

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A
KOLEJOVÝCH VOZIDEL



DIPLOMOVÁ PRÁCE

MODELOVÁNÍ DEGRADACE TUHOSTI KOMPOZITNÍHO HŘÍDELE
VLIVEM CYKlickÉHO ZATĚŽOVÁNÍ

AUTOR: Bc. Karel Novotný

STUDIJNÍ PROGRAM: Dopravní a transportní technika

SPECIALIZACE: Motorová vozidla

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Kazda

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **466696**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Motorová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelování degradace tuhosti kompozitního hřídele vlivem cyklického zatěžování

Název diplomové práce anglicky:

Modeling of degradation of composite shaft stiffness due to cyclic loading

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši v oblasti únavy kompozitních materiálů a metod jejího stanovení.
Do MKP modelu kompozitní hřídele s ozubeným kolem zahrňte vliv cyklického zatěžování na materiálové vlastnosti.
Vyjádřete závislost průhybu hřídele na počtu zatěžných cyklů pomocí MKP

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Kazda ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Lukáš Kazda
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato diplomová práce se v teoretické části zabývá stručným popisem kompozitů a únavy způsobené cyklickým zatěžováním. V praktické části je zkoumána degradace tuhosti kompozitního hřídele s ozubeným kolem.

Klíčová slova

Kompozity, únava, cyklické zatěžování, hřídel, MKP

Annotation

The theoretical part of this thesis deals with a brief description of composites and fatigue caused by cyclic loading. In the practical part, the stiffness degradation of a composite gear shaft is investigated.

Keywords

Composites, fatigue, cyclic loading, shaft, FEM

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukášovi Kazdovi za trpělivost a veškerou pomoc, díky které jsem mohl dokončit tuto diplomovou práci. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Zdeňkovi Padovcovi, Ph.D. za vysvětlení některých zákonitostí při práci s kompozity v Abaqusu a Ing. Veronice Drátovské za rady s Fe-Safe. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Obsah

Použité značení.....	8
1. Úvod.....	9
2. Kompozity	9
2.1. Výroba kompozitů	11
2.2. Historie kompozitů	12
3. Únava kompozitních materiálů.....	12
3.1. Faktory ovlivňující únavu vláknových kompozitů.....	13
3.2. Modely predikce životnosti	17
4. MKP laminátů.....	23
5. Model kompozitní hřídele.....	28
6. Pracovní postup	31
6.1. Tvorba sítě	31
6.2. Cyklické zatěžování v Fe-Safe	34
6.3. Pole v programu Abaqus	36
7. Ověření funkčnosti postupu.....	37
8. Cyklické zatěžování kompozitní hřídele	41
Závěr.....	48
Bibliografie	49
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	52
Přílohy.....	52

Použité značení

E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
σ	[MPa]	Normálové napětí
σ_a	[MPa]	Amplituda normálového napětí
σ_m	[MPa]	Střední normálové napětí
D	[-]	Stav poškození
ε	[-]	Deformace
k	[-]	Křivost
N	[-]	Počet cyklů
N_f	[-]	Počet cyklů, při kterých došlo k porušení součásti
γ_{xy}	[-]	Zkos v rovině xy
τ	[MPa]	Smykové napětí
u	[mm]	Posuv ve směru x
v	[mm]	Posuv ve směru y
R	[MPa]	Pevnost v tahu
F	[N]	Síla
M_k	[Nm]	Kroutící moment

TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Kompozity jako takové se využívají od 50. let 20. století, nicméně k jejich rozsáhlejšímu využití začalo docházet v posledních letech. Se stále rostoucími požadavky na snížení nákladů se hledají nové cesty a jedním z nich je právě využití kompozitních materiálů. Díky rozvoji počítačové technologie je v současnosti možné provádět složité analýzy jejich vlastností, a tak efektivně rozšiřovat oblast jejich využití.

Teoretická část se zabývá charakteristikou kompozitů a jejich únavou způsobenou cyklickým zatěžováním. Únava hraje při návrhu součásti velkou roli a je nutné ji ve výpočtech zohledňovat, jelikož na její velikost má u kompozitů vliv velké množství faktorů. Pomocí přesných výpočtů, které zohledňují tyto faktory a následných simulacích tak lze dosáhnout funkční součásti bez velkého množství nákladných experimentálních zkoušek.

2. Kompozity

Kompozit je materiál, který se skládá ze dvou nebo více chemicky odlišných složek. Tvrdší složka se nazývá výztuž a poddajnější složka, obvykle plnící funkci pojiva, se nazývá matrice. Kovové materiály mají homogenní izotropní materiálové a pevnostní vlastnosti a při jejich volbě se hledí na to, aby jejich určitá vlastnost ustála maximální namáhání. Při takovém pohledu je materiál využitý pouze v jedné oblasti, což je značně neefektivní. Právě z tohoto důvodu stoupají do popředí kompozity, které umožňují vytvořit strukturu, která odpovídá danému poli napjatosti a splňuje podmínky v zadaných oblastech. Kompozity mají oproti běžným kovovým materiálům mnoho výhod. Využitím kompozitů je možné dosáhnout nižší hustoty, větší měrné pevnosti, lepší odolnosti vůči chemickým vlivům, lepších tepelných a elektroizolačních vlastností [1] [2].

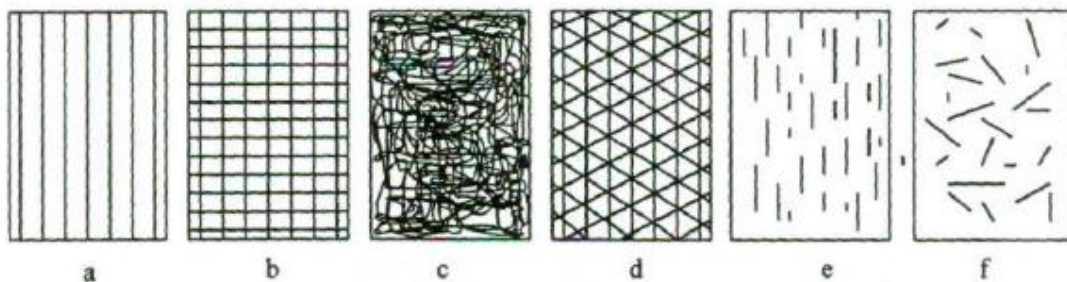
Na vlastnosti kompozitů má největší vliv: materiál matrice, tvar vlákenné výztuže, přísady, podpovrchová rouška a technologie výroby. Materiál matrice je obvykle jeden z níže uvedených:

- Polymer

- Kov
- Sklo
- Sklokeramika
- Keramika

Vyztužující fáze kompozitů nabývají různých rozměrů. Ve strojírenství mají největší roli mikrokompozity, u kterých mají výztuže příčné rozměry v rozmezí $1 - 10^2 \mu\text{m}$. Dále se ve strojírenství také objevují nanokompozity, jejichž výztuže mají maximálně 1 nm. Makrokompozity jsou používány především ve stavebnictví. Dle tvaru výztuže lze kompozity rozdělit na dva druhy: vláknové kompozity a částicové kompozity. Vlákna mají obvykle kruhový průřez a jejich pevnost se zvyšuje se zmenšujícím se průměrem, jelikož jejich přirozené defekty jsou také menší. V kompozitech se mohou objevit vlákna skleněná, uhlíková, polymerní, keramická anebo kovová. Částicové kompozity se dále dělí na sférické (izometrické) a destičkovité (anizometrické). Částice mají za účel zvýšení tuhosti. Anizometrické částice (tvar jehlic, disků, ...) mohou také významně zvyšovat pevnost – tzv. aktivní částice. Podpovrchová rouška má velký význam při použití kompozitního materiálu v chemicky agresivním prostředí [1] [3].

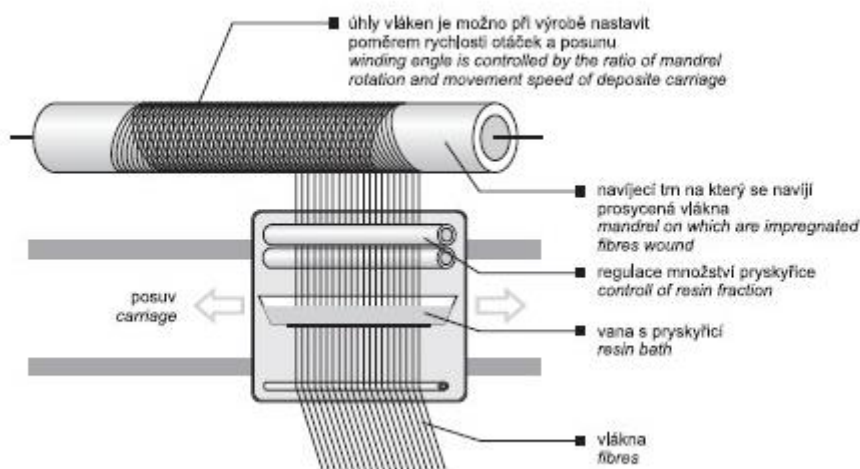
Kompozity mohou mít vlákna orientována jednosměrně, dvouose, víceose nebo nahodile (Obr. 1). Naskládáním jednotlivých vrstev vláken na sebe vzniká tzv. laminát, jehož vlastnosti jsou závislé na orientaci a vlastnostech daných vláken v jednotlivých vrstvách. Významná vlastnost vláknových kompozitů je, že negativní mechanické vlastnosti složek se ve výsledku často neprojevují. Např. kompozit obsahující křehká vlákna v křehké matici má mnohem lepší odolnost vůči křehkému lomu oproti homogennímu materiálu. Příčinou je odlišný mechanismus šíření trhliny. Při šíření trhliny dochází v matici v kolmém směru k osám vláken k otupování vrcholů trhlín [1].



Obr. 1 Různá uspořádání vláken kompozitů [1]

2.1. Výroba kompozitů

Výroba kompozitů je poměrně náročná a podle nároků (sériovost, velikost výrobku, kvalita povrchu, požadované vlastnosti, ...) je třeba zvolit vhodnou technologii. Obvykle je třeba volit určitý kompromis mezi těmito faktory a pokusit se nejvíce přiblížit tomu nejdůležitějšímu. Nejstarší, nejjednodušší technologií a dodnes nejrozšířenější technologií je ruční kladení. Postup spočívá nejprve ve vytvoření nevyztužené povrchové vrstvy (tzv. gelcoat), která zajišťuje ochranu vůči okolnímu prostředí. Po vytvrzení gelcoatu se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, mezi které se štětcem nanáší pryskyřice. Další technologií je tažení. Touto technologií lze vyrábět efektivně kontinuálním způsobem různé tvarové profily, které mají vysoký obsah výztuže. Výztuž prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí a po následném odstranění přebytečné pryskyřice je vtahována do tvarovacích průvlaků, které odpovídají vnějšímu požadovanému tvaru. Stříkání je nenákladná technologie výroby kompozitů. Principem je pneumatické nanášení sekaných vláken a pryskyřice na formu speciální pistolí. Při navíjení (Obr. 2) se výztuž impregnuje pojivem a poté se navíjí na jádro. Touto technologií se vyrábí kompozitní dutá tělesa, např. trubky, nádrže, ... Pro lisování se obvykle používají dvou nebo vícedílné formy, čímž se dosáhne hladkého povrchu z obou stran. Kompozity lze vyrábět lisováním za studena, tepla, v autoklávu nebo ve vakuu. Volba záleží na požadovaných vlastnostech a objemu výroby. Odlévání je využíváno pouze u vláken nevyztužených kompozitů [4].



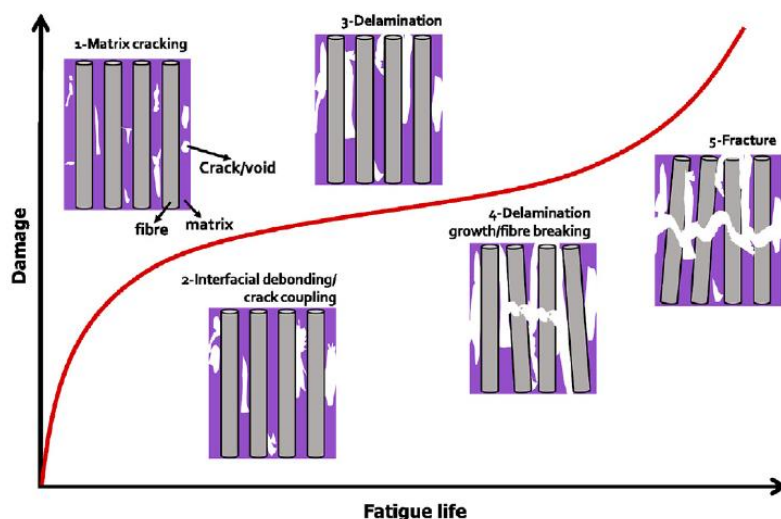
Obr. 2 Navíjení kompozitu [4]

2.2. Historie kompozitů

První známý kompozit na světě se odhaduje stářím 3500 let př. n. l. – jednalo se o různě orientované kusy dřeva, které byly slepené dohromady. Kolem roku 1500 n.l. Mongolové používali lepší a přesnější luky než většina ostatních civilizací díky zkombinování dřeva s kostmi a hedvábím. Moderní kompozity se začaly objevovat ve 30. letech 20. století v leteckém průmyslu. Jednalo se o kompozity se skelným vláknem. Během druhé světové války byl jejich vývoj značně uspíšen – na kompozity byly kladeny dva nároky – vysoká pevnost a nízká hmotnost. Po válce se začal rozvíjet kosmický průmysl a s ním stoupající nároky na vlastnosti materiálů. V důsledku toho byly v 60. letech vyrobeny první kompozity s uhlíkovými vlákny. V 70. letech poté následovaly kompozity s polymerními vlákny. Díky tomuto postupnému vývoji si kompozity našly cestu do většiny odvětví průmyslu. V současnosti nacházejí například užití v automobilovém, lodním a leteckém průmyslu, komponentech v počítačích, lékařství, ... a rozsah jejich využití stále roste [5] [6] [7].

3. Únava kompozitních materiálů

Ve většině případů jsou kompozity namáhány proměnným zatížením, a tak je kromě statických výpočtů třeba provádět i výpočty, které zahrnují únavu materiálu. U kompozitních materiálů má únava velký význam a na rozdíl od izotropních materiálů se projevuje kombinací tří faktorů – porušení vlákna, mezivláknové porušení a delaminace (Obr. 3) [8].



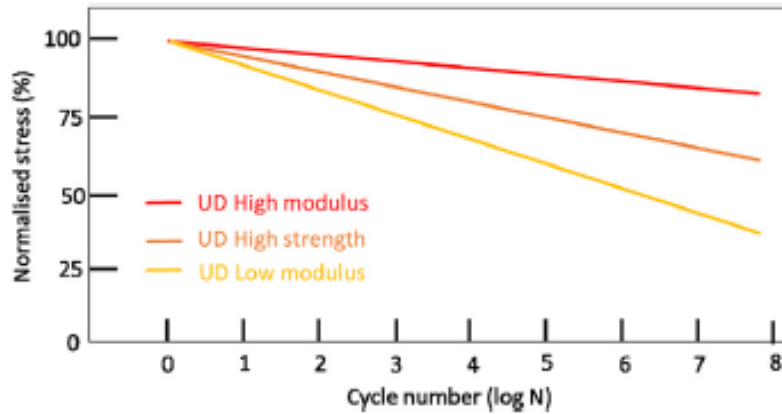
Obr. 3 Rozvoj typů poškození během zatěžování kompozitu [9]

Zakladatelem studie únavy materiálu byl Friedrich Wöhler, jehož S-N křivka je dodnes používána. Nicméně tyto křivky jsou vytvářeny na základě pravděpodobnosti, a tak je jejich tvorba poměrně drahá a navíc platí pouze pro danou součást – nikoliv samotný materiál. Proto byl vynalezen Parisův zákon, který popisuje vývoj trhlin vlivem cyklického zatěžování [10].

Zkoumání únavy má několik podstatných důvodů. Prvním jsou již zmíněné náklady. Testování prototypů je velmi drahé a při možnostech dnešních technologií, kdy je možné simulovat chování materiálů, je velice výhodné zkoumat jejich únavové chování. Druhým bodem je důležitost znát přesné hodnoty materiálu – kompozity byly prvně a stále ve velkém rozsahu jsou používány v leteckém průmyslu, kde je perfektní znalost materiálu naprosto nezbytná. Dalším bodem je, že kompozitní materiály také často v dnešní době nahrazují v konstrukcích materiály jako ocel. Tím vzniká nové rozložení působících sil, neboť např. ocelová konstrukce je zatížena především svojí vahou (oproti provoznímu zatížení), ale u konstrukce z kompozitního materiálu je tento poměr naprosto odlišný. Poslední důležitý faktor je křehkost jednosměrových kompozitů. K jejich porušení dochází náhle, a tak je znalost únavy podstatná [8].

3.1. Faktory ovlivňující únavu vláknových kompozitů

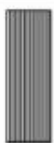


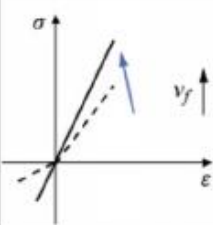
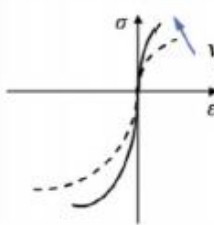
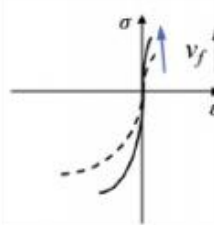
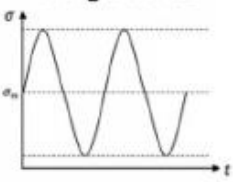
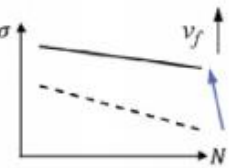
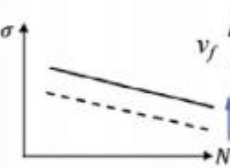

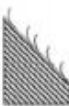

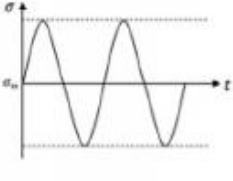
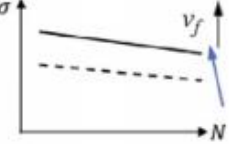
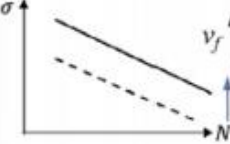



Při zatěžování jsou v kompozitu nejvíce namáhána vlákna, jelikož tvoří 30 – 70 % celkového objemu. Typ vlákna hraje ve vlastnostech kompozitu velkou roli. Různé typy mají různé meze pevnosti a kluzu, což má velký vliv na tvar ϵ -N křivek (u kompozitů často používány ϵ -N křivky místo S-N) a životnost materiálu. Na Obr. 4 jsou data z experimentu, který porovnával použití vláken s vysokým Youngovým modulem pružnosti (UD High modulus), vysokou mezí pevnosti (UD High strength) a vláken s nízkým Youngovým modulem pružnosti (UD Low modulus). Z tohoto pokusu je zřejmé, že nejlepší hodnoty mají vlákna s vysokým Youngovým modulem pružnosti. Nicméně při tomto experimentu bylo také zjištěno, že každé vlákno mělo odlišný mechanismus poškození. U vláken s vysokým E došlo k náhlému přetržení vláken, u dalších dvou typů byla tvorba a růst trhlin postupná [9].



Obr. 4 Wöhlerovy křivky tří kompozitů s různými typy vláken [9]

Dalším důležitým faktorem v únavě kompozitů je samotná matrice. V případě použití pryskyřice jsou nejčastější termosetové a termoplastické. Pokusy bylo zjištěno, že kompozity s termosetovou pryskyřicí dosahují delší životnosti, kdy se po několika cyklech objevilo pouze pár mikrotrhlin. Naopak u kompozitů s termoplastickou pryskyřicí docházelo při stejném zatěžování k poškození matrice, tvorbě trhlin a porušení vazeb mezi vlákny a matricí. Mechanismy poškození se u obou matric odlišovaly. Nicméně jednou velkou výhodou termoplastické pryskyřice je vysoká lomová houževnatost [9].

Na tuhost a pevnost kompozitu má vliv také koncentrace a orientace vláken (Obr. 5). S vyšší koncentrací vláken stoupá mez únavy, ovšem míra zvýšení je ovlivněna orientací vláken. Natočení vláken má na chování materiálu velký vliv, ale nelze jej charakterizovat stejně jednoduše jako koncentraci. Při natočení se mění celý mechanismus deformace, a tak může při určitém natočení např. docházet při vysokých napětích k vytahování vláken a naopak při nižších k porušení matrice [9].

	UD 0° 	UD 45° 	UD 90° 
Quasi-static load			
Fatigue R=0.1			
Damage mechanisms:	Fibre pull-out Fibre breakage 	Matrix cracking Matrix fibre debonding Fibre pull-out 	Matrix cracking Matrix fibre debonding Fibre pull-out 
Fatigue R=-1			
Damage mechanisms:	Fibre breakage 	Matrix cracking Fibre „crushing“ Fibre breakage Fibre pull-out 	Matrix cracking Fibre „crushing“ Fibre breakage 

Obr. 5 Mechanismy poškození kompozitu s odlišně orientovanými karbonovými vlákny [9]

Kromě typu, koncentrace a orientace mají na vlastnosti kompozitů vliv samotné vlastnosti vláken. Při dobré adhezi mezi maticí a vlákny dochází k rovnoměrnému rozložení napětí, a tak se prodlužuje životnost materiálu. Populární metodou na zlepšení vlastností kompozitů je infuze pryskyřice, kdy se vyplní póry ve vláknech a volný prostor mezi maticí a vláknem. V některých případech vykazovaly při pokusech takto upravené kompozity až o 60 % delší životnost. Velikost vláken je také důležitým faktorem. Obvykle platí, že delší vlákna dosahují delší životnosti, jelikož dochází k lepšímu přenosu zatížení. Nicméně na výrobu jsou

zpravidla jednodušší kompozity s krátkými vlákny (např. kompozity s karbonovými vlákny a termoplastickou maticí), což je potřeba při volbě materiálu vždy zohlednit [9] [11].

S předchozí operací (infuze pryskyřice) souvisí následující bod – defekty vzniklé při výrobě. Výroba kompozitů je velmi složitá a ve většině případů nelze zajistit, aby materiál neobsahoval žádné vady. Mezi nejčastější defekty patří póry, přírodní vady a vlnivost vláken nebo pouze jejich konců. Póry vznikají nedokonalým odvzdušněním při výrobě, kdy se v materiálu vytvoří vzduchová bublina, která má následně velký vliv na pevnost vlákna, a tím pádem celkové vlastnosti kompozitu, které, jak bylo prokázáno pokusy, se zhoršují s každým cyklem. Právě v těchto místech poté dochází ke koncentraci napětí a následnému vzniku/šíření trhliny. Dalším problémem je vytvrzování pryskyřice, kde může dojít k jejímu sražení, což způsobí vznik vnitřních napětí v materiálu. Vlnitost vláken a jejich konců má na únavový život materiálu negativní efekt ve velkém měřítku. Kromě těchto defektů může také dojít vnějším zásahem k poškození materiálu během výroby. Při porušení vlákna dochází v těchto místech k větší koncentraci vnitřních napětí a obvykle v těchto místech poté dochází k selhání materiálu [9].

Dalším důležitým faktorem je kumulace tepla. Během deformace materiálu dochází ke změnám vnitřní energie. Vlivem zatěžování při vyšších napětích nebo vysokých frekvencích může dojít ke kumulaci velkého množství tepla, které může ovlivnit mechanické chování materiálu a také mohou začít probíhat některé chemické procesy. To má za důsledek tvorbu mikrotrhlin v materiálu. Při pokusech bylo zjištěno, že při stejném zatěžování byla teplota vyšší u kompozitů, jejichž vrstvy vláken byly oproti sobě natočeny o 45°, oproti kompozitům s natočením 90°. Tato skutečnost se projevuje především u vysokocyklové únavy a také proto jsou kompozity s natočením vláken o 45° mnohem citlivější na frekvenci zatěžování [9].

Kromě vlastností samotného materiálu má vliv na únavu také prostředí, kterému je kompozit vystaven. Jedním z těchto faktorů je teplota, která má vliv především pokud se cyklicky mění. Při pokusech, kdy byly kompozity s uhlíkovými vlákny po delší dobu vystaveny konstantním teplotám daleko přesahující jejich normální provozní teploty, nebyl pozorován výrazný pokles meze pevnosti. Naopak při experimentech, kdy probíhala cyklicky změna teploty v rozmezí -50 °C – 150 °C, byla pozorována již po pár cyklech tvorba mikrotrhlin v matici. Tyto trhliny měly poté negativní dopad na mechanické vlastnosti materiálu. Tento

jev musí např. při návrhu lopatek turbíny, kde dochází k velkým teplotním změnám, brát konstruktéři v potaz [9].

Voda a vlhkost mají na únavu kompozitů také značný účinek. Pokud je materiál ponořen do vody, dojde k vyplnění pórů v matrici a mezer na hranicích vláken a matrice. Při následné změně teploty začne docházet k tvorbě zduřelin a následných vnitřních napětích, což se projeví na mechanických vlastnostech materiálu. Při pokusech bylo prokázáno, že různé typy poškození se objevily u materiálů nasycených vodou při nižších napětích oproti stejným materiálům, které ovšem vodě nebyly vystaveny. Závěrem bylo, že u kompozitu nasyceném vodou poklesne mez únavy přibližně o 1/3 původní hodnoty [9].

3.2. Modely predikce životnosti

Pro popis životnosti materiálu existuje mnoho modelů. Žádný z nich není univerzální a u každého je třeba definovat požadavky kritérií. První skupinu tvoří modely fenomenologické. Ty lze dále rozdělit na:

- Empirické, poloempirické
- Predikce na základě určení zbytkové pevnosti materiálu
- Modifikace pevnostních kritérií pro únavové zatížení
- Predikce na základě určení zbytkové tuhosti kompozitu

První druh nesleduje mechanismy poškození, pouze vychází z výsledků zkoušek (Wöhlerova křivka). Vysokocyklová únava je obvykle měřena v rozmezí $10^3 - 10^7$ cyklů. Nejsnazší vztah pro popis únavové křivky je Basquinův. Jeho forma je:

$$\sigma = \sigma_0 * N^{\frac{-1}{k}} \quad 1.$$

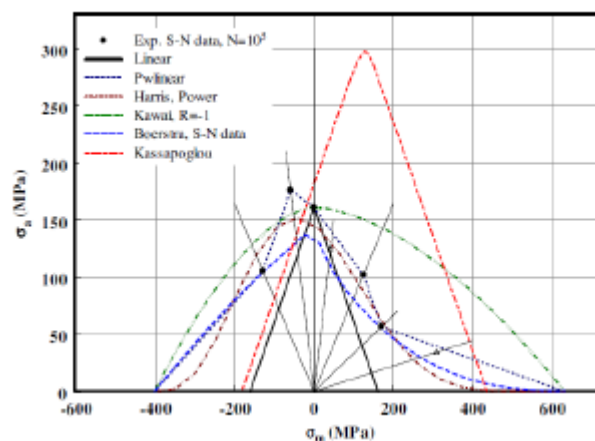
kde σ_0 symbolizuje součinitel únavové pevnosti, N je počet cyklů do porušení a k je exponent únavové pevnosti. Pro dlouhovláknové kompozity se koeficient k pohybuje v rozmezí 7 – 25 [8] [12].

Do této podskupiny patří také modely zohledňující vliv středního napětí. Data z více únavových křivek pro různé napěťové součinitele lze vynést do jednoho grafu, který vyjadřuje

závislost amplitudy napětí na středním napětí. Díky tomuto postupu lze zpětně odvodit i únavové křivky pro napěťové součinitele, pro které experimenty nebyly provedeny. Klasický lineární model (Goodmanův), který je využíván u kovů, není vhodný pro kompozity, neboť mají jinou tahovou a tlakovou pevnost a také různé mechanismy poškození dle směru působící síly. Níže je uvedeno několik modelů zohledňujících vliv středního napětí na únavu:

- Po částech lineární – vytvořen spojením lin. interpolací hodnot $\sigma_a - \sigma_m$
- Po částech nelineární – vytvořen spojením nelin. interpolací hodnot $\sigma_a - \sigma_m$
- Harrisův – semi-empirická rovnice odvozená z experimentů
- Kawaiův – asymetrický diagram, možný sestavit z jedné únavové křivky
- Boerstův – možné sestavit bez znalosti napěťového součinitele
- Kassapoglův – počítá s tím, že pravděpodobnost porušení materiálu během každého cyklu je konstantní

Na Obr. 6 je grafické porovnání jednotlivých modelů. Jak je z grafu patrné, jednotlivé modely se poměrně velmi liší [8].



Obr. 6 Porovnání jednotlivých modelů při zatěžování skelného laminátu [8]

Druhý druh fenomenologických modelů pracuje s tím, že k porušení dojde v okamžiku, kdy rozkmit cyklu zatížení dosáhne zbytkové pevnosti degradovaného kompozitu. Jako zástupce této kategorie lze uvést model Schaff-Davidsona:

$$R(N) = R_0 - (R_0 - \sigma_{MAX}) * \left(\frac{n}{N}\right)^m = 1 \quad 2.$$

kde $R(N)$ je zbytková pevnost, R_0 statická pevnost, σ_{MAX} je maximální cyklické napětí a m je exponent určující progresivitu degradace v závislosti na počtu kmitů [12].

Třetí druh lze rozdělit na dvě podkategorie – neinteraktivní kritéria a interaktivní kritéria. Do první skupiny patří kritérium maximálních napětí a kritérium maximálních poměrných deformací. Ze zástupců druhé skupiny lze uvést např. Tsai-Hillovo kritérium [12].

Modely popisující degradaci tuhosti mají oproti modelům degradace pevnosti jednu velkou výhodu a tou je, že zbytkovou tuhost lze vyšetřit i pomocí nedestruktivních metod na rozdíl od zbytkové pevnosti. Zde je uvedeno několik zástupců této skupiny:

Echtermeyerův model
$$E(N) = E(0) * \alpha * \log N \quad 3.$$

kde $E(N)$ je Youngův modul pružnosti po určitém množství cyklů, $E(0)$ modul pružnosti na počátku a α parametr.

Yangův model
$$E(N) = E(0) * [1 - Q * N^a] \quad 4.$$

Hwangův model
$$\frac{dE(N)}{dN} = -A * c * N^{c-1} \quad 5.$$

Zhangův model
$$E(N) = E(0) * [1 - K * \left(\frac{\sigma_{MAX}}{E(0)}\right)^\alpha * N^\beta] \quad 6.$$

Maoův model
$$\frac{E(0) - E(N)}{E(0) - E(N_f)} = q * \left(\frac{N}{N_f}\right)^{m_1} + (1 - q) * \left(\frac{N}{N_f}\right)^{m_2} \quad 7.$$

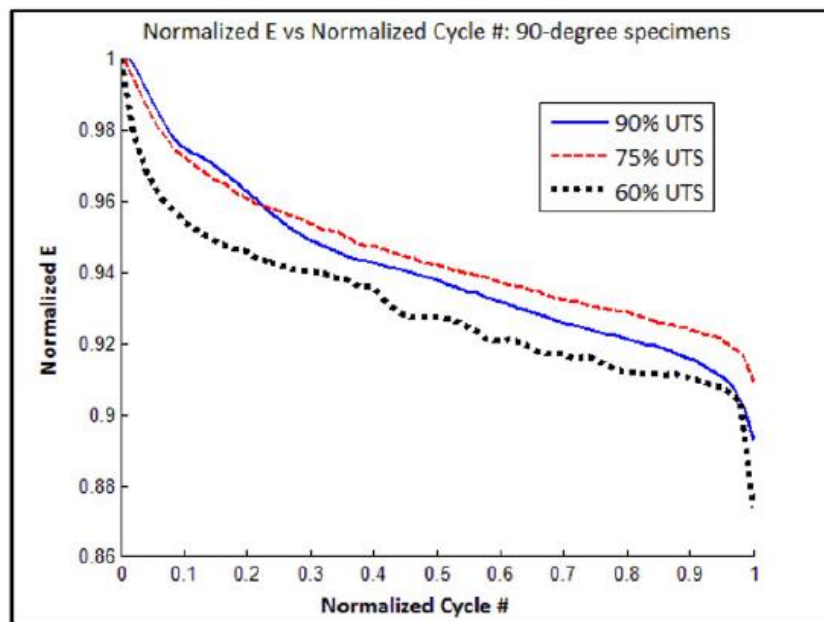
Obecně lze modely degradace tuhosti rozdělit do dvou podskupin. První podskupinou jsou modely, které popisují vztah mezi zbytkovou tuhostí a počtem cyklů jako např. Yangův model, Zhangův model, Echtermeyerův model ... Druhá podskupina popisuje vztah mezi zbytkovou tuhostí a délkou života v poměru N/N_f (např. Maoův model). Zajímavým modelem je Whitworthův, který propojil degradaci tuhosti se zbytkovou pevností a má následující tvar:

$$\frac{R(N)}{R_0} = C * \left[\frac{E * (N_f)}{E_0} \right]^m \quad 8.$$

kde jednotlivá značení mají stejný význam jako výše uvedený model Schaff-Davidsona [8] [12].

Pro zobrazení degradace tuhosti jsou také často používány D-N grafy, kde D symbolizuje tzv. Damage state (stav poškození) a N počet cyklů. „Damage state“ byl poprvé

použit pro kvantifikaci poškození vlákný vyztužených kompozitů. Vstupní veličiny pro následující vztah lze získat z měření (viz Obr. 7).

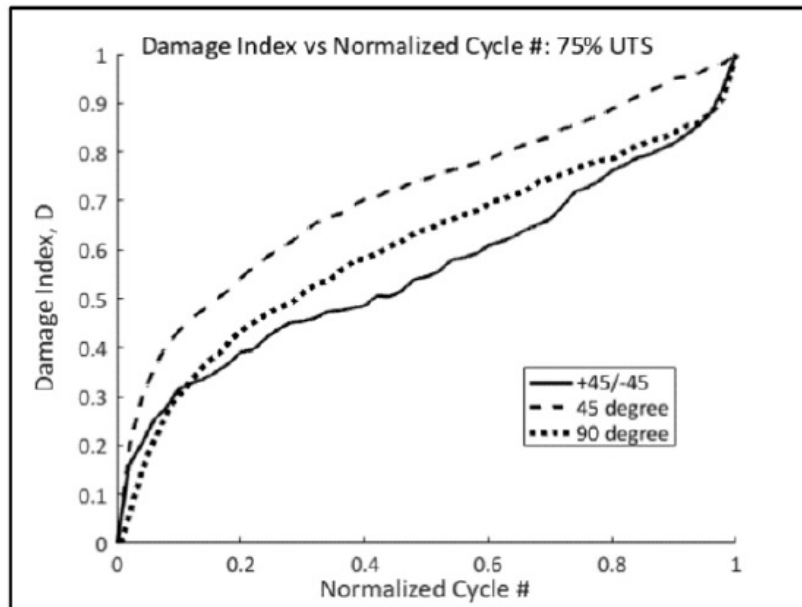


Obr. 7 Graf závislosti E-N [13]

Ze získané křivky se následně dosadí do níže uvedeného vztahu pro D :

$$D(n) = \frac{E_0 - E(n)}{E_0 - E_f} \quad 9.$$

kde E_0 symbolizuje Youngův modul na počátku procesu, E_f na konci procesu, a $E(n)$ je modul pružnosti při daném počtu cyklů. Poté lze sestavit D-N graf viz. Obr. 8.



Obr. 8 Graf závislosti D-N [13]

Analyticky lze „Damage state“ získat následujícím vztahem:

$$D_a(n) = q * \left(\frac{n}{N}\right)^{m_1} + (1 - q) * \left(\frac{n}{N}\right)^{m_2} \quad 10.$$

$D_a(n)$ ve vztahu symbolizuje poškození při daném počtu cyklů, q , m_1 a m_2 jsou parametry, které záleží na materiálových vlastnostech a typu zatěžování, n je aktuální počet cyklů a N je počet cyklů, při kterém by měl materiál dosáhnout meze únavy při daném zatěžování [13].

Druhou velkou skupinu tvoří modely postupného poškozování a mikromechanické modely. V prvním případě se jedná o popis degradace mechanických vlastností a růstu poškození. Jako zástupce této skupiny je uveden model Lemaitre-Desmoratův:

$$N_f = \frac{q * \left(1 - m * \frac{\sigma_m}{\sigma_f}\right)^{2q}}{2 * (2q + 1) * C} * \sigma_a^{-2q} = X * \sigma_a^{-2q} \quad 11.$$

Mikromechanickými modely je myšleno MKP modelování stavu napjatosti v mikro/mezzo/makro elementech. Volba velikosti elementů obvykle záleží na úrovni modelování. Tvorba modelů i následné vyhodnocení je u kompozitů náročnější oproti izotropním materiálům. Při tvorbě hraje velkou roli míra zjednodušení geometrie a také přístup k modelování samotné kompozitní struktury:

- Zadání všech vrstev kompozitu

- ABD matice
- Homogenizace vlastností

U MKP je nutnost experimentů pro ověření správnosti mechanismů poškození. Přestože technologie simulací znatelně pokročila v posledních letech, stále může docházet k mnoha nepřesnostem (odlišný tahový a tlakový E , objemový podíl vláken odlišný od reálného výrobku, některé parametry nemusí být známy, ...). Často se využívá lomová mechanika, sleduje se hustota i délka trhlinek v objemu a porovnává se s kritickými hodnotami. MKP výpočty u vláknových kompozitů se stejně jako u izotropních materiálů řídí rovnicí:

$$u = K^{-1} * f \quad 12.$$

K je ve výše uvedené rovnici globální matice tuhosti, u je vektor uzlových posuvů a f vektor ekvivalentních uzlových sil. Pro kompozity platí následující tvar Hookova zákona:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{21} & -\nu_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\nu_{32} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \quad 13.$$

U tenkých struktur lze zanedbat stav rovinné napjatosti ve směru tloušťky vrstvy a díky tomu celý vztah zjednodušit do tohoto tvaru:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{21} & 0 \\ -\nu_{12} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad 14.$$

V takovém případě stačí zadat pouze 4 parametry (E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy}). E_x je modul pružnosti v tahu ve směru vláken. E_y je modul pružnosti tahu ve směru kolmém na E_x . G_{xy} je modul pružnosti ve smyku a ν_{xy} je Poissonův poměr, který je při jednoosém zatížení definován jako poměr příčné

poměrné deformace k poměrnému prodloužení. I když jsou tyto 4 parametry postačující, je lepší zadat i další dva smykové moduly z důvodu zamezení nereálných deformací MKP modelu [1] [12] [14].

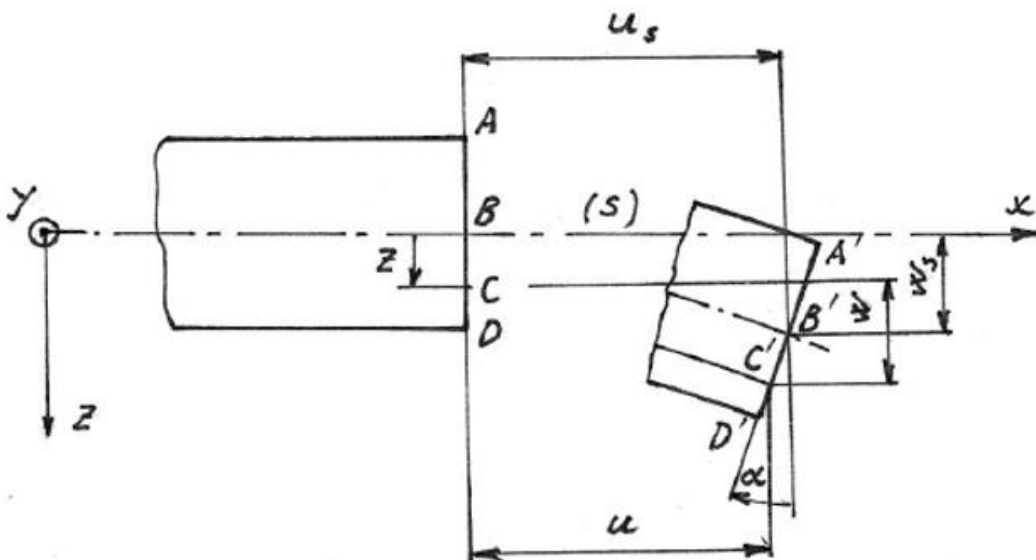
U modelování vrstvy kompozitu je potřebné znát tloušťku vrstvy, výše uvedené materiálové vlastnosti ($E_x, E_y, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}$) a orientaci materiálu. Mechanické údaje lze zjistit přímo od výrobce polotovaru, z experimentů nebo ze směšovacích pravidel a modelů mikromechaniky. Mezi nejčastější problémy patří neznalosti některého parametru, mikromechanické modely nemusí přesně odpovídat vybranému typu vlákna nebo odlišnost teoretického podílu vláken v kompozitu od reálného podílu z výroby [14].

4. MKP laminátů

V příčném řezu stěny tenkostěnného laminátového tělesa (skořepiny) (Obr. 9) je hlavní svislý průhyb. V obecném bodě C platí pro posuv u ve směru x a posuv v ve směru y následující vztahy:

$$u = u_s - z * \operatorname{tg}(\alpha) = u_s - z * \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad 15.$$

$$v = v_s - z * \frac{\partial w_s}{\partial y} \quad 16.$$



Obr. 9 Deformace stěny [2]

Symbol s označuje posuv adekvátního bodu B na střednicové ploše. Derivací těchto vztahů lze získat deformace v daných směrech:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_s}{\partial x} - z * \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \quad 17.$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_s}{\partial y} - z * \frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2} \quad 18.$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_s}{\partial y} + \frac{\partial v_s}{\partial x} - 2 * z * \frac{\partial^2 w_s}{\partial x \partial y} \quad 19.$$

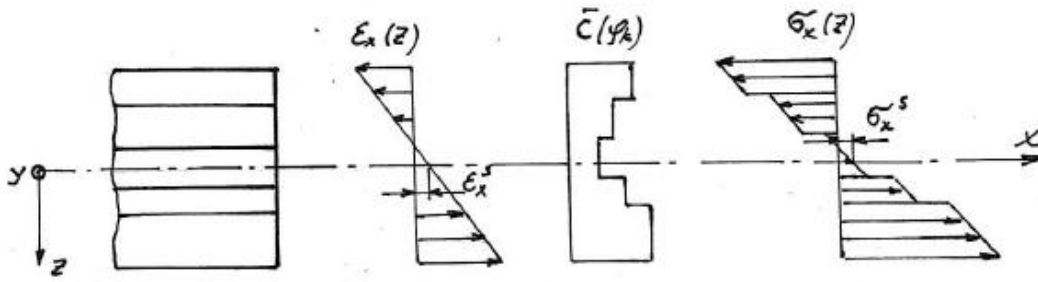
Tyto vztahy lze maticově vyjádřit následujícím vztahem:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_s + z * \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad 20.$$

Symbole k_x , k_y , k_{xy} jsou složky vektoru křivosti v místě B střednicové plochy. Z maticového zápisu vyplývá, že průběh složek ε_x , ε_y a γ_{xy} je lineární a není závislý na struktuře laminátové stěny viz Obr. 10. Totéž nelze říct o napětí, které je lineární pouze, dokud nedojde k přechodu mezi jednotlivými vrstvami. Napětí v každé vrstvě k jsou definována Hookeovým zákonem, do kterého je po dosazení výše uvedeného maticového zápisu získán tento tvar:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = [C(\varphi_k)] * \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_k = [C(\varphi_k)] * \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_s + z * \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \right) \quad 21.$$

$[C(\varphi_k)]$ symbolizuje matici materiálových tuhostních konstant vrstvy k , které se v každé vrstvě odlišují.



Obr. 10 Průběh složky deformace a napětí ve směru x [2]

Silové účinky se označují N_x , N_y a T_{xy} a momentové M_x , M_y , M_{xy} . Pro tyto veličiny platí následující vztahy:

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_x * dz \quad 22.$$

$$N_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_y * dz \quad 23.$$

$$T_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \tau_{xy} * dz \quad 24.$$

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x * z * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_x * z * dz \quad 25.$$

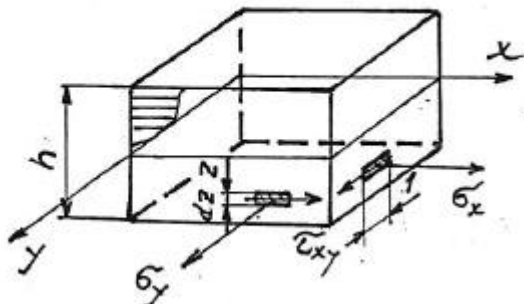
$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y * z * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_y * z * dz \quad 26.$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} * z * 1 * dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \tau_{xy} * z * dz \quad 27.$$

Parametr z je vyobrazen na Obr. 11. Pro zjednodušení později použitých vztahů jsou používány níže uvedená značení:

$$\{N\} = [N_x \ N_y \ T_{xy}]^T$$

$$\{M\} = [M_x \ M_y \ M_{xy}]^T$$



Obr. 11 Uvolněný element desky [2]

Po dosažení vztahů z rovnice 21. do rovnic 22. – 27. lze vyjádřit vektory lineových sil a momentů následovně:

$$\begin{aligned} \{N\} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{bmatrix}_s &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} [C(\varphi_k)] * \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_s + z * \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \end{pmatrix} * dz = & 28. \\ &= \left(\sum_{k=1}^n [C(\varphi_k)] * h_k \right) * \{\varepsilon\}_s + \left(\sum_{k=1}^n [C(\varphi_k)] * \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \right) * \{k\} = \\ &= [A] * \{\varepsilon\}_s + [B] * \{k\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{M\} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}_s &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} [C(\varphi_k)] * \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_s + z^2 * \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \end{pmatrix} * dz = & 29. \\ &= \left(\sum_{k=1}^n [C(\varphi_k)] * \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \right) * \{\varepsilon\}_s + \left(\sum_{k=1}^n [C(\varphi_k)] * \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \right) * \{k\} = \\ &= [B] * \{\varepsilon\}_s + [D] * \{k\} \end{aligned}$$

Ve výše uvedených vztazích symbolizuje $[A]$ matici tahové tuhosti, $[B]$ matici vazebné tuhosti a $[D]$ matici ohybové tuhosti. Vazbu mezi liniovými silami a momenty lze poté již jednoduše vyjádřit jako:

$$\begin{bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{k\} \end{bmatrix} \quad 30.$$

Následným zúžením se lze dostat na tvar základní rovnice, která byla uvedena na konci předchozí kapitoly:

$$\{S\} = [K] * \{d\} \quad 31.$$

kde $\{S\}$ je vektor liniových silových účinků, $[K]$ symbolizuje globální matici tuhosti a $\{d\}$ je vektor přetvoření střednicové plochy [2].

PRAKTICKÁ ČÁST

5. Model kompozitní hřídele

Praktická část této diplomové práce se zabývá simulací degradace tuhosti kompozitní hřídele za využití programů Abaqus a Fe-Safe. Reálná součást, podle níž byl model vytvořen, je vyobrazena na Obr. 12. Jedná se o hřídel z převodovky, která je umístěna ve výzkumném centru ČVUT v Rožtokách.



Obr. 12 Kompozitní hřídel

Na Obr. 13 je zobrazena materiálová skladba hřídele. Použity byly kompozitní materiály s označením UHM, UHM2 a HS a ocel. Vlastnosti jednotlivých kompozitů jsou uvedeny v Tabulka 1, jedná se o vláknové kompozity. Youngův modul pružnosti použité oceli je 210 000 MPa a Poissonovo číslo se rovná 0,3.

The original layup					
No. of the layer	Layers in FEM model	thickness mm	Thickness of the layup in the sections mm	orientation °	material
1	1	0,63		45	UHM1
	2	1,26		-45	UHM1
	3	0,63		45	UHM1
2	4	0,22		85	HS
	5	0,65	6,21	45	UHM1
3	6	1,30		-45	UHM1
	7	0,65		45	UHM1
4	8	0,22		87	HS
	9	0,66		37	UHM1
5	10	1,32	1,98	-37	UHM1
	11	0,66		37	UHM1
6	12	0,22		87	HS
	13	1,75	2,06	0	UHM1
7	14	0,09		60	HS
	15	0,18		-60	HS
8	16	0,09	0,27	60	HS
	17	1,84		0	UHM1
9	18	0,08		-60	HS
	19	0,17	2,03	60	HS
10	20	0,08		60	HS
	21	0,38		44	UHM2
11	22	0,76		-44	UHM2
	23	0,38		44	UHM2
12	24	1,02		0	UHM2
	25	0,13		48	HS
13	26	0,26	3,20	-48	HS
	27	0,13		48	HS
	28	0,13		48	HS
	29	0,26		-48	HS
	30	0,13		48	HS

Obr. 13 Materiálová skladba hřídele

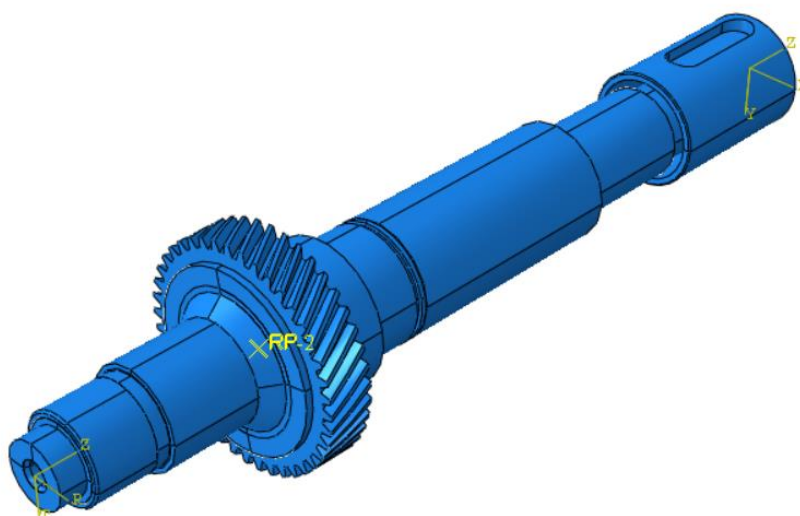
Materiál	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν_{xy} [-]	ν_{xz} [-]	ν_{yz} [-]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]
UHM	481888	3673	3673	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
UHM2	421948	3673	3673	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
HS	128188	4993	4993	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352

Tabulka 1 – Materiálové vlastnosti použitých kompozitů

Pro usnadnění práce s tvorbou modelu byl využitý již existující model (Obr. 14), který skladbou materiálu odpovídal zkoumané hřídeli. Poté bylo v programu Abaqus nutné provést úpravu geometrie a přidání ozubeného kola (Obr. 15).

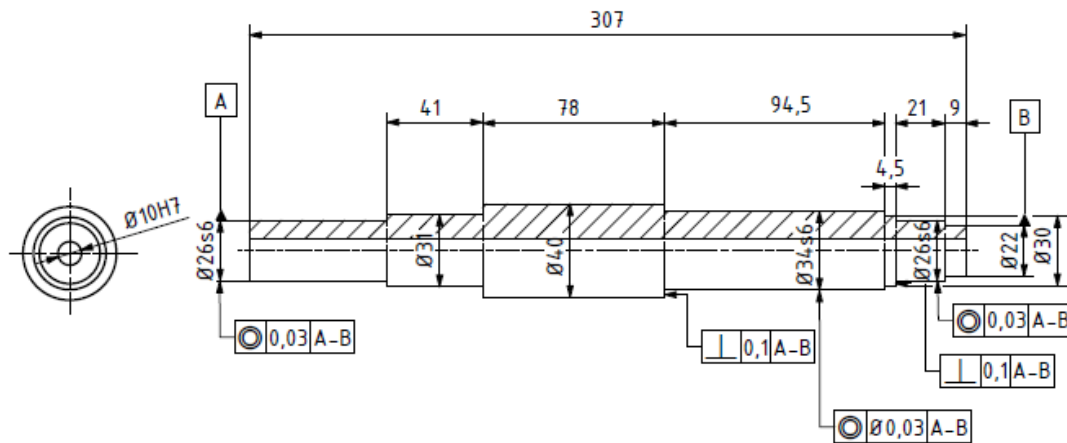


Obr. 14 Výchozí model kompozitní hřídele

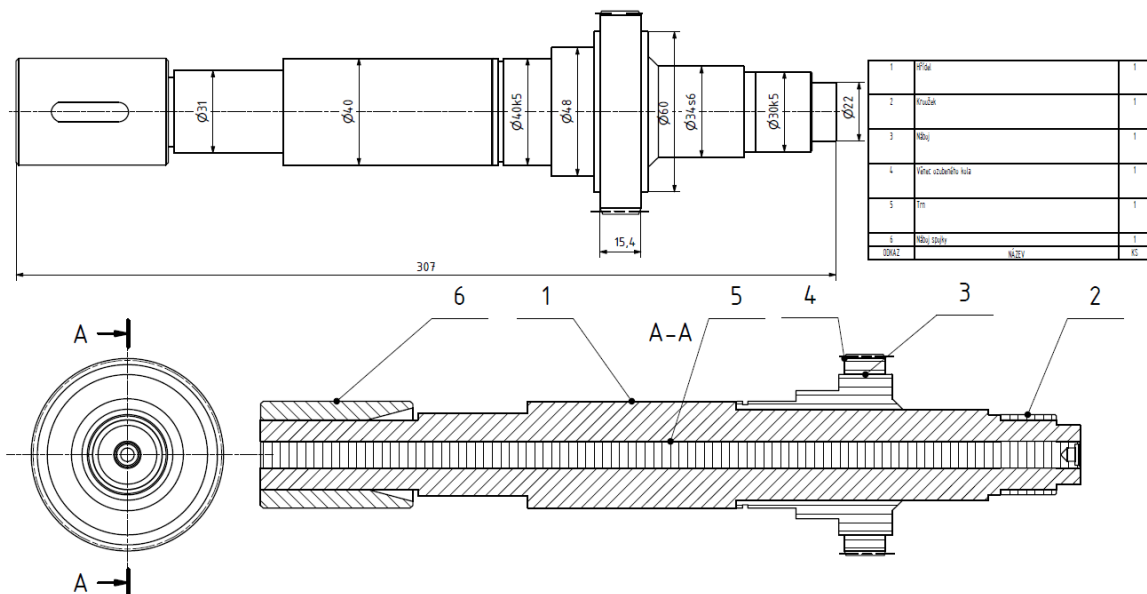


Obr. 15 Model kompozitní hřídele

Jednotlivé díly sestavy jsou spojeny vazbou „tie“, která zajišťuje spojení a přenos působících sil bez jakýchkoliv ztrát, respektive jako by se jednalo o jednu součást. Výkres kompozitní hřídele je zobrazen na Obr. 16. Celá sestava kompozitní hřídele s ocelovými částmi je zobrazena na Obr. 17.



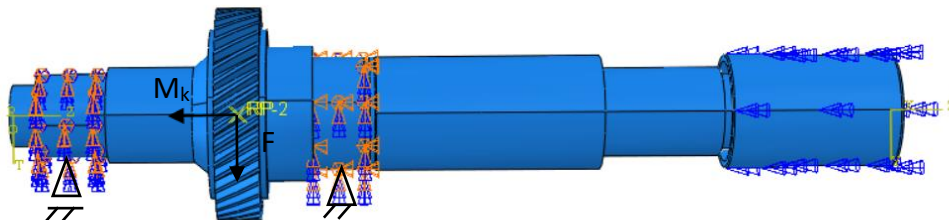
Obr. 16 Výkres kompozitní části hřídele



Obr. 17 Výkres sestavy

Působící síla a kroučící moment byly umístěny do středu ozubeného kola, které bylo v sestavě zavedeno jako „rigid body“, neboli nedeformovatelné těleso. Vzhledem k tomu, že

hřídel je velmi předimenzovaná, bylo nutné zvolit nereálné hodnoty zatížení, aby bylo možné zobrazit danou závislost průhybu na stavu poškození. Velikost působící síly je 100 000 N a velikost kroutícího momentu je 8 897,273 Nm. Rotační a posuvná vazba symbolizují umístění ložisek. Na náboji spojky je zakázána pouze rotace kolem vlastní osy (Obr. 18).

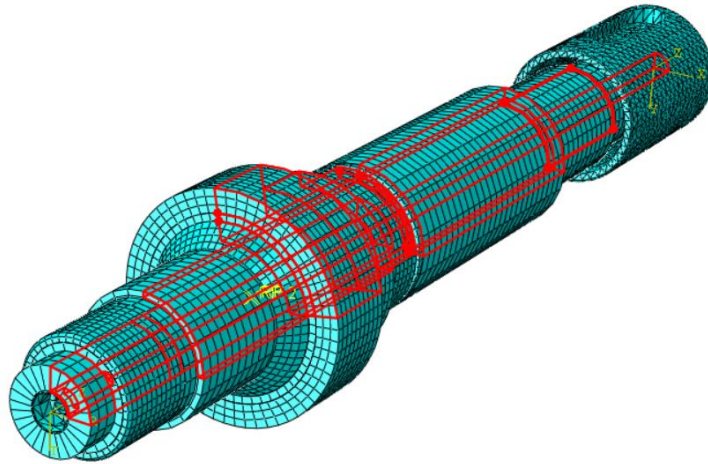


Obr. 18 Okrajové podmínky

6. Pracovní postup

6.1. Tvorba sítě

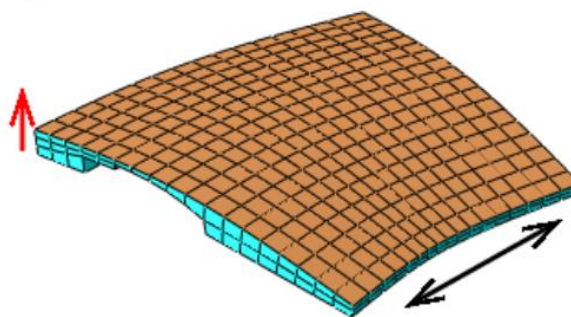
Tvorba sítě je obvykle nejdelší částí celého procesu, jelikož její kvalita se odráží ve výsledcích simulace. Nejpřesnějších výsledků lze dosáhnout při použití jemné sítě a strukturovaných hexahedronů (šestistěnů). Z tohoto důvodu bylo nutné jednotlivé vrstvy nařezat na 4 části (po 90°) v podélném směru (směr osy z), jak je na několika vrstvách zobrazeno na Obr. 19. Dále bylo nutné odříznout ve všech vrstvách úseky, kde byla komplikovanější geometrie (malé zkosení, zaoblení, drážka, ...), jelikož by program nemusel být schopný v této části vytvořit elementy o požadované velikosti a tvaru, i když by bylo na zbylých 90 % vybrané plochy možné požadované šestistěnné elementy použít. Na složitější ocelové součásti (ozubené kolo a náboj spojky) byla aplikována síť čtyřstěnných elementů, jelikož ocelové součásti nejsou předmětem zkoumání v těchto simulacích, a tak je nepřesnost výsledků v těchto oblastech nepodstatná. Další podstatnou částí síťování kompozitů je, aby vždy jeden element na výšku reprezentoval jednu vrstvu tak, jak je uvedeno na Obr. 13. V opačném případě by např. při vytvoření 2 elementů na sobě, které by reprezentovaly jednu vrstvu kompozitu, byla materiálová struktura použita v obou elementech a model by přestal odpovídat realitě – došlo by ke „zdvojení“ materiálové skladby.



Obr. 19 Tvorba sítě – nařezání součásti

Pro veškeré kompozitní části byl zvolen typ elementů „continuum shell“, který se běžně používá pro kompozity. Pro ocelové části byl zvolen typ „3D stress“.

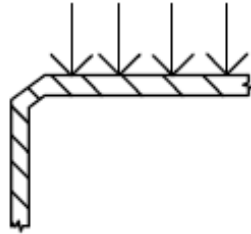
Následně bylo nutné přiřadit elementům orientaci. Tato část je u kompozitních materiálů velmi důležitá. Abaqus přiřazuje orientaci všem elementům, které mají strukturovaný tvar šestiúhelníku, nicméně u izotropních materiálů nehraje její zadání ve výpočtech žádnou roli. U kompozitů zadání orientace ovlivňuje, jak se bude materiál při simulacích chovat a je důležité, aby na sebe orientací jednotlivé vrstvy pod sebou navazovaly. Jak je zobrazeno na Obr. 20, oranžová barva symbolizuje horní stranu elementů, fialová spodní.



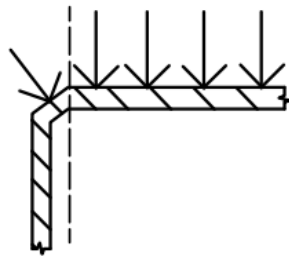
Obr. 20 Orientace elementů [15]

Problém může způsobit jakákoliv složitější geometrie jako např. zkosení. V takovém případě není program schopný určit, zda se stále jedná o horní část či nikoliv, a tím pádem přiřadit orientaci (Obr. 21). V důsledku toho nelze provést jakoukoliv simulaci. Řešením je rozříznutí

součásti a poté nově vzniklé části přiřadit identickou orientaci (Obr. 22). Tento krok je nutné provést ve všech vrstvách. S touto operací souvisí udržení identických elementů sítě, aby nedošlo v uměle vzniklé samostatné části součásti k tvorbě jiných elementů, které by mohly způsobit nepřesnost výsledků.

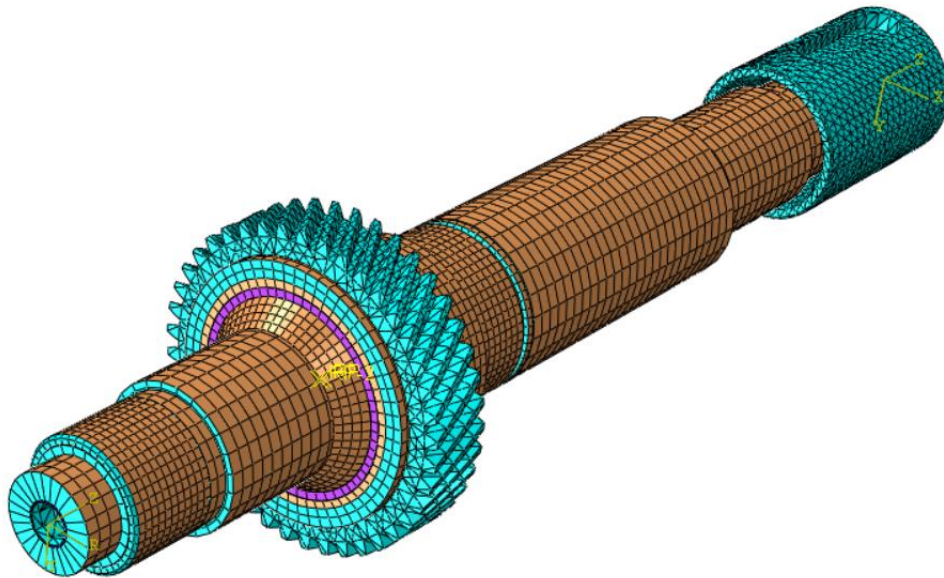


Obr. 21 Orientace elementů – problém

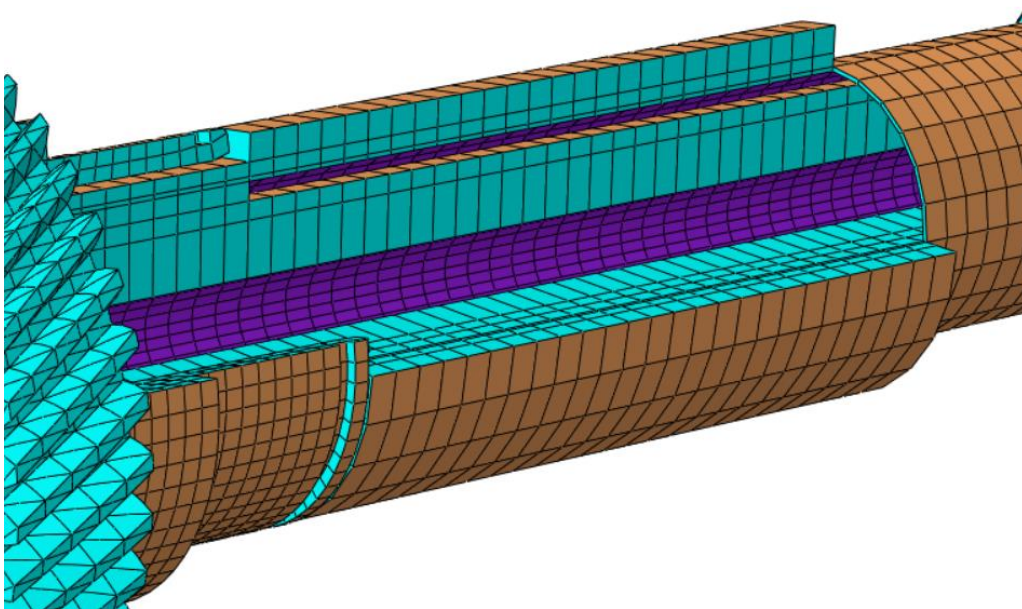


Obr. 22 Orientace elementů – řešení

Na Obr. 23 a Obr. 24 je vyobrazena již celková sestava se správně přiřazenou orientací ve všech částech. Fialový pás na ocelové části v tomto případě nehraje žádnou roli, jelikož ocel je izotropní materiál, který má ve všech směrech stejné chování.



Obr. 23 Hřídel – orientace elementů

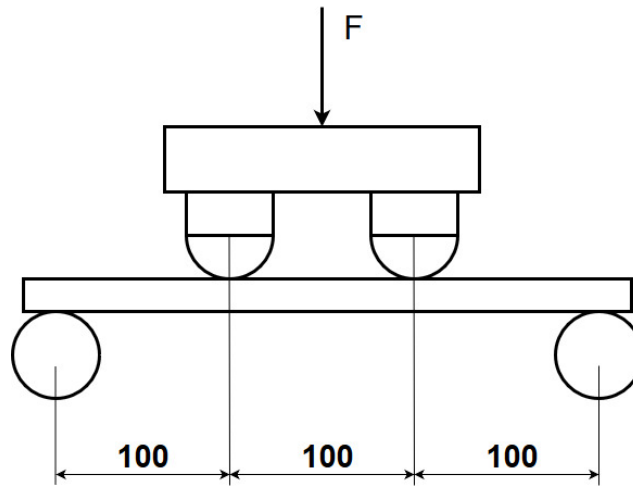


Obr. 24 Hřídel řez – orientace elementů

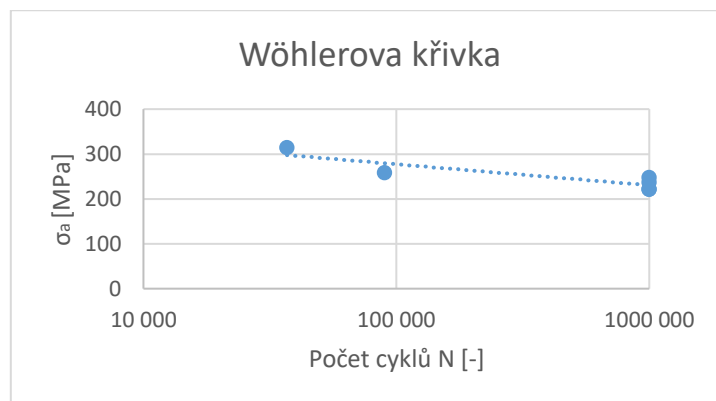
6.2. Cyklické zatěžování v Fe-Safe

Po provedení „jobu“ (simulace), kde staticky působila síla F a moment M_k , v Abaqusu byly výsledky nahrány do programu Fe-Safe. Jedná se o program zabývající se únavou materiálu, který umožňuje simulovat cyklické zatěžování. Fe-Safe pracuje s daty z Abaqusu,

ale je zde nutnost zadat parametry použitých materiálů. Jelikož je však Fe-Safe primárně navržen pro práci s izotropními materiály, tak bylo možné v tomto případě zadat pouze E každého kompozitu v jednom směru. Použity byly hodnoty v hlavních směrech. Jako další parametr byly zadány parametry pro Wöhlerovu křivku. Tyto parametry byly získány z pokusů na hřídeli s podobnou materiálovou strukturou. Tato zkouška byla koncipována jako čtyřbodový ohyb (Obr. 25) a zatížení bylo míjivé. Výsledkem byla Wöhlerova křivka na Obr. 26.



Obr. 25 Schéma zatěžování



Obr. 26 Wöhlerova křivka pokusné hřídele

Jako další krok bylo nutné v Fe-Safe zvolit algoritmus, podle kterého budou veškeré výpočty probíhat. Vzhledem k malému množství známých materiálových parametrů byl zvolen výchozí algoritmus normálové deformace:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} * (2N_f)^b + \varepsilon_f' * (2N_f)^c \quad 34.$$

kde σ_f' součinitel únavové pevnosti a ε_f' součinitel únavové tažnosti, pro které platí:

$$\sigma_f' = 1,67 * R_m = 1,67 * 877,64 = 1465,66 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f' = 0,535$$

kde R_m je mez pevnosti v tahu. Dále bylo nutné do Fe-Safe zadat následující únavové parametry materiálů:

- b - exponent únavové pevnosti
- K' - modul cyklického zpevnění
- n' - exponent cyklického zpevnění
- c - exponent únavové tažnosti

Vzhledem k nedostatku informací byly tyto zbylé parametry aproximovány pomocí Seegrovovy metody:

$$b = -0.095$$

$$K' = 1,61 * R_m$$

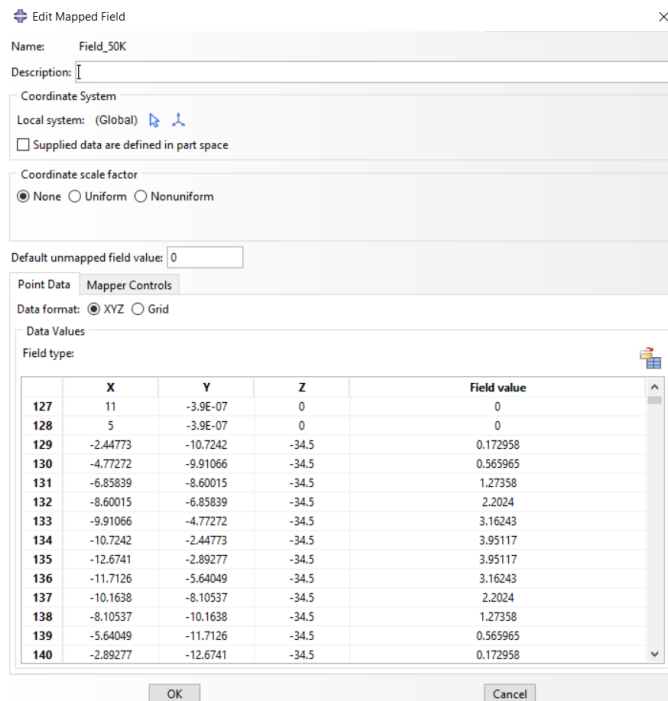
$$n' = 0.11$$

$$c = -0.69$$

Výstupní soubor lze následně otevřít v programu Abaqus. Hlavním získaným parametrem, který byl pro tuto práci důležitý, byl stav poškození (v Fe-Safe značen jako Damage) [16].

6.3. Pole v programu Abaqus

V poslední části bylo nutné zvolit model predikce životnosti. Na základě zvoleného modelu degradace tuhosti byly v závislosti na daném počtu cyklů dopočítány nové predikované parametry materiálu (Youngův modul pružnosti ve všech třech směrech). Tyto nové hodnoty byly dosazeny do materiálových vlastností, které byly propojené s tzv. „Predefined fields“, které odpovídaly stavu součásti po x cyklech v Fe-Safe (poškození po určitém množství cyklů). Tato pole se odkazovala na tzv. „Analytical fields“, ve kterých byly zadefinovány souřadnice jednotlivých uzlů a k nim přiřazena hodnota stavu poškození (Obr. 27).



Obr. 27 Analytical field

Youngův modul pružnosti se poté mění v průběhu času tak, že v uzlu, kde byla dosažena maximální „Damage“, je dosaženo nového předepsaného E . Ostatní uzlům je hodnota přiřazena poměrově – v uzlu, kde je poloviční „Damage“ oproti maximální hodnotě, je hodnota E rovna přesně polovině rozdílu mezi hodnotou na počátku a po daném množství cyklů. Na závěr byla provedena analýza průhybu hřídele a jeho vyhodnocení vzhledem k počtu cyklů. Na Obr. 28 je zobrazeno schéma celého výše popsaného postupu.

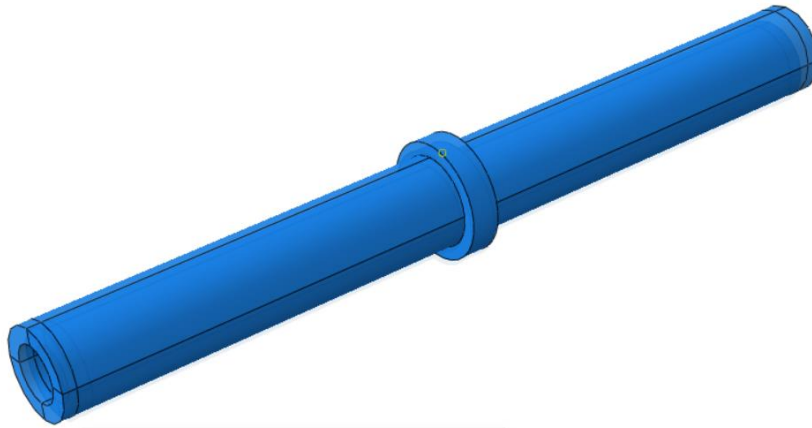


Obr. 28 Schéma celého postupu

7. Ověření funkčnosti postupu

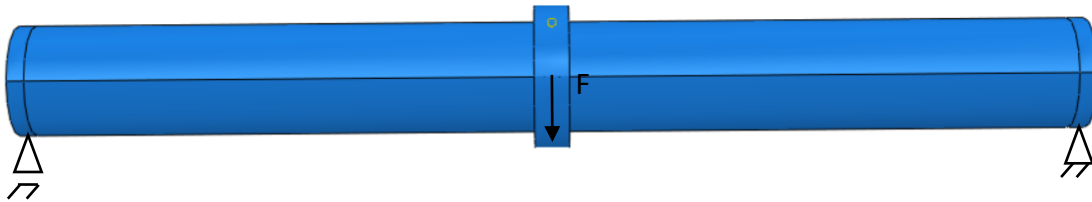
Jelikož se během celého postupu vyskytlo několik překážek, bylo vhodné vytvořit v programu Abaqus jednoduchou kompozitní hřídel (Obr. 29), která se skládala pouze ze 3 kompozitních vrstev materiálu UHM. Tato hřídel sloužila jako experiment každého kroku

uvedeného v Kapitole 6 a zároveň se dalo snáze vyčíst, zda je postup proveditelný. Délka hřídele byla 310 mm, vnější průměr 16 mm a vnitřní průměr 10 mm.

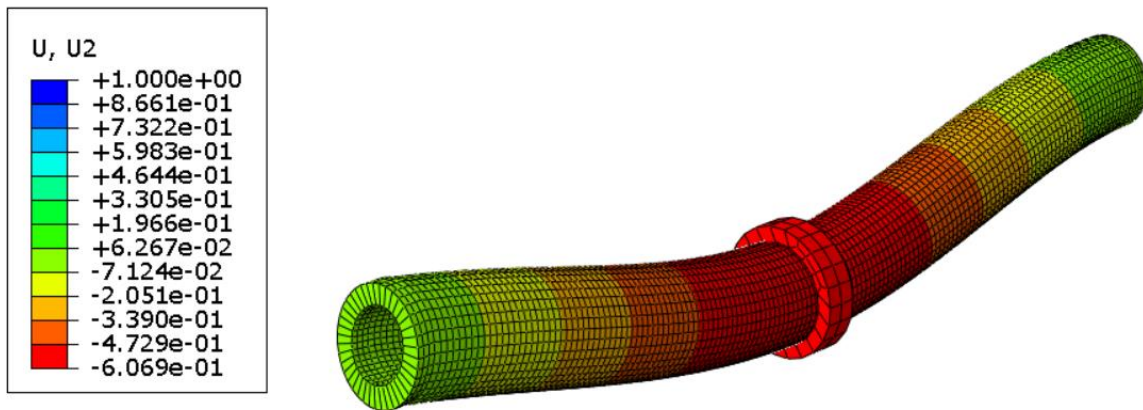


Obr. 29 Pokusná UHM hřídel

Na obou koncích hřídele byly definovány okrajové podmínky – na jednom konci hřídele je posuvná vazba a na druhé rotační (Obr. 30). Na hřídel působí uprostřed ocelová objímka silou o velikosti 500 N a bod jejího působení je v těžišti tělesa. Objímka je v programu Abaqus zavedena jako „rigid body“ a má povolený pohyb pouze ve směru osy y a rotaci kolem své osy. Na Obr. 31 je zobrazen průhyb hřídele ve směru osy y po statickém zatěžování.

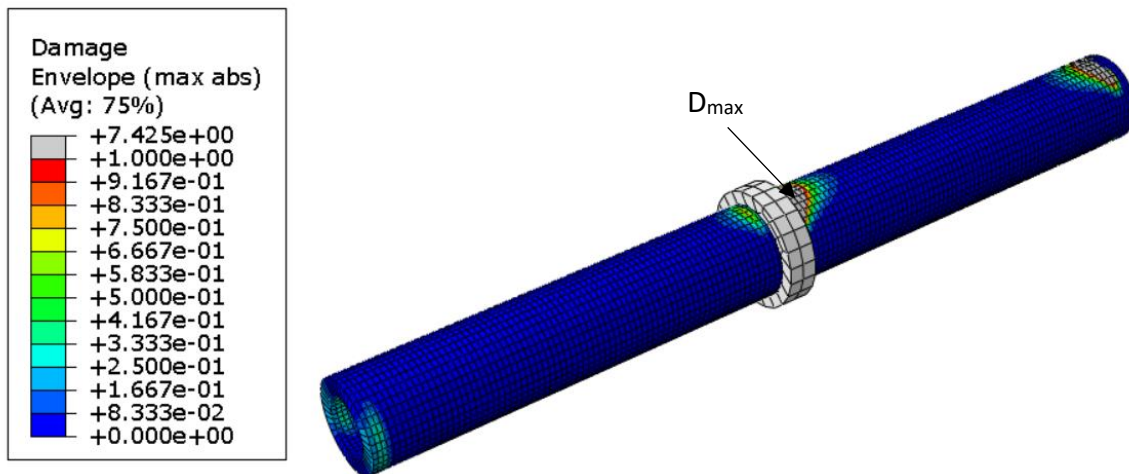


Obr. 30 Okrajové podmínky UHM hřídele



Obr. 31 Statické zatěžování UHM hřídele (průhyb v ose y)

V Fe-Safe byla následně provedena simulace únavy po 100 000 a 500 000 cyklech se střídavým napětím ($R = -1$). Výsledný stav poškození je vyobrazen na Obr. 32, na kterém je pro lepší vyobrazení rozsahu poškození dána stupnice hodnot od 1 do 0. K největšímu poškození došlo v oblasti za ocelovou objímkou (v obrázku znázorněno šedě z důvodu nastaveného rozsahu hodnot). Jelikož je hodnota stavu poškození v několika místech větší než 1, lze konstatovat, že již po 100 000 cyklech dochází na hřídeli k tvorbě trhlin.

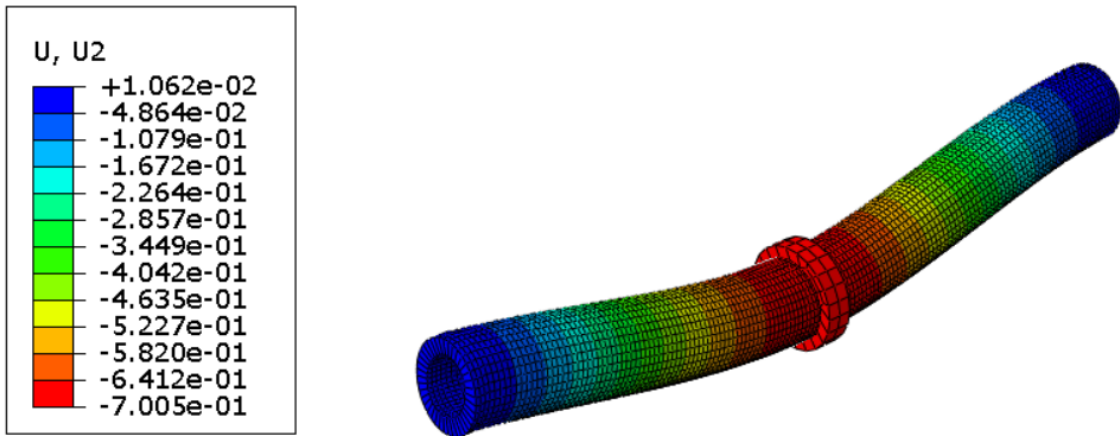


Obr. 32 Stav poškození UHM hřídele po 100 000 cyklech

Po simulaci v Fe-Safe byl jednotlivým uzlům přiřazený stav poškození. Jako model degradace tuhosti byl zvolen Echtermeyerův model (3). Hodnota parametru α byla zvolena 500. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka 2. Na Obr. 33 je zobrazen průhyb po 100 000 cyklech. Maximální hodnota průhybu vzrostla o jednu desetinu mm, což je poměrně velká změna vzhledem k malému počtu cyklů.

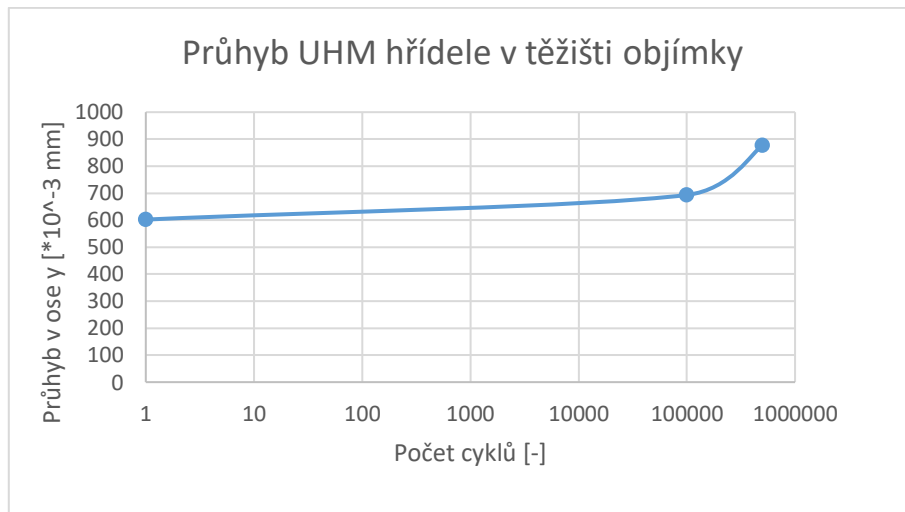
Počet cyklů [-]	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν_{xy} [-]	ν_{xz} [-]	ν_{yz} [-]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]
0	481888	3673	3673	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
100000	479388	1173	1173	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
500000	479038	824	824	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180

Tabulka 2 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM v závislosti na počtu cyklů



Obr. 33 Průhyb UHM hřídele po 100 000 cyklech

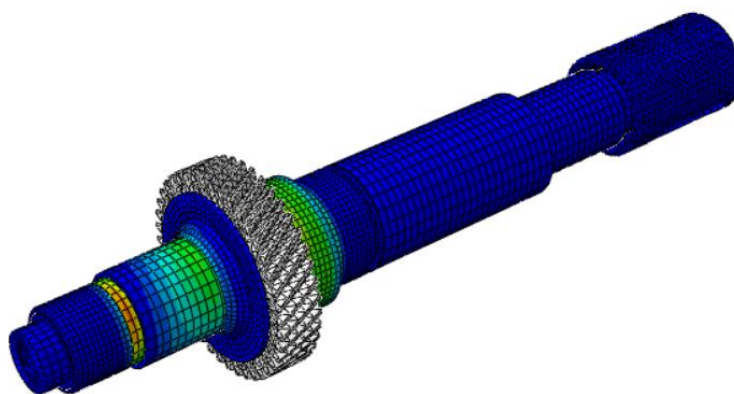
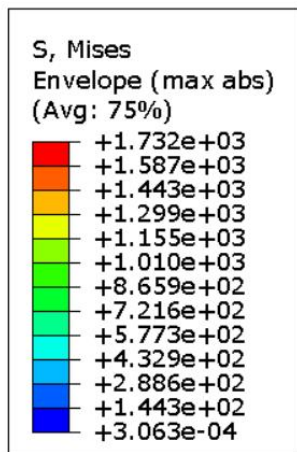
Na Obr. 34 je zobrazen průběh průhybu v těžišti ocelové objímky v závislosti na počtu cyklů, kde po 500 000 cyklech došlo k nárůstu průhybu o téměř 0,2 mm oproti simulaci po 100 000 cyklech.



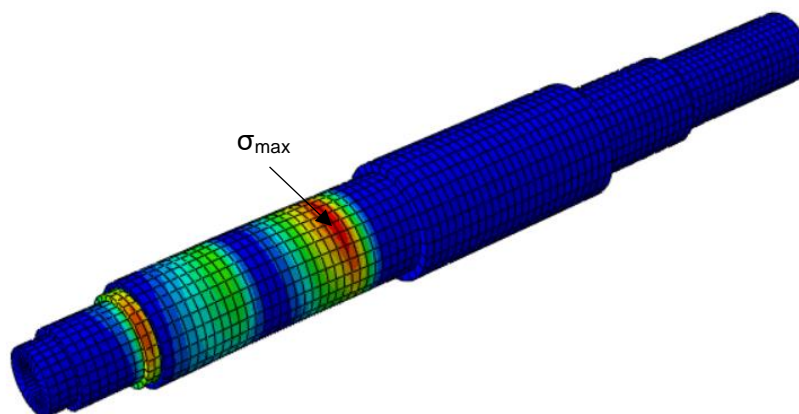
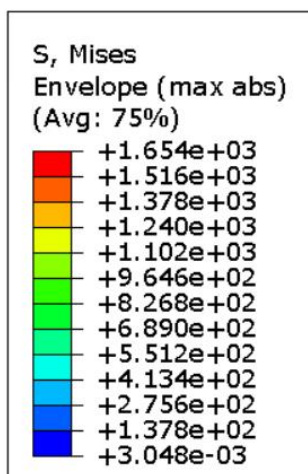
Obr. 34 Průhyb UHM hřídele v závislosti na počtu cyklů

8. Cyklické zatěžování kompozitní hřídele

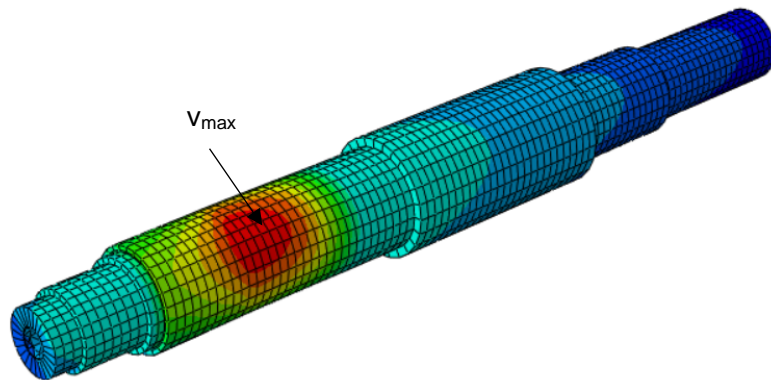
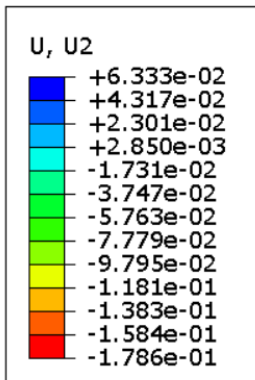
Po ověření postupu byla provedena simulace střídavého cyklického zatěžování na kompozitní hřídeli. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Kapitole 5. Výsledky statického zatěžování jsou zobrazeny na Obr. 35 a Obr. 36. Největší napětí na kompozitní hřídeli bylo dosaženo v oblasti pod ocelovým nábojem. Největší hodnota průhybu byla dosažena přímo pod ocelovým ozubeným kolem – 0,1786 mm (Obr. 37).



Obr. 35 Statické zatěžování kompozitní hřídele

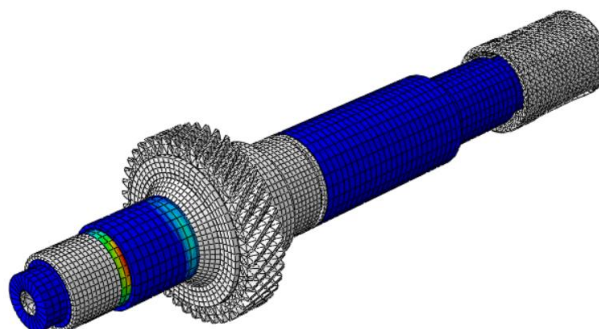
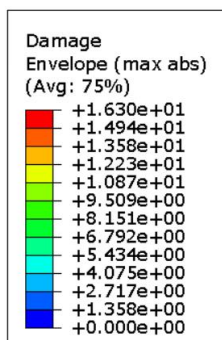


Obr. 36 Statické zatěžování kompozitní hřídele – bez ocelových částí (napětí)

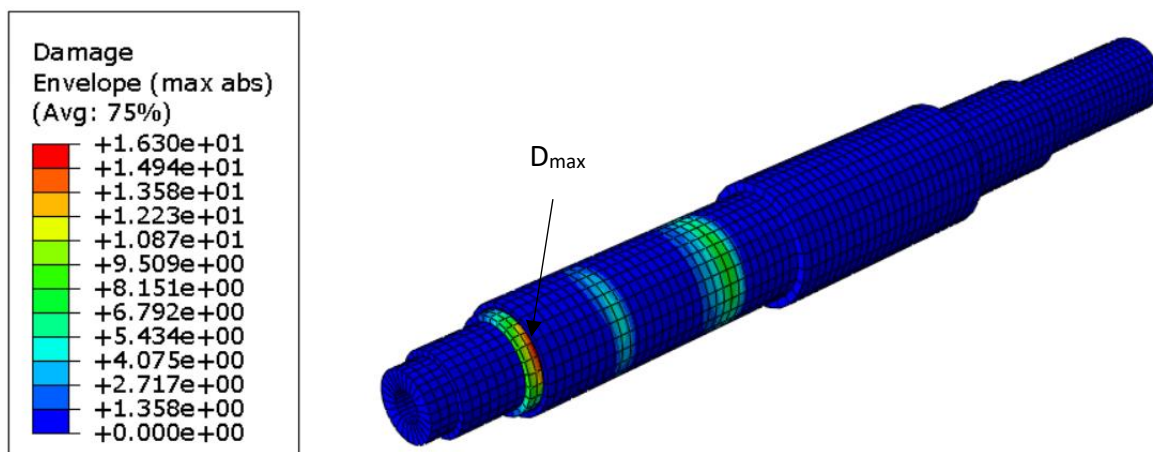


Obr. 37 Statické zatěžování kompozitní hřídele – bez ocelových částí (průhyb v ose y)

Jelikož program Fe-Safe nedokáže po provedení simulace rozdělit jednotlivé části původní sestavy, a tím pádem přiřadit k jednotlivým uzlům čísla na základě součásti sestavy, bylo nutné zadat analýzu pouze kompozitních částí. Z tohoto důvodu se výstupní databázi z programu Fe-Safe vykreslují ocelové součásti šedě ve všech simulacích. Je s nimi počítáno během simulace, ale dle volby jsou poté poskytnuty výsledky pouze požadované části součásti – v tomto případě kompozitní část hřídele. Tato skutečnost nicméně neovlivňuje jakkoliv výsledky této práce, jelikož jejím předmětem je zkoumání kompozitní části hřídele. Zajímavé je, že největší poškození nenastalo v místě s největším napětím, nicméně se jednalo při statickém zatěžování o druhé nejnamáhanější místo (Obr. 38 a Obr. 39). Z Obr. 39 plyne, že maximální hodnoty je dosaženo pouze v jedné malé oblasti, ve které začne docházet k tvorbě trhliny již po několika cyklech (v řádu jednotek). To je dáno extrémními hodnotami zatížení. Při reálných hodnotách zatížení, kterým by mohla být hřídel vystavena, nedošlo k tvorbě trhliny ani po 1 milionu cyklů.

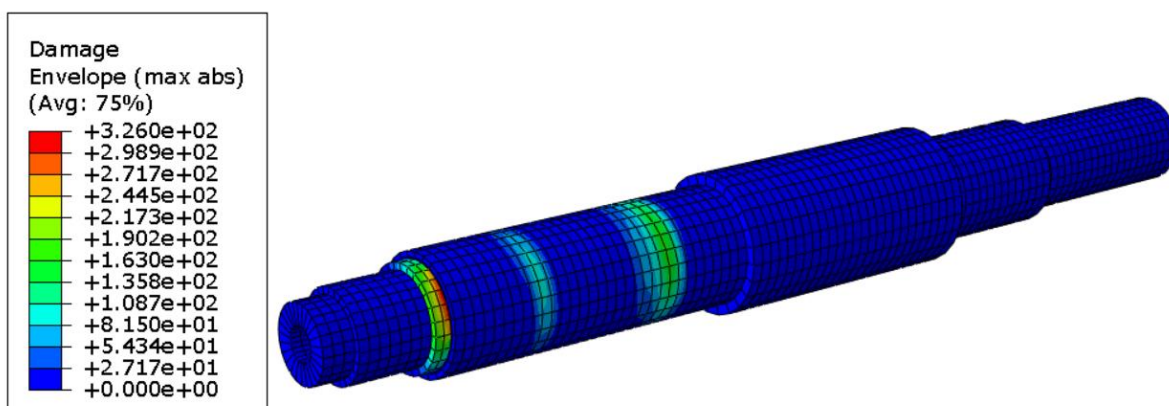


Obr. 38 Stav poškození po 50 000 cyklech



Obr. 39 Stav poškození po 50 000 cyklech – pouze kompozit

Následně byla stejná simulace provedena pro 100 000, 250 000, 500 000, 750 000 a 1 000 000 (Obr. 40) cyklů. Stejně jako u pokusné hřídele byl zvolen jako model degradace tuhosti Echtermeyerův model (3). Hodnota parametru α byla opět poměrně extrémní, aby byly změny na dané simulaci viditelné – 250. Je nutné zdůraznit, že se jedná o extrémní hodnoty jak v zatížení, tak v parametrech modelu, jelikož cílem této diplomové práce je ukázat celou metodiku postupu. Při reálných zatíženích by byly změny na celé hřídeli téměř nulové a celá simulace by postrádala význam, jelikož by nedošlo k většímu poškození ani po 1 milionu cyklů, jak bylo simulacemi ověřeno.



Obr. 40 Stav poškození po 1 000 000 cyklů – pouze kompozit

Poté bylo nutné přiřadit hodnoty stavu poškození k jednotlivým uzlům a ty následně v Abaqusu spojit s novými materiálovými vlastnostmi dle Echtermeyerova modelu degradace tuhosti. Tyto materiálové vlastnosti jednotlivých kompozitních materiálů jsou uvedeny v Tabulka 3, Tabulka 4, Tabulka 5.

Počet cyklů [-]	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν_{xy} [-]	ν_{xz} [-]	ν_{yz} [-]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]
0	481888	3673	3673	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
50000	480713	2498	2498	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
100000	480638	2423	2423	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
250000	480539	2324	2324	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
500000	480463	2248	2248	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
750000	480419	2204	2204	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
1000000	480388	2173	2173	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180

Tabulka 3 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM v závislosti na počtu cyklů

Počet cyklů [-]	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν_{xy} [-]	ν_{xz} [-]	ν_{yz} [-]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]
0	421948	3673	3673	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
50000	420773	2498	2498	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
100000	420698	2423	2423	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
250000	420599	2324	2324	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
500000	420523	2248	2248	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
750000	420479	2204	2204	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180
1000000	420448	2173	2173	0.371	0.003	0.003	3180	3180	3180

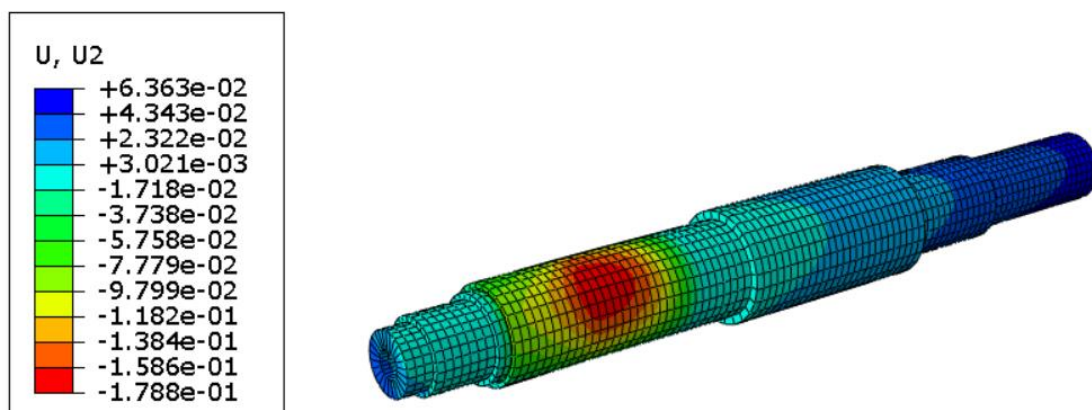
Tabulka 4 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM2 v závislosti na počtu cyklů

Počet cyklů [-]	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	Nu_{xy} [-]	Nu_{xz} [-]	Nu_{yz} [-]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]
0	128188	4993	4993	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
50000	127013	3818	3818	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
100000	126938	3743	3743	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
250000	126839	3644	3644	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
500000	126763	3568	3568	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
750000	126719	3524	3524	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352
1000000	126688	3493	3493	0.339	0.013	0.013	3352	3352	3352

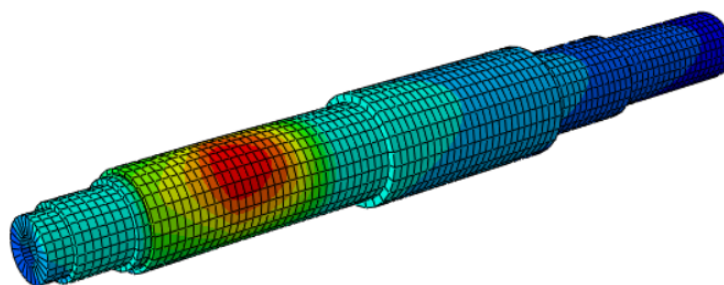
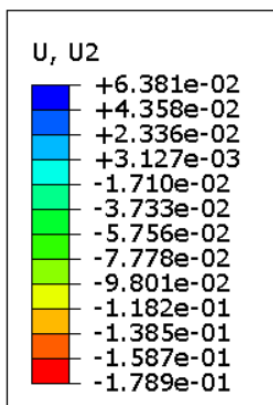
Tabulka 5 – Materiálové vlastnosti materiálu HS v závislosti na počtu cyklů

U všech tří materiálů je zjevný velký skok v materiálových vlastnostech po 50 000 cyklech. Tato skoková změna je dána velikostí parametru α . Pokud by byla hodnota tohoto parametru rovna např. 2, byla by změna materiálových vlastností po 50 000 cyklech řádově stejná jako mezi 50 000 a 100 000 cykly. Nicméně v takovém případě by byly rozdíly v napětí po výše stanovených počtech cyklů v řádu jednotek MPa a změny průhybu by řádově byly v 10^{-6} mm.

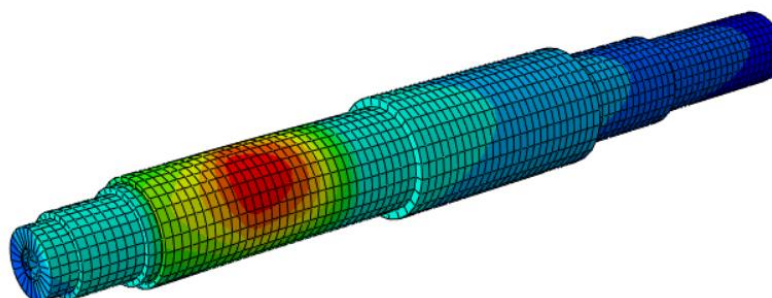
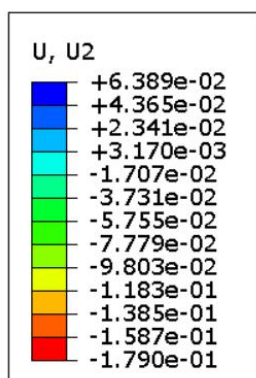
I přes extrémní hodnoty parametru α nebylo dosaženo výraznějšího průhybu ani změn napětí. Místo maximálního průhybu zůstalo nezměněno. Na Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43 je zobrazen průhyb kompozitní hřídele v ose y po daném množství cyklů.



Obr. 41 Průhyb kompozitní hřídele po 50 000 cyklech

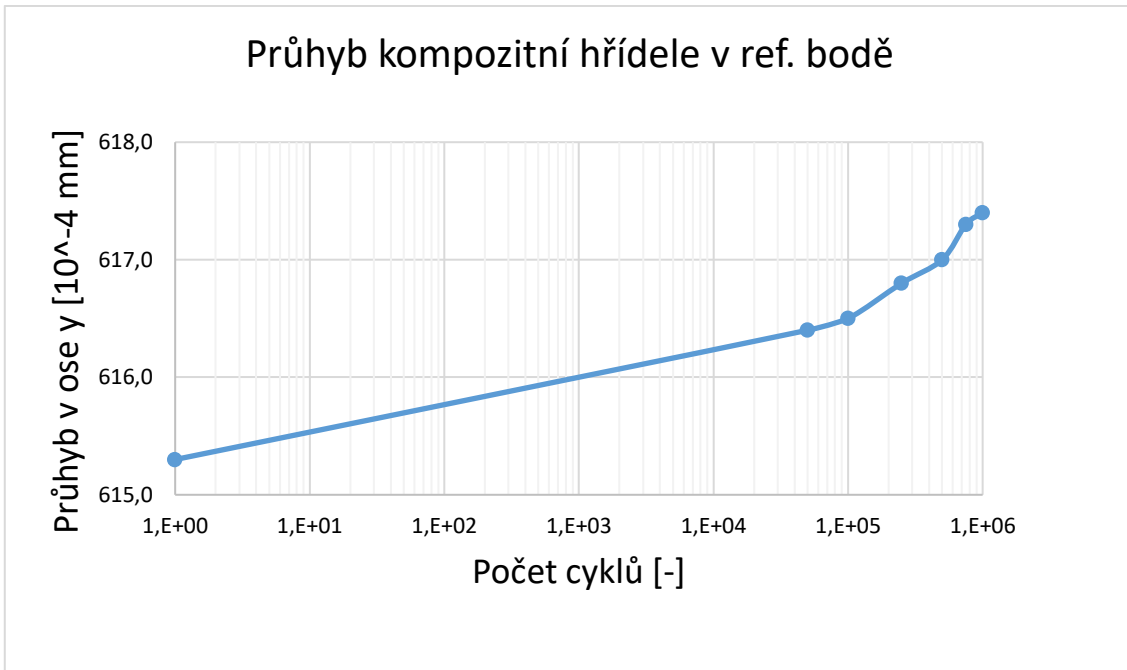


Obr. 42 Průhyb kompozitní hřídele po 500 000 cyklech

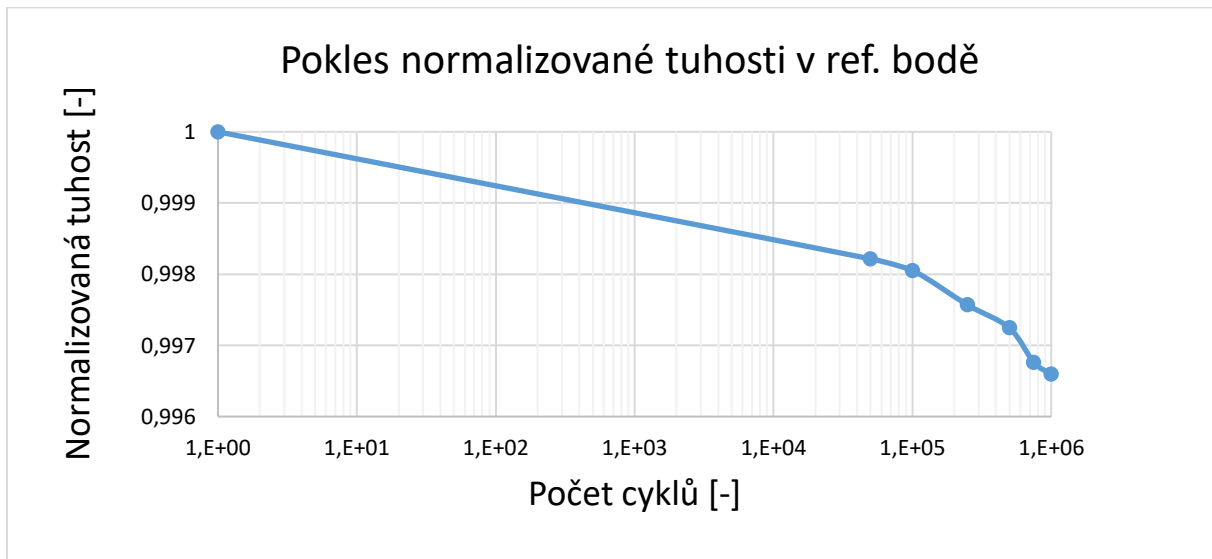


Obr. 43 Průhyb kompozitní hřídele po 1 000 000 cyklů

I průhyb v řádu desetitisícin mm by měl na záběr ozubených kol nepatrný vliv, ale při daných hodnotách zatížení je závěrem, že hřídel je opravdu předimenzována jak rozměry, tak materiálovými vlastnostmi. Na Obr. 44 je zobrazen průběh průhybu v referenčním bodě kompozitní hřídele (Obr. 15), který je umístěn ve středu ozubeného kola, v závislosti na počtu cyklů. I při zanedbání počáteční skokové změny mezi 0 a 50 000 cykly je patrné, že změna průhybu byla ke konci simulace při vysokém počtu cyklů již velmi malá oproti počátku. Je nutné nicméně zdůraznit, že se jedná o změny v řádech desetitisícin mm. Na Obr. 45 je vyneseno pokles normalizované tuhosti v závislosti na počtu cyklů (opět v referenčním bodě).



Obr. 44 Průhyb kompozitní hřídele v závislosti na počtu cyklů



Obr. 45 Pokles normalizované tuhosti kompozitní hřídele v závislosti na počtu cyklů

Posledním zajímavým bodem bylo, že místo největšího průhybu nebylo vůbec poblíž místa s největším stavem poškození. Nicméně v oblasti, kde došlo k maximálnímu průhybu, byly zaznamenány určité hodnoty stavu poškození.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést rešerši v oblasti únavy kompozitních materiálů a následně v praktické části vymyslet postup, jak provést simulaci degradace tuhosti kompozitního materiálu, konkrétně za využití stavu poškození. Přestože nejsou k dispozici programy, které by byly přímo určené pro tento úkol, podařilo se vytvořit postup, který lze aplikovat na jakékoliv budoucí simulace při zkoumání únavy kompozitního materiálu. Daná hřídel, která byla předmětem této diplomové práce, je nicméně natolik předimenzovaná, že nelze ani při extrémních hodnotách zatížení dojít k výraznějším změnám v průhybu. Určitě by bylo v budoucnu zajímavé provést simulace na jiných kompozitních součástech a zároveň k tomu provést zkoušky na ověření celého postupu. Je důležité zmínit, že určitě mohou nastat nepatrné odchylky při praktických experimentech z důvodu toho, že Fe-Safe počítal s materiálem jako izotropním, nicméně program zároveň citlivě reaguje na materiálové změny provedené v Abaqusu, a tudíž by odchylky způsobené touto skutečností neměly být příliš velké. Určitě bude také zajímavé provést porovnání výsledků, až bude v budoucnu dostupný program podobný Fe-Safe (nebo rozšíření funkcí Fe-Safe) určený přímo pro kompozity.

Bibliografie

1. Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní. *Kompozitní materiály*. [Online] [Citace: 15. 03. 2021] http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf.
2. VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*, Brno : Fakulta strojního inženýrství v Brně, 2008. [Online] [Citace: 10. 05. 2021] https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
3. *PREFA KOMPOZITY*. [Online] [Citace: 14. 03. 2021] <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/co-je-to-kompozit/>.
4. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. [Online] [Citace: 25. 09. 2021] <https://polymer-composites.cz/category/technologie/>.
5. STAFF, W. A Brief History of Aircraft Materials. *THOMAS*. [Online] 12. 11 2019. [Citace: 15. 03. 2021] <https://bit.ly/3qRGF4D>.
6. A Brief History of Composites Materials. *SMI Composites*. [Online] [Citace: 05. 04. 2021] <https://smicomposites.com/then-now-a-brief-history-of-composites-materials/>.
7. STRONG, B. History of Composite Materials. *YUMPU*. [Online] 2013. [Citace: 15. 03. 2021] <https://www.yumpu.com/en/document/read/7139494/history-of-composite-materials-opportunities-dr-brent-strong>.
8. BEK, L. *Únava kompozitních materiálů*. 2014.
9. ALAM, P., MAMALIS, D., ROBERT, C., FLOREANI, C, BRÁDAIGH, C. M. *The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review*. The University od Edinburgh, 2019.
10. KÖHLER, J., MAGINO, N., ANDRÄ, H., WELSCHINGER, F., MÜLLER, R., SCHNEIDER, M. *A computational multi-scale model for the stiffness degradation of short-fiber reinforced plastics subjected to fatigue loading*. 2020.
11. Vacmobiles. *What is resin infusion (or vacuum infusion)?* [Online] [Citace: 20. 03. 2021] https://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html#:~:text=In%20the%20field%20of%20composites,into%20a%20unified%20rigid%20composite..
12. RŮŽIČKA, M. *ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ*. 2019.
13. ZIEMAN, C.,W., ZIEMAN, R.,D., HAILE, K.,V. *Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts*. Lewisburg : Bucknell University, Department of Mechanical Engineering, Lewisburg, 2016.
14. KULÍŠEK, V. *Výpočty kompozitních komponent pomocí metody konečných prvků*. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2016. [Online] [Citace 10. 10. 2021] http://drone.fsid.cvut.cz/mcmfolder/MKP_kompozity_2021.pdf

15. Applying a mesh stack orientation. *Abaqus Documentation*. [Online] [Citace: 10. 03. 2022] <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAECAERefMap/simacae-t-mgnattributesstack.htm>.

16. Strain Based Fatigue Analysis. *Autodesk help*. [Online] [Citace: 11. 04. 2022] <https://help.autodesk.com/view/ASMECH/2014/ENU/?guid=GUID-ECD9AB-BE65-43A3-9ECB-D25C38606A3E>.

Seznam obrázků

Obr. 1 Různá uspořádání vláken kompozitů [1]	10
Obr. 2 Navíjení kompozitu [4]	11
Obr. 3 Rozvoj typů poškození během zatěžování kompozitu [9]	12
Obr. 4 Wöhlerovy křivky tří kompozitů s různými typy vláken [9].....	14
Obr. 5 Mechanismy poškození kompozitu s odlišně orientovanými karbonovými vlákny [9]	15
Obr. 6 Porovnání jednotlivých modelů při zatěžování skelného laminátu [8].....	18
Obr. 7 Graf závislosti E-N [13]	20
Obr. 8 Graf závislosti D-N [13].....	21
Obr. 9 Deformace stěny [2]	23
Obr. 10 Průběh složky deformace a napětí ve směru x [2]	25
Obr. 11 Uvolněný element desky [2].....	26
Obr. 12 Kompozitní hřídel	28
Obr. 13 Materiálová skladba hřídele	28
Obr. 14 Výchozí model kompozitní hřídele	29
Obr. 15 Model kompozitní hřídele	29
Obr. 16 Výkres kompozitní části hřídele	30
Obr. 17 Výkres sestavy	30
Obr. 18 Okrajové podmínky	31
Obr. 19 Tvorba sítě – nařezání součásti	32
Obr. 20 Orientace elementů [15]	32
Obr. 21 Orientace elementů – problém.....	33
Obr. 22 Orientace elementů – řešení.....	33
Obr. 23 Hřídel – orientace elementů	34
Obr. 24 Hřídel řez – orientace elementů	34
Obr. 25 Schéma zatěžování	35
Obr. 26 Wöhlerova křivka pokusné hřídele	35
Obr. 27 Analytical field	37
Obr. 28 Schéma celého postupu	37
Obr. 29 Pokusná UHM hřídel.....	38
Obr. 30 Okrajové podmínky UHM hřídele.....	38
Obr. 31 Statické zatěžování UHM hřídele (průhyb v ose y)	39
Obr. 32 Stav poškození UHM hřídele po 100 000 cyklech	39
Obr. 33 Průhyb UHM hřídele po 100 000 cyklech.....	40
Obr. 34 Průhyb UHM hřídele v závislosti na počtu cyklů	40
Obr. 35 Statické zatěžování kompozitní hřídele	41
Obr. 36 Statické zatěžování kompozitní hřídele – bez ocelových částí (napětí).....	41
Obr. 37 Statické zatěžování kompozitní hřídele – bez ocelových částí (průhyb v ose y).....	42
Obr. 38 Stav poškození po 50 000 cyklech	42
Obr. 39 Stav poškození po 50 000 cyklech – pouze kompozit	43
Obr. 40 Stav poškození po 1 000 000 cyklů – pouze kompozit.....	43
Obr. 41 Průhyb kompozitní hřídele po 50 000 cyklech	45

Obr. 42 Průhyb kompozitní hřídele po 500 000 cyklech	46
Obr. 43 Průhyb kompozitní hřídele po 1 000 000 cyklů.....	46
Obr. 44 Průhyb kompozitní hřídele v závislosti na počtu cyklů	47
Obr. 45 Pokles normalizované tuhosti kompozitní hřídele v závislosti na počtu cyklů	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Materiálové vlastnosti použitých kompozitů	29
Tabulka 2 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM v závislosti na počtu cyklů.....	40
Tabulka 3 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM v závislosti na počtu cyklů.....	44
Tabulka 4 – Materiálové vlastnosti materiálu UHM2 v závislosti na počtu cyklů.....	44
Tabulka 5 – Materiálové vlastnosti materiálu HS v závislosti na počtu cyklů	45

Přílohy

V příloze této diplomové práce jsou modely kompozitní a pokusné UHM hřídele. Dále jsou zde také přiloženy veškeré použité výstupní databáze z programu Abaqus a Fe-Safe a Excel soubory, které sloužily k tvorbě „Analytical fields“. Vzhledem k velikosti celé složky jsou tyto přílohy dostupné pouze na USB flash disku, který je přiložen k tištěné verzi této diplomové práce.