelníkový tvar (označený jako centrální kužel) s velikostí rostoucí od nárazové strany ke straně obvykle označované jako spodní (zadní). [20]



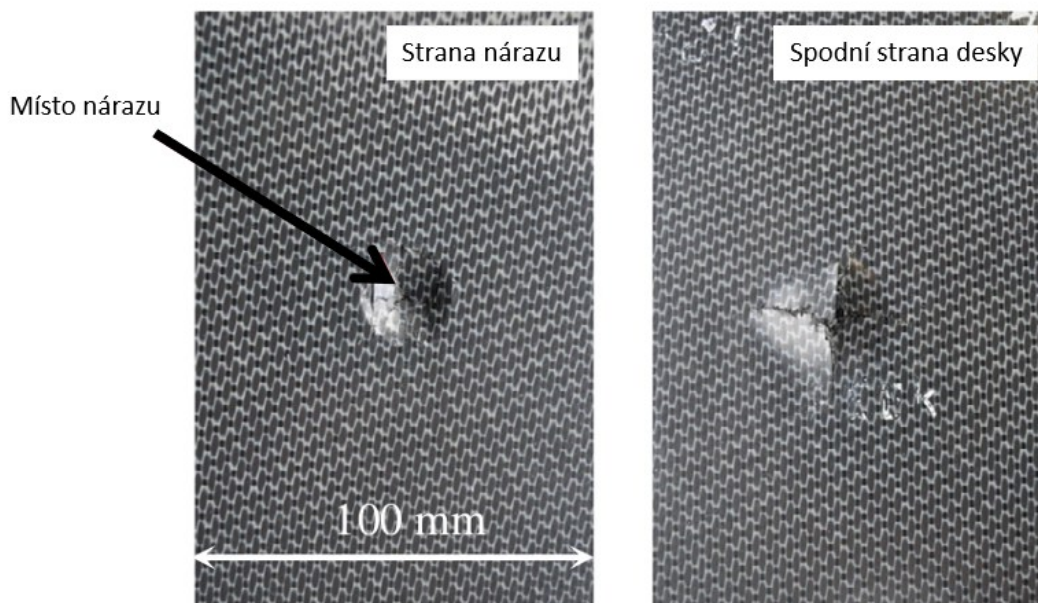
Obrázek 28 Vznik delaminace během nárazu [20]

Při nárazech s vysokou energií (rychlostí) dochází k lámání vláken, která se nachází především pod nárazovým tělesem, což vede k rychlému nárůstu trvalého vtisku (deformace) na povrchu cílové struktury. Poruchy vláken jsou způsobeny kompresním zatížením, vznikajícím pod narážejícím tělesem a tahovým zatížením ve střední tloušťce nebo ve spodní části struktury. Hlavní poruchy vláken jsou umístěny mezi střední tloušťkou a spodní stranou

struktury. Tyto poruchy v důsledku tahového (a částečně smykového) napětí umožňují oddělit oblast centrálního kuželu (oblast, s vysokou koncentrací napětí) od zbytku struktury (desky) a vyvolat vytvoření většího trvalého promáčknutí (vtisku) a právě v této oblasti je obvykle dosaženo sotva viditelného poškození. [20]



Obrázek 29 Lámání vláken během nárazu [20]



Obrázek 30 Příklad poškození laminátu vlivem nárazu [20]

Kromě již zmíněných nárazů existují i takové, jejichž hladina energie je velmi vysoká a spadá již do oblasti perforace (jev, při kterém nárazující těleso kompletně projde skrze cílovou strukturu). V takových případech je nemožné hovořit o trvalém vtisku. [20]

4 KOMPOZITOVÁ VRTULE

Vrtule se skládá minimálně ze dvou listů, které jsou spojeny nábojem. Účelem vrtule je absorbovat výkon (krouticí moment hřídele) motoru, tzn. převzít sílu potřebnou k jejímu otáčení a pomocí vrtulových listů vyvinout tah k pohonu letadla či dronu vpřed (nahoru). Vrtule je uložena na hřídeli, která může být prodloužením klikového hřídele u motorů s nízkým výkonem a u motorů s vysokým výkonem je namontována na kardanovém hřídeli, který je spojen s hřídelem klikovým. V obou případech motor otáčí vrtulí vysokou rychlostí a vrtule tak přeměňuje rotační výkon motoru na zmíněný tah. Ačkoli většina vrtulí je tvořena dvěma listy, požadavky na velký nárůst výkonu vedly k vývoji vrtulí tvořených čtyřmi až šesti listy s velkými průměry. [26,27,28]

Mnoho různých typů vrtulí bylo vyvinuto pro konkrétní zařízení – letadla, drony apod. Vývoj samotné vrtule podnítil mnoho změn a tím i samotný vývoj pohonných systémů. Počáteční vrtule byly jednoduché tyče potažené látkou a jejich úkolem bylo tlačení vzduchu směrem dozadu, následně byly zhotovovány dvoulisté a poté složité vícelisté vrtule pro pohonné systémy turbovrtulových letadel. Jako následek sofistikovaných konstrukcí vrtulí byly vyvinuty systémy s proměnným stoupáním, konstantní rychlostí a reverzací. [28]



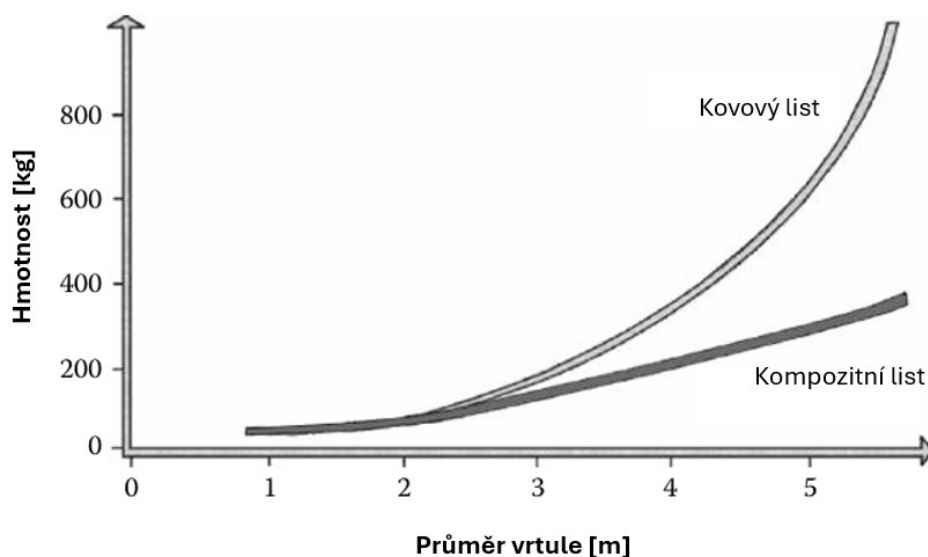
Obrázek 31 Základní terminologie vrtule [26]

Kromě vývoje samotné geometrie vrtulových listů došlo i ke změně materiálů, které se na jejich výrobu používají. První jednoduché dvoulisté vrtule byly tvořeny z jednoho bloku dřeva, postupem času se však přešlo na tvorbu dřevěných vrtulí vyráběných z jednotlivých vrstev tvrdého dřeva, které se spojují lepením. Nicméně s potřebou vyšších výkonů se stalo využití dřevěných vrtulí poměrně zbytečným (dřevěné vrtule se však dodnes využívají u některých letadel s nízkými výkony) a byly nahrazeny kovovými, především hliníkovými listy, jejichž hlavní výhodou bylo snížení hmotnosti, náročnosti na údržbu a možnost změny

úhlu stoupání vrtulového listu, která u dřevěných vrtulí není možná (u hliníkových vrtulí lze tento úhel mírně změnit díky zkroucení listů na opravárenských stanicích). [28]

S dalším vývojem došlo v oblasti konstrukce vrtulí k dominanci kompozitních materiálů, především uhlíkových vláken s epoxidovou matricí, které přinesly řadu výhod: [28]

- Výrazné snížení hmotnosti (v některých případech až o 50 %) se zachováním vynikajících mechanických vlastností (především pevnosti). [12]
- Proměnná šířka a tloušťka profilu listu. [12]
- Asymetrické a nelineární zkroucení profilu listu. [12]
- Možnost řízení ohybové a torzní tuhosti díky promyšlenému využití kompozitních materiálů. [12]
- Možnost výraznější změny úhlu stoupání. [12]
- Snížení hluku, vibrací a odolnost vůči korozi. [12]



Obrázek 32 Závislost hmotnosti listu na průměru vrtule
vztažená na vrtule vrtulníků [12]

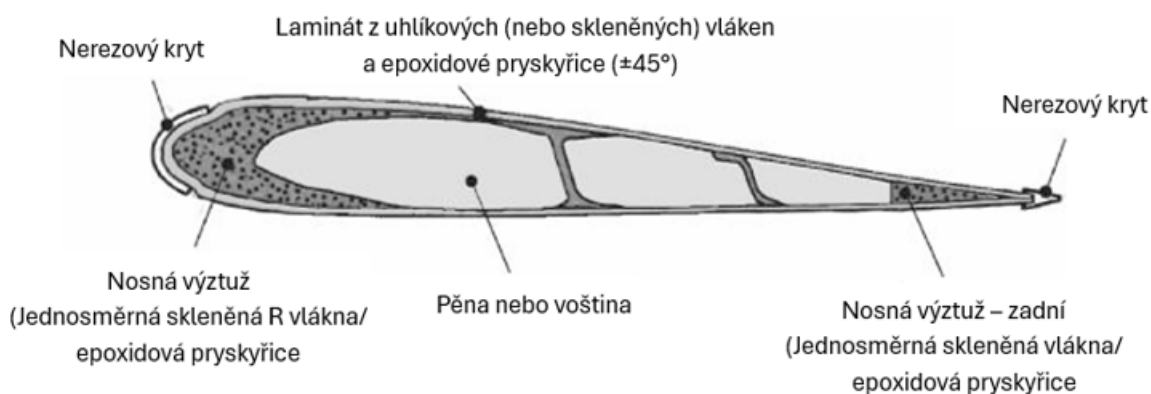
Hlavní nevýhodou vrtulových listů tvořených z kompozitních materiálů je již zmíněná vysoká citlivost na nárazové poškození, jenž může vést k lokálnímu poškození vrtulového listu, které často nelze identifikovat a jeho růst může vyústit v havárii zařízení. [12,20]

4.1 Konstrukce kompozitové vrtule

Konstrukce listu kompozitní vrtule využívá různé materiály, např. uhlíková a skleněná vlákna s epoxidovou pryskyřicí, polyuretanovou pěnu a případně kovové (nerezové) prvky. Celkovou stavbu listu lze rozdělit do několika částí: [12]

- Vnější plášť – zajišťuje aerodynamický tvar listu a torzní tuhost (nedochází ke kroucení vrtulového listu vlivem aerodynamických sil). Plášť je tvořen především z uhlíkových vláken uložených v epoxidové pryskyřici (taktéž se natírá antikorozi barvou). [12]
- Hlavní nosná výztuž (nosník) – Zajišťuje odolnost vůči odstředivému napětí působícího na list a stejně tak ohybovému zatížení, které je vyvoláno vztlakovými a odporovými silami. Tato část využívá jako materiál převážně skleněná vlákna a epoxidovou pryskyřici. [12]
- Jádro (výplň) – Zabraňuje deformaci vnějšího pláště a zajišťuje stálost tvaru, rozměrovou stabilitu, snížení vibrací a hluku. Zpravidla je tvořeno polyuretanovou pěnou, v případě sendvičových struktur jej tvoří voština. [12]

Spojujícím prvkem jednotlivých listů je již zmíněný náboj (materiálem je např. sklolaminát), který slouží k přenosu sil od motoru a zajišťuje stabilitu vrtule. Samotná konstrukce, resp. vnitřní uspořádání jednotlivých částí se může lišit. Kromě zmíněných stavebních složek se mohou objevovat i kovové prvky v podobě nerezových krytů, které se umísťují na náběžnou a odtokovou hranu pro zvýšení jejich ochrany. Pro list vrtule je velmi důležité navržení zadní hrany (strany) listu, jelikož napomáhá k jeho zpevnění a odolnosti vůči ohybu ve směru pohybu. [12,28]



Obrázek 33 Vnitřní stavba listu kompozitní vrtule [12]

4.1.1 Technologie výroby

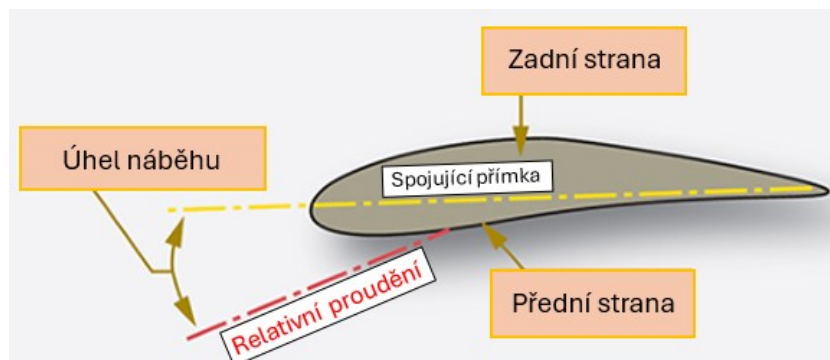
Výroba kompozitních vrtulí může využívat různé technologické postupy pro výrobu kompozitních součástí. Nejčastěji používanou technologií v této oblasti je tzv. ruční kladení (kladení za mokra) a následného lisování v autoklávu. Princip výroby lze rozdělit do několika kroků: [10,14]

- Zhotovení formy, která má vnější tvar pláště vrtule (forma je dvoudílná, kvůli umístění jádra).
- Příprava formy (nanesení separátoru a vrstvy pryskyřice – gelcoat).
- Řezání prepregů do tvaru vnějšího pláště vrtulového listu. Může být ruční nebo strojní.
- Kladení prepregů do zhotovené formy (množství vrstev závisí na požadované tloušťce pláště). Prepregy se vkládají do obou polovin formy.
- Tvorba jádra z polyuretanové pěny (nejčastěji se požadovaný tvar získává obráběním na CNC strojích) a příprava sklolaminátového náboje (vyrábí se samostatně – taktéž metodou ručního kladení).
- Vkládání pěnového jádra na prepregy umístěných v jedné polovině formy.
- Spojení obou částí formy (pomocí šroubů, kolíků apod.).
- Vložení formy do autoklávu, kde dojde k vytvrzení výrobku pomocí vysokých teplot a tlaků. Prepregy, pěnové jádro a náboj vytvoří monolitickou strukturu.
- Demontáž formy a vyjmutí kompozitní vrtule.

Další možnost výroby kompozitních vrtulí je typicky Infuzní technologie. [10,14]

4.2 Geometrie vrtulového listu

Samotná geometrie, resp. příčný průřez vrtulového listu je podobný aerodynamickému profilu křídla letadla. Obr. 34 zobrazuje řez listem vrtule se znázorněním úhlu náběhu, což je úhel mezi přímkou spojující náběžnou a odtokovou hranu listu a relativním prouděním vzduchu (náběžná hrana je tlustá hrana, která se při rotaci setkává nárazově se vzduchem jako první). [26,28]



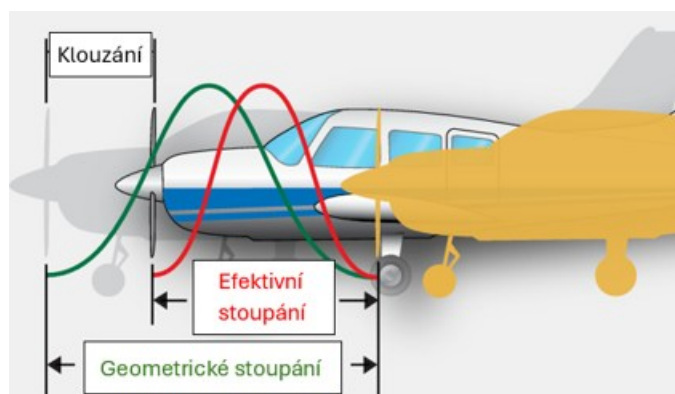
Obrázek 34 Profil vrtulového listu se znázorněnou spojující přímkou a úhlem náběhu [26]

Dalším důležitým parametrem je úhel stoupání (sklon) – úhel mezi přímkou spojující přímkou a rovinou rotace, který však není totéž, co úhel listu. Stoupání můžeme rozdělit na dva základní typy: [26]

- Geometrické stoupání – Označuje vzdálenost, kterou by letadlo či dron měly urazit během jedné otáčky vrtule bez prokluzu. [26]
- Efektivní stoupání – Vyjadřuje vzdálenost, kterou zařízení skutečně urazí. Uvažuje odpor vzduchu, turbulence a další ztráty, které během pohybu zařízení vznikají. [26]

$$\text{Geometrické stoupání} - \text{Efektivní stoupání} = \text{klouzání} \quad (17)$$

Rozdíl mezi těmito stoupáními se nazývá klouzání vrtule – čím menší je tato hodnota, tím blíže je hodnota efektivního stoupání k hodnotě stoupání geometrického a konstrukci listu lze považovat za vhodnou, v opačném případě nevhodná konstrukce listu, tedy úhlu náběhu, úhlu listu a stoupání způsobí mezi zmíněnými hodnotami velmi výrazný rozdíl a použití takových vrtulí způsobuje neefektivní funkci celého zařízení. [26]

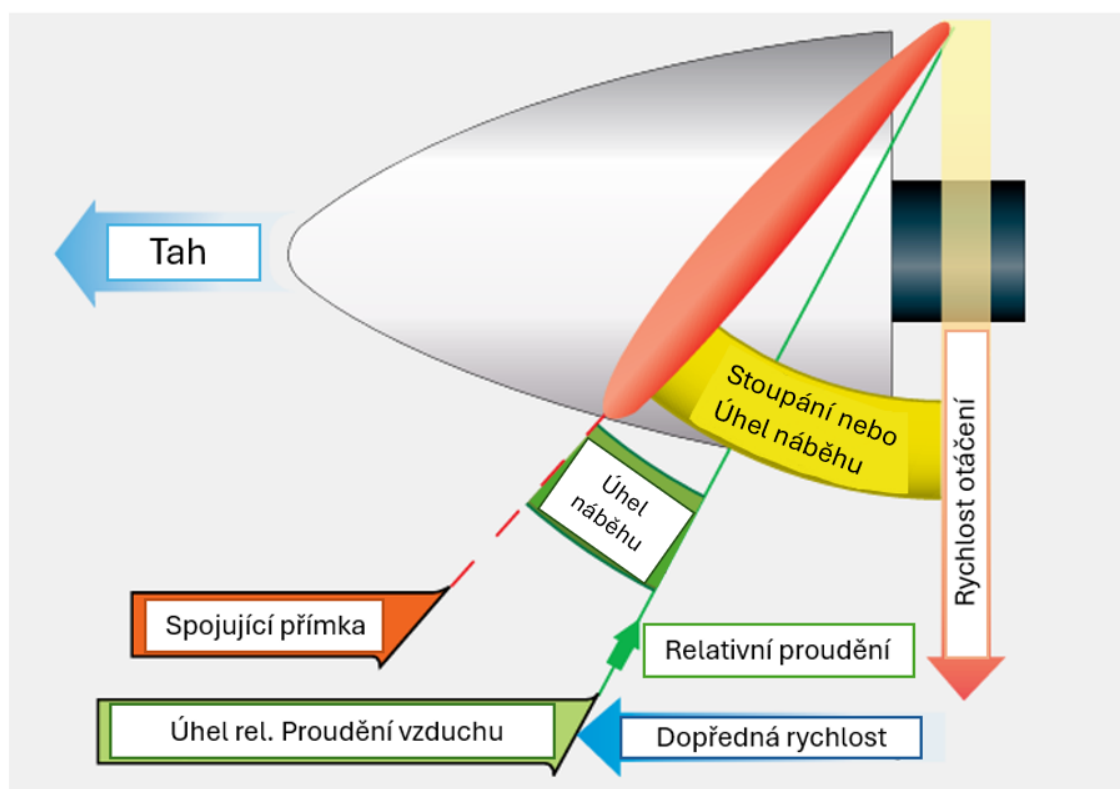


Obrázek 35 Klouzání vrtule [28]

Spojovací přímka (spojuje náběžnou a odtokovou hranu) je určena (stejně jako ostatní parametry) téměř identicky jako u profilu křídla letadla. Průřez vrtulového listu se po celé délce listu mění – není konstantní (mění se zkroucení, šířka a zmíněný úhly) a můžeme jej považovat za prvek složený z nekonečného počtu tenkých elementů, z nichž každý je profil listu vzniklý příčným řezem a jehož spojovací přímka je šířka listu v tomto úseku. Jelikož má většina vrtulí plochou přední stranu (čelo) listu, je spojovací přímka často vedena podél čela. [28]

4.2.1 Aerodynamické faktory

Úhel náběhu způsobuje vychýlení proudění vzduchu, což má za následek zvýšení dynamického tlaku na straně vrtule na hodnoty převyšující atmosférický tlak, čímž vzniká tah. Na tomto úhlu závisí pro každou jednu otáčku vrtule množství vytlačeného vzduchu, který se před vrtulí pohybuje. Pohybem nosné plochy vzduchem dochází k tvorbě dvou sil, kterými jsou zdvih a odpor. Zvětšení náběhového úhlu listu vrtule se sice docílí většího zdvihu, ale dojde tak i k nárustu odporu a naopak. [26]

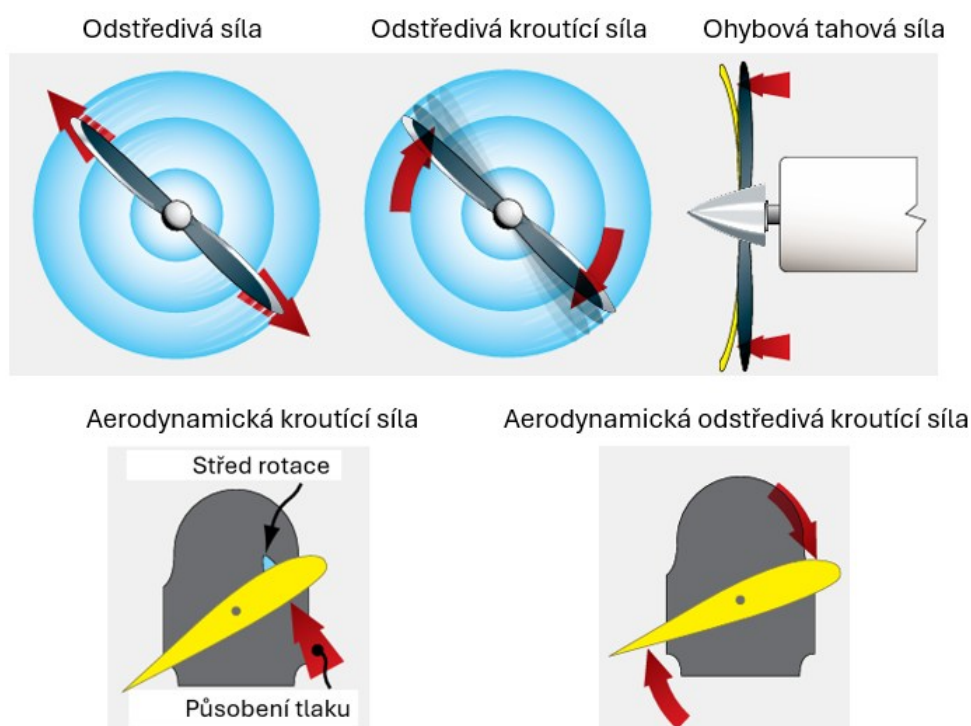


Obrázek 36 Aerodynamické faktory vrtule [26]

4.3 Síly působící na vrtuli

Na vrtule působí během jejich aktivního stavu několik zatížení, které je z hlediska geometrie a materiálových vlastností při jejich konstrukci třeba uvažovat (tato zatížení gradují s nárůstem otáček). Mezi tato zatížení spadá: [28]

- Odstředivá síla – Dominantní síla působící na vrtuli, která má tendenci vymršťovat rotující listy směrem od náboje. [28]
- Ohybová kroutící síla – Způsobuje ohýbání listů vlivem kroutícího momentu vrtule ve směru opačném ke směru otáčení. [28]
- Ohybová tahová síla – Jedná se o ohybové namáhání vrtule vyvolané tahem, které ohýbá listy vrtule dopředu, když je letadlo nebo dron tažen vzduchem. [26]
- Aerodynamická kroutící síla – Působením této síly dochází ke kroucení listu do velkých úhlů. Výrazný vliv má především u vrtulí s možností regulace sklonu. [28]
- Aerodynamická odstředivá kroutící síla – Stejně jako u předešlé zmíněné síly dochází i v tomto případě ke kroucení listů vrtule. Tato síla je však větší než aerodynamická kroutící síla. [28]



Obrázek 37 Síly působící na vrtuli [28]

Vrtule musí být také dostatečně tuhá, aby se zabránilo chvění, což je typ vibrací, při kterých se konce lisu kroutí ze strany na stranu s vysokou frekvencí kolem osy kolmé na klikovou hřídel motoru. Toto chvění je doprovázeno výrazným hlukem, často mylně zaměňovaným za hluk výfukových systémů. [28]

4.4 Vliv struktury kompozitové vrtule na nárazové zatížení

Listy vrtulí jsou komplexní struktury, které pracují v náročném dynamickém prostředí, ve kterých mohou být vystaveny nárazům různých těles (kroupy, ptáci apod.). Tyto nárazy způsobují již popsané mechanismy selhání kompozitní struktury, které vedou k oslabení mechanických vlastností, případně k úplnému selhání systému. Při nárazovém zatížení je tedy nutné predikovat strukturní a zbytková napětí a na základě patřičných simulací a experimentů zvolit vhodnou konstrukci vrtulových listů pro danou aplikaci. [25,29]

Faktory ovlivňující odezvu kompozitní vrtule na nárazy objektů jsou především materiálové vlastnosti jednotlivých složek vrtule (listu), její geometrie a místo dopadu. [29]

4.4.1 Vliv materiálových vlastností

Vlastnosti výztužných vláken, matrice a mezifázového rozhraní určují reakci vrtule na vnější náraz ovlivňováním mechanického namáhání, které řídí počátek a šíření různých způsobů poškození. Tyto vlastnosti rovněž určují celkovou schopnost vrtule absorbovat energii při daném druhu nárazového zatížení. [29]

4.4.1.1 Vyztužující vlákna

Nositelem pevnosti a tuhosti jsou především vyztužující vlákna a pro kompozitní vrtule se nejčastěji používají vlákna skleněná nebo uhlíková. Ačkoli mají právě uhlíková vlákna vysokou pevnost ve srovnání s jinými vlákny, vykazují díky své křehkosti mnohem menší odolnost vůči nárazu než vlákna skleněná. Skleněná vlákna dokážou také absorbovat více energie o téměř dvojnásobek ve srovnání s uhlíkovými vlákny. Je však důležité uvažovat extrémně nízkou hmotnost uhlíkových vláken, která zvyšuje účinnost motoru, dále vysokou pevnost, jenž zajišťuje vyšší odolnost vůči odstředivým silám a v neposlední řadě vysoký modul pružnosti, díky kterému jsou deformace vrtulí při vyšších otáčkách výrazně menší. [29]

Kromě druhu vláken je důležitá i orientace jednotlivých vrstev, přičemž platí, že vrstvení s různou orientací zvyšuje odolnost vůči nárazovému zatížení. Na druhé straně je opět

zapotřebí uvažovat mechanické vlastnosti výsledné struktury, které jsou v oblasti konstrukce vrtulí přednější a orientací vrstev je lze výrazně změnit. [29]

4.4.1.2 Matrice

Na nárazové děje má výrazný vliv i samotná matrice, kdy u nízkorychlostních nárazů dochází převážně k jejímu poškození. Kompozity s termoplastickou matricí díky její přirozené interlaminární houževnatosti vykazují při nárazovém zatížení mnohem vyšší odolnost vůči praskání matrice a jsou méně náchylné k delaminaci. Studie však prokázaly, že i když je odolnost termoplastických matric vůči dynamickému zatížení výrazně vyšší, vzniká při těchto nárazech mnohem větší oblast šíření napětí a vzniku reziduálního napětí, na rozdíl od matrice termosetické. [29]

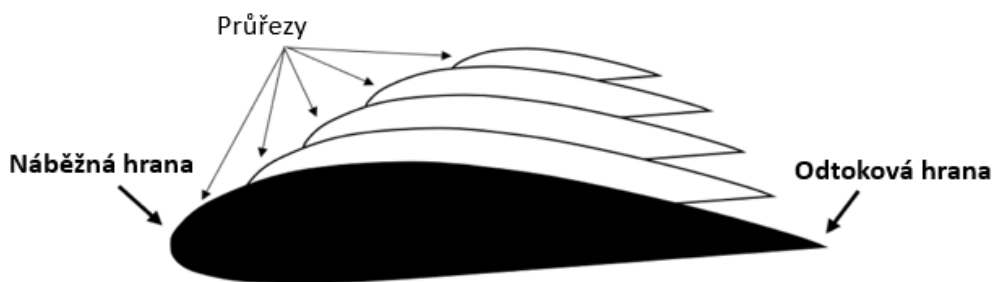
Vzhledem k lepší zpracovatelnosti, menší energetické náročnosti, větší pevnosti a menší oblasti šíření napětí tak převládá využití termosetické matrice, i když snadněji dochází k jejímu praskání a delaminaci. [29]

4.4.1.3 Jádro

Jádro vrtulového listu dronů je převážně tvořeno PMI nebo PUR pěnou, díky které je podpořena tvarová stabilita vnějšího pláště (skořepiny) zhotoveného právě z kompozitního materiálu (termosetické matrice a uhlíkových či skleněných vláken) a vzhledem ke tlumícím vlastnostem se také snižuje šíření napěťových vln strukturou listu. [12]

4.4.2 Vliv geometrie vrtulového listu

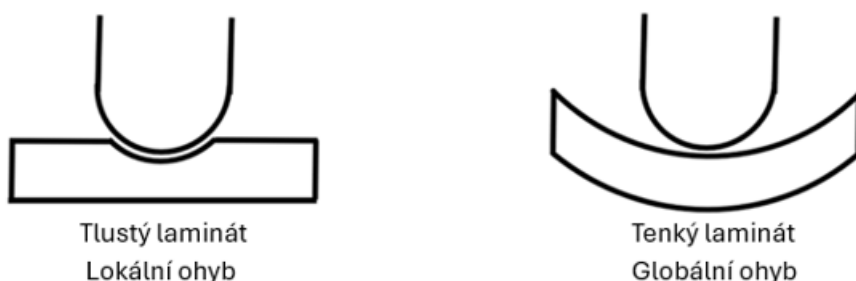
Kompozitní listy vrtule, jako např. ty, znázorněné na Obr. 38, mají netradiční tloušťku laminátu (skořepiny) a zakřivení, což jsou faktory, které výrazně ovlivňují chování listu při nárazu. [29]



Obrázek 38 Zjednodušený průřez listem kompozitní vrtule [29]

4.4.2.1 Tloušťka

Zvětšení tloušťky skořepiny vrtulového listu výrazně ovlivňuje nárazové chování, ať už lokální či celé struktury vrtulového listu. [29]



Obrázek 39 Vliv tloušťky laminátu na deformaci při nárazu [29]

Vliv tloušťky na nárazovou odezvu je možné uvést na příkladu tenkého (tloušťka 10 mm) a tlustého (tloušťka 15 mm) laminátu (skořepiny vrtulového listu). Tloušťka (jak vyplývá z Obr. 39) významně ovlivňuje profil deformace, kdy u tlustého laminátu dochází ke globální ohybové deformaci, kdežto u tenkého laminátu dochází k lokálnímu ohybu. Lamináty s vyšší tloušťkou jsou spojeny s kratší dobou kontaktu, nižším průhybem a vyšším špičkovým zatížením. Odezva na poškození je však složitější, jelikož záleží na několika vzájemně se ovlivňujících faktorech nárazu. Naopak u tenkých laminátů je reakce na poškození relativně jednoduchá, jelikož je primárně výsledkem ohybu laminátu. [29]

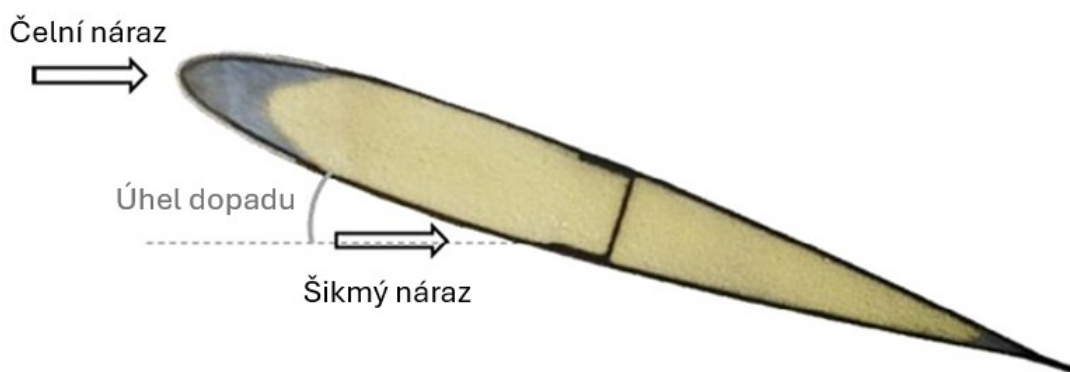
S rostoucí tloušťkou se zachováním kinetické energie nárazu snižuje oblast delaminace a tlustší struktura listu má tak výrazně větší odolnost vůči nárazu, zvyšuje se však hmotnost, případně rozměry listu a dochází k ovlivnění výkonu a provozních charakteristik celého systému apod. (tyto následky však ovlivňují jednotlivé vlastnosti většinou zanedbatelně). [29]

4.4.2.2 Zakřivení

Zakřivený tvar se týká v podstatě celého vrtulového listu po celém jeho průměru. Tato geometrie se používá kvůli samotné funkci vrtule – tedy ke správnému fungování při letu. Zakřivení kromě letové funkce ovlivňuje i odezvy na nárazové zatížení. Větší zakřivení způsobuje větší poškození vrtulového listu při nárazu, který vyvolá ohyb (snadněji k němu dochází u pružnějších laminátů se zakřivením přibližně 0,5) ve středu zakřivení. Konstrukce vrtulového listu by se tak z hlediska odolnosti vůči nárazu měla zaměřit na minimalizaci flexibility (pružnosti) v zakřivených oblastech, čímž by bylo zabráněno významnému poškození. [29]

4.5 Nárazové zatížení

V důsledku rotace lopatek se nárazové rychlosti zmíněných objektů mohou lišit od několika metrů za sekundu až do několika desítek až stovek metrů za sekundu a v případě vrtulových listů mohou nastat dva nárazy – čelní nárazy na náběžnou hranu a šikmé nárazy na spodní část listu. Úhel dopadu je způsoben sklonem lopatky za letu a pohybuje se od 10 do 20°. Z hlediska dronů jsou důležité převážné nárazy na koncovou část náběžné hrany, jelikož v tomto místě je šance na kontakt dopadajícího objektu a vrtule největší. [25]

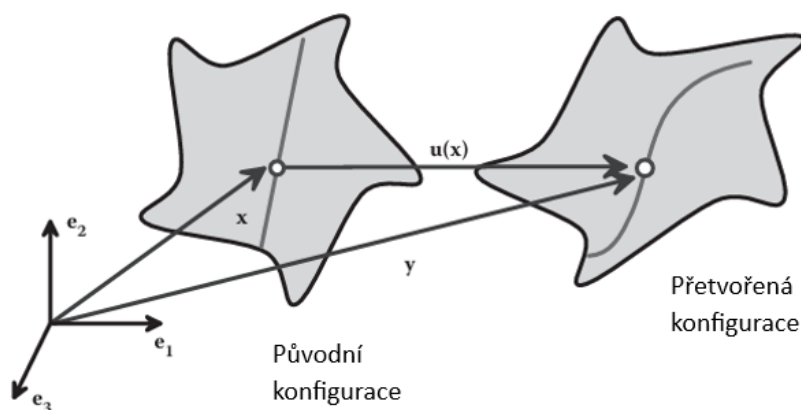


Obrázek 40 Typy nárazů na vrtulový list [25]

5 FEM – METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Omezení lidské mysli jsou taková, že nedokáže pochopit chování svého složitého okolí a výtvorů v jedné operaci. Proces rozdělování všech systémů na jejich jednotlivé komponenty nebo tzv. elementy, jejichž chování je snadno pochopitelné, a následná přestavba původního systému z jednotlivých elementů ke studiu chování systému jako celku, je přirozeným způsobem, kterým inženýr postupuje. [30]

FEM (Finite Element Method) – Metoda konečných prvků je počítačová technika, která slouží pro řešení náročných inženýrských problémů na základě parciálních diferenciálních rovnic – typicky pro výpočet pole posunutí v tělese pomocí vektoru posunutí, které je vystaveno působení vnějších sil. [31]



Obrázek 41 Původní a přetvořená konfigurace souřadnicového systému s vektorem posunutí [31]

Tato metoda byla nejdříve využívána především pro predikci napětí a deformací v oblasti mechaniky pevného tělesa a později prostoupila do dalších oborů, jako je přenos tepla, dynamika tekutin, nárazové děje a elektromagnetismus. Hlavním důvodem pro použití FEM je, že díky příslušným počítačovým softwarům a simulacím lze nahradit experimenty, které by za běžných okolností musely být prováděny fyzicky, což výrazně snižuje náklady a časovou náročnost při jejich řešení. [31,32]

5.1 Tvorba FEM modelu

Pro zhotovení konečné prvkové sítě a obdržení výsledků její analýzy je zapotřebí jednotlivé součásti, resp. základní 3D CAD modely převést na FEM modely, jenž jsou tvořeny z určitého počtu elementů se specifickou geometrií vzájemně propojených pomocí uzlů. [31]

5.1.1 Uzly

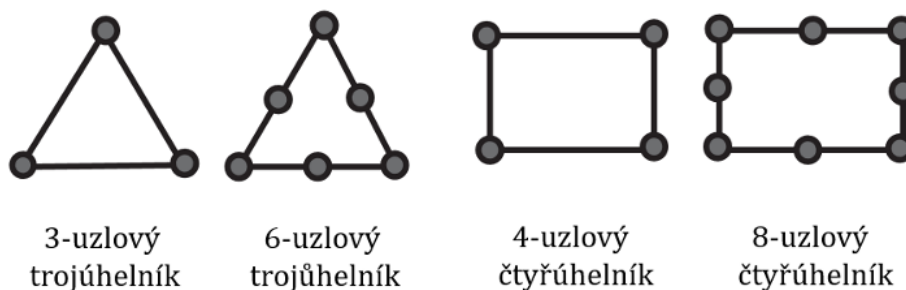
Uzly jsou množinou koncových bodů elementů v pevném tělese a je jim přiřazeno: [31,33]

- Číslo – Každému uzlu je přiřazeno číslo, které slouží k jeho identifikaci (uzly nemusí být číslovány v řadě a některá čísla mohou být vynechána). [31]
- Souřadnice – Při 3D analýze je poloha každého uzlu definována pomocí tři souřadnic v původním nedeformovaném 3D systému. V případě 2D analýzy je jejich poloha určena dvěma souřadnicemi. [31]
- Posunutí – Při deformaci tělesa dochází k posunutí uzlu do nové polohy (přetvořená konfigurace). [31]
- Stupně volnosti – Všechny uzly mají přiřazeny tři složky rotace a tři složky posunutí, které je při komplexních analýzách potřeba zohlednit. [31]

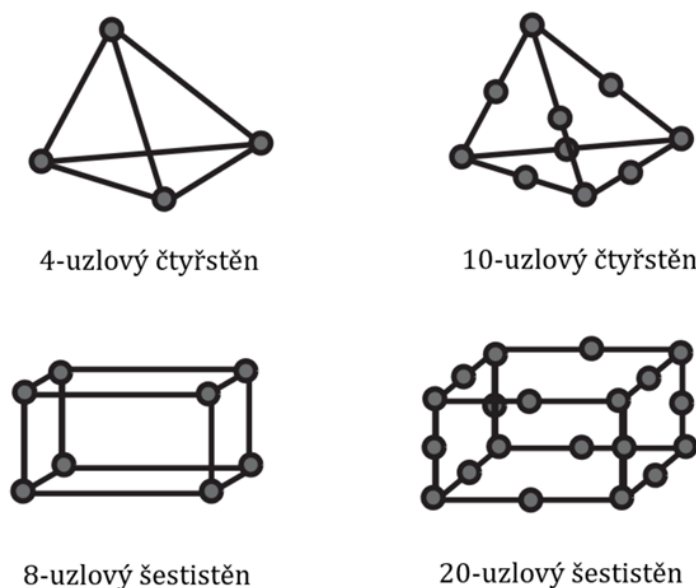
5.1.2 Elementy

Elementy slouží k rozdělení základního 3D CAD modelu do několika samostatných oblastí (základ FEM modelu) a mají následující vlastnosti: [31]

- Číslo – Stejně jako u uzlů slouží číslo k jejich identifikaci a pravidla číslování jsou také stejná. [31]
- Geometrie – Tvar elementu rozlišujeme na základě 3D a 2D systému. V případě 2D systému je nejčastěji geometrie elementu tvořena trojúhelníkem nebo čtyřúhelníkem. 3D systémy využívají převážně tvar čtyřstěnu nebo šestistěnu. [31]



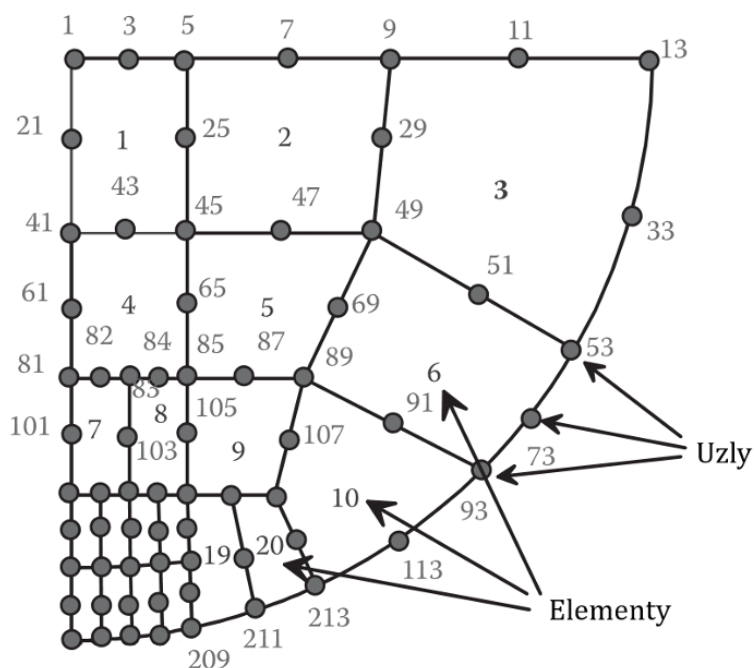
Obrázek 42 Nejčastěji používané 2D elementy [31]



Obrázek 43 Nejčastěji používané 3D elementy [31]

V případě jednoduchých nosníkových analýz, vazníků, skořepin apod. můžeme využít i speciální typ elementů (0D a 1D elementy), jelikož využití 3D sítě v těchto případech by bezvýznamně zvyšovalo složitost a čas výpočtu. [31]

- Stěny elementu – Jednotlivé stěny elementu. [31]
- Skupina uzlů, jenž jsou připojeny k elementu. [31]

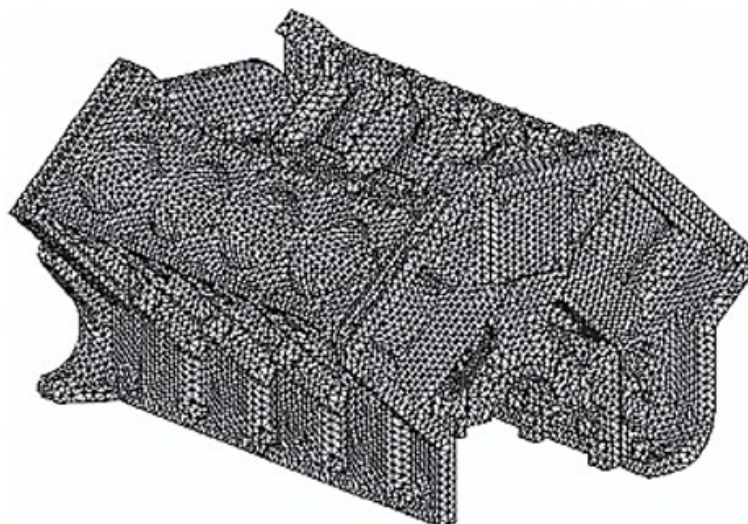


Obrázek 44 Elementy s uzly v konečněprvkové síti [31]

- Interpolační schéma. [31]
- Integrační body – Slouží pro matematické určení šíření napětí. [31]

5.1.3 Konečně prvková síť

Síť konečných prvků je tvořena z několika elementů a jim příslušných uzlů. Definuje geometrii tělesa (původního 3D CAD modelu) a popisuje pole posunutí. Stejně jako element může být síť buďto 3D (komplexní analýzy) a nebo 2D, které se používá u jednodušších analýz nebo v případě, kdy je vhodné řešit převážně rovinné napětí, rovinné deformace a osovou symetrii. [31]



Obrázek 45 Konečněprvková síť bloku motoru [30]

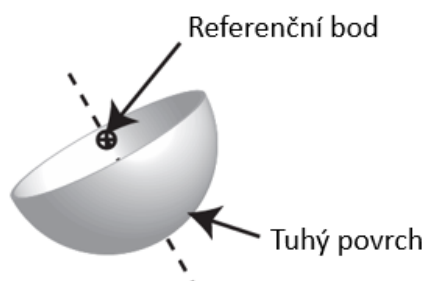
5.2 FEM Analýza

Pro řešení simulace – konečně prvkové analýzy (FEA – Finite Element Analysis) se používají speciální softwary, jejichž volba závisí na osobní preferenci, a hlavně na jejich vhodnosti pro daný typ analýzy, které lze rozlišit na: [31]

- Statické – Situace, které jsou popsány rovnicí $\sum F = 0$, tedy součet všech sil působících na těleso je roven nule – těleso je ve statické rovnováze. [31]
- Dynamické – FEM řeší pohybové rovnice kontinua pomocí v podstatě složitější rovnice $\sum F = m \cdot a$, kdy je pohyb tělesa funkcí času. Do této kategorie spadají právě nárazové simulace. [31]

5.2.1 Simulace kontaktu

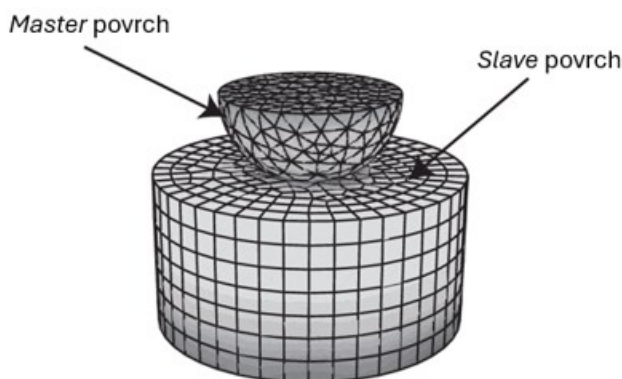
Kromě toho, že jsou tělesa vystavena působení (statických nebo graduujících) sil nebo předepsaným posunům, jsou často zatěžována nebo posunována tak, že dojde k jejich vzájemnému kontaktu (srážce). Kontakt může však značně ztížit výpočet, protože oblast, ve které se dvě pevné látky dostanou do kontaktu, nemusí být přesně známa, ale musí být definována jako součást řešení (je např. nutné definovat uzel konečné prvkové sítě, který se do kontaktu s cílovou strukturou dostane jako první, případně uzel nacházející se v ose symetrie tělesa na jednom z jeho konců, nebo zjednodušeně pomocí vlastností interagujících těles, díky kterým software kontakt vytvoří automaticky) a problém je tak vždy nelineární. [31]



Obrázek 46 Volba referenčního bodu kontaktu [31]

Při modelování kontaktu je nutné provést tyto kroky: [31]

- Určení dvojice povrchů – Definování povrchů, které se dostávají do vzájemného kontaktu. Jednomu z povrchů je přiřazen hlavní, tzv. *Master* povrch (tato vlastnost se přidává tělesu vyvolávající náraz nebo deformaci druhého tělesa) a druhému podřízený, tzv. *Slave* povrch. [31]
- Určení způsobu interakce mezi povrchy. [31]



Obrázek 47 Nastavení kontaktu mezi dvěma tělesy [31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je zhotovit numerickou analýzu dynamického zatížení kompozitové vrtule s využitím metody konečných prvků, které je reprezentováno nárazem ptáka a podle místa nárazu jsou vytvořeny dvě individuální simulace. Zároveň práce cílí na detailní studii odezvy kompozitních materiálů na tento typ zatížení.

7 3D MODELY

Ke zhotovení samotné FEM analýzy je zapotřebí nejdříve vytvořit 3D modely jednotlivých komponent, jež se experimentu účastní. V tomto případě se jedná o zjednodušený model ptáka (válec se sférickými plochami na jeho koncích) a model kompozitní vrtule, jenž byl poskytnut firmou Mejlík Propellers s.r.o. Veškerá tvorba a úpravy 3D modelů byly provedeny v softwaru NX od firmy Siemens.

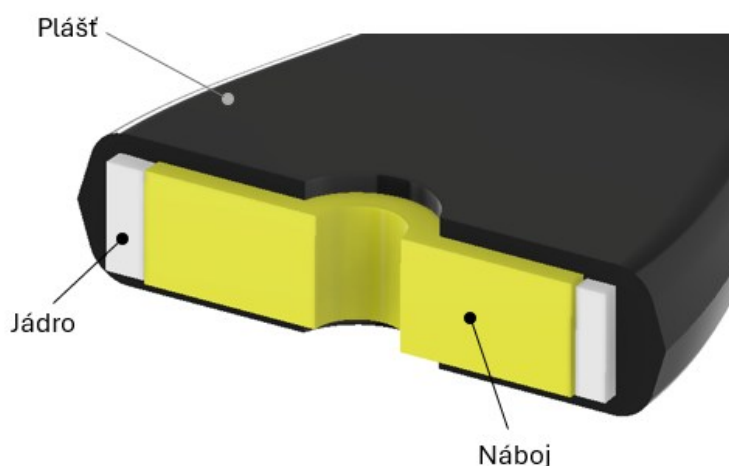
7.1 Kompozitní vrtule

Konkrétní kompozitní vrtule nachází využití u dronů a je tvořena ze dvou listů. Celkový průměr vrtule je 710 mm (28 palců) a stoupání vrtule – posun za jednu otáčku, činí 256,5 mm (10,1 palců). Tyto hodnoty se zpravidla udávají v palcích a jedná se o základní údaje, které slouží k označení daného typu vrtule – v tomto případě kompozitní vrtule 28x10,1.



Obrázek 48 3D model kompozitní vrtule

Vrtule se skládá ze čtyř základních částí, kterými jsou vnější plášť, náboj, jádro a výztuhy, nicméně samotné výztuhy nejsou v původním CAD modelu zahrnuty (jsou vytvořeny posléze) a původní poskytnutý model je tak tvořen pouze ze tří komponent.



Obrázek 49 Řez středem vrtule

K úspěšnému zhotovení simulace je zapotřebí na modelu provést několik úprav, kterými je vyhotovení pouze 2D plochy vnějšího pláště a vytvoření dvou samostatných výztuh (původní plášť byl vytvořen jako 3D těleso, které vyplňuje i prostor pro obě výztuhy, jenž se nachází na odtokové a náběžné hraně). Výsledný model kompozitní vrtule se tedy skládá ze čtyř požadovaných částí a díky symetrické povaze modelu vrtule je možné využít pouze jednu polovinu celé vrtule, tedy jeden vrtulový list.

7.1.1 Vnější plášť

Vnější plášť je uvažován jako 2D plocha. Důvodem je skořepinový charakter a kompozitní materiálové vlastnosti, jejichž zhotovením jsou definovány tloušťky v jednotlivých místech.

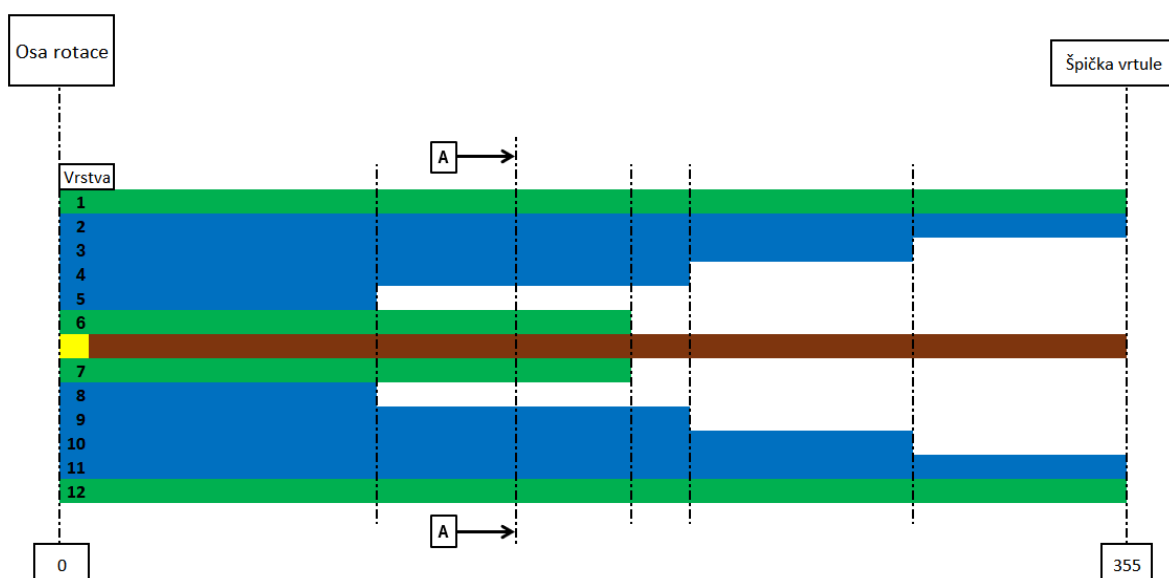


Obrázek 50 Kompozitní plášť vrtule

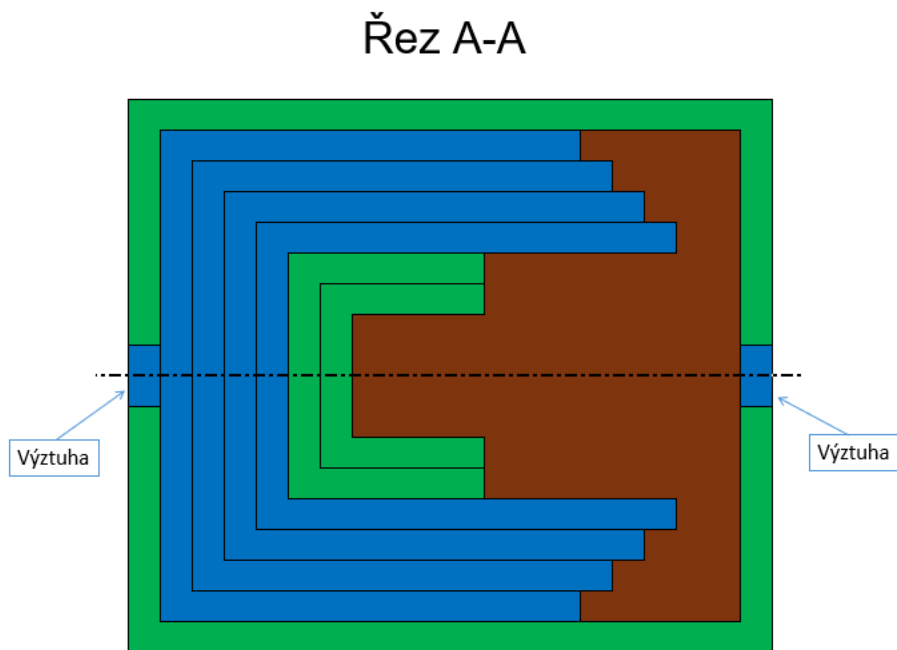
Materiálová struktura pláště je tvořena z prepregů využívající uhlíková vlákna. Vrstvení samotných prepregů pláště se mění v podélném i příčném směru, tedy tloušťka pláště vzniklá vrstvením jednotlivých prepregů, není konstantní, a tudíž jsou rozdílné i mechanické vlastnosti. Plán vrstvení je znázorněn níže a vychází z podkladů zaslaných firmou Mejlík Propellers s.r.o.

Tabulka 1 Materiály tvořící jednotlivé komponenty vrtulového listu

Součást	Typ materiálu	Hmotnost výztuže [g/cm ²]	Tloušťka vrstvy [mm]	Orientace [°]	Vlákna
Kompozitní plášť (uhlíková vlákna)	Tkanina	206	0,2	45	HT
	UD	150	0,15	0	HT
Jádro	PMI pěna	/	/	/	/
Náboj	Sklolaminát	/	0,5	45	/

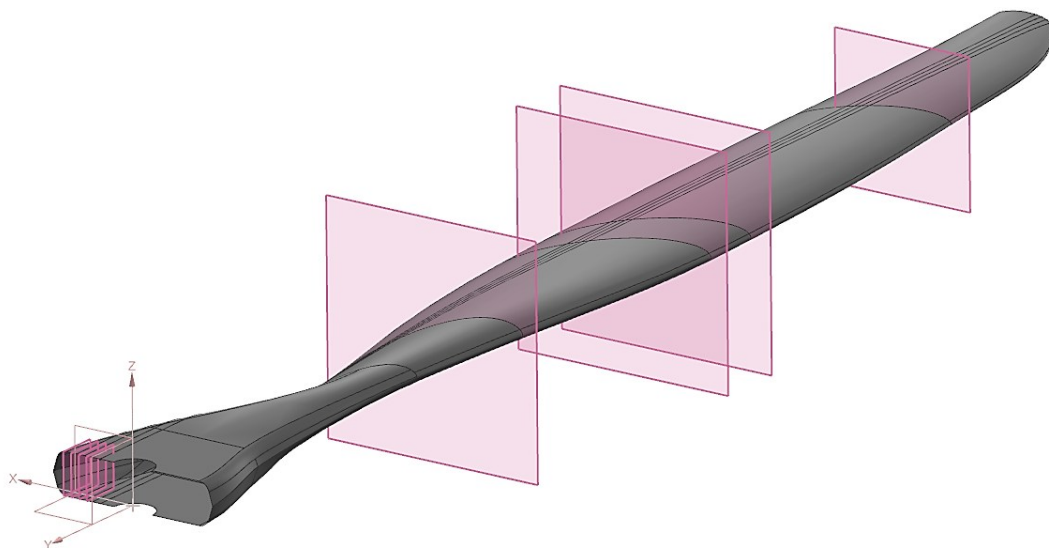


Obrázek 51 Schéma vrstvení kompozitního pláště v podélném směru



Obrázek 52 Schéma vrstvení kompozitního pláště v příčném řezu

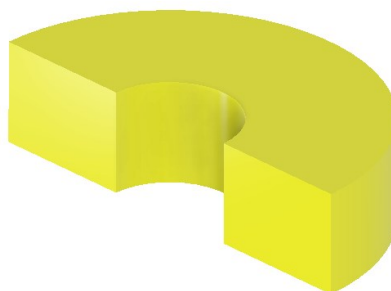
Aby bylo možné takto se měnící vrstvení provést, je nutné podle plánu vytvořit na modelu jednoduché roviny a podle nich vnější plášť rozdělit na samostatné plochy pomocí funkce *Divide surface*, která se v programu NX nachází v modeláři ploch.



Obrázek 53 Kompozitní plášť s rozdělenými plochami podle plánu vrstvení

7.1.2 Náboj

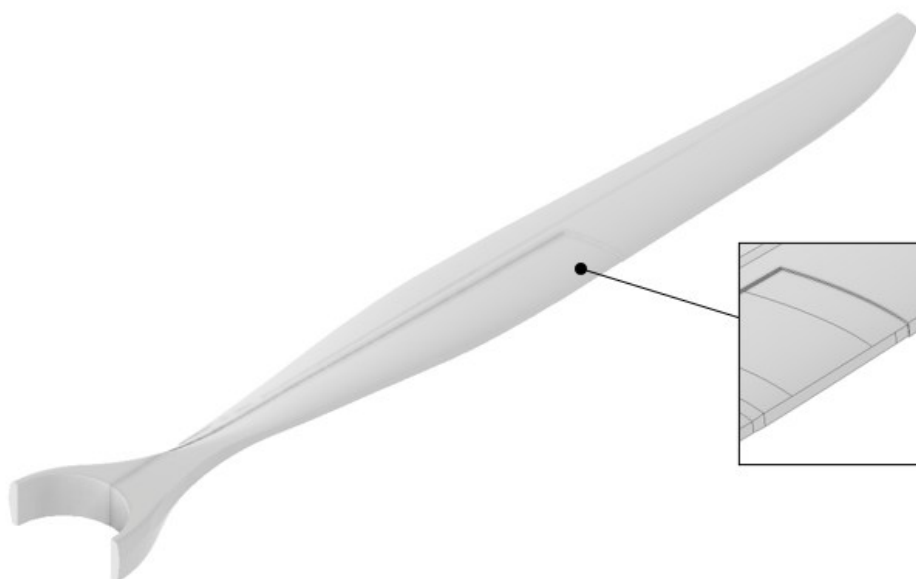
Náboj vrtule je tvořen ze sklaminátu, což je kompozitní materiál využívající skleněná vlákna s epoxidovou pryskyřicí. Vyznačuje se vysokou pevností, tuhostí, tepelnou odolností a nízkou hmotností a slouží k přenosu krouticího momentu od motoru na samotnou vrtuli, čímž je zajištěna její rotace. Vnější průměr náboje je 30 mm, vnitřní průměr 15 mm a jeho výška činí 7,5 mm.



Obrázek 54 Sklaminátový náboj

7.1.3 Jádro

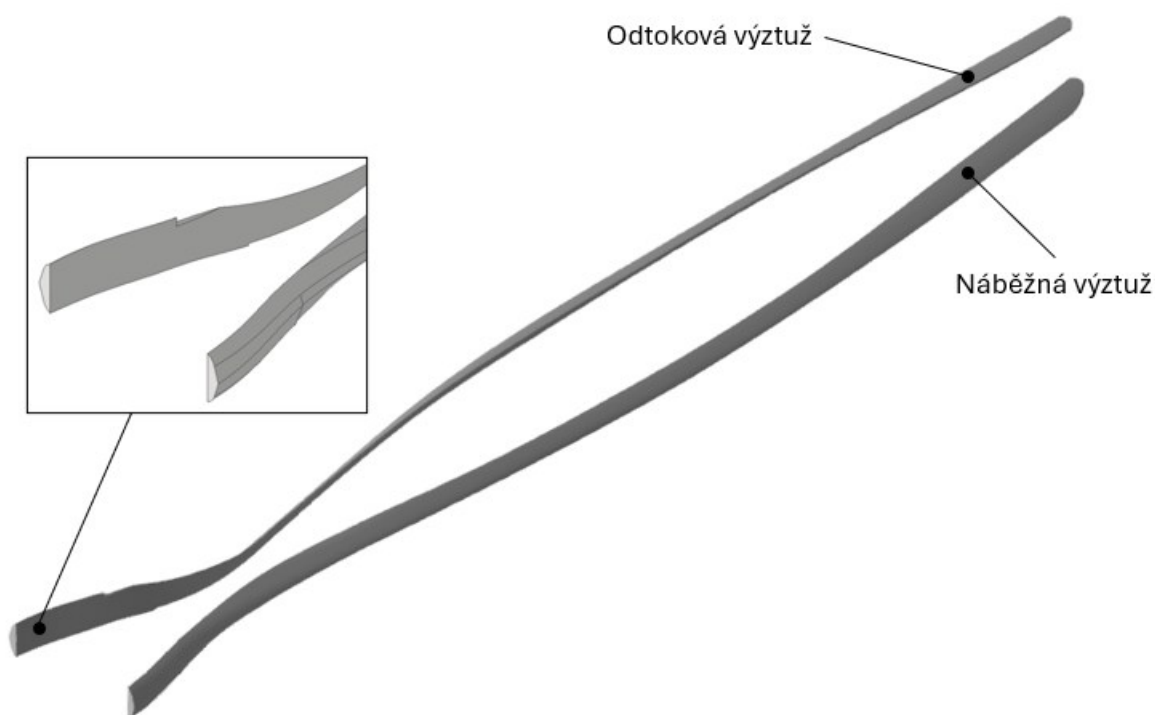
Jádro tvoří celkovou výplň vrtule a ve většině případů je tvořeno PMI pěnou, která disponuje vysokou pevností, tepelnou odolností, nízkou hmotností a vynikajícími tlumícími vlastnostmi. Dodává se převážně v podobě desek o různých tloušťkách a frézováním se získává finální tvar požadovaného jádra.



Obrázek 55 Pěnové jádro

7.1.4 Výztuhy

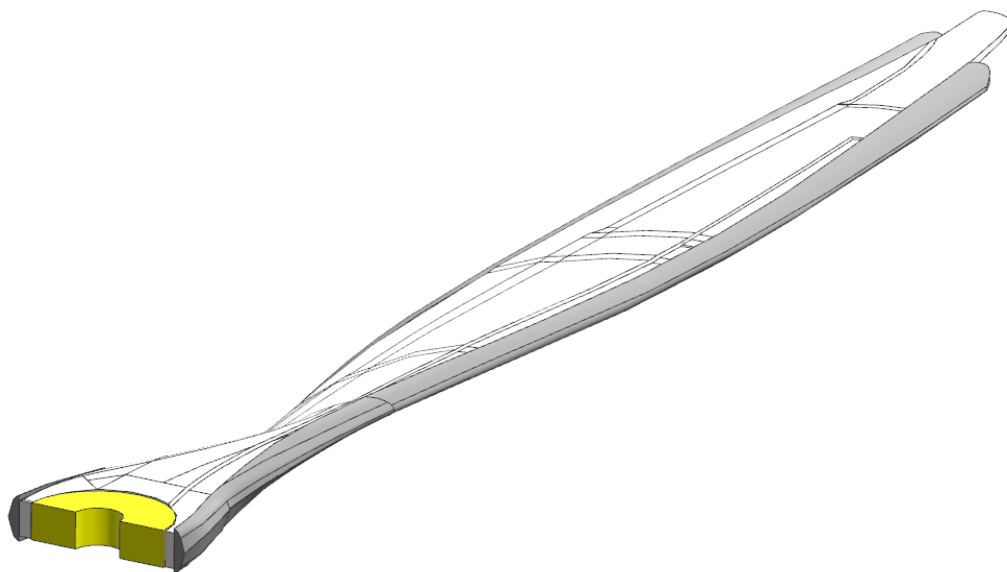
Výztuhy si lze představit jako vlákna – v tomto případě vysokopevnostní uhlíková vlákna (ačkoli jsou výztuhy na Obr. 52 označeny modře stejně jako samotný prepreg, jedná se pouze o vlákna), která se upěchují mezi vnější plášť a jádro vrtule (podélně kolem odtokové a náběžné hrany) za účelem zvýšení odolnosti vůči normálovému zatížení a nárazům. Jejich tvar a geometrie nemusí v realitě dokonale vyplňovat prostor mezi zmíněnými komponentami, nicméně kvůli správnému zhotovení FEM analýzy tato podmínka musí být splněna a výztuhy je tak nutno vymodelovat „přesně“.



Obrázek 56 Vláknové výztuhy

7.1.5 Optimalizovaný model vrtule

Po zmíněných úpravách pláště a tvorbě výztuh je 3D model vrtulového listu již vhodný ke zhotovení FEM modelů (aby bylo zamezeno nevhodnému prolínání modelu výztuh a pláště, u kterého jsou uvažovány proměnné tloušťky, nebyly výztuhy modelovány až do místa špičky vrtulového listu – tato úvaha nemá vliv na výsledky týkající se nárazové simulace).



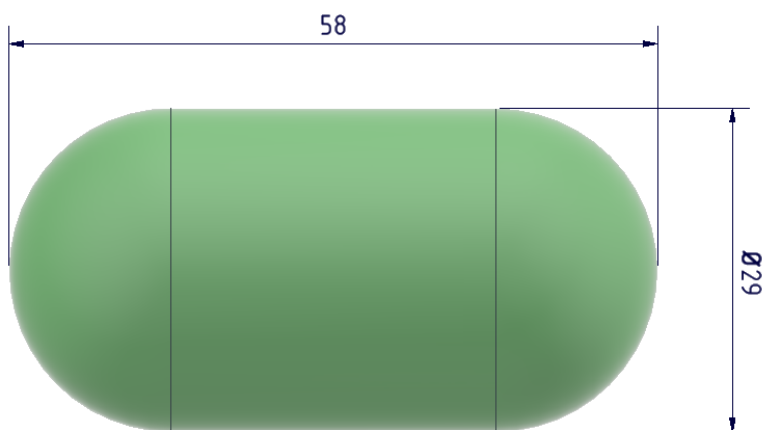
Obrázek 57 Pohled na model vrtulového listu bez kompozitního pláště



Obrázek 58 Finální optimalizovaný model vrtulového listu

7.2 Pták

Model ptáka je ve srovnání s realitou značně zjednodušen. Mnoho studií se zabývalo vytvořením optimálního geometrického modelu, jenž by bylo možné použít při různých analýzách a experimentech a zároveň docílit reálných výsledků. Tyto studie dospěly k návrhu modelovat ptáka jako jednoduchý válec, jehož výška (délka) odpovídá průměru sférické plochy, která se nachází na jeho koncích. Konkrétní rozměry vyplývají z uvažované hmotnosti ptáka (zpravidla 0,2 až 0,3 kg) a jeho hustoty. V tomto experimentu byla hmotnost ptáka stanovena na 0,25 kg a jelikož se předpokládá, že je pták z 96 % tvořen vodou, je jeho hustota 960 kg/m^3 . S uvážením těchto hodnot a jejich dosazením do jednoduchých objemových vzorců sférické plochy a válce vyplývá délka ptáka jako 58 mm a průměr 29 mm.



Obrázek 59 Model ptáka

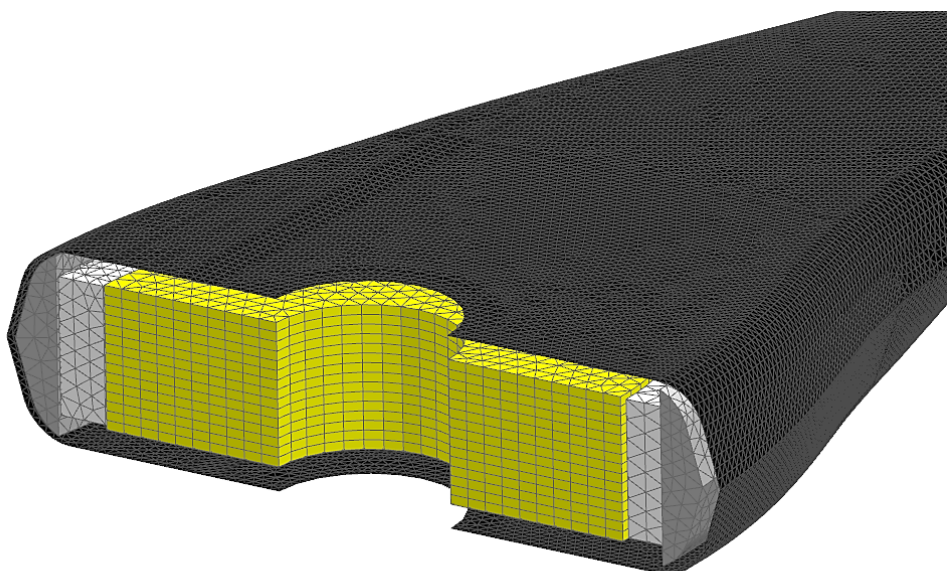
8 FEM MODEL

Vytvoření konečněprvkových sítí jednotlivých modelů zjednodušeně zahrnuje rozdělení původních CAD modelů na velmi malé prvky – elementy (vznik konečněprvkové sítě) a následné přiřazení materiálových vlastností a okrajových podmínek. Velikost a geometrie elementů se odvíjí od složitosti geometrie daného modelu a požadavků na přesnost výsledků – čím menší budou elementy, tím přesnější výsledky budou obdrženy. Nicméně se výrazně prodlouží doba výpočtu analýzy a je tak vhodné zvolit nejprve větší elementy a ty postupně zjemňovat.

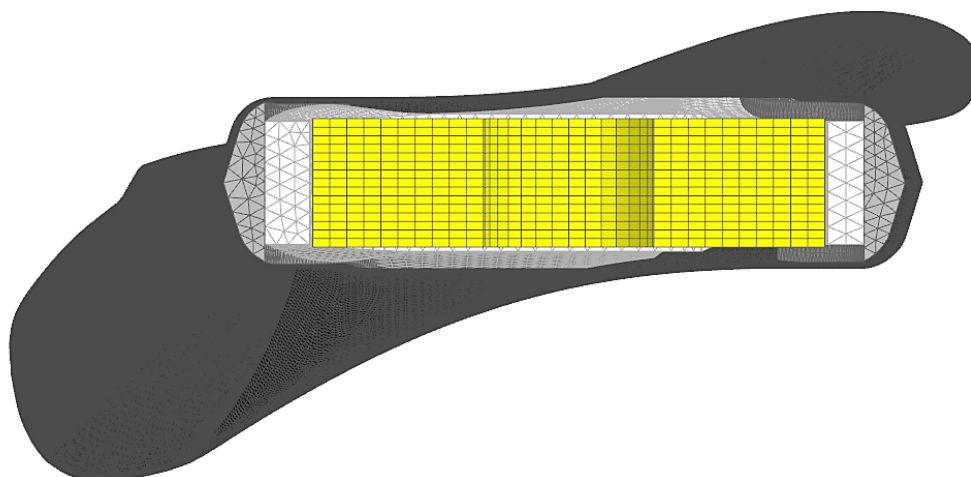
K vytvoření FEM modelů, tedy konečněprvkových sítí a materiálových vlastností jednotlivých komponent vrtulového listu, slouží opět program Siemens NX. Následně jsou FEM modely importovány do programu MSC Patran, který umožňuje vytvoření simulace nárazu ptáka na kompozitovou vrtuli a definici modelu porušení jednotlivých materiálů.

8.1 Kompozitní vrtule

FEM model kompozitní vrtule využívá různé typy a velikosti elementů jednotlivých částí, které jsou detailně popsány níže a je zobrazen na Obr. 60 a 61.



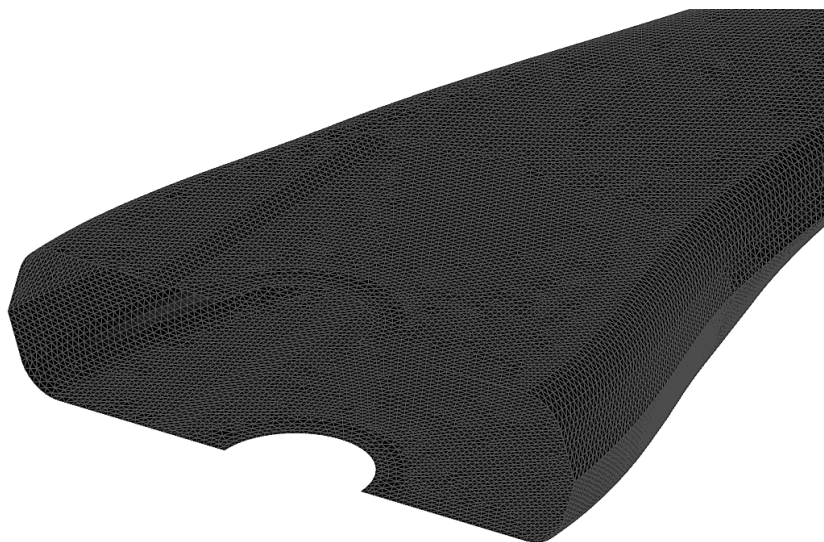
Obrázek 60 Kompletní FEM model vrtule (detailní pohled)



Obrázek 61 Pohled na FEM model vrtule v příčném směru

8.1.1 Vnější plášť

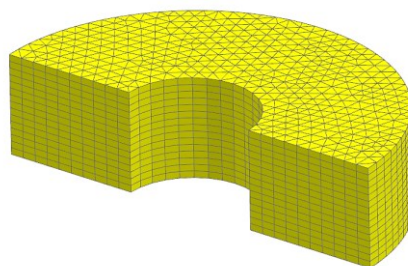
Z hlediska 2D plochy kompozitního pláště je nutné při tvorbě sítě použít 2D elementy typu *CTRIA(3)*, což jsou trojúhelníkové elementy s lineární interpolací, které jsou tvořeny třemi uzly. Velikost těchto elementů byla s ohledem na různorodý tvar s malými rádiusy a požadovanou přesností výsledků zvolena na 0,5 mm. Následně byly vytvořeny plány vrstvení podle Obr. 51 a 52, díky čemuž si model při následném importování do MSC Patran zachoval jednotlivé vlastnosti, resp. plochy, u kterých se plán vrstvení liší (přesné materiálové vlastnosti je však nutné definovat až v Patranu).



Obrázek 62 FEM model kompozitního pláště
(detailní pohled)

8.1.2 Náboj

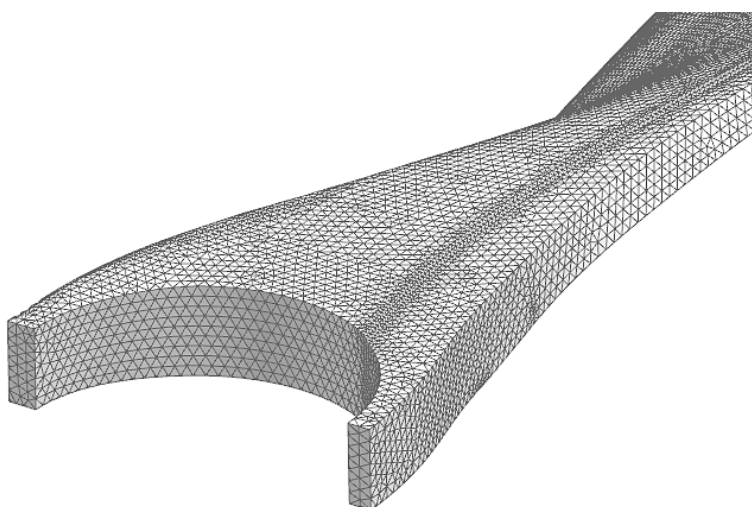
Síť náboje byla stejně jako u pláště vytvořena pomocí 2D elementů *CTRIA(3)* s odlišnou velikostí, tedy 1 mm. Tato 2D síť však byla vytvořena pouze na horní a spodní ploše náboje a pomocí jejího symetrického vytažení ji bylo možné transformovat na 3D síť. Použití tohoto způsobu zesíťování je vhodné k zajištění rovnoměrné 3D sítě po celém průřezu při použití vrstvených materiálů, jako je právě sklolaminát, kdy každá jedna vrstva 3D elementů odpovídá jedné materiálové vrstvě sklolaminátu o tloušťce 0,5 mm.



Obrázek 63 FEM model
sklolaminátového náboje

8.1.3 Jádro

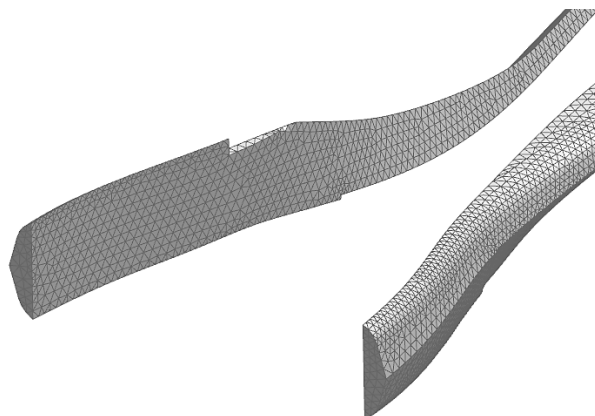
Konečněprvková síť jádra je tvořena z čtyřstěnných 3D elementů nesoucích označení *CTETRA(4)*, u kterých uzly tvoří samotné vrcholové body. Tento typ elementů je vhodný pro většinu analýz pracujících s 3D tělesy a kvůli vysokým požadavkům na přesnost (ale také k zamezení nereálných deformací elementů, ke kterým může během nárazových simulací docházet) byla po několika pokusech optimální velikost zvolena jako 1 mm.



Obrázek 64 FEM model pěnového jádra (detailní pohled)

8.1.4 Výztuhy

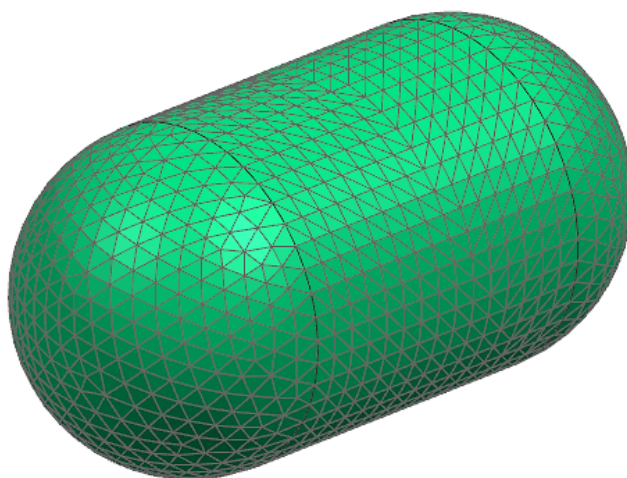
Tvorba konečněprvkové sítě výztuh proběhla identicky jako v případě jádra, tzn. s použitím čtyřstěnných elementů typu *CTETRA(4)* o velikosti 1 mm.



Obrázek 65 FEM model vláknových výztuh
(detailní pohled)

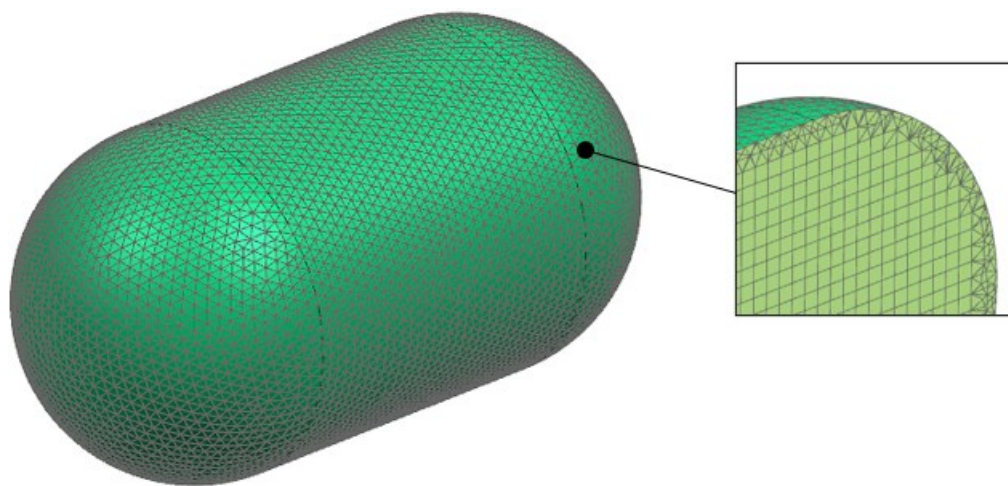
8.2 Pták

FEM model ptáka je opět tvořen ze čtyřstěnných elementů *CTETRA(4)*. Modely, jejichž materiálové vlastnosti se blíží vlastnostem vody, a u kterých dochází k extrémním hodnotám přetvoření, využívající tento druh elementů, operují lépe s většími elementy, a tudíž byla jejich velikost nastavena na 2 mm (menší elementy způsobují nereálné šíření napětí napříč částmi vrtule vlivem energie, kterou pták při nárazu vrtuli předává. Naopak větší elementy mají za následek numerické nestability při práci s řešičem).



Obrázek 66 FEM model ptáka

Druhá možnost tvorby FEM modelu ptáka je s využitím hybridní 3D sítě, u které je povrch modelu tvořen z běžných *CTETRA(4)* elementů a vnitřní část se dále skládá z pravidelných šestistěnů značených jako *CHEXA(8)*. Při tvorbě této sítě je z hlediska nárazových simulací nutné využít zpravidla jemnější síť – v tomto případě byla velikost obou typů elementů zvolena jako 1 mm. Výhodou tohoto typu sítě je vysoká stabilita při nárazových analýzách, naproti tomu je nevýhodou výrazné navýšení výpočetních časů. Při tvorbě následných numerických simulací byly použity oba zmíněné FEM modely ptáka.



Obrázek 67 FEM model ptáka – hybridní síť

9 FEM SOFTWARE POUŽITÉ PRO ZHOTOVENÍ ANALÝZY

K provedení FEM analýzy byly použity produkty od firmy Hexagon. Jako pre-processor a post-processor byl použit software MSC Patran a jako řešič MSC Dytran.

9.1 MSC Patran

Jedná se o software, který slouží k sestavení daného numerického modelu, tzn. k uspořádání geometrie, vytvoření sítě konečných prvků, tvorbě okrajových podmínek, materiálových a geometrických vlastností (práce v pre-processoru), ale také k prohlížení výsledků simulace (práce v post-processoru) – Patran vytvoří vstupní soubor pro Dytran (koncovka .dat), který je tímto řešičem spočítán. Během výpočtu vznikají jednotlivé archivové soubory (koncovka .ARC) obsahující výsledky daných kroků analýzy, které je možné nahrát zpět do Patranu a jednotlivě je prohlížet.

9.2 MSC Dytran

Dytran je trojrozměrný explicitní řešič, jenž využívá parciálních diferenciálních rovnic k řešení požadované analýzy. Zahrnuje širokou škálu materiálové a geometrické nelinearity a je vhodný pro analýzu krátkých dynamických událostí, které zahrnují velké deformace, vysoký stupeň nelinearity a interakce mezi strukturami a tekutinami, např: [34]

- Nárazy ptáků na letecké konstrukce
- Nárazové testy automobilů
- Vysokorychlostní penetrace
- Odezva konstrukcí na výbuch

Rozhraní Dytranu nenabízí žádné speciální funkce, jde v podstatě pouze o výběr souboru vytvořeného Patranem, u kterého se spustí matematické řešení.

10 SIMULACE 1 – KONCOVÁ ČÁST VRTULOVÉHO LISTU

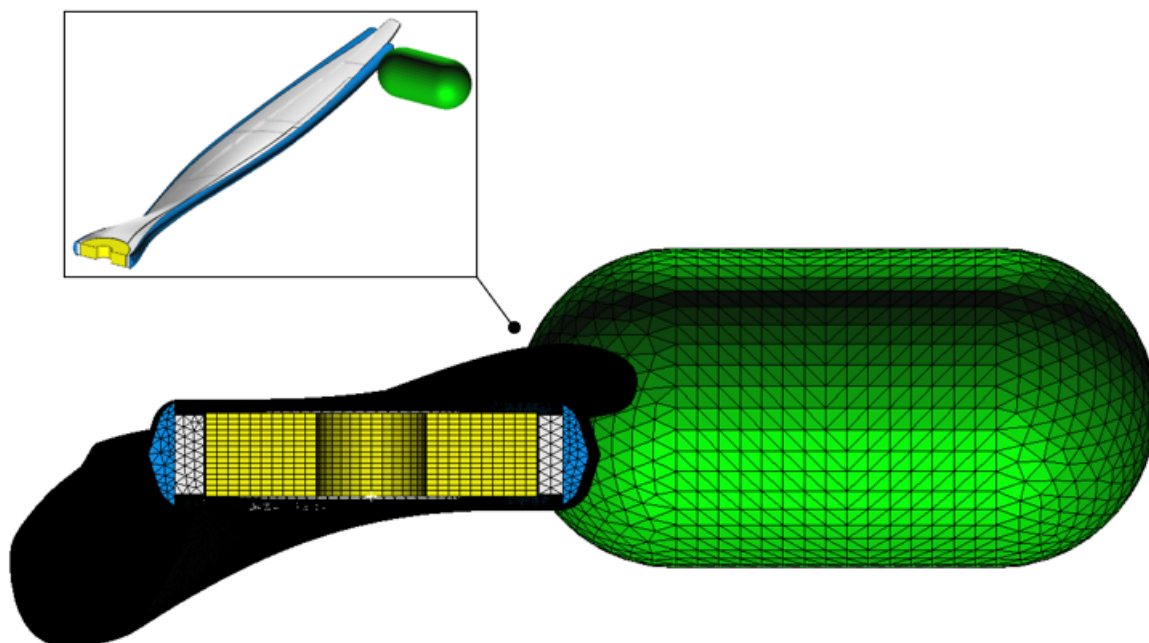
První simulace zkoumá náraz ptáka na náběžnou hranu listu vrtule ve vzdálenosti 285,5 mm od jejího středu (koncová část, resp. špička vrtulového listu). Jedná se totiž o oblast s největší pravděpodobností na náraz s cizím objektem. Samotný model ptáka uvažuje síť tvořenou pouze ze čtyřstěnů o velikosti 2 mm.

10.1 Založení analýzy

Počátečním krokem pro zhotovení FEM analýzy je vytvoření nové databáze v programu MSC Patran a následná volba správného řešiče, tedy MSC Dytran v panelu *Preferences – Analysis*. Poté přichází na řadu import FEM modelů do Patranu, jenž se na simulaci podílí (pták a vrtule).

10.2 Příprava FEM modelů

V další části následuje správné nastavení vzájemné polohy ptáka a vrtule, resp. zajištění polohy ptáka tak, aby odpovídala počátečnímu kroku simulace, tzn. ve vzdálenosti 285,5 mm od středu vrtule v podélném směru (osa y) a přibližně 5 mm od náběžné hrany ve směru příčném (osa x).



Obrázek 68 Uspořádání modelů

10.3 Materiálové vlastnosti

V prostředí MSC Patran je definice kompozitních materiálů realizována pomocí výsledných vlastností samotného prepregu, nikoli pomocí jeho stavby vlákna a matrice (jak je tomu v NX) a je tak nutné tento materiál vytvořit samostatně jako 2D ortotropní materiál s lineárně elastickým konstitutivním modelem značeným softwarově jako *LinElas (MAT8)*. Tvorba a úprava veškerých materiálů se nachází na panelu *Materials*.

Z důvodu dynamické povahy této analýzy je však nutné navíc definovat materiálovým modelům model jejich porušení, tzn. limitní hodnoty, při kterých dojde k deaktivaci elementů, jenž nejsou dále schopny přenášet zatížení – v tomto případě byl u kompozitního pláště model porušení zvolen podle metody *Tsai-Wu* pracující s maximálními hodnotami normálových a smykových napětí, jejichž překročením dojde ke zmíněné deaktivaci.

Materiálové vlastnosti uhlíkových vláken prepregu s hmotností výztuže 206 g/cm²:

- Hustota: 1 790 kg · m⁻³
- Modul pružnosti: 235 GPa
- Poissonova konstanta: 0,2
- Pevnost v tahu: 4 410 MPa
- Pevnost v tlaku: 1 400 MPa
- Pevnost ve smyku: 85 MPa

Hodnoty modelu porušení prepregu s hmotností výztuže 206 g/cm²:

- Pevnost v tahu v podélném směru: 670 MPa
- Pevnost v tlaku v podélném směru: 520 MPa
- Pevnost v tahu v příčném směru: 645 MPa
- Pevnost v tlaku v příčném směru: 495 MPa

Materiálové vlastnosti epoxidové pryskyřice prepregu s hmotností výztuže 206 g/cm²:

- Hustota: 1 200 kg · m⁻³
- Modul pružnosti: 3 GPa
- Poissonova konstanta: 0,3

- Pevnost v tahu: 80 *MPa*
- Pevnost v tlaku: 110 *MPa*
- Pevnost ve smyku: 20 *MPa*

Materiálové vlastnosti uhlíkových vláken prepregu s hmotností výztuže 150 g/cm²:

- Hustota: 1 820 *kg · m⁻³*
- Modul pružnosti: 240 *GPa*
- Poissonova konstanta: 0,2
- Pevnost v tahu: 4 900 *MPa*
- Pevnost v tlaku: 1 600 *MPa*
- Pevnost ve smyku: 90 *MPa*

Hodnoty modelu porušení prepregu s hmotností výztuže 150 g/cm²:

- Pevnost v tahu v podélném směru: 2,08 *GPa*
- Pevnost v tlaku v podélném směru: 1,2 *GPa*
- Pevnost v tahu v příčném směru: 65 *MPa*
- Pevnost v tlaku v příčném směru: 180 *MPa*

Materiálové vlastnosti epoxidové pryskyřice prepregu s hmotností výztuže 150 g/cm²:

- Hustota: 1 200 *kg · m⁻³*
- Modul pružnosti: 3 *GPa*
- Poissonova konstanta: 0,3
- Pevnost v tahu: 80 *MPa*
- Pevnost v tlaku: 110 *MPa*
- Pevnost ve smyku: 20 *MPa*

Materiály náboje, jádra a výztuh jsou uvažovány jako izotropní. Z hlediska Patranu se jedná o izotropní elasto-plastický konstitutivní model značený jako *ElasPlas(DYMAT24)*, u kterého je model porušení definován jako tzv. *Yield model*, tedy model plastického přetvoření, využívající napětí *Von-Mises*, pracující s hodnotou pro překročení maximální plastické deformace (*Maximum Plastic Strain*) v tahu a tlaku, která je vyjádřena bezrozměrně (v podobě procent) – deaktivace elementů nastane v momentě, kdy dojde k překročení plastické deformace o danou procentuální hodnotu.

Materiálové vlastnosti náboje ze sklolaminátu:

- Hustota: $1\,800\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Modul pružnosti: 25 GPa
- Poissonova konstanta: 0,2
- Pevnost v tahu: 370 MPa
- Pevnost ve smyku: 55 MPa
- Mez kluzu: 180 MPa
- Maximální plastická deformace: 0,2
- Maximální kompresní plastická deformace: 0,2

Jádra z PMI pěny:

- Hustota: $50\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Modul pružnosti: 83 MPa
- Poissonova konstanta: 0,28
- Pevnost v tahu: $1,68\text{ MPa}$
- Pevnost v tlaku: $0,85\text{ MPa}$
- Pevnost ve smyku: $0,85\text{ MPa}$
- Mez kluzu: $0,5\text{ MPa}$
- Maximální plastická deformace: 0,3
- Maximální kompresní plastická deformace: 0,3

Výztuh z uhlíkových vláken:

- Hustota: $1\,820\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Modul pružnosti: 240 GPa
- Poissonova konstanta: 0,2
- Pevnost v tahu: $4\,900\text{ MPa}$
- Pevnost v tlaku: $1\,600\text{ MPa}$
- Pevnost ve smyku: 90 MPa
- Maximální plastická deformace: 0,8
- Maximální kompresní plastická deformace: 0,5

Model ptáka je taktéž uvažován jako izotropní těleso využívající elasto-plastický konstitutivní model, který však nese odlišné označení *ElasPlas(DMAT)*. Použití tohoto modelu spočívá v možnosti definování objemového modulu pružnosti a je ideální pro případy modelování nárazů živých objektů, kdy se vychází z teorie, že jejich hmota je z převládající většiny tvořena vodou. Model porušení je opět důležitým parametrem a jeho nastavení je identické, jako u modelů předešlých.

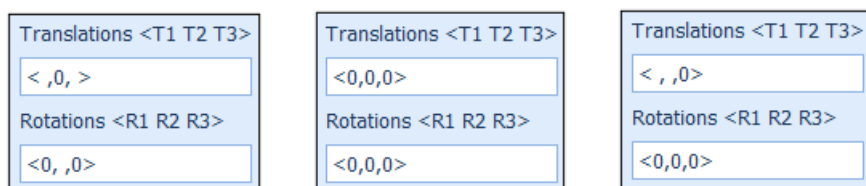
Materiálové vlastnosti ptáka:

- Hustota: $960\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Objemový modul pružnosti: $2,2\text{ GPa}$
- Modul pružnosti ve smyku: $20,7\text{ MPa}$
- Mez kluzu: 100 MPa
- Maximální plastická deformace: 0,1
- Maximální kompresní plastická deformace: 0,1

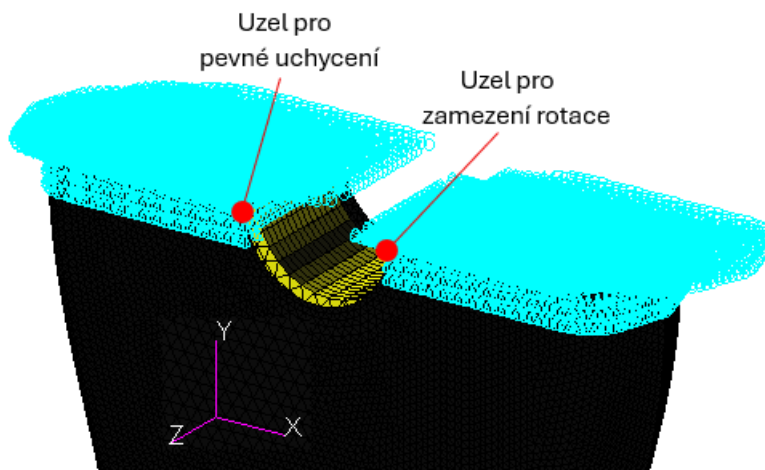
10.4 Okrajové podmínky

Jakmile jsou připraveny materiálové vlastnosti, je zapotřebí definovat okrajové podmínky. Jelikož je pro tuto simulaci využita symetrie, bylo nutné ji zadat pomocí fixačních podmínek (odebrání translačního stupně volnosti ve směru symetrie – osa y a rotačních stupňů volnosti podle os, které nejsou ve směru symetrie – osa x, z). V tomto případě je však v místě nastavení symetrie nutné zajistit také úplné uchycení, tedy odebrání všech stupňů volnosti, aby nedocházelo k nežádoucímu vychýlení vrtulového listu. K tomu je možné využít jeden uzel, který se nachází např. na hraně kompozitního pláště vymezující středový otvor. Fixace rotačního pohybu pomocí jednoho uzlu však není v případě komplexního modelu vrtulového listu dostačující (zamezení tomuto pohybu je umožněno pouze přímo v místě uzlu, nikoli celému listu vrtule). Proto je vhodné dalšímu uzlu, jenž se nachází např. na protilehlém konci hrany středového otvoru, odebrat posunutí ve směru osy z , díky čemuž nenastane nežádoucí rotace vrtulového listu okolo prvního – pevně uchyceného uzlu.

K odebrání stupňů volnosti slouží okrajová podmínka *Displacement*, která se stejně jako všechny okrajové podmínky nachází na panelu *Load/BCs*. Grafické znázornění veškerých okrajových podmínek je vyjádřeno pomocí šipek v jejich hlavních směrech.

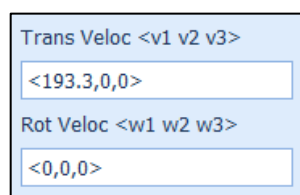


Obrázek 69 Nastavení symetrie (vlevo), úplného uchycení (uprostřed), zamezení celkové rotaci (vpravo) odebráním stupňů volnosti



Obrázek 70 Grafické znázornění symetrie vrtulového listu včetně uzlů s pevným uchycením

Pták je uvažován jako pohybující se těleso o rychlosti 50 km/h, resp. 13,9 m/s ve směru osy x . Hodnota rychlosti je však výrazně zvětšena o obvodovou rychlost vrtule plynoucí ze vzdálenosti od jejího středu k místu dopadu (285,5 mm) a operační hodnotou její rotace, kterou výrobce uvádí jako 6 000 ot/min. Z těchto parametrů vyplývá velikost obvodové rychlosti vrtule 179,4 m/s a součtem této hodnoty s rychlostí ptáka je obdržena výsledná rychlost 193,3 m/s, jenž je k modelu ptáka přiřazena. Volba tohoto postupu je v podobných situacích běžná, jelikož odpadá nutnost uvažovat rotaci vrtule, která by výrazně zvýšila výpočetní časy simulace. K definici rychlosti slouží funkce *Initial Velocity*.



Obrázek 71 Nastavení počáteční rychlosti

Jako poslední okrajová podmínka byl definován kontakt – *Contact*, jenž umožňuje nastavit nejen nárazovou interakci mezi dopadajícím ptákem a vrtulovým listem, ale také vzájemné deformace a přenášení napětí (napětíových vln) mezi jednotlivými částmi listu.

K tomu byl použit adaptivní kontakt, konkrétně *Adaptive Master-Slave surface*, kde je nutné vybrat *Master* povrch (těleso, které vyvolává náraz nebo deformaci jiného tělesa) a *Slave* povrch (těleso, které čelí nárazu nebo je deformováno působením jiného tělesa).

Nejdříve byl nastaven kontakt mezi Ptákem a jednotlivými součástmi vrtulového listu (důvodem je možná perforace – úplný průnik ptáka některými komponentami), tedy:

- Pták (*Master*) – Kompozitní plášť (*Slave*)
- Pták (*Master*) – Výztuha náběžné hrany (*Slave*)
- Pták (*Master*) – Výztuha odtokové hrany (*Slave*)
- Pták (*Master*) – Jádru (*Slave*)

A dále kontakt pro vzájemnou interakci a přenos napětíových vln mezi komponentami listu vrtule:

- Náboj (*Master*) – Jádru (*Slave*)
- Výztuha náběžná (*Master*) – Jádru (*Slave*)

- Jádru (*Master*) – Výztuha odtoková (*Slave*)
- Plášť (*Master*) – Výztuhy, jádro, náboj (*Slave*): tyto komponenty se nachází uvnitř pláště, který lze chápat jako jakýsi obal a je tak možné je všechny zařadit mezi *Slave* povrchy.

Mezi komponentami vrtule, u kterých dochází ke kontaktu jejich sousedních ploch, je u této okrajové podmínky nutné také definovat jejich spojení („slepení“) pomocí hodnoty koeficientu statického tření s hodnotou 1.

Následně bylo nutné definovat interakci mezi samotnými elementy kompozitního pláště, u kterých se předpokládá jejich vzájemný styk, jelikož vlivem jeho deformace může docházet ke kontaktu s jinými než přímo sousedními elementy. K tomu slouží funkce *Contact* typu *Adaptive Self Contact*, kterou lze nastavit pouze na elementy konkrétní části pláště, kde se tato interakce předpokládá (oblast, ve směru pohybu ptáka), nebo také na celý model pláště, jelikož vliv této okrajové podmínky na výpočetní časy (z hlediska celkového počtu elementů, jenž s touto podmínkou pracují) je minimální. Grafické znázornění je opět znázorněno pomocí šipek, tentokrát však se žlutou barvou.

10.5 Výpočetní analýza

K zadání parametrů výpočetní analýzy slouží příkaz *Analyze* na panelu *Analysis*, kde je nutné nejdříve vybrat metodu analýzy jako *Translate*, jenž je ideální pro nárazové děje. Dále je zapotřebí v záložce *Execution Controls*, která obsahuje dialogové okno *Execution Control Parameter*, provést veškerá nastavení týkající se doby a celkového počtu kroků analýzy a taktéž jejich počáteční a minimální časové intervaly.

Tyto hodnoty nelze přesně odhadnout a k přesnému určení je potřeba provést několik pokusů. Důležitý je především minimální časový krok analýzy *Minimum Time Step*, který musí být dostatečně malý na to, aby byl řešič MSC Dytran schopen správně vypočítat rovnice pro šíření napěťových vln jednotlivými elementy, a tudíž docílit realistických výsledků (hodnota závisí na průměrné velikosti elementů konkrétní součásti a rychlosti šíření zvuku v přiřazeném materiálu). Výsledné časové parametry byly zvoleny následovně:

End Step: 1,9e+5, *End Time*: 7e-4, *Time-Step Size at Start*: 1e-11, *Minimum Time Step*: 1e-12.

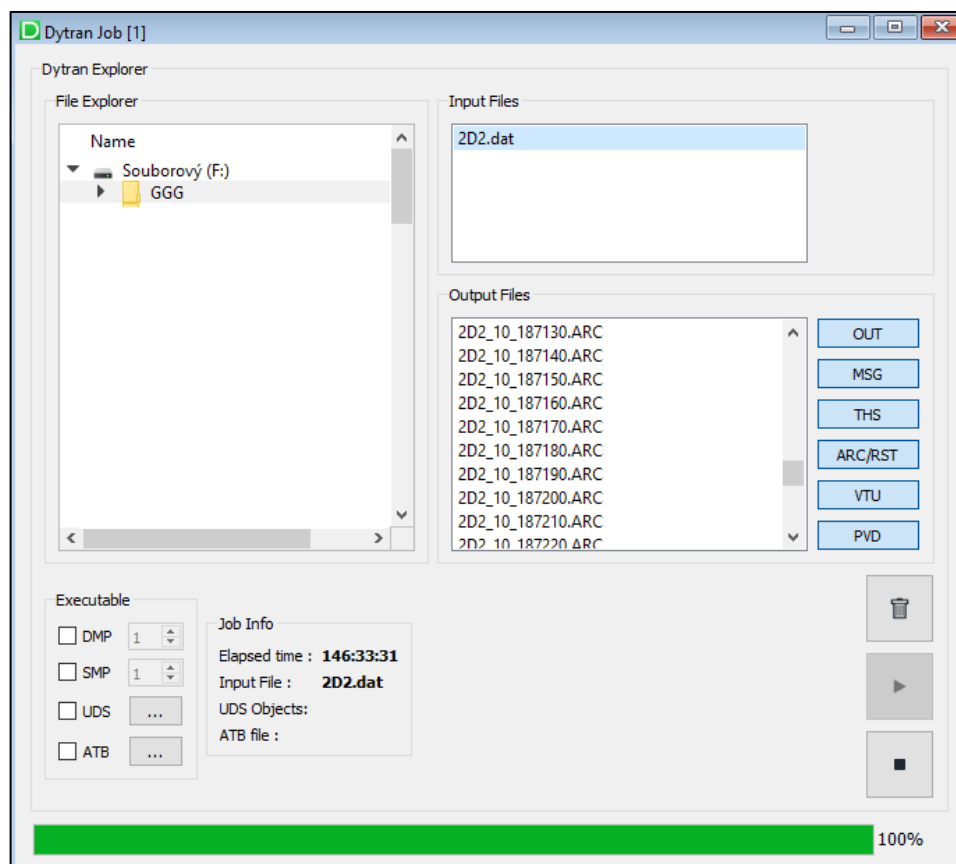
V druhé části analýzy je nutné definovat její výstupy. K tomu slouží záložka *Output Controls*, kde je nutné nastavit druh souboru, který je vytvořen řešičem MSC Dytran a zpětně

vložen do MSC Patran k zobrazení požadovaných výsledků simulace v jednotlivých krocích, tzn. *Fill Type* je zvolen jako *Archive*. Následuje dialogová záložka *Result Type*, kde je potřeba zvolit požadované výsledky analýzy, které chceme prohlížet – tyto výsledky je nutné nastavit zvlášť pro elementy, tedy *Element Output* (zobrazení výsledků napětí, deformací, tlaku atd.) a poté pro uzly jako *Grid Point Output* (zobrazení rychlosti, zrychlení, reakčních sil apod.). Záznamy obou typů výsledků byly vybrány po 10 krocích jako *Steps for Output* – *Sampling Rate* s počtem uložení pro jeden archivní soubor jako 10 000.

K uložení parametrů analýzy slouží tlačítko *Apply*, čímž zároveň dojde k vytvoření vstupního souboru pro řešič (koncovka .dat).

10.6 Řešič – MSC Dytran

K matematickému řešení zhotovené simulace slouží MSC Dytran, ve kterém proběhne vytvoření nové výpočetní operace *New Job*, pro kterou je zvolen soubor vygenerovaný Patranem s koncovkou .dat, čímž dojde k zahájení řešení.



Obrázek 72 Výsledky řešení v MSC Dytran

Jednotlivé komponenty vrtulové listu jsou tvořeny z velmi jemných sítí, kde velikost elementů nepřesahuje ani 1 mm, což má za následek jejich velké množství, a tudíž i velké časy potřebné k výpočtu simulace – v tomto případě 146 hodin. Kromě vysoké kvality samotné sítě negativně ovlivňují výpočetní časy nárazové okrajové podmínky (kontakt typu Master/Slave) a různorodost materiálových vlastností z hlediska vzájemného šíření napětových vln a z nich vyplývajících deformací mezi jednotlivými komponentami.

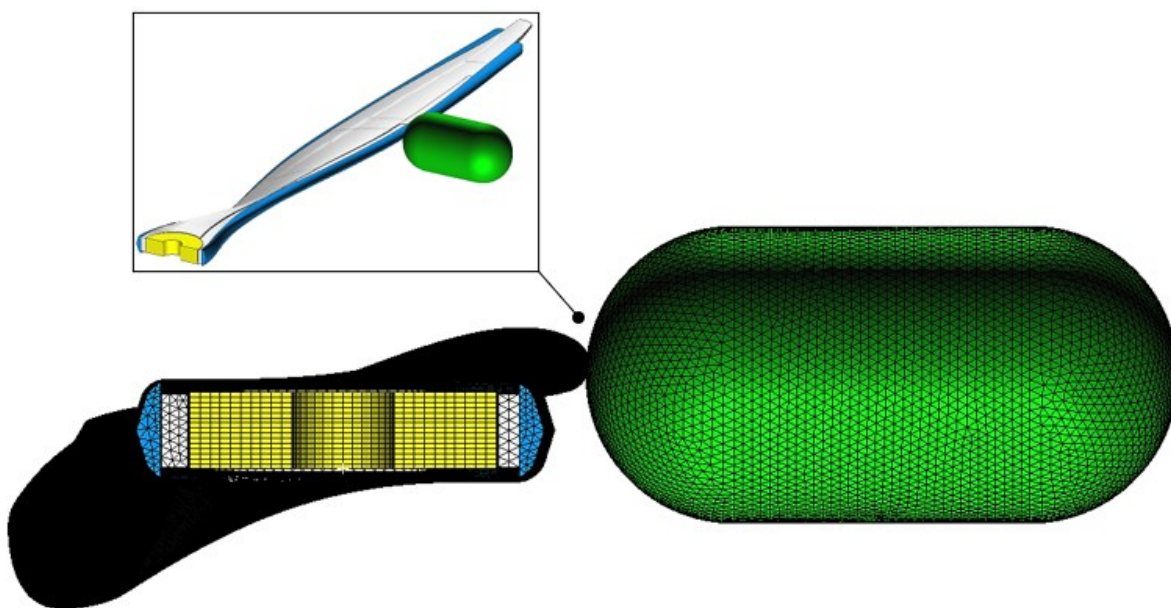
Výsledkem práce v MSC Dytran jsou zmíněné výstupní archivové soubory s koncovkou .ARC, kdy každý jeden z těchto souborů reprezentuje jeden časový krok simulace se zvolenými výsledky napětí, deformací, rychlostí apod.

Tyto soubory se nahrají zpětně do MSC Patran, kde je možné výsledky individuálně prohlížet.

11 SIMULACE 2 – STŘED VRTULOVÉHO LISTU

Tato simulace se zabývá nárazem ptáka na náběžnou hranu vrtulového listu v poloviční vzdálenosti od středu rotace (177,5 mm). Model ptáka v této analýze využívá složitější hybridní síť.

Stejně jako v případě první simulace bylo nejdříve zapotřebí zhotovit a vhodně připravit novou databázi a poté uspořádat modely do polohy odpovídající prvotnímu kroku simulace.



Obrázek 73 Uspořádání modelů

Přiřazení materiálových vlastností a tvorba okrajových podmínek je identická jako v předešlém experimentu až na hodnotu počáteční rychlosti ptáka, která je v tomto případě 125,4 m/s a odpovídá obvodové rychlosti plynoucí z rychlosti rotace vrtule 6 000 ot/min ve vzdálenosti 177,5 mm od jejího středu (s přičtením hodnoty 13,9 m/s). Výpočetní parametry analýzy se od předchozí simulace liší hlavně navýšením počtu kroků (způsobeno převážně větším množstvím elementů ptáka a hybridním charakterem jeho sítě):

End Step: 2,5e+5, End Time: 1.3e-3, Time-Step Size at Start: 1e-11, Minimum Time Step: 1e-12.

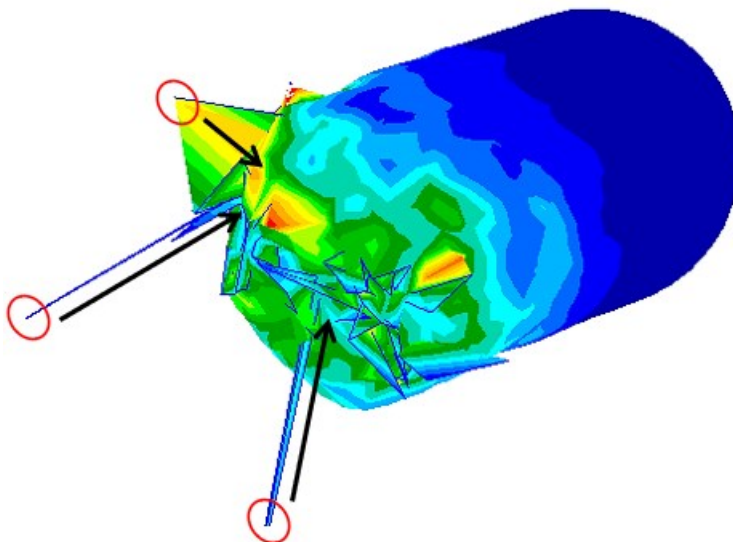
Výsledná doba výpočtu nakonec trvala 193 hodin, což je o 37 hodin více než u předešlé simulace (důvodem je zmíněná složitá síť ptáka a taktéž i větší šířka pláště v místě dopadu).

12 VÝSLEDKY SIMULACÍ

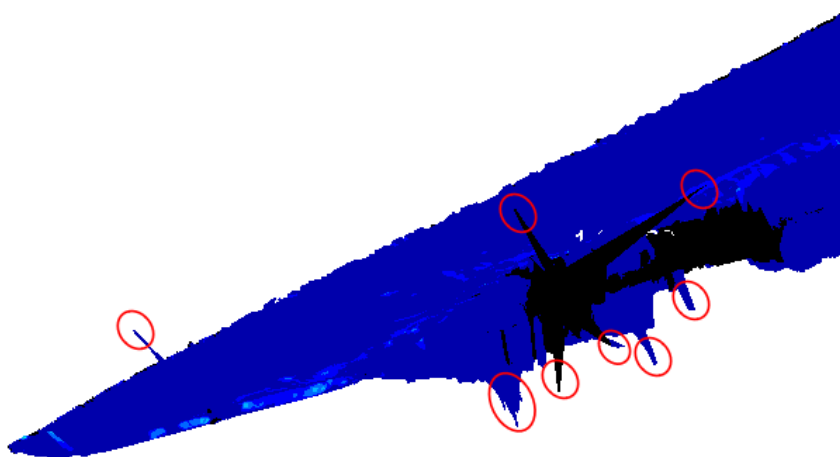
Tato kapitola shrnuje výsledky zhotovených simulací z pohledu šíření napětí či přetvoření daných komponent v určitých oblastech, resp. časech.

K zobrazení výsledků (šíření napětí, přetvoření aj.) jednotlivých komponent je nutné v Patranu ke každému modelu přiřadit skupinu (*Group*), díky čemuž poté archivový soubor slouží jako zdroj informací o hodnotách napětí a přetvoření vztažených na konkrétní komponentu.

Nevýhodou v případě 2D modelů (plášť) a těles, u kterých dochází k vysokým hodnotám přetvoření (pták) je grafické zobrazení výsledků z hlediska jednotlivých komponent, které se týká překročení hydrodynamického limitu daných elementů. Pokud jsou výsledky zobrazeny pouze u konkrétního modelu (případně dvou a více skupin zobrazených zároveň), software (Patran) neuvažuje překročení hydrodynamického limitu – graficky zachovává spojitost materiálu, tzn. jakmile se materiál, resp. daný element oddělí vlivem napětí (deformací) od zbytku modelu, software jej graficky propojuje s místem, kde se původně nacházel a na modelu tak vznikají protažené oblasti a výsledky mohou na první pohled působit jako nesprávné (během výpočtu jsou tyto elementy ignorovány a jejich protažení tak neovlivňuje konečné výsledky).

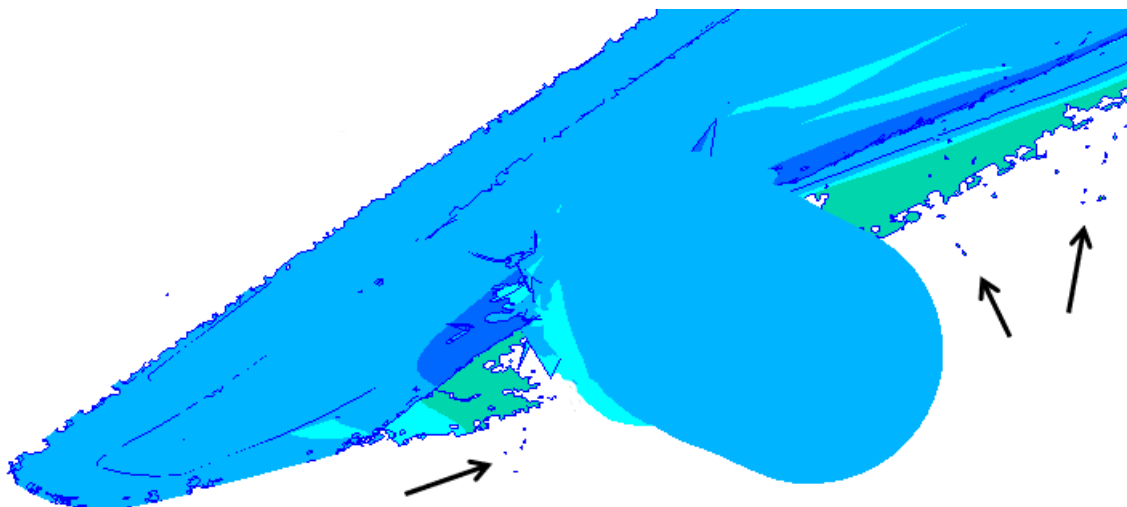


Obrázek 74 Zobrazení ptáka jako samotného modelu během simulace – grafické spojení oddělených elementů



Obrázek 75 Zobrazení pláště jako samotného modelu během simulace v místě dopadu (grafické spojení oddělených elementů)

Naopak u zobrazení daného archivového souboru týkajícího se celé sestavy, je překročení hydrodynamického limitu zakomponováno a zobrazení výsledků tak odpovídá realitě, nicméně zobrazením všech komponent není možné např. nahlížet na celé jádro vrtule, které se nachází uvnitř kompozitního pláště.



Obrázek 76 Graficky přesné znázornění oddělených elementů od modelu pláště (a ptáka) při zobrazení výsledků jako celkové sestavy

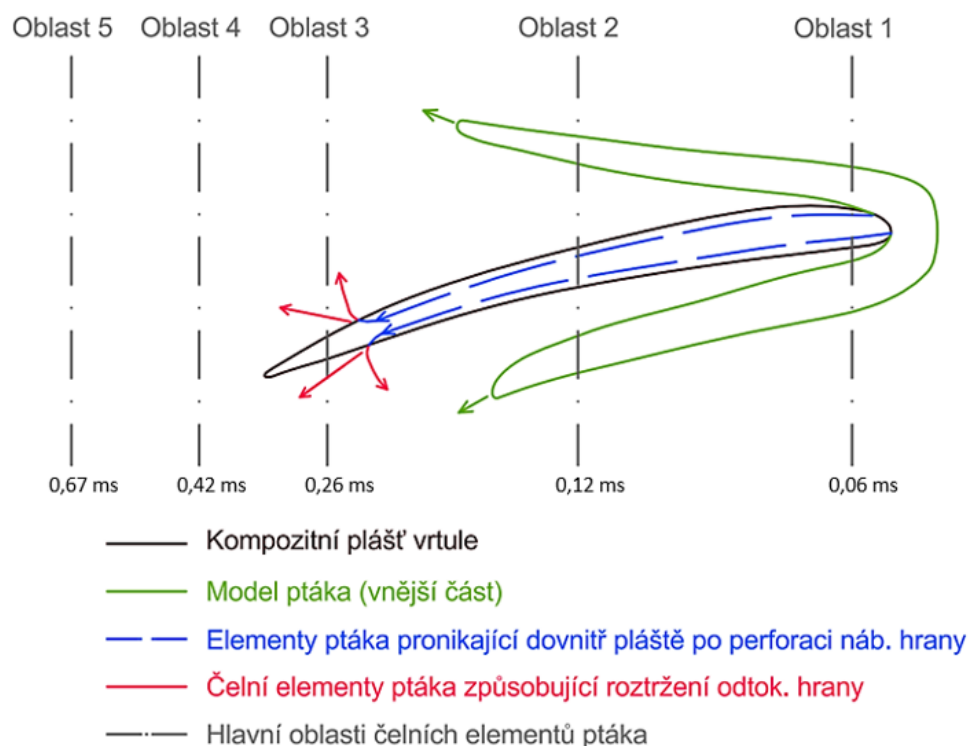
Grafickou interpretaci individuálních výsledků s požadovaným přerušením soudržnosti materiálu daného modelu je však možné docílit odstraněním elementů ostatních těles z původní sestavy a tím obdržet reálné grafické zobrazení (v případě velmi velkých přetvoření, ke kterým dochází převážně v konečných krocích simulace vykazuje však i toto zobrazení lehké grafické nesrovnalosti spojené již s neúplným uvažáním hydrodynamických limitů, jenž jsou v případě dynamických FEM analýz běžným jevem).

12.1 Simulace 1

Výsledky simulace jsou shrnuty podle pěti hlavních oblastí (časů), ve kterých se model ptáka během experimentu nachází:

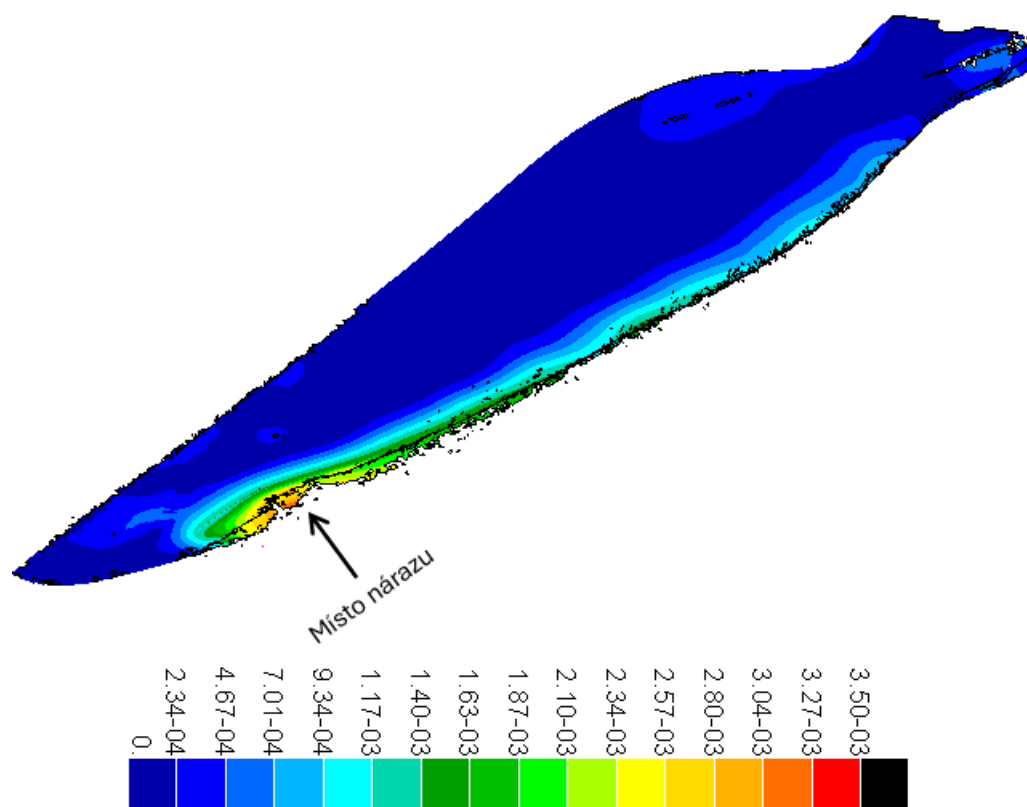
- Oblast č.1: Čelo ptáka se po perforaci pláště nachází těsně za náběžnou hranou – čas 0,06 ms.
- Oblast č.2: Čelo ptáka se nachází v polovině šířky pláště – čas 0,12 ms.
- Oblast č.3: Čelo ptáka se nachází těsně před odtokovou hranou – čas 0,26 ms.
- Oblast č.4: Polovina modelu ptáka se nachází již mimo plášť – čas 0,42 ms.
- Oblast č.5: Konečný krok simulace, celý pták se nachází mimo plášť – čas 0,67 ms.

Během simulace dochází k narušení soudržnosti modelu ptáka a deformaci komponent vrtule způsobují spíše jeho zbylé elementy (jejichž množství se postupně snižuje). Graficky přesné znázornění ptáka je při použití Lagrangian metody, se kterou tato analýza pracuje (neuvažuje tento model jako skupinu částic) kvůli překročení hydrodynamického limitu téměř nedosažitelné (velké množství protažených elementů). Z tohoto důvodu bylo pro porozumění vytvořeno schéma, které postupnou deformaci ptáka zjednodušeně znázorňuje:

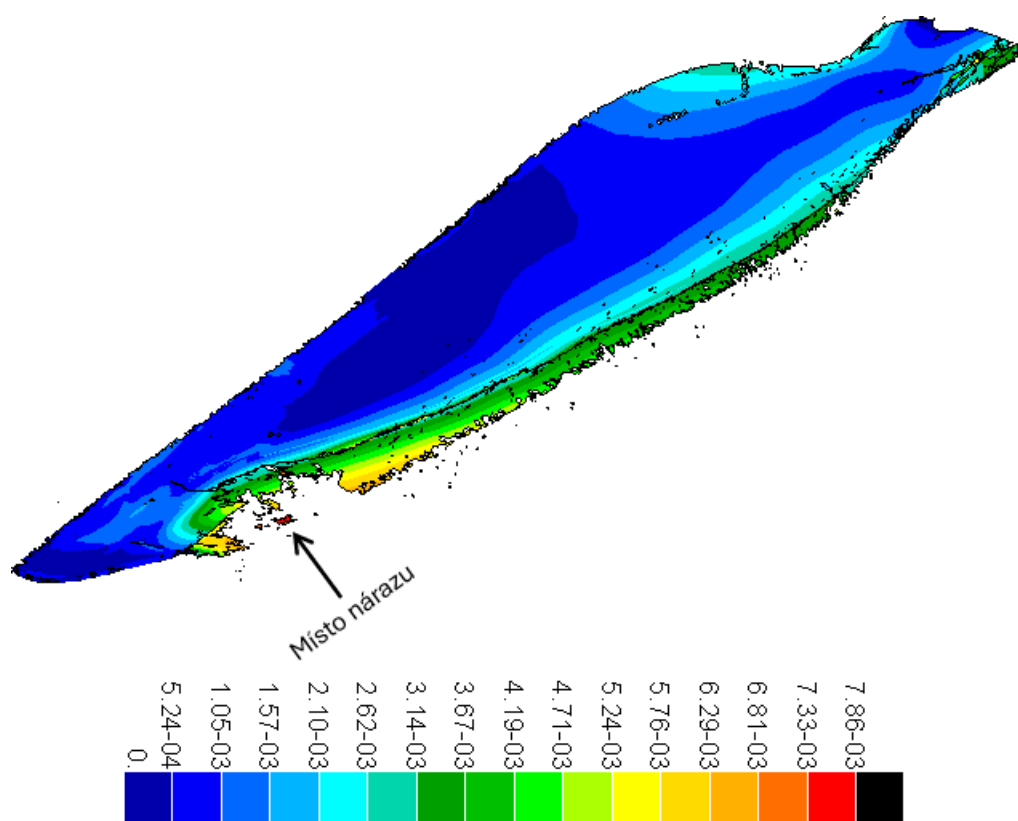


Obrázek 77 Schéma postupné deformace ptáka během simulace (příčný řez pláštěm)

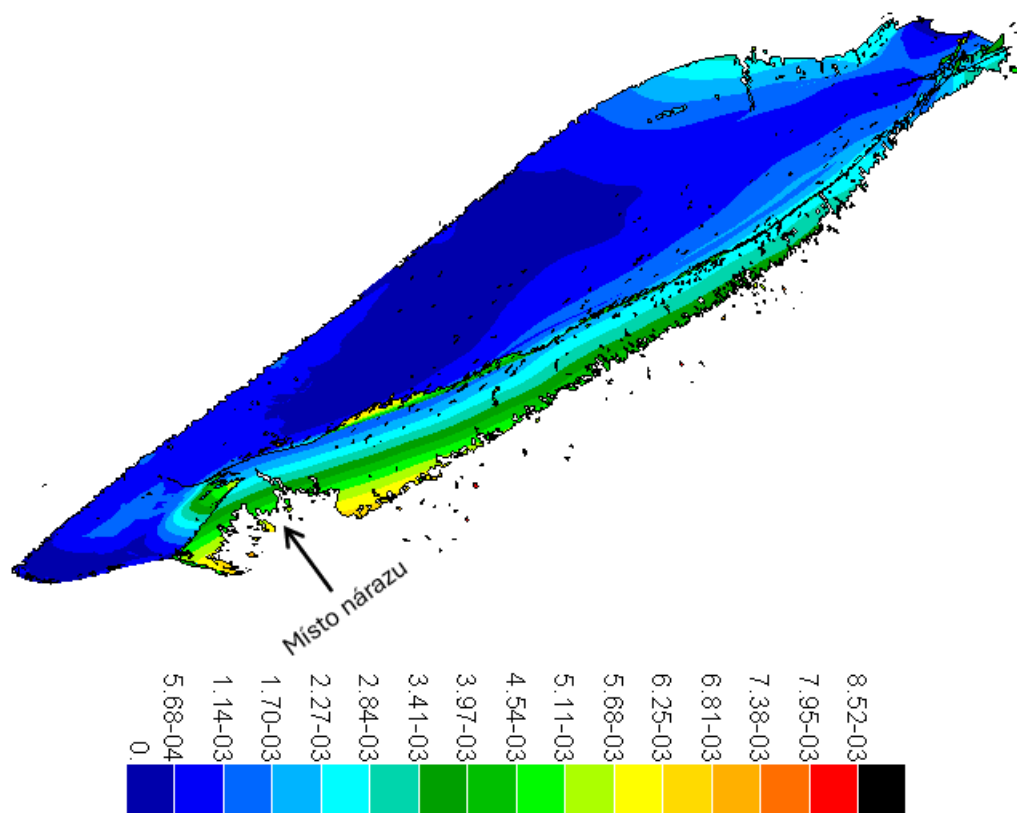
12.1.1 Kompozitní plášť



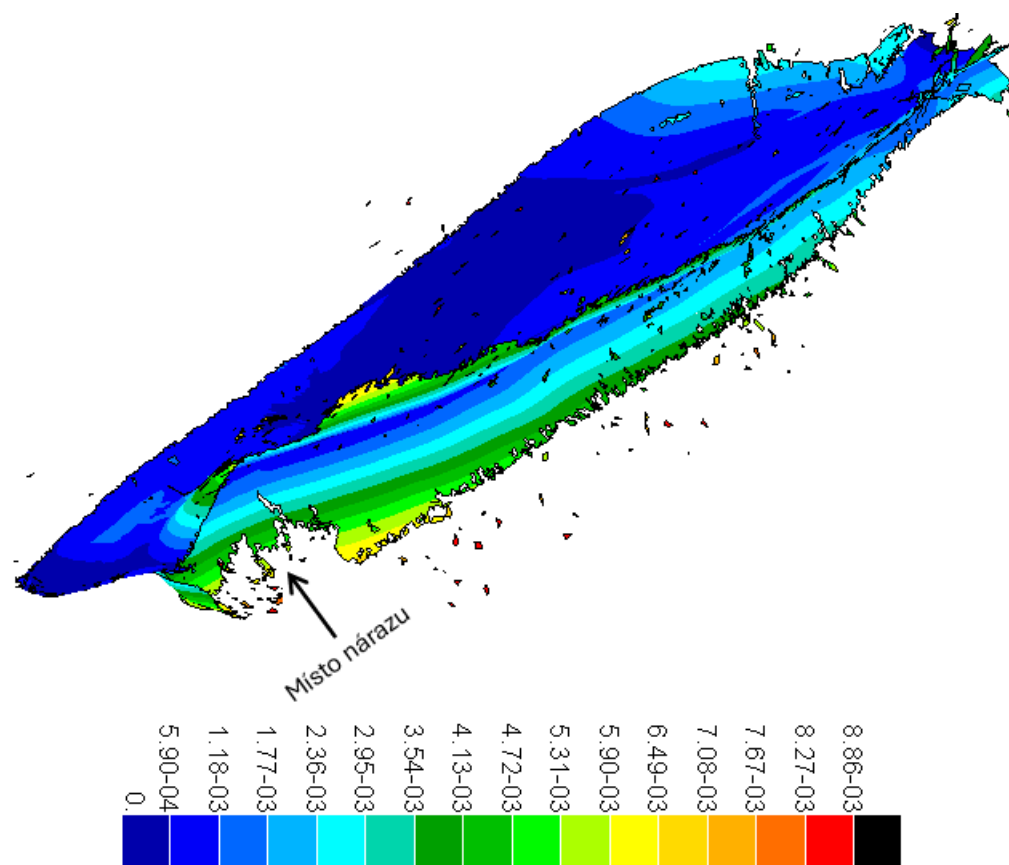
Obrázek 78 Přetvoření kompozitního pláště v čase oblasti č.1



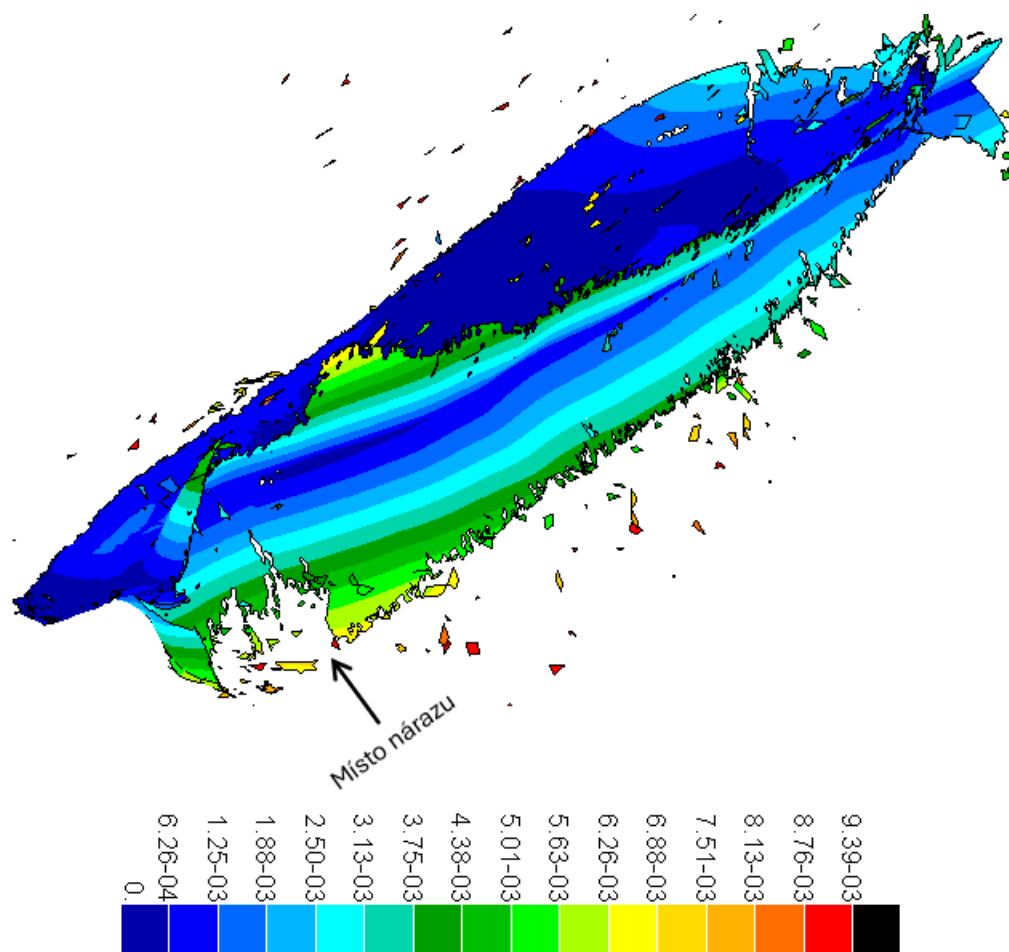
Obrázek 79 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.2



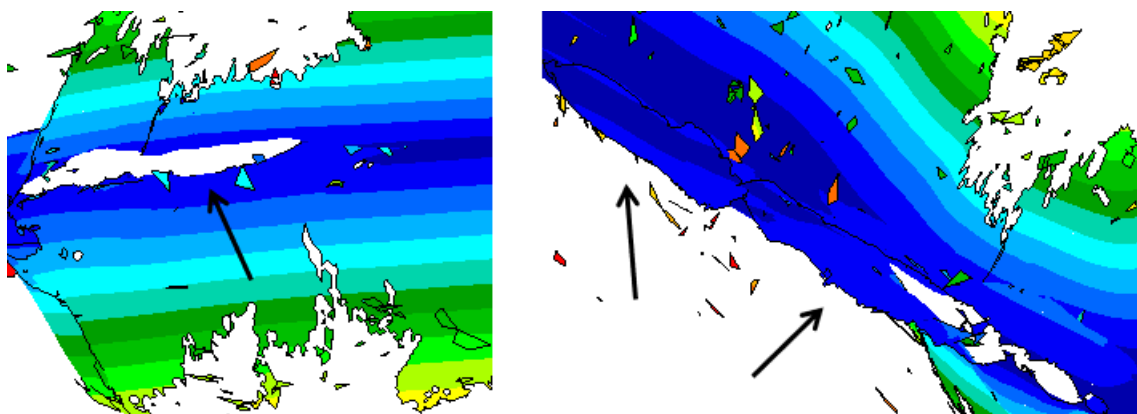
Obrázek 80 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.3



Obrázek 81 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.4

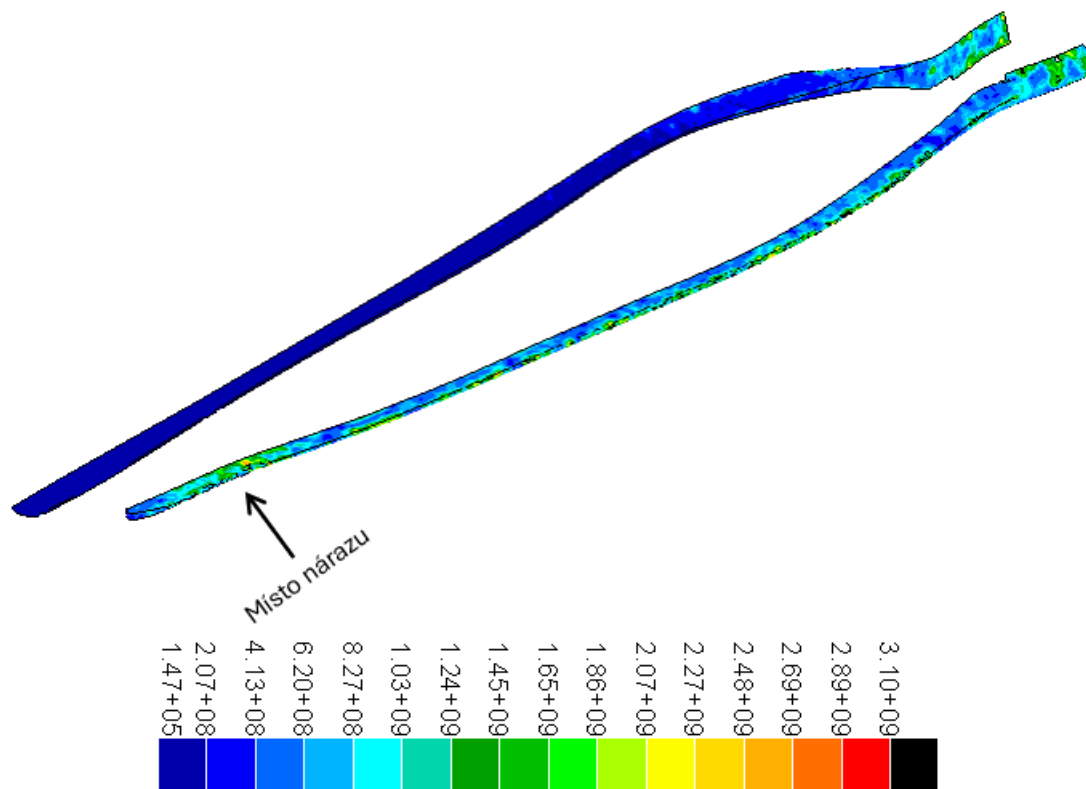


Obrázek 82 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.5

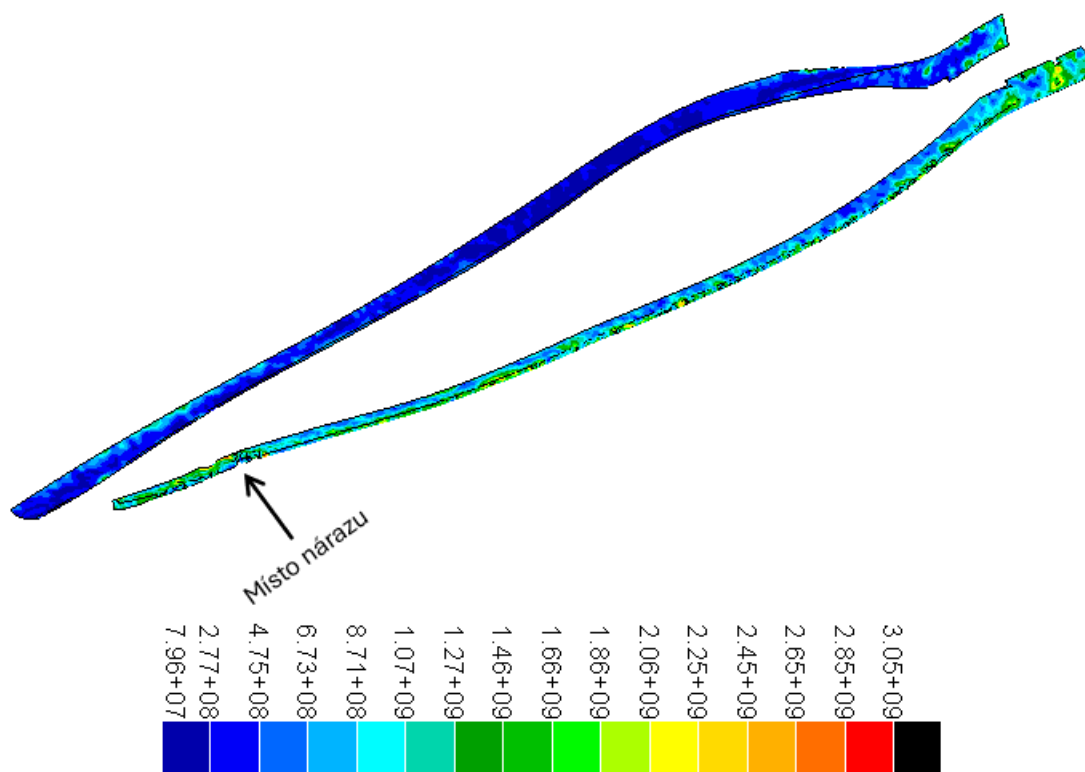


Obrázek 83 Detailní pohled na roztrženou odtokovou hranu v konečném kroku simulace, oblast č.5 (vlevo pohled směrem od náběžné hrany, vpravo od hrany odtokové)

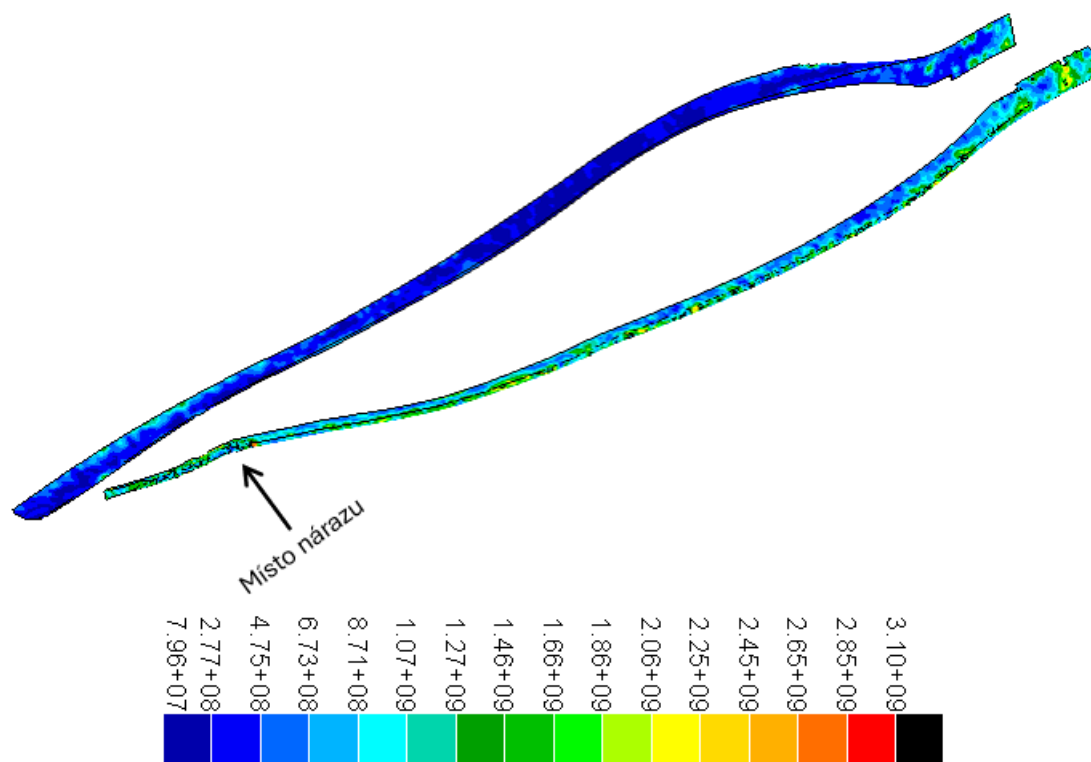
12.1.2 Výztuhy



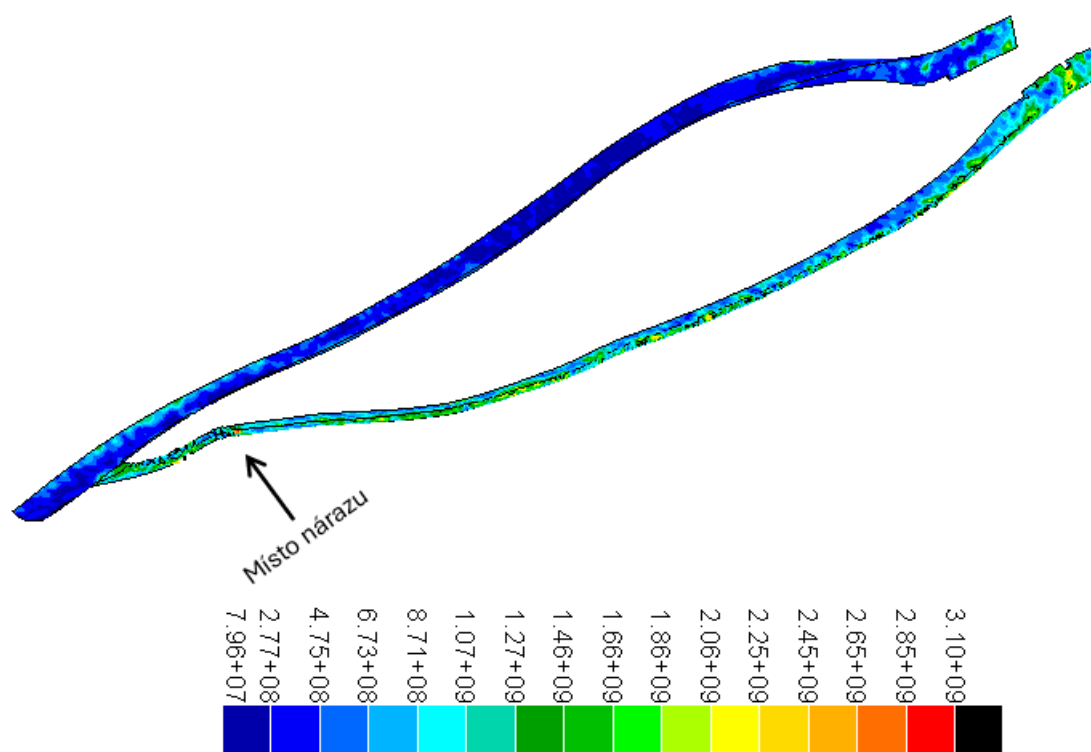
Obrázek 84 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.1



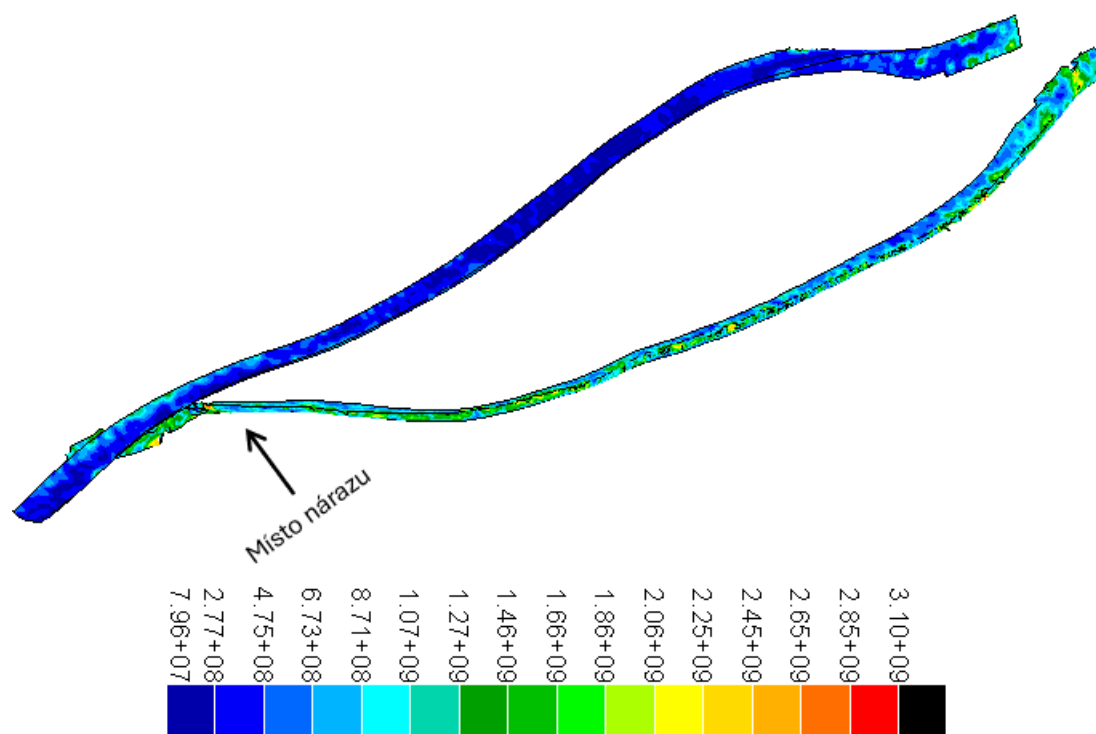
Obrázek 85 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.2



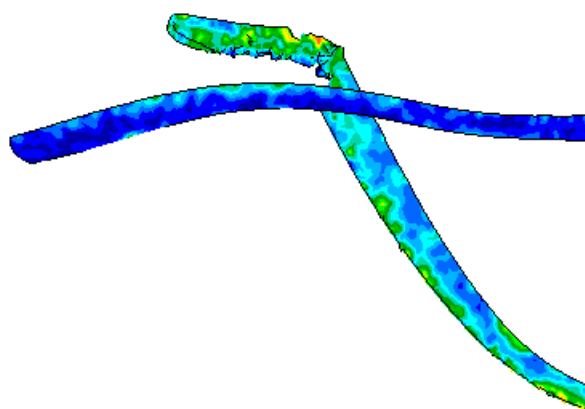
Obrázek 86 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.3



Obrázek 87 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.4

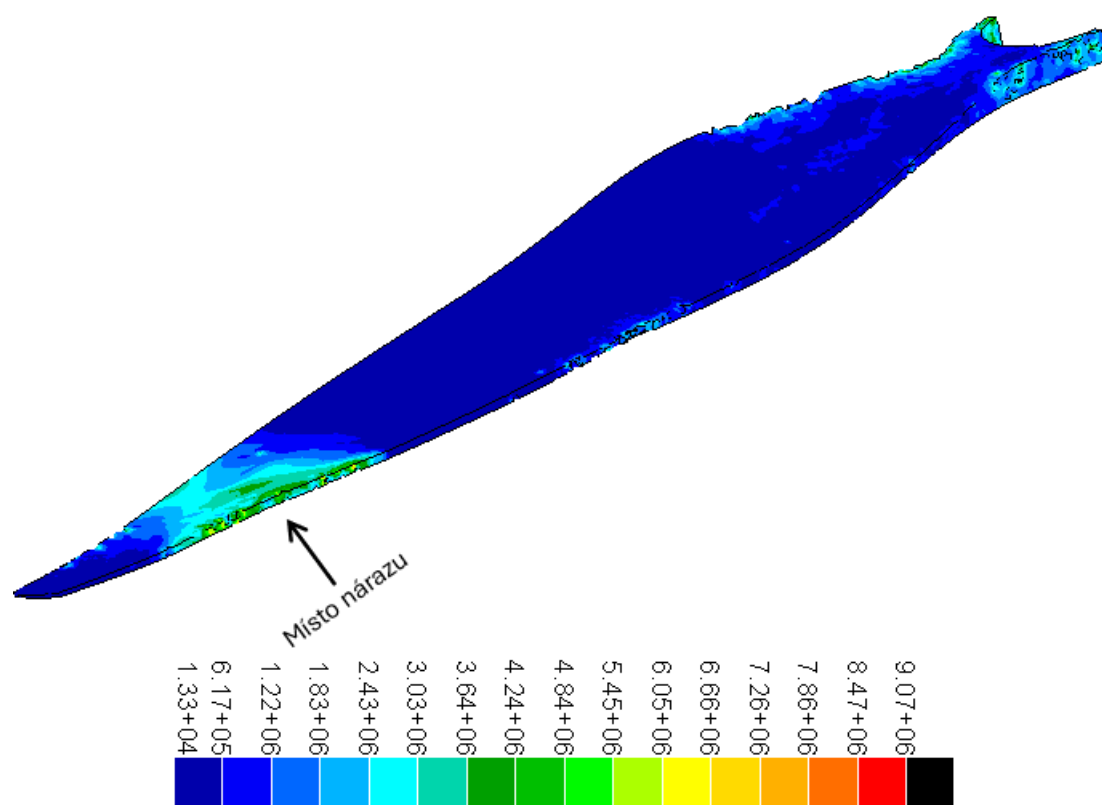


Obrázek 88 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.5

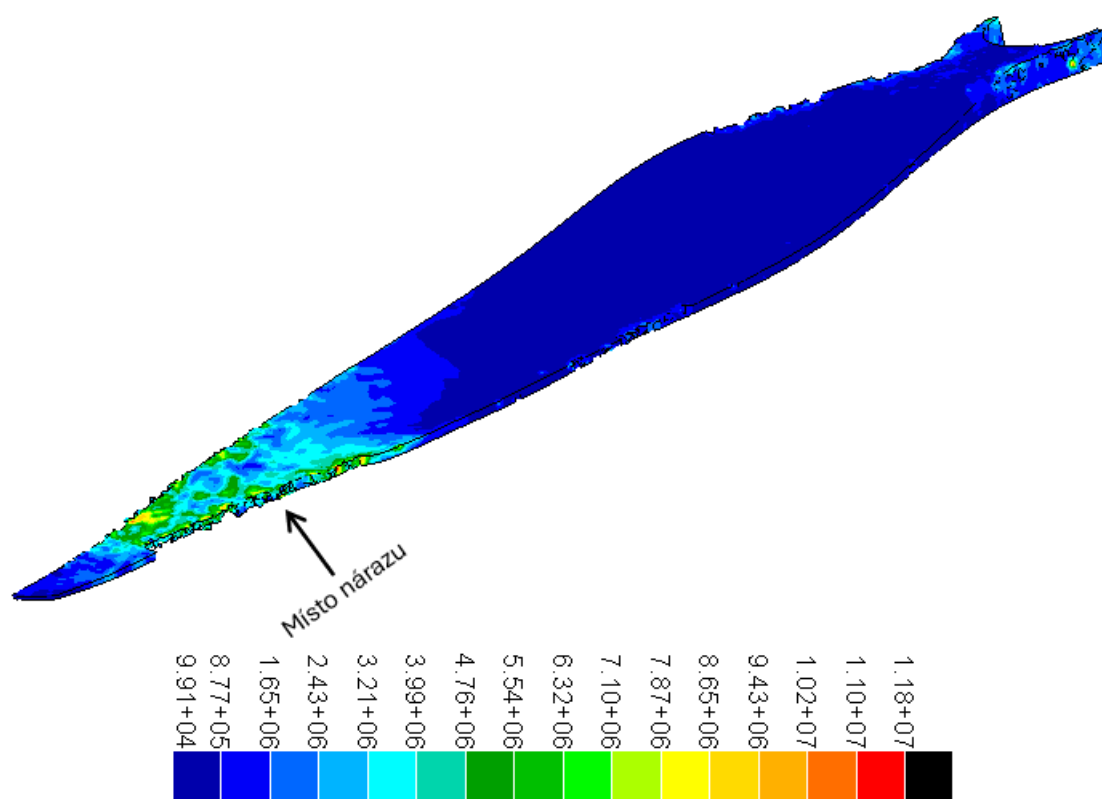


Obrázek 89 Detailní pohled shora na výslednou deformaci výztuh

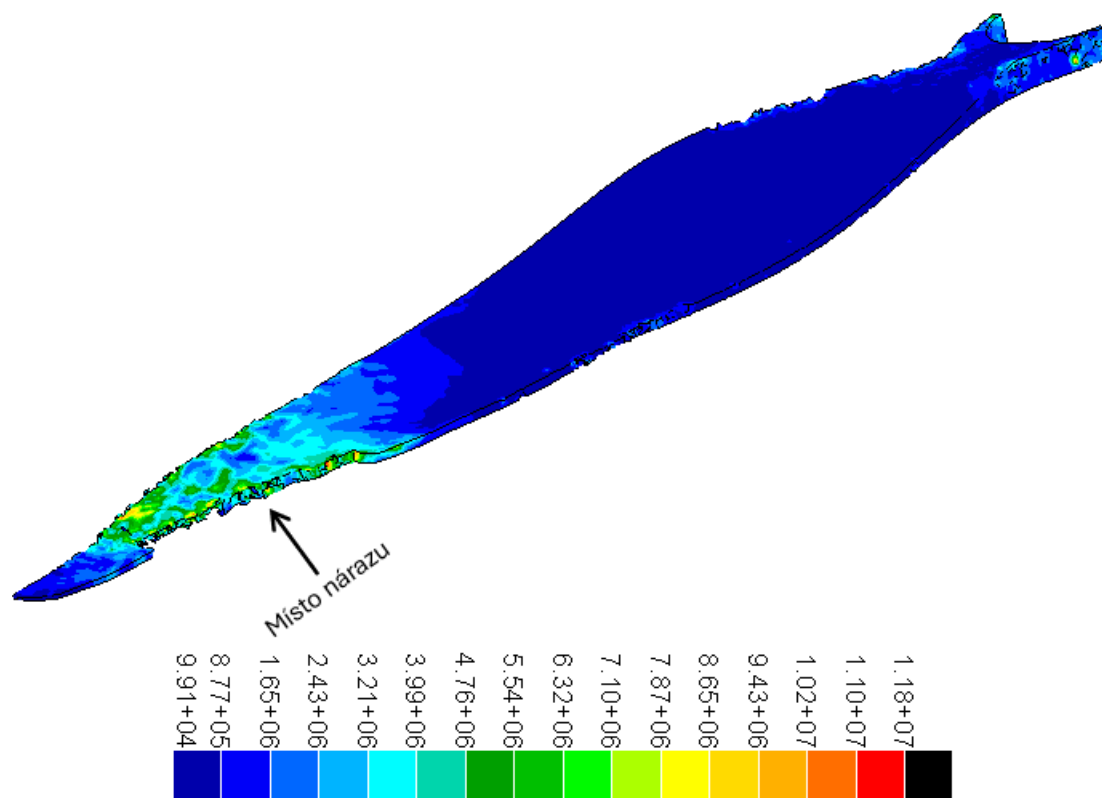
12.1.3 Jádno



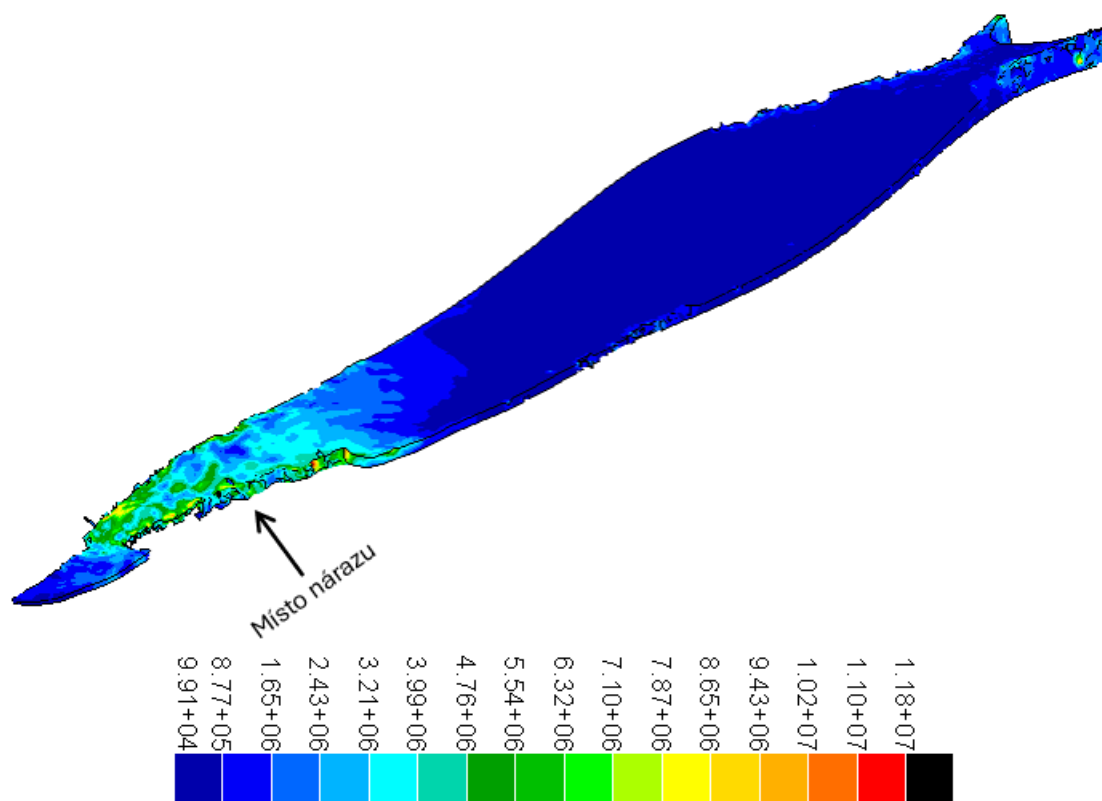
Obrázek 90 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.1



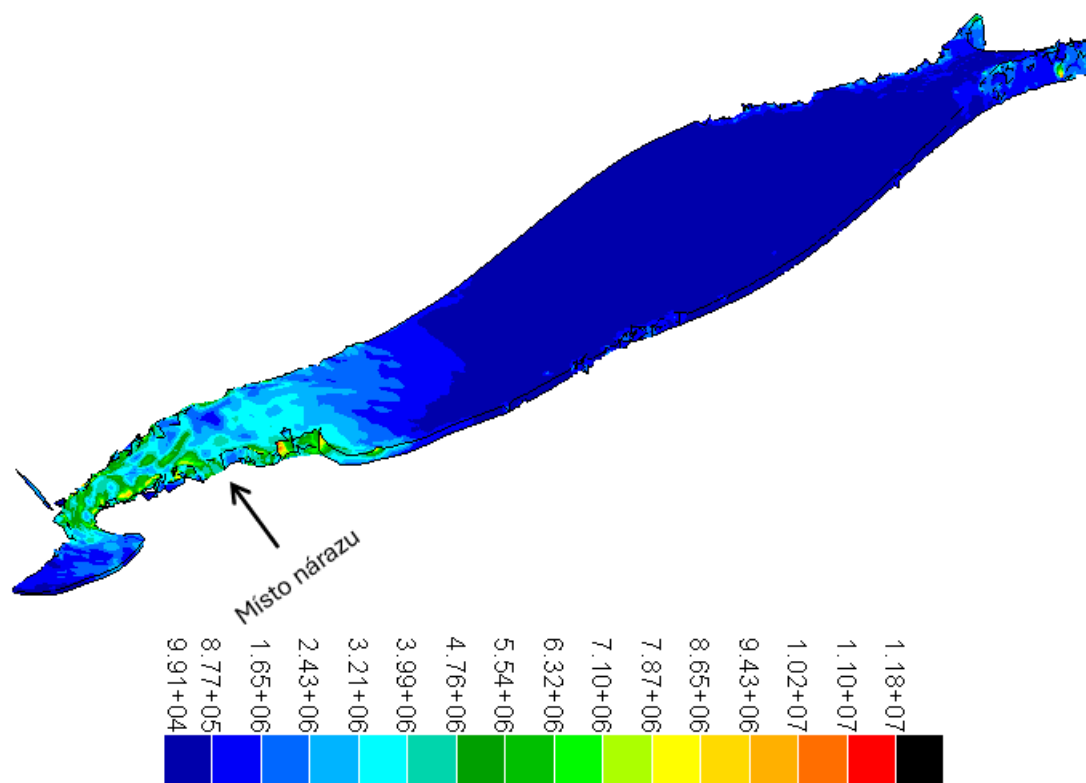
Obrázek 91 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.2



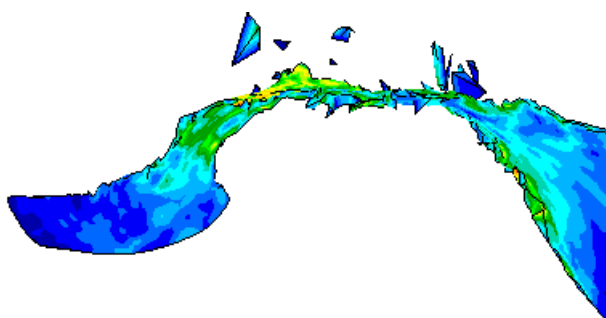
Obrázek 92 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.3



Obrázek 93 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.4



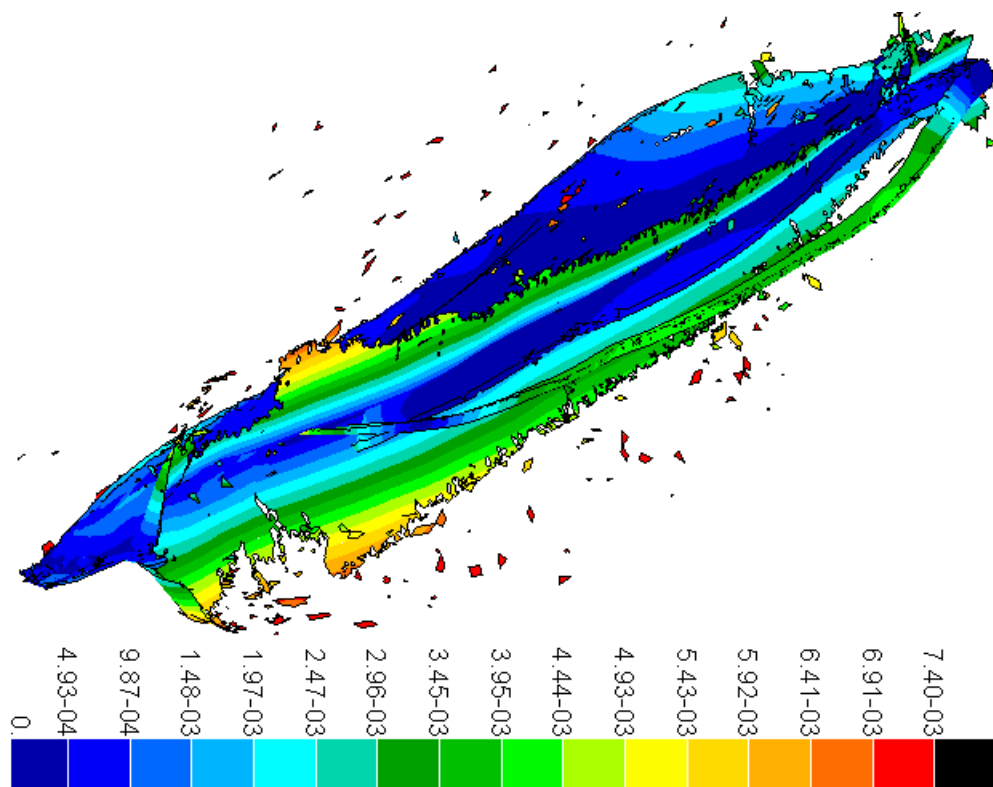
Obrázek 94 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.5



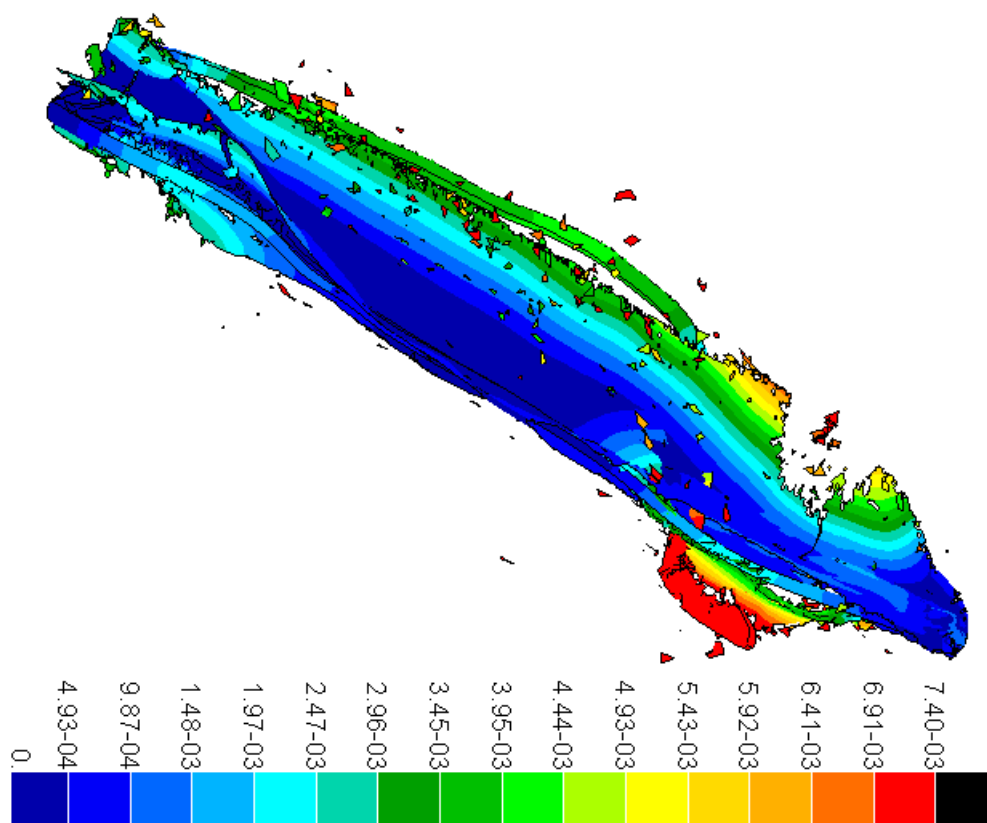
Obrázek 95 Detailní pohled shora na výslednou deformaci pěnového jádra

Jelikož na sklolaminátovém náboji nedochází k trvalým deformacím, není ve výsledcích simulace uveden.

12.1.4 Sestava vrtulového listu



Obrázek 96 Výsledná deformace vrtulového listu (náběžná hrana)



Obrázek 97 Výsledná deformace vrtulového listu (odtoková hrana)

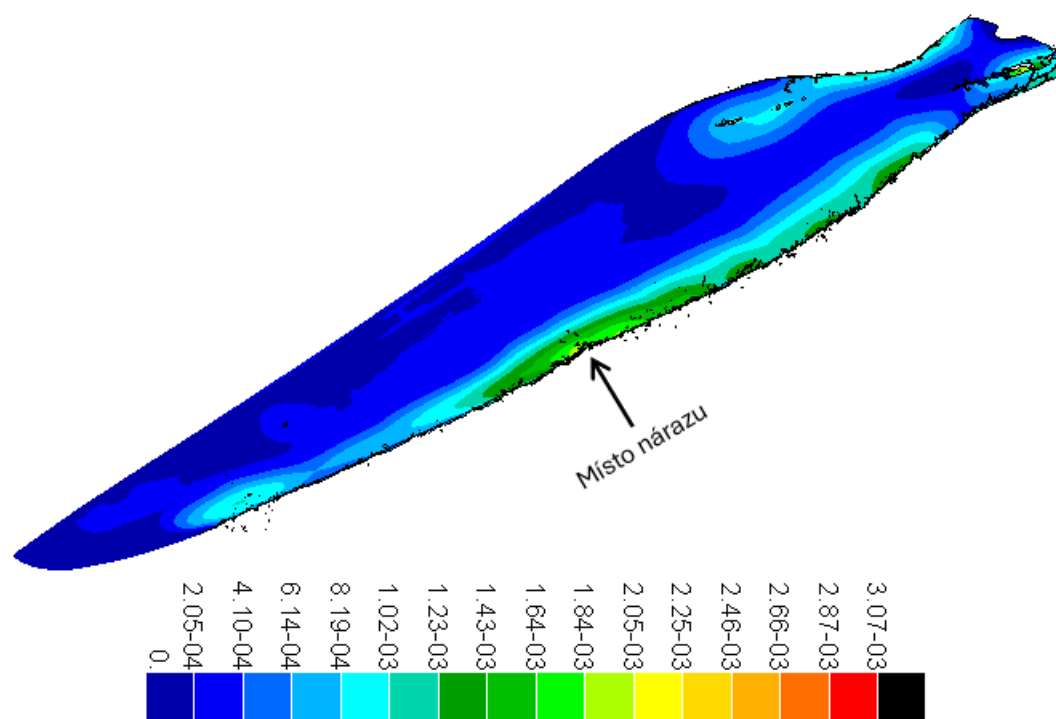
12.2 Simulace 2

Výsledky první simulace se týkají simulace znázorňující nejpravděpodobnější místo nárazu objektu na vrtuli, tzn. jedná se o hlavní simulaci, která popisuje chování kompozitního materiálu (pláště) při nárazových dějích, ale také výsledný stav jednotlivých komponent vrtule a jejího celku při srážce s ptákem.

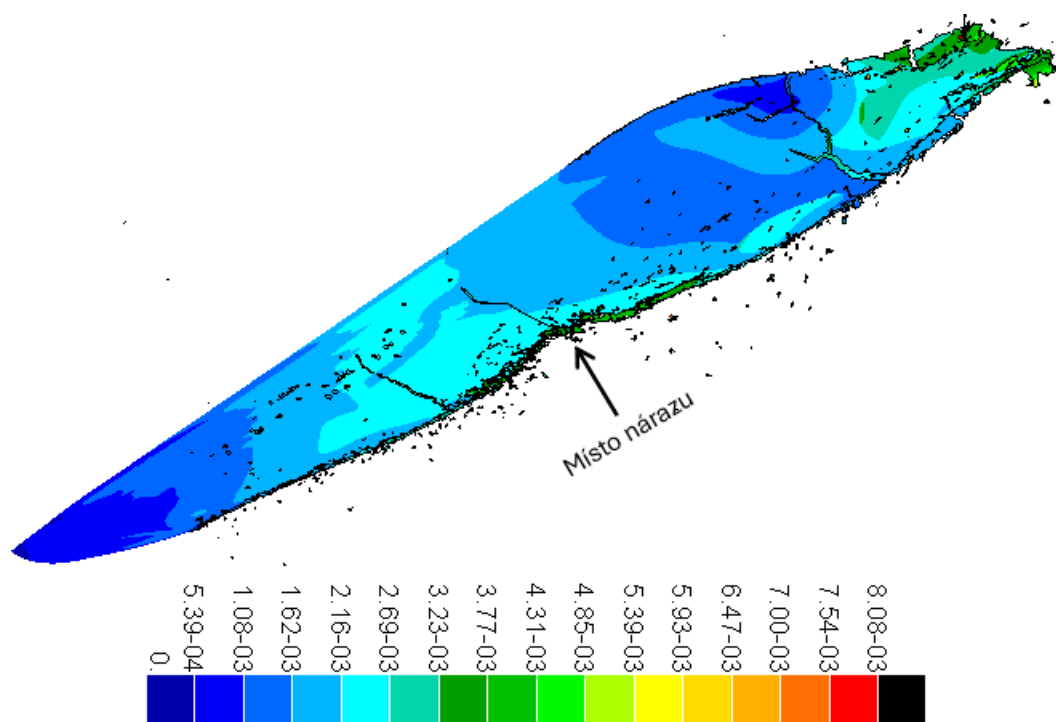
Simulace č.2 slouží převážně k dalšímu prohloubení vědomostí v oblasti dynamického chování kompozitních materiálů (pláště) a jsou zde zkráceně uvedeny pouze tři výsledky simulace znázorňující stav kompozitního pláště během nárazu (vymezení oblastí č.1, 3, 5, zmíněných na Obr. 77). Zbylé komponenty jsou zobrazeny výhradně ve finálním zdeformovaném stavu.

Deformace ptáka je při této simulaci analogií simulace první, liší se však časy jednotlivých oblastí, ve kterých se nachází – ty jsou uvedeny v popisu obrázku daného kroku simulace.

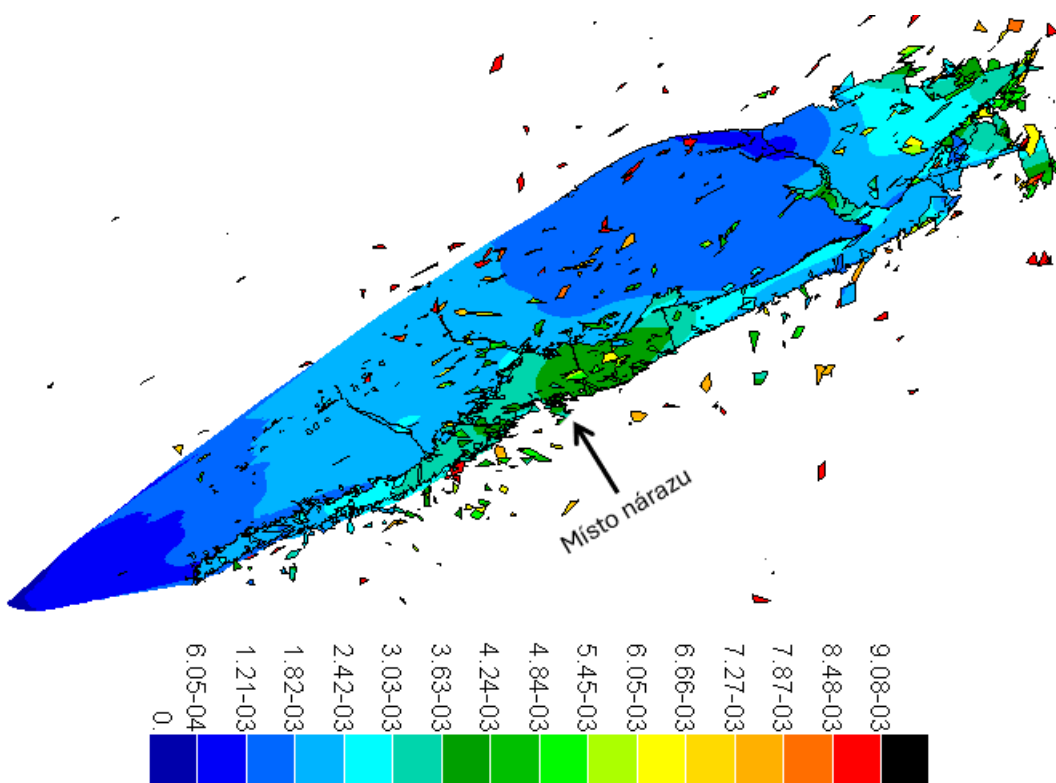
12.2.1 Kompozitní plášť



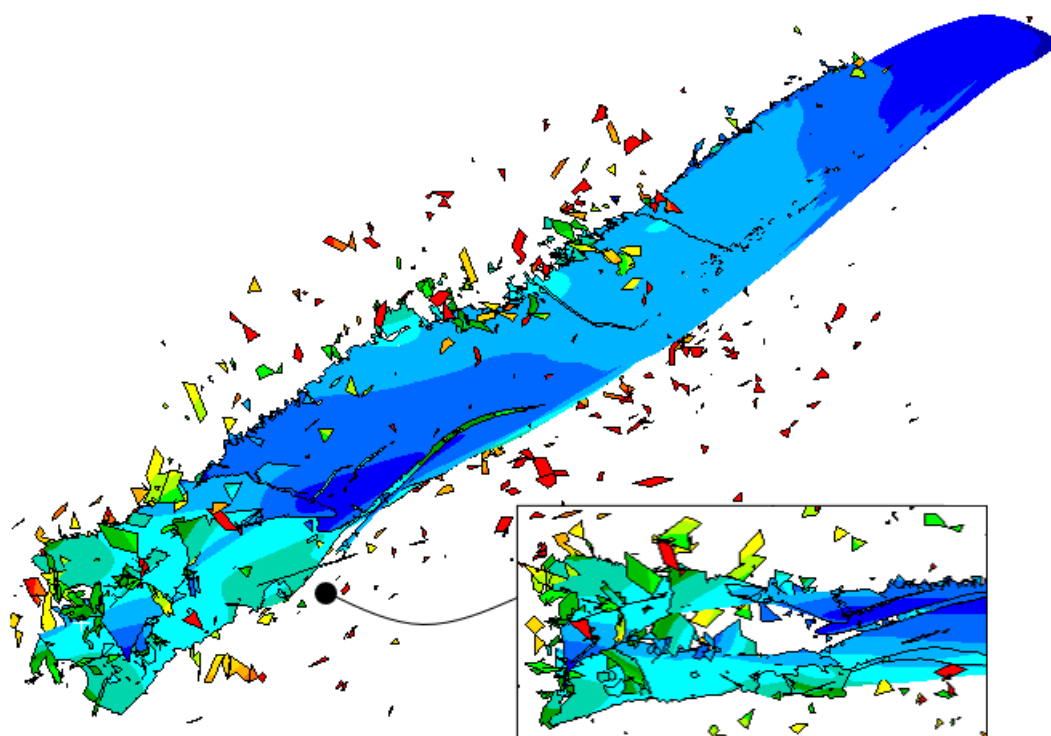
Obrázek 98 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.1 (čas 0,07 ms)



Obrázek 99 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.3 (čas 0,38 ms)

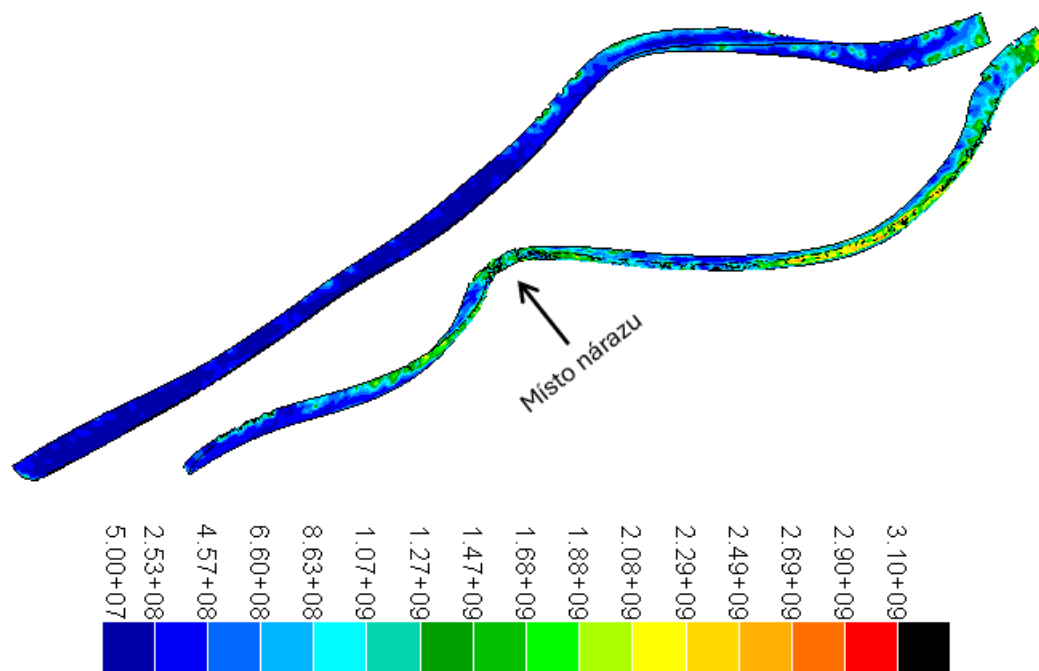


Obrázek 100 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.5 (čas 1,28 ms)



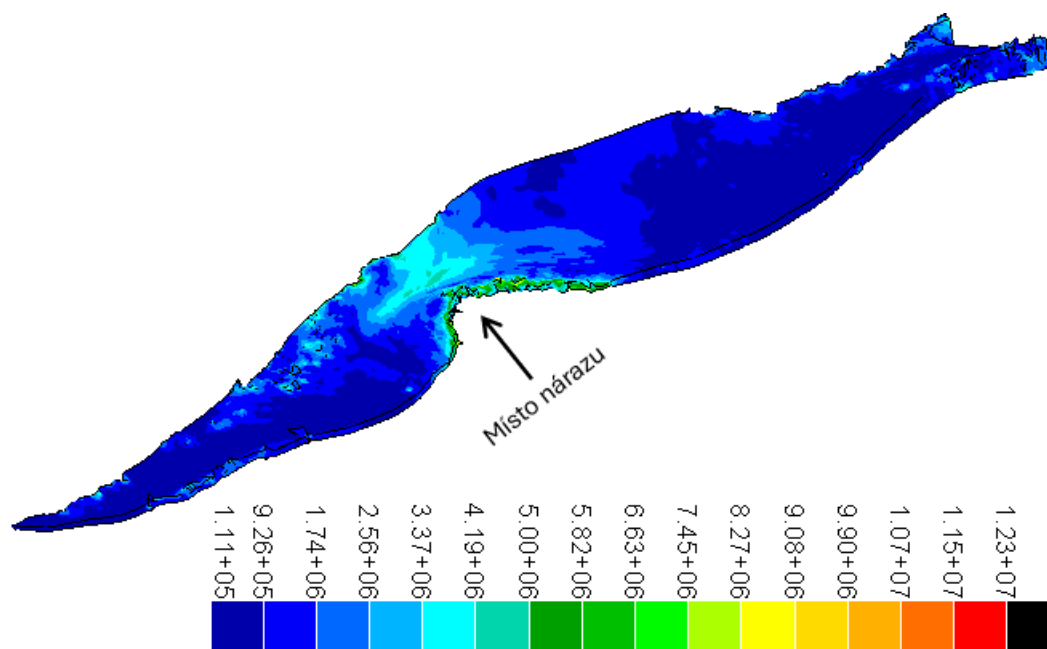
Obrázek 101 Pohled na odtokovou hranu s detailem na místo roztržení – konečný krok simulace (oblast č.5)

12.2.2 Výztuhy



Obrázek 102 Efektivní napětí na vláknových výztuhách
v konečném kroku simulace

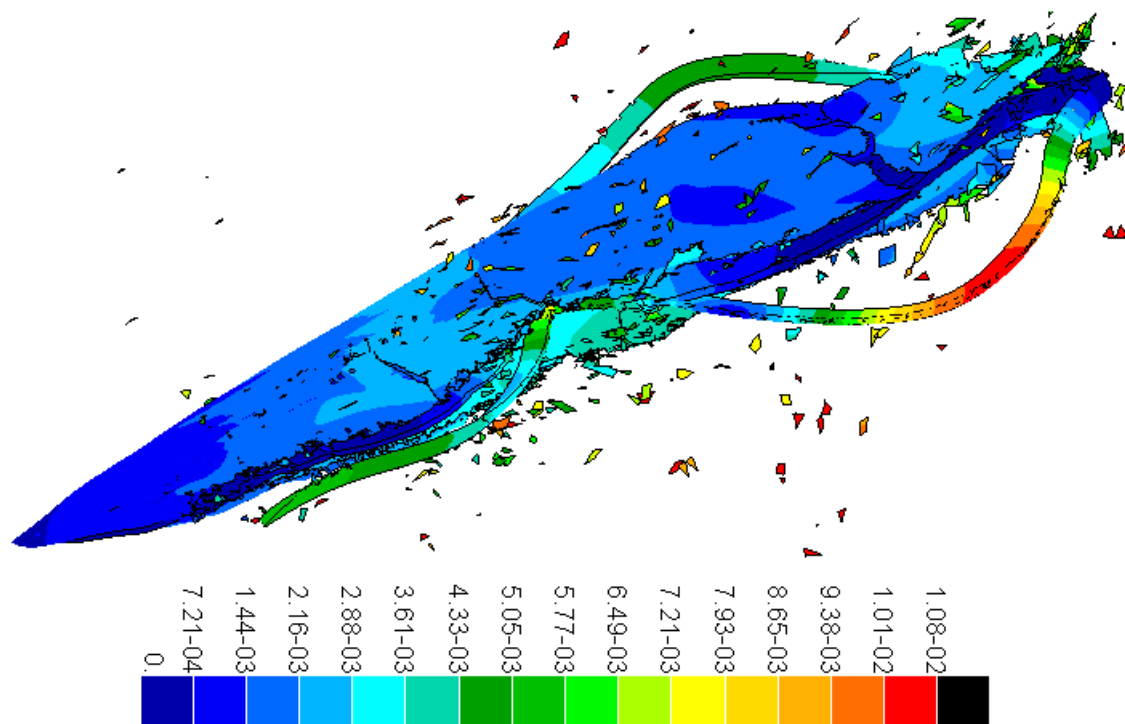
12.2.3 Jádno



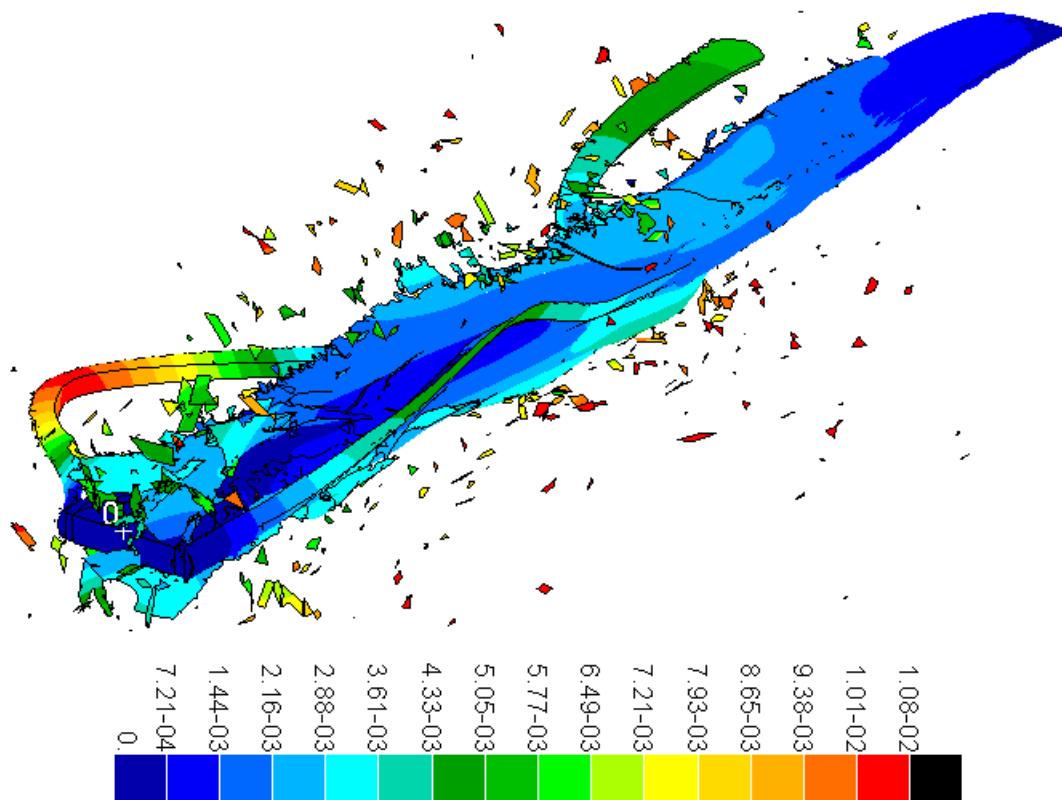
Obrázek 103 Efektivní napětí na pěnovém jádře v konečném kroku simulace

Sklolaminátový náboj, stejně jako v předešlé simulaci, nepodléhá trvalé deformaci, a opět tak není ve výsledcích zmíněn.

12.2.4 Sestava vrtulového listu



Obrázek 104 Výsledná deformace vrtulového listu (náběžná hrana)



Obrázek 105 Výsledná deformace vrtulového listu (odtoková hrana)

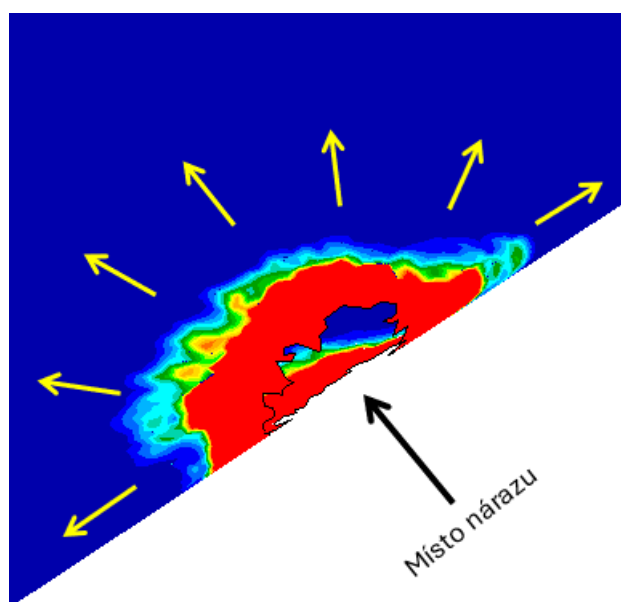
13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tato část práce se detailně věnuje dynamické odezvě, šíření napět'ových vln (napětí) a deformací kompozitního pláště způsobené nárazovým zatížením, které je vyvoláno ptákem. Okrajově jsou zde zmíněny stavy ostatních komponent vrtule a jejich vliv na celkovou deformaci kompozitního pláště a taktéž vrtule jako celku. V konečné části jsou popsány možné úpravy vrtule, jejichž aplikací lze výrazně podpořit odolnost vůči nárazovým dějům.

13.1 Kompozitní plášť

Vypracované experimenty spadají z hlediska svého charakteru mezi vysokorychlostní nárazové děje, u kterých při prvotní fázi impaktu dochází vlivem nárazové energie ptáka (hodnota 4 671 J u první simulace a 1 966 J u simulace druhé) k šíření napět'ové vlny napříč celou tloušťkou kompozitního pláště v místě dopadu.

Kvůli velmi vysoké rychlosti šíření této vlny nemá kompozitní plášť dostatečné množství času na reakci – energie není pohlcena elastickými vlnami, čímž vzniká lokální poškození, jenž je způsobeno napětím v místě nárazu na kompozitní plášť (napětí již na počátku kontaktu dosahuje hodnot až 300 MPa).

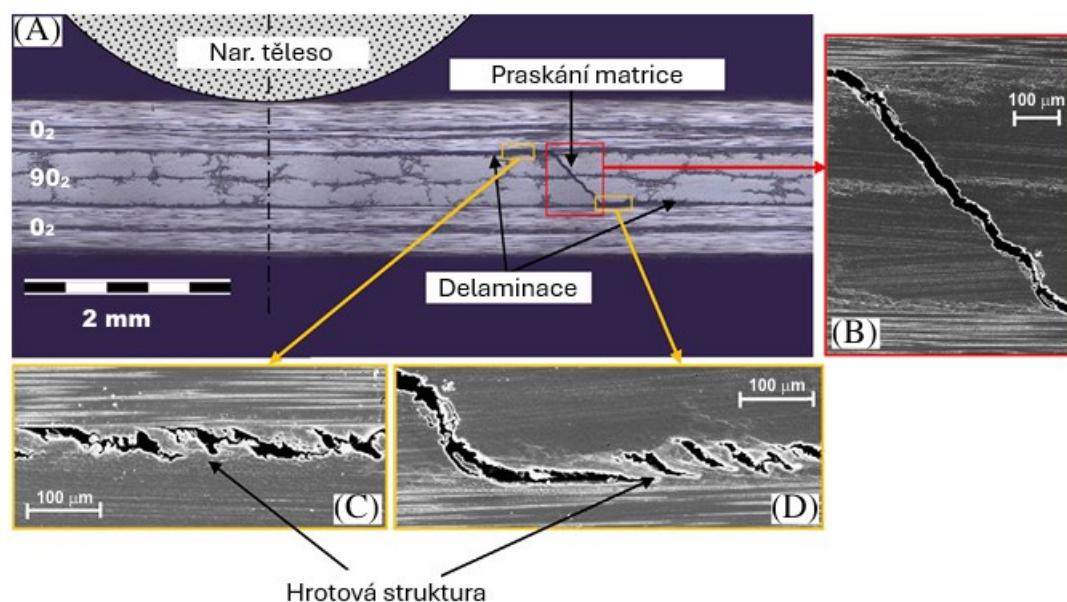


Obrázek 106 Šíření napět'ové vlny (simulace 1)

Napětí působící ve směru nárazu se kvůli anizotropním vlastnostem a vysoké heterogenitě povaze nešíří stejnoměrně (jak tomu bývá u materiálů s izotropními vlastnostmi) a popis šíření napět'ových vln plynoucích z tohoto druhu zatížení je velmi složitý, jelikož v určitém místě může vyvolávat tahové, tlakové či jiné zatížení, které způsobuje příslušné selhání

(závisí na mezních hodnotách týkajících se daného typu zatížení), resp. mechanismy poškození, které se dělí na tři základní druhy:

- Praskání matrice
- Delaminace
- Lámání vláken



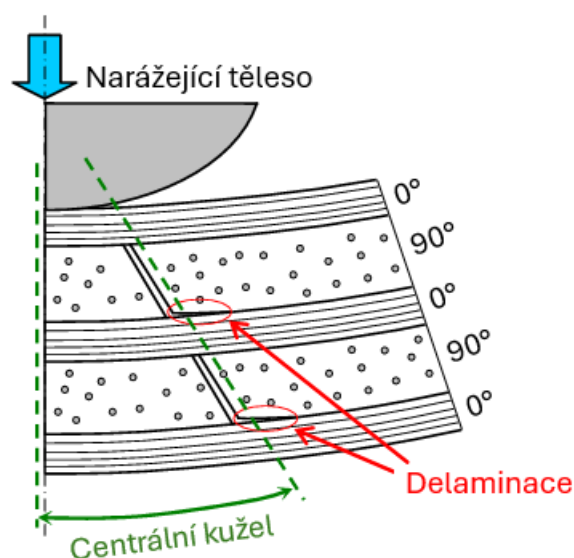
Obrázek 107 Praskání matrice a delaminace během nárazového děje (epoxidová pryskyřice vyztužená uhlíkovými vlákny) [20]

Druh poškození závisí na konkrétním místě, orientaci vláken, celkové tloušťce a počtu vrstev, materiálových vlastnostech, a taktéž na tvaru nárazejícího tělesa a kompozitní struktury.

Z důvodu vysokých hodnot nárazové energie ptáka v obou simulacích dochází vlivem vzniklého ohybového napětí téměř okamžitě v čase kontaktu s kompozitním pláštěm k intralaminárnímu poškození – poškození uvnitř vrstvy, které může vést k praskání matrice (způsobené již zmíněným tahovým či tlakovým působením vycházející z ohybového napětí). Pokračujícím růstem trhlin v matrici, které způsobují její další praskání, vzniká poškození interlaminární (mezi vrstvami), reprezentované delaminací, tedy oddělováním vláken od matrice – vzniká hrotová, resp. nerovnoměrná struktura (způsobeno malými úlomky, které se oddělují od matrice při jejím praskání).

Šíření trhlin v matrici roste ve směru vláken (opět je velmi složité jej popsat z důvodu různé orientace vláken a anizotropie), což má za následek oddělení segmentu vláken a matrice v určitých vrstvách, čímž dojde k jejich posunutí v kolmých směrech (vždy na následující

vrstvu). Tímto vzniká oblast tahového napětí, které působí mezi dvěma sousedními vrstvami a v tomto místě může dojít opět k další delaminaci. Zmíněná oblast má trojúhelníkový tvar, (značený, jak z teoretické části práce plyne: centrální kužel) a jeho tvar roste od strany nárazu směrem ke straně zadní – v tomto případě tím není myšleno od náběžné hrany ke hraně odtokové, ale ke spodní vrstvě náběžné hrany.

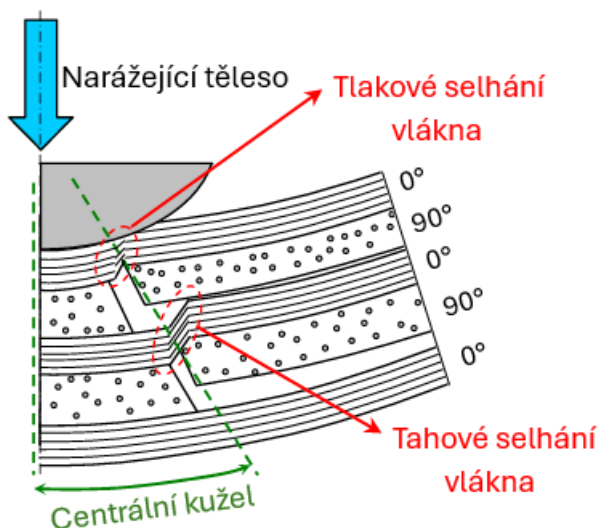


Obrázek 108 Vznik a šíření delaminace [20]

Díky vysokorychlostní povaze této problematiky dochází taktéž k intralaminárnímu poškození, kterým je lámání vláken, jenž vzniká vlivem kompresního zatížení (pod nárazovým objektem) a tahového zatížení (mezi středem tloušťky laminátu a spodní hranou).

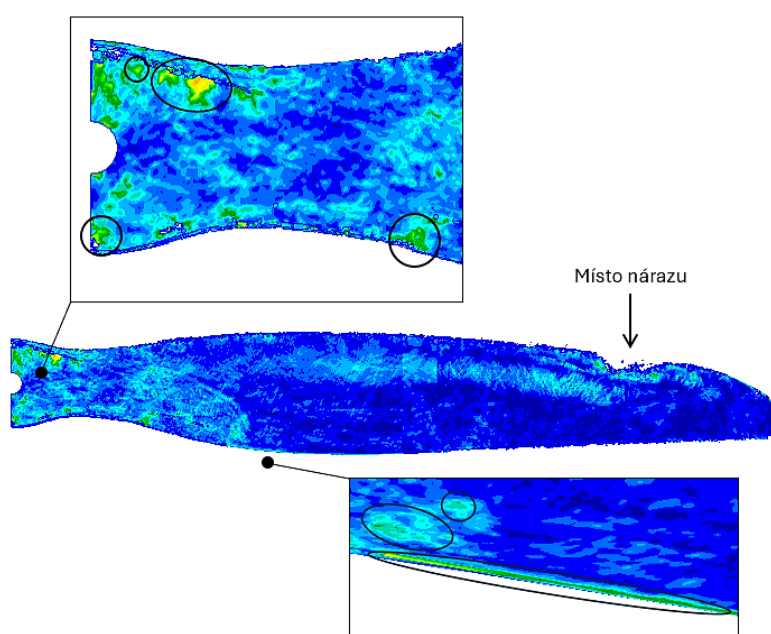


Obrázek 109 Lámání uhlíkových vláken vyztužujících epoxidovou pryskyřici [20]



Obrázek 110 Lámání vláken [20]

S pokračující fází simulace a nárazového působení ptáka na kompozitní plášť dochází k těmto poškozením i na dalších místech pomocí nových napěťových vln, jejichž vznik vychází např. z původní vlny, která po dosažení rozhraní (další vrstvy kompozitu či koncové hrany struktury) odrazí část své energie na odlišné místo, na kterém nově dochází k šíření dalšího napětí (vlny), jehož hodnota je nižší (avšak dostatečně vysoká na způsobení dalšího poškození). Tento odraz či lom ovlivňuje zejména geometrie kompozitního pláště, tedy náhlé přechody, velikost zakřivení a taktéž strukturní konfigurace. Příčinou vzniku nových oblastí s kritickými hodnotami napětí jsou průběžná přetvoření modelu ptáka, který svými částmi během simulace působí silově na další místa pláště (i ostatní komponenty vrtule).

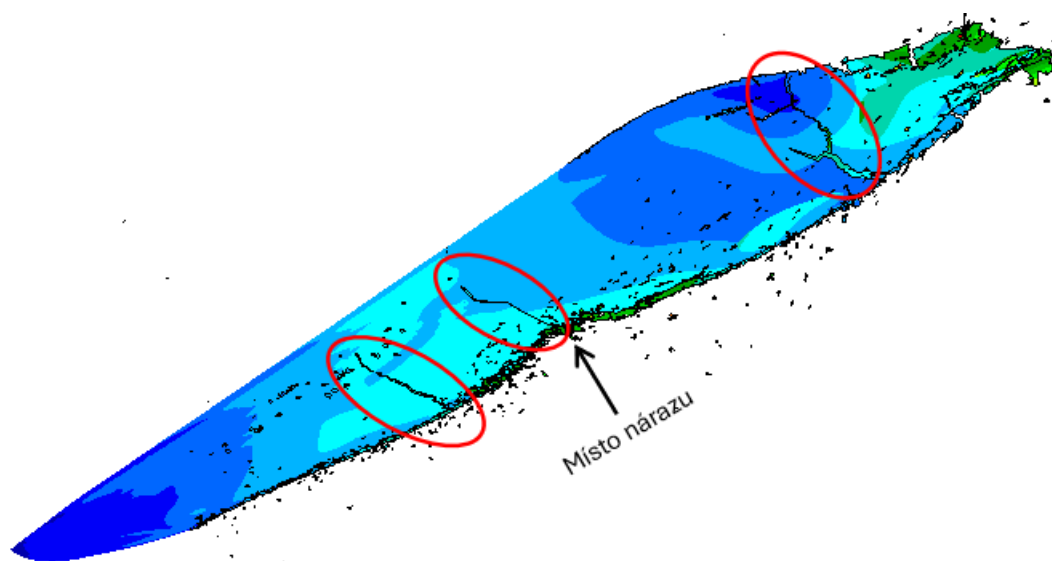


Obrázek 111 Vznik nových napěťových vln

Veškerá strukturní pnutí a mechanismy selhání vyvolaná nárazem mají za následek výrazný pokles pevnosti kompozitního pláště a taktéž celistvosti celé vrtule a její funkce.

Ke kompletnímu selhání kompozitního pláště dochází převážně na náběžné hraně (poté taky na hraně odtokové), jelikož postupné šíření napětí o vysokých hodnotách podél této hrany způsobuje úplnou ztrátu celistvosti (roztržení) kompozitního pláště – u odtokové hrany výrazně napomáhá k jejímu roztržení silové působení od vnitřních komponent vrtule vlivem jejich vlastní deformace.

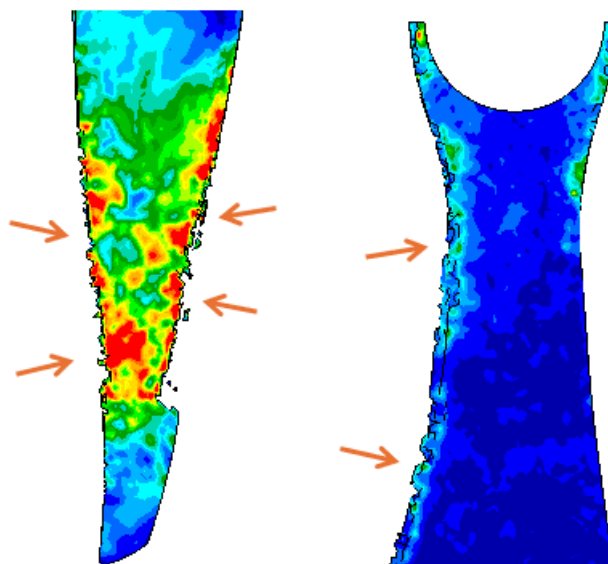
K roztržení pláště však nedochází jenom na náběžné a odtokové hraně, ale i na přední a spodní části vlivem lámání vláken, jelikož orientace vláken použitých kompozitních materiálů je 0° a 45° . Náraz lze tedy z pohledu vláken uvažovat v příčné směru, ve kterém je jejich odolnost nejmenší (toto selhání také závisí na množství vrstev a geometrii vrtulového listu).



Obrázek 112 Lámání vláken kompozitního pláště na horní části listu (simulace 2)

13.2 Vnitřní komponenty vrtulového listu

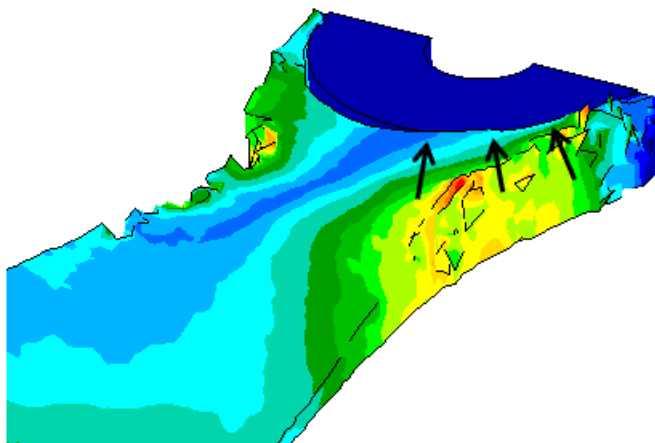
Dynamickou odolnost celé vrtule zvyšují i výztuhy a jádro, které se nachází uvnitř kompozitního pláště. Pěnové jádro díky svým materiálovým vlastnostem tlumí nárazy (absorbuje nárazovou energii), tedy napětí, které na něm při nárazu vzniká a tím pádem zajišťuje odolnost vrtule jako celku vůči nárazu. Průběh deformací je oproti kompozitnímu materiálu značně jednodušší – v místě nárazu dochází k výraznému překročení hodnoty plastické deformace, a tudíž i k frakci, resp. vydrolování (dochází k němu i v místě blízkosti pevného upnutí vrtulového listu nebo v oblastech, kde vznikají napěťové vlny s hodnotami, které frakci způsobují). Na opačném konci postupně převládá trvalá deformace způsobená tlakovým zatížením (a z něho plynoucích tlakových napěťových vln).



Obrázek 113 Vydrolování pěnového jádra (simulace 1)

U vláknových výztuh nedochází k úplné ztrátě soudržnosti (jak je z výsledků obou simulací patrné) a napomáhají k absorpci nárazové energie. Hlavní využití však nachází ve zvýšení odolnosti vůči odstředivým silám a normálovým napětím (díky unidirekcionálním materiálovým vlastnostem) během rotace vrtule, nikoli v dynamické odolnosti vůči nárazům.

Vliv sklolaminátového náboje na dynamickou odolnost je zanedbatelný. Díky jeho tvarové stálosti však mírně podporuje deformaci jádra (a částečně i kompozitního pláště) během simulace vlivem předávání kompresního zatížení.



Obrázek 114 Deformace jádra v blízkosti náboje
vlivem tlakového působení (simulace 1)

Popis chování jednotlivých komponent vrtulového listu vyplývá z výsledků obou simulací (a taktéž z poznatků v teoretické části). Kvůli místu dopadu je však možné např. u simulace č.2 pozorovat mnohem větší deformace v místě uchycení vrtule a k roztržení náběžné hrany v místě dopadu ptáka dochází později než u první simulace, což je dáno větším množstvím vrstev v tomto místě (znázorněno na Obr. 51 a 52), větší šířkou profilu listu a menším zakřivením. Roztržení v blízkosti místa uchycení je také velmi ovlivněno deformací výztuh, které mají tendenci vystupovat ven z pláště.

Zvýšení odolnosti vůči nárazovým dějům je z hlediska kompozitního pláště možné dosáhnout větším množstvím vrstev nebo jejich tloušťky, čímž je potlačen globální ohyb v místě nárazu ptáka, dále menším zakřivením (zvýšení radiusu náběžné a odtokové hrany), změnou konfigurace struktury (variace orientací vláken směřovanou proti směru nárazu objektu), případně náhradou materiálu kompozitního pláště využívajícího uhlíková vlákna za vlákna skleněná, jenž mají vyšší odolnost vůči dynamickému zatížení (nevýhodou je větší hmotnost). Dalším možným řešením je přidání vnějších výztuh na náběžnou a odtokovou hranu nebo opět volba odlišných materiálů vnitřních komponent.

Je však nutné si neustále připomínat hlavní funkci vrtule, kterou je přeměna kroutícího momentu (rotační energie od hřídele motoru) na tah (tahovou sílu neboli propulzi), díky čemuž umožňuje danému zařízení (v tomto případě dronu) vzlétnout a pohybovat se ve vzduchu. Ke splnění tohoto účelu je zapotřebí dodržet složitý tvar vrtule (např. nižší celkovou tloušťku profilu listu a zpravidla větší zakřivení odtokové a náběžné hrany, které bohužel dynamickou odolnost snižují), nízkou hmotnost a převážně odolnost vůči odstředivým silám, které během její rotace působí – při použití vláknových výztuh jsou vlákna vhodně

orientována ve směru působení těchto sil, tzn. od středu rotace v podélném směru k její špičce, čímž značně zvyšují odolnost vůči tomuto druhu silového působení díky vysoké pevnosti se zachováním velmi nízké hmotnosti – z pohledu dynamiky však tento typ vláknových výztuh odolnost vůči nárazům příliš nezvyšuje, jelikož dopadající objekt směřuje na výztužná vlákna v příčném směru, ve kterých je jejich celková odolnost nejmenší). Pěna použitá ke tvorbě jádra taktéž není z hlediska odolnosti vůči nárazům nejvhodnější, tlumí však vibrace, zachovává si nízkou hmotnost, vysokou pevnost a tepelnou odolnost, což jsou opět vlastnosti, které jsou pro správnou funkci vrtule zásadní (z hlediska její zpracovatelnosti je také velmi šetrná k opotřebení nástrojů, které se při jejím frézování používají).

Zvýšení odolnosti vůči nárazům cizích objektů, jak už z uvedených poznatků vyplývá, je možné provést převážně na úkor hlavní funkce vrtule a její primární odolnosti vůči působení odstředivých sil. Proto je v případě její úpravy, zajišťující vyšší schopnost odolávat nárazům, potřeba uvažovat veškeré hlavní aspekty (nízká hmotnost, rovnoměrný chod, účinný přenos výkonu a následná přeměna na rotační energii, vhodná geometrie, resp. zakřivení, tloušťka kompozitního pláště, tlumení vibrací apod.) a najít tak optimální konstrukci, která umožní správné fungování a zároveň zvýšení dynamické odolnosti.

ZÁVĚR

Požadovaným cílem práce bylo provedení numerické analýzy dynamického charakteru, která reprezentuje náraz ptáka na kompozitovou vrtuli s využitím pokročilých FEM softwarů, jenž zpracování tohoto typu simulací umožňují. Podstatou však není pouze provedení nelineární konečněprvkové analýzy, ale taktéž prohloubení studie týkající se dynamického namáhání kompozitních materiálů a jednotlivých stavů jejich porušení, a proto byly zhotoveny dvě individuální simulace, které se liší místem dopadu ptáka na vrtuli, díky čemuž je možné její dynamickou odezvu na základě lišících se výsledků vyplývajících z rozdílných rychlostí ptáka (plynoucích z obvodové rychlosti vrtule) a geometrií profilu vrtulového listu v místě nárazu porovnat.

Teoretická část je rozdělena do pěti samostatných kapitol. První tři kapitoly poskytují detailní přehled polymerních kompozitních materiálů – popis specifických vlastností a z nich plynoucích důvodů použití v dané oblasti, způsob jejich výroby a konfigurace, druhy vyztužujících vláken, matrice a kompozice, vysvětlení mechanického chování, jeho srovnání s konvenčními materiály, význam anizotropie a následně samotné dynamické chování těchto materiálů, šíření napětových vln při nárazech, mechanismy poškození apod. Čtvrtá kapitola se poté věnuje podrobnému popisu kompozitových vrtulí, jejich funkci, významu geometrie profilu listu a typů nárazů. Poslední – pátá kapitola teoretické části, pojednává o metodě FEM, popisu jednotlivých prvků konečněprvkové sítě a způsobu nastavení kontaktních analýz.

Praktická část se věnuje vytvoření dynamických simulací nárazu ptáka na zmíněnou kompozitovou vrtuli, které předchází úprava původního modelu vrtulového listu, tvorba modelu ptáka, jejich následné zesíťování, resp. vytvoření FEM modelů a přiřazení materiálových vlastností. K matematickému řešení simulace poté slouží řešič MSC Dytran.

První simulace představuje náraz ptáka na koncovou část vrtulového listu. Vlivem šíření napětové vlny (způsobené nárazem ptáka) vzniká v místě dopadu globální ohyb, což by vedlo k praskání matrice, delaminace a z důvodu vysokorychlostního nárazu také lámání vláken kompozitního pláště. Následkem je kompletní roztržení náběžné hrany z důvodu vysoké hodnoty nárazové energie (4 671 J) a z ní plynoucích napětových vln, které se (nejen) podél této hrany šíří, a také kvůli jejímu velkému zakřivení (velmi nízké hodnoty zaoblení), čímž k roztržení dochází mnohem snadněji. Kromě roztržení náběžné hrany dochází také

k porušení hrany odtokové vlivem kompresního působení vnitřních komponent (jádra a výztuh) proti místu dopadu a také v oblasti upnutí listu způsobené šířením a vznikem nových napětových vln. Kombinací těchto působení na odtokovou hranu dochází ke ztrátě její celistvosti po celé délce.

Druhá simulace se zabývá nárazem ptáka v poloviční vzdálenosti vrtulového listu. Tato oblast je z hlediska reálného nárazu nepravděpodobná, avšak rozdílná dynamická odezva umožňuje využít tento experiment k hlubšímu porozumění dynamického chování polymerních kompozitních materiálů. V této simulaci je šířka profilu kompozitního pláště v místě nárazu výrazně větší a nárazová energie ptáka znatelně menší (1 966 J), díky čemuž má kompozitní struktura větší množství času reagovat na šíření počáteční napětové vlny způsobené ohybovým napětím (stále je však tato energie dostatečně velká na to, aby struktura nemohla reagovat proti tomuto působení pomocí elastických napětových vln). Kombinací větší šířky (a menšího zakřivení pláště na náběžné hraně) a pomaleji se šířící napětové vlny, která způsobuje kritické mechanismy selhání, dochází k méně výraznému roztržení náběžné hrany než v předchozí simulaci, ale k razantnějšímu příčnému trhání horní a spodní plochy pláště, čemuž napomáhá také orientace vláken (náraz je směřován na vlákna příčně a pod úhlem 45° – ideálně by měla být orientace soustředěna ve směru dopadu) – tato situace je v případě první simulace méně patrná kvůli malé šířce profilu pláště v místě nárazu. Šíření těchto trhlin napomáhá k roztržení odtokové hrany především v místě mezi nárazem ptáka a upnutím vrtule – směr, vzdálenost a charakter jejich šíření se odvíjí od velikosti nárazové energie a mechanismů selhání kompozitního materiálu, které jsou, jak již bylo zmíněno, velmi obtížné přesně popsat, jelikož závisí na orientaci vláken, množství vrstev, typu materiálu, geometrii pláště apod. Výsledné selhání náběžné a odtokové hrany je opět způsobeno převážně tlakovým působením vnitřních komponent (výztuhy a příp. jádra), jenž je vyvoláno narážejícím ptákem. V této simulaci je právě díky větší tloušťce geometrie profilu listu, většímu počtu vrstev a menšímu zakřivení v oblasti nárazu zamezeno kompletnímu selhání odtokové hrany – k roztržení dochází pouze od místa upnutí listu (jenž je způsobeno tendencí výztuh vlivem kompresního zatížení vystupovat během nárazu mimo plášť) přibližně k polovině jeho délky, tedy místu dopadu.

Z výsledků tedy vyplývá velmi malá odolnost polymerních kompozitních materiálů využívající uhlíková vlákna na dynamické zatížení. Odolnost vůči nárazům je možné zvýšit počtem vrstev (potlačení globálního ohybu), vhodnou orientací vláken a také změnou geometrie pláště – menší zakřivení, větší šířka, ale také celková tloušťka (resp. výška profilu

listu). Lze také nahradit samotný materiál matrice nebo vláken např. vlákny skleněnými, které disponují vyšší dynamickou odolností (ale vyšší hmotností).

Vnitřní komponenty v obou případech umožňují do jisté míry absorbovat nárazovou energii a ovlivnit tak celkovou deformaci vrtule během nárazových dějů. Tato schopnost záleží na jejich materiálových vlastnostech, které však nelze, stejně jako v případě kompozitních materiálů pláště, primárně volit na základě dynamické odolnosti, ale podle hlavní funkce vrtule, pro kterou je důležitá transformace rotační energie na tah (propulzi), díky čemuž je zařízení schopné vzlétnout – k tomu slouží právě složitá geometrie vrtulového listu (proměnlivá šířka, tloušťka a velká zakřivení), dalším důležitým faktorem je nízká hmotnost a vysoká pevnost, které je docíleno použitím právě polymerních kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny ke zhotovení pláště (vhodnou orientací vláken a počtem vrstev), dále odolnost vůči odstředivým silám působícím od středu rotace vrtule k její špičce (proto např. výztuhy využívají vlákna orientovaná pouze v tomto směru, čímž odolnost rapidně zvyšují) a také tepelná odolnost (způsobená rotací a prostředím, ve kterém zařízení operuje), snížení hluku, vibrací a zajištění plynulého chodu – k zajištění těchto vlastností slouží pěnové jádro (a taktéž vysoké nároky na výrobní přesnost všech komponent).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] J. BARBERO, Ever. *Introduction to Composite materials design*. 3. vyd. CRC Press, 2018. ISBN 978-1138196803.
- [2] KAW, Autar. *Mechanics of Composite Materials (Mechanical and Aerospace Engineering Series)*. 2. vyd. CRC Press, 2006. ISBN 978-0849313431.
- [3] SOHEL, Rana. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. Woodhead Pub, 2023. ISBN 978-0-08100-332-9.
- [4] KAUSHIK, Kumar. *Polymers and composites manufacturing*. De Gruyter, 2020. ISBN 978-3-11-065193-5.
- [5] DEBNATTA, Ratna. *Polymer matrix composite materials*. De Gruyter, 2024. ISBN 978-3-11-078148-9.
- [6] KOZŁOWSKI, Ryszard M. *Handbook of Natural Fibres: Volume 2: Processing and Applications*. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-1-84569-698-6.
- [7] K.CHAWLA, Krishan. *Composite Materials: Science and Engineering*. 4. vyd. Woodhead Pub, 2012. ISBN 978-3-030-28982-9.
- [8] W. CLYNE, T. a HULL, D. *An Introduction to Composite Materials*. 3. vyd. Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-0-521-86095-6.
- [9] D.L. CHUNG, Ddeborah. *Composite materials: Science and Applications: Science and Applications*. 2. vyd. Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-830-8.
- [10] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] VASILEV, Valery V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4. vyd. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-102209-2.
- [12] GAY, Daniel. *Composite Materials, Design and Applications*. 3. vyd. CRC Press, 2014. ISBN 978-1466584877.
- [13] PARK, Soo-Jin. *Carbon Fibers*. 2. vyd. Springer, 2018. ISBN 978-981-13-0537-5.
- [14] LENGSELD, Hauke. *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. 2. vyd. Hanser Fachbuchverlag, 2021. ISBN 978-1-56990-599-9.

- [15] JONES, Robert M. *Mechanics of Composite Materials*. 2. vyd. CRC Press, 2015. ISBN 978-1560327127.
- [16] VINSON, Jack R. *The Behaviour of Structures Composed of Composite Materials*. 2. vyd. Kluwer Academic, 2008. ISBN 978-1-4020-0904-4.
- [17] WANG, Chuanting; HE, Yong; ZHENG, Yuanfeng; ZHANG, Shuhai a TANG, Wenhui. *Dynamic Behaviour of Materials*. Mdpi, 2023. ISBN 978-3-0365-6942-0.
- [18] YU, T.X. *Introduction to Impact Dynamics*. Wiley, 2018. ISBN 9781118929841.
- [19] SHEVCHENKO, V. Ya.; ORYSHCHENKO, A. S.; PEREVISLOV, S. N. a SIL'NIKOV, M. V. About the Criteria for the Choice of Materials to Protect Against the Mechanical Dynamic Loading. *Glass Physics and Chemistry*. 2021, roč. 47, č. 4, s. 281-288. ISSN 1608-313X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1134/S1087659621040179>.
- [20] SILBERSCHMIDT, Vadim. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. 2. vyd. Woodhead Publishing, 2023. ISBN 978-0-12-823979-7.
- [21] STRONGE, W. J. *Impact Mechanics*. 2. vyd. Cambridge University Press, 2018. ISBN 978-0-521-84188-7.
- [22] YANG, Bingen. *Stress, Strain, and Structural Dynamics*. Elsevier, 2005. ISBN 978-0127877679.
- [23] BAILLY, Patrice. *Materials and Structures under Shock and Impact*. Wiley, 2013. ISBN 978-1-84821-651-8.
- [24] GOPALAKRISHNAN, Srinivasan. *Elastic Wave Propagation in Structures and Materials*. CRC Press, 2023. ISBN 9780367637576.
- [25] LOPRESTO, Valentina; LANGELLA, Antonio a ABRETE, Serge. *Dynamic Response and Failure of Composite Materials and Structures*. Woodhead Publising, 2017. ISBN 978-0-08-100887-4.
- [26] STEPKENBURG, Ronald a HAO WANG, Peng. *Standard Aircraft Engines Handbook*. McGraw-Hill Education, 2022. ISBN 978-1-26-425915-1.
- [27] FAROKHI, Saeed. *Aircraft Propulsion*. 2. vyd. Wiley, 2014. ISBN 9781118806777.

- [28] U.S. Department of Transportation. *Aviation Maintenance Technician Handbook - Powerplant*. Aviation Supplies & Academics, 2023. ISBN 978-1-64425-353-3.
- [29] ISLAM, Faisal; CALDWELL, Rowan; PHILLIPS, Andrew W.; JOHN, Nigel A. St a PRUSTY, B. Gangadhara. A review of relevant impact behaviour for improved durability of marine composite propellers. *Composites Part C: Open Access*. 2022, roč. 8, s. 100251. ISSN 2666-6820. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100251>.
- [30] ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. a ZHU, J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7. vyd. Elsevier, 2013. ISBN 978-1-85617-633-0.
- [31] BOWER, Allan F. *Applied Mechanics of Solids*. CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0247-2.
- [32] KIM, Nam-Ho. *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. Springer, 2015. ISBN 978-1-4419-1745-4.
- [33] KOUTROMANOS, Ioannis. *Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis*. Wiley, 2018. ISBN 9781119260080.
- [34] NEXUS, Hexagon. *Dytran 2021 - User's Guide*. 2020. Dostupné také z: https://nexus.hexagon.com/documentationcenter/en-US/bundle/Dytran_2021_User_Guide/resource/Dytran_2021_User_Guide.pdf.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Stavba kompozitního materiálu [3]	15
Obrázek 2 Obecné rozdělení kompozitních materiálů [5]	16
Obrázek 3 Částicový, vločkový, vláknový kompozit [6].....	17
Obrázek 4 Mechanické zaklínění [8]	17
Obrázek 5 a) Ideální smáčivost, b) Nesmáčivost, c) Částečná smáčivost [7].....	18
Obrázek 6 Chemická vazba [7].....	18
Obrázek 7 Kompozit s dlouhými vlákny [12].....	19
Obrázek 8 Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého kompozitu na úhlu orientace vláken [10].....	19
Obrázek 9 Laminát složený z vrstev s různou orientací vláken [1]	20
Obrázek 10 Symetrické uspořádání – vlevo s lichým, vpravo se sudým počtem vrstev [2]21	
Obrázek 11 Uspořádání vrstev – vlevo symetrické, vpravo asymetrické [2]	21
Obrázek 12 Výroba skleněných vláken tažených z trysek [10]	22
Obrázek 13 Výroba uhlíkových PAN-vláken [10]	24
Obrázek 14 Výroba aramidových vláken [10].....	25
Obrázek 15 Výroba jednosměrných prepregů s termosetickou matricí [10]	28
Obrázek 16 Autokláv [14].....	29
Obrázek 17 Podstata mikromechaniky [1].....	31
Obrázek 18 Příklad reprezentativního objemového elementu [1]	32
Obrázek 19 Roviny symetrie jednosměrně vyztužené vrstvy [10]	33
Obrázek 20 Elastické charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy [10]	34
Obrázek 21 Souřadnicový systém a rozložení složek elementu laminátu [10].....	35
Obrázek 22 a) kolineární konfigurace dopadu, b) nekolineární konfigurace dopadu [21] ..	38
Obrázek 23 Příklad nárazu projektilu na koncový cíl [23]	38
Obrázek 24 Povrchové (Rayleighovy) vlny [18]	40
Obrázek 25 Šíření elastických vln v pevném tělese [19]	40
Obrázek 26 Časoprostorový diagram vývoje oblastí při šíření elasticko-plastických napětíových vln [18].....	41
Obrázek 27 Závislost reziduálního tlakového napětí po nárazu na nárazové energii dopadajícího tělesa a rozčlenění poškození [20].....	44
Obrázek 28 Vznik delaminace během nárazu [20]	45
Obrázek 29 Lámání vláken během nárazu [20]	46
Obrázek 30 Příklad poškození laminátu vlivem nárazu [20].....	46
Obrázek 31 Základní terminologie vrtule [26]	47
Obrázek 32 Závislost hmotnosti listu na průměru vrtule vztažená na vrtule vrtulníků [12]48	

Obrázek 33 Vnitřní stavba listu kompozitní vrtule [12]	49
Obrázek 34 Profil vrtulového listu se znázorněnou spojující přímkou a úhlem náběhu [26]	51
Obrázek 35 Klouzání vrtule [28]	51
Obrázek 36 Aerodynamické faktory vrtule [26]	52
Obrázek 37 Síly působící na vrtuli [28]	53
Obrázek 38 Zjednodušený průřez listem kompozitní vrtule [29]	55
Obrázek 39 Vliv tloušťky laminátu na deformaci při nárazu [29]	56
Obrázek 40 Typy nárazů na vrtulový list [25]	57
Obrázek 41 Původní a přetvořená konfigurace souřadnicového systému s vektorem posunutí [31]	58
Obrázek 42 Nejčastěji používané 2D elementy [31]	59
Obrázek 43 Nejčastěji používané 3D elementy [31]	60
Obrázek 44 Elementy s uzly v konečněprvkové síti [31]	60
Obrázek 45 Konečněprvková síť bloku motoru [30]	61
Obrázek 46 Volba referenčního bodu kontaktu [31]	62
Obrázek 47 Nastavení kontaktu mezi dvěma tělesy [31]	62
Obrázek 48 3D model kompozitní vrtule	65
Obrázek 49 Řez středem vrtule	66
Obrázek 50 Kompozitní plášť vrtule	66
Obrázek 51 Schéma vrstvení kompozitního pláště v podélném směru	67
Obrázek 52 Schéma vrstvení kompozitního pláště v příčném řezu	68
Obrázek 53 Kompozitní plášť s rozdělenými plochami podle plánu vrstvení	68
Obrázek 54 Sklolaminátový náboj	69
Obrázek 55 Pěnové jádro	69
Obrázek 56 Vláknové výztuhy	70
Obrázek 57 Pohled na model vrtulového listu bez kompozitního pláště	71
Obrázek 58 Finální optimalizovaný model vrtulového listu	71
Obrázek 59 Model ptáka	72
Obrázek 60 Kompletní FEM model vrtule (detailní pohled)	73
Obrázek 61 Pohled na FEM model vrtule v příčném směru	74
Obrázek 62 FEM model kompozitního pláště (detailní pohled)	74
Obrázek 63 FEM model sklolaminátového náboje	75
Obrázek 64 FEM model pěnového jádra (detailní pohled)	75
Obrázek 65 FEM model vláknových výztuh (detailní pohled)	76
Obrázek 66 FEM model ptáka	76

Obrázek 67 FEM model ptáka – hybridní síť	77
Obrázek 68 Uspořádání modelů.....	79
Obrázek 69 Nastavení symetrie (vlevo), úplného uchycení (uprostřed), zamezení celkové rotaci (vpravo) odebráním stupňů volnosti	84
Obrázek 70 Grafické znázornění symetrie vrtulového listu včetně uzlů s pevným uchycením	84
Obrázek 71 Nastavení počáteční rychlosti.....	85
Obrázek 72 Výsledky řešení v MSC Dytran.....	87
Obrázek 73 Uspořádání modelů.....	89
Obrázek 74 Zobrazení ptáka jako samotného modelu během simulace – grafické spojení oddělených elementů.....	90
Obrázek 75 Zobrazení pláště jako samotného modelu během simulace v místě dopadu (grafické spojení oddělených elementů)	91
Obrázek 76 Graficky přesné znázornění oddělených elementů od modelu pláště (a ptáka) při zobrazení výsledků jako celkové sestavy.....	91
Obrázek 77 Schéma postupné deformace ptáka během simulace (příčný řez pláštěm)	92
Obrázek 78 Přetvoření kompozitního pláště v čase oblasti č.1.....	93
Obrázek 79 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.2	93
Obrázek 80 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.3	94
Obrázek 81 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.4	94
Obrázek 82 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.5	95
Obrázek 83 Detailní pohled na roztrženou odtokovou hranu v konečném kroku simulace, oblast č.5 (vlevo pohled směrem od náběžné hrany, vpravo od hrany odtokové).....	95
Obrázek 84 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.1	96
Obrázek 85 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.2	96
Obrázek 86 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.3	97
Obrázek 87 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.4	97
Obrázek 88 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v oblasti č.5	98
Obrázek 89 Detailní pohled shora na výslednou deformaci výztuh	98
Obrázek 90 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.1.....	99
Obrázek 91 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.2.....	99
Obrázek 92 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.3.....	100
Obrázek 93 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.4.....	100
Obrázek 94 Efektivní napětí na pěnovém jádře v oblasti č.5.....	101
Obrázek 95 Detailní pohled shora na výslednou deformaci pěnového jádra.....	101
Obrázek 96 Výsledná deformace vrtulového listu (náběžná hrana)	102
Obrázek 97 Výsledná deformace vrtulového listu (odtoková hrana)	102

Obrázek 98 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.1 (čas 0,07 ms).....	103
Obrázek 99 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.3 (čas 0,38 ms).....	104
Obrázek 100 Přetvoření kompozitního pláště v oblasti č.5 (čas 1,28 ms).....	104
Obrázek 101 Pohled na odtokovou hranu s detailem na místo roztržení – konečný krok simulace (oblast č.5)	105
Obrázek 102 Efektivní napětí na vláknových výztuhách v konečném kroku simulace	106
Obrázek 103 Efektivní napětí na pěnovém jádře v konečném kroku simulace.....	106
Obrázek 104 Výsledná deformace vrtulového listu (náběžná hrana)	107
Obrázek 105 Výsledná deformace vrtulového listu (odtoková hrana)	107
Obrázek 106 Šíření napěťové vlny (simulace 1)	108
Obrázek 107 Praskání matrice a delaminace během nárazového děje (epoxidová pryskyřice vyztužená uhlíkovými vlákny) [20]	109
Obrázek 108 Vznik a šíření delaminace [20].....	110
Obrázek 109 Lámání uhlíkových vláken vyztužujících epoxidovou pryskyřici [20].....	110
Obrázek 110 Lámání vláken [20]	111
Obrázek 111 Vznik nových napěťových vln	111
Obrázek 112 Lámání vláken kompozitního pláště na horní části listu (simulace 2)	112
Obrázek 113 Vydrolování pěnového jádra (simulace 1)	113
Obrázek 114 Deformace jádra v blízkosti náboje vlivem tlakového působení (simulace 1)	114

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Materiály tvořící jednotlivé komponenty vrtulového listu	67
--	----

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
θ	[°]	Úhel smáčivosti
V_f	[-]	Objemový zlomek výztuže
V_m	[-]	Objemový zlomek matrice
W_f	[-]	Hmotnostní zlomek výztuže
W_m	[-]	Hmotnostní zlomek matrice
ρ_c	[kg·m ⁻³]	Hustota celková
ρ_f	[kg·m ⁻³]	Hustota výztuže
ρ_m	[kg·m ⁻³]	Hustota matrice
$O_{\parallel}$	[-]	Podélný směr
$O_{\perp}$	[-]	Příčný směr
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
ν	[-]	Poissonova konstanta
γ	[-]	Smykové přetvoření
ε	[-]	Poměrná deformace
$\varepsilon_r^{\text{comp}}$	[%]	Trvalá kompresní deformace
σ	[MPa]	Normálové napětí
τ	[MPa]	Smykové napětí
$\bar{\sigma}, \bar{\tau}$	[MPa]	Střední napětí
S	[-]	Matice poddajnosti
f	[N]	Síla na jednotku délky
F	[N]	Síla
t	[mm]	Celková tloušťka stěny
t_l	[mm]	Tloušťka jedné vrstvy

m	$[\text{kg}]$	Hmotnost částice
v	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost
a	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Zrychlení
c_o	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost šíření elastické vlny
c_p	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost šíření plastické vlny

Zkratka	Význam
LM	Nízko modulová vlákna
MM	Středně modulová vlákna
HM	Vysoko modulová vlákna
UHM	Ultra vysoce modulová vlákna
HT	Vysokopevnostní vlákna
UD	Jednosměrná vlákna
SiO ₂	Oxid křemičitý
MgO	Oxid hořečnatý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
PAN	Polyakrylonitril
PUR	Polyuretan
PMI	Polymetakrylimid
RVE	Referenční objemový element
CNC	Computer Numerical Control
CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Element Method
FEA	Finite Element Analysis
MKP	Metoda Konečných prvků
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation

