

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A
KOLEJOVÝCH VOZIDEL



DIPLOMOVÁ PRÁCE

SPOJENÍ OCELOVÉ HŘÍDELE A KOMPOZITNÍHO NÁBOJE
CONNECTION OF STEEL SHAFT AND COMPOSITE HUB

AUTOR: Bc. Jan Myslivec
STUDIJNÍ PROGRAM: Dopravní a transportní technika
SPECIALIZACE: Motorová vozidla
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Kazda

PRAHA 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Myslivec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **475012**
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:

Spojení ocelové hřídele a kompozitního náboje

Název diplomové práce anglicky:

Connection of steel shaft and composite hub

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši, která bude obsahovat stav současného poznání v oblasti spojů kovu a kompozitního materiálu. Dále by měla obsahovat základní přehled o kompozitních materiálech, technologiích jejich výroby a výpočtech. Navrhněte a proveďte experiment, kterým otestujete vlastnosti spoje ocel-kompozit realizovaného drážkováním. Návrh experimentu zahrnuje návrh metod zkoušení, konstrukci zkušebních vzorků (včetně zjednodušeného výpočtu) a přípravků ke zkušebnímu stanovišti a návrh parametrů zkoušek.

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: **19.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Lukáš Kazda
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, 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 práce pojednává o možnostech spojování součástí vyrobených z kompozitních materiálů a kovů. Zabývá se návrhem a testováním tvarově lisovaného spoje kompozitní trubky a ocelové hřídele. Součástí práce je obecné seznámení s kompozitními materiály, jsou představeny technologie výroby součástí z takových materiálů a také mechanika kompozitních materiálů a jejich pevnostní kritéria. Hlavním tématem je však návrh a MKP analýza samotného spoje.

Klíčová slova

kompozitní materiály, mechanika kompozitů, pevnostní kritéria kompozitů, spojování kompozitů a kovů, tvarově lisovaný spoj, MKP

Annotation

This thesis deals with possibilities of bonding parts made of composite materials and irons. It concerns design and examination of a shape-pressed bond of a composite tube and a steel shaft. The thesis includes an explanation of composite materials in general, technologies of production of parts made of such materials and composite mechanics and their failure theories. However, key focus is the design and FEM analysis of the bond.

Keywords

Composite materials, composite mechanics, failure criteria of composite materials, bonding of composites and irons, shape-pressed bond, FEM

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukáši Kazdovi za odborný dohled, cenné rady a připomínky, trpělivost a čas věnovaný konzultacím. Dále děkuji společnosti CompoTech Plus za odbornou pomoc a konzultaci technologických možností výroby vedoucí k optimálnímu návrhu spoje.

OBSAH

1. Seznam použitého značení	13
2. Úvod	17
3. Obecná charakteristika kompozitů	18
4. Rozdělení kompozitů	20
4.1. Rozdělení podle disperzní fáze	20
4.2. Rozdělení podle rozměru výztuže	20
4.3. Rozdělení podle tvaru výztuže	21
4.4. Rozdělení podle materiálu výztuže	27
4.5. Rozdělení podle materiálu matrice	28
5. Technologie výroby kompozitů	31
5.1. Ruční kladení	32
5.2. Lisování	32
5.3. Injekční vstřikování	33
5.4. Pultruze	34
5.5. Navíjení	34
6. Mechanické namáhání kompozitů	35
6.1. Napětí a deformace	36
6.2. Mechanismy porušení kompozitů	38
6.3. Pevnostní kritéria	39
6.3.1. Kritérium maximálního napětí	40
6.3.2. Kritérium maximální deformace	41
6.3.3. Tsai-Hillovo kritérium	43
6.3.4. Hoffmanovo kritérium	44
6.3.5. Tsai-Wu kritérium	44
6.3.6. Hashinovo kritérium	46
6.3.7. Puckovo kritérium	47
6.3.8. Kritérium LaRC04	47
6.3.9. Mori-Tanaka kritérium	47
6.3.10. Teorie fázového pole	48
7. Spojování kompozitů s kovy	49
7.1. Nýtové a šroubové spoje	49
7.2. Lepené spoje	52



7.3.	Nalisované spoje	52
7.4.	Integrované spoje.....	53
7.5.	Tvarově lisované spoje.....	53
8.	Návrh tvarově lisovaného spoje	54
8.1.	Pevnostní výpočty.....	54
8.2.	Návrh drážkování.....	58
8.3.	Design zkušebních vzorků.....	63
8.3.1.	Kompozitní trubka	63
8.3.2.	Ocelová hřídel.....	64
8.3.3.	Tvarově lisovaný spoj.....	66
9.	Pevnostní kontrola spoje.....	68
9.1.	Analytický přístup.....	68
9.1.1.	Tlaky mezi vrstvami po nalisování	68
9.1.2.	Hashinovo pevnostní kritérium.....	69
9.2.	Metoda konečných prvků	70
9.2.1.	Tlaky mezi vrstvami po nalisování	72
9.2.2.	Vliv délky omotávky na lisovací tlak.....	75
9.2.3.	Hashinovo pevnostní kritérium.....	76
9.3.	Diskuse výsledků	79
10.	Zkoušení spoje.....	81
10.1.	Lisovací tlak	81
10.2.	Statický krut.....	82
11.	Závěr.....	85
12.	Reference	87
12.1.	Seznam obrázků.....	87
12.2.	Seznam tabulek.....	90
12.3.	Seznam rovnic.....	91
12.4.	Seznam příloh.....	93
12.5.	Seznam citovaných zdrojů	94

1. SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

E	[MPa]	Modul pružnosti kompozitu
ρ	[kg/m ³]	Hustota kompozitu
σ_{pt}	[MPa]	Pevnost kompozitu
$\sigma(\mathbf{P})$	[MPa]	Tenzor napětí
$\sigma_1, \dots, \sigma_6$	[MPa]	Prvky vektoru napětí
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	[MPa]	Normálové složky napětí v souřadnicovém systému $O(1,2,3)$
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	[MPa]	Normálové složky napětí v souřadnicovém systému $O(x,y,z)$
$\sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}$	[MPa]	Smykové složky napětí v souřadnicovém systému $O(1,2,3)$
$\sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy}$	[MPa]	Smykové složky napětí v souřadnicovém systému $O(x,y,z)$
$\varepsilon(\mathbf{P})$		Tenzor deformace
$\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$		Prvky vektoru deformace
$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$		Poměrná prodloužení (deformace) v souřadnicovém systému $O(1,2,3)$
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$		Poměrná prodloužení (deformace) v souřadnicovém systému $O(x,y,z)$
$\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$		Zkosity v souřadnicovém systému $O(1,2,3)$
$\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$		Zkosity v souřadnicovém systému $O(x,y,z)$
\mathbf{C}	[MPa]	Matice tuhosti
C_{11}, \dots, C_{66}	[MPa]	Prvky matice tuhosti
\mathbf{S}	[MPa ⁻¹]	Matice poddajnosti
S_{11}, \dots, S_{66}	[MPa ⁻¹]	Prvky matice poddajnosti
E_L, E_1	[MPa]	Podélný modul pružnosti příčně izotropního materiálu
E_T, E_2	[MPa]	Příčný modul pružnosti příčně izotropního materiálu
G, G_{12}	[MPa]	Smykový modul příčně izotropního materiálu
ν_{12}, μ_{rt}		Hlavní Poissonova konstanta příčně izotropního materiálu
ν_{23}		Vedlejší Poissonova konstanta příčně izotropního materiálu
X^C, Y^C, Z^C	[MPa]	Meze pevnosti v tlaku ve směrech x, y, z
X^T, Y^T, Z^T	[MPa]	Meze pevnosti v tahu ve směrech x, y, z
S^L	[MPa]	Podélná smyková pevnost



$X_{\varepsilon}^C, Y_{\varepsilon}^C$		Mezní deformace v tlaku v podélném a příčném směru
$X_{\varepsilon}^T, Y_{\varepsilon}^T$		Mezní deformace v tahu v podélném a příčném směru
S_{ε}^L		Mezní zkos
f_i, f_{ij}	[MPa]	Tenzory pevnosti prvního a druhého řádu
f_{12}^*		Vazebný koeficient pro Tsai-Wu kritérium pevnosti
τ_k	[MPa]	Napětí v krutu
M_k	[Nmm]	Krouticí moment
W_k	[mm ³]	Průřezový modul
τ_D	[MPa]	Dovolené napětí v krutu
ε_t		Tečná deformace
E_t	[MPa]	Tečný modul pružnosti
σ_t	[MPa]	Tečné napětí
E_r	[MPa]	Radiální modul pružnosti
σ_r	[MPa]	Radiální napětí
p_i	[MPa]	Vnitřní tlak v silnostěnné nádobě
r_i	[mm]	Vnitřní poloměr silnostěnné nádoby
p_e	[MPa]	Vnější tlak v silnostěnné nádobě
r_e	[mm]	Vnější poloměr silnostěnné nádoby
δ_{lis}	[mm]	Lisovací deformace u lisovaného spoje
Δr_1	[mm]	Změna vnitřního poloměru trubky u lisovaného spoje
Δr_0	[mm]	Změna vnějšího poloměru hřídele u lisovaného spoje
p_{01}	[MPa]	Tlak mezi hřídelí a vrstvou 1 trubky po nalisování
p_{12}	[MPa]	Tlak mezi vrstvami 1 a 2 trubky po nalisování
p_{23}	[MPa]	Tlak mezi vrstvami 2 a 3 trubky po nalisování
σ_{IL}	[MPa]	Interlaminární napětí
l_{spoj}	[mm]	Délka lisovaného spoje
f_{fikt}		Fiktivní koeficient tření tvarově lisovaného spoje
A_t	[mm ²]	Plocha zubu
h_t	[mm]	Výška zubu
x_t	[mm]	Výška zaoblené části u zubu
α_t	[°]	Úhel zubu
R	[mm]	Střední poloměr drážkování

φ_t	[°]	Roztečný úhel zubu
δ	[°]	Úhel mezi drážkou a zubem
x_i	[mm]	Výška zaoblené části nad drážkou
A_g	[mm ²]	Plocha drážky
h_g	[mm]	Výška drážky
x_g	[mm]	Výška zaoblené části u drážky
α_g	[°]	Úhel drážky
φ_g	[°]	Roztečný úhel drážky
D_0	[mm]	Vnitřní průměr kompozitní trubky
t_1	[mm]	Tloušťka vrstvy 1 kompozitní trubky
t_2	[mm]	Tloušťka vrstvy 2 kompozitní trubky
t_3	[mm]	Tloušťka vrstvy 3 kompozitní trubky
l_T	[mm]	Délka kompozitní trubky
l_3	[mm]	Délka vrstvy 3 kompozitní trubky
d	[mm]	Střední průměr hřídele
l_H	[mm]	Délka hřídele
D_{FT}^{Vi}		Hashinův koeficient módu porušení vláken v tahu
D_{FC}^{Vi}		Hashinův koeficient módu porušení vláken v tlaku
D_{MT}^{Vi}		Hashinův koeficient módu porušení matrice v tahu
D_{MC}^{Vi}		Hashinův koeficient módu porušení matrice v tlaku



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

2. ÚVOD

Kompozitní materiály se považují za nejpokrokovější materiály dnešní doby. Původní vojenská použití za druhé světové války podnítila v široké míře jejich komerční aplikace koncem 40. a začátkem 50. let minulého století zejména v lodním průmyslu. Dnes je na kompozitních materiálech závislý zejména letecký a automobilový průmysl, z kompozitních materiálů se čím dál více vyrábějí sportovní potřeby a výjimkou není ani jejich použití jako konstrukčních prvků. [1][2]

Atraktivita kompozitních materiálů spočívá v nízké hmotnosti, poměrně atraktivní ceně, variabilitě materiálů samotných a tím i dosažení požadovaných mechanických vlastností. Všechny zmíněné výhody souvisí se základní definicí kompozitů, která charakterizuje kompozit jako materiál, který je zhotoven ze dvou či více různých fází. Nastává tedy situace, kdy je možné kombinovat například lehké a levné plasty s různě mechanicky odolnými vlákny. Výsledkem je materiál, který má nižší hmotnost, lepší mechanické vlastnosti a v případě velkosériové výroby je levnější, než kdyby měl být takový materiál zhotoven z materiálu výztuže v kompaktní formě. [1]

S rostoucím zájmem o kompozitní materiály v automobilovém průmyslu přichází i otázka, jak tyto prvky spojit s ostatními materiály, zejména s ocelí, případně s hliníkem. Vzniká řada možných návrhů vzhledem k povaze aplikace. Každé takové řešení musí vyhovovat z hlediska únosnosti. Než se návrh promění ve skutečnou hmatatelnou součást automobilu, byť třeba jen předmětem zkušebního testování, musí projít řadou analýz a mechanických zkoušek. Na začátku je konstrukční návrh, vycházející z určitých teoretických základů a povaze namáhání, první odpověď na funkčnost daného spoje nabídne simulace metodou konečných prvků, směrodatné jsou však zpravidla výsledky statických a únavových zkoušek.

3. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA KOMPOZITŮ

Kompozitem je nazýván takový materiál, který je složen ze dvou nebo více složek, respektive fází, které se obvykle liší v chemickém složení, fyzikálních a mechanických vlastnostech. Obecně se jedná o matrici a disperzní fázi (výztuž, plnivo). Za výztuž se v kompozitním materiálu považuje ta fáze, která je diskontinuální, tedy nespojitá, a vykazuje podstatně lepší mechanické vlastnosti (tvrdost, tuhost, pevnost) než matrice, která je spojitá v celém objemu a je obvykle poddajnější. [1][3]

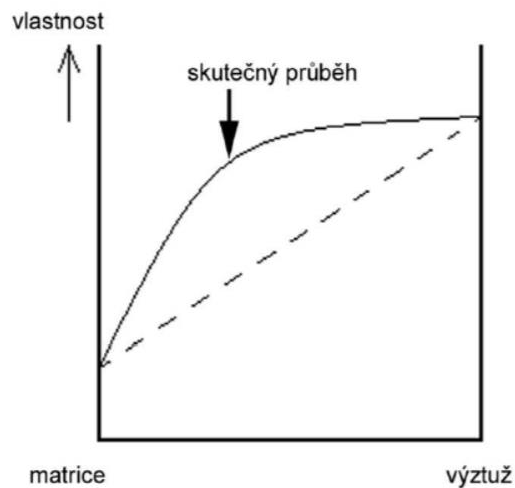
PODMÍNKY PŘI DEFINOVÁNÍ KOMPOZITU

Za klíčovou podmínku při definování kompozitu se považuje vícefázové složení materiálu. Existují však i další podmínky, které musí být splněny, aby se materiál mohl považovat za pravý kompozit. Například podmínka o alespoň 5% podílu diskontinuální složky (výztuže) v materiálu. Navzdory splnění podmínky o vícefázovém složení se za pravé kompozity tím pádem nemohou považovat plasty, které obsahují malé množství aditiv, maziv a pigmentů. Důvodem je právě jejich četnost, která nesplňuje zmíněnou 5% podmínku. Další podmínka definuje přípravu kompozitních materiálů, které se zužuje pouze na mechanické mísení složek. Proto ani slitiny kovů, ve kterých došlo při tepelném zpracování k vyloučení podstatně tvrdší fáze, se nedají považovat za kompozity. Naopak například hliníková slitina zpevněná částicemi Al_2O_3 (oxidu hlinitého), k jejíž výrobě se používá technologie práškové metalurgie, je pravý kompozit, protože je splněna jak podmínka fázová, tak podmínka o podílu diskontinuální složky a nakonec i podmínka o způsobu výroby. [1][4]

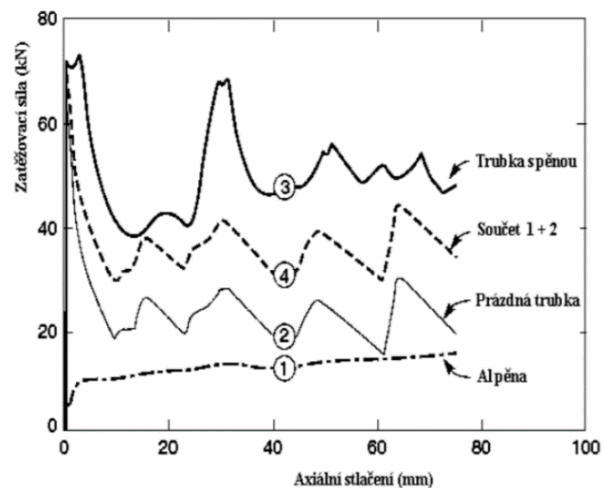
SYNERGISMUS

Základem synergismu je sečtení vlastností všech složek a fází, z nichž se kompozit skládá. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou zpravidla lepší, než by odpovídalo pouhému poměrovému sečtení vlastností dílčích složek. U kompozitních materiálů je výhodné, aby byl synergický efekt co možná nejvýraznější. Synergický efekt nejlépe ilustruje *Obr. 1*, kde je čárkovanou čarou zobrazen průběh součtu dané vlastnosti matrice a výztuže a plná křivka zobrazuje skutečný průběh dané vlastnosti kompozitního materiálu. Stejně tak *Obr. 2* znázorňuje nejprve určitou vlastnost dílčích složek, dále

součet těchto vlastností a skutečný průběh změřený na kompozitním materiálu složeného ze dvou zmíněných složek. [1][5]



Obr. 1 – Znárodnění synergického efektu v kompozitním materiálu. [5]



Obr. 2 – Příklad synergického efektu v kompozitní sktruktúře z hliníkové pěny, kterou je vyztužena tenkostěnná hliníková trubka. [5]

MATRICE

Matrice je obvykle poddajnější prvek kompozitního materiálu, který je spojitý v celém objemu. Hlavním úkolem matrice je zajistit soudržnost celého kompozitu. Vlákna mají v matrici pevnou pozici. Dále matrice zajišťuje přenos vnějšího zatížení na zpevňující vlákna a chrání je před korozi, oxidací či mechanickým poškozením. [1][4]

Matrice má obecně nízkou hmotnost a určuje další vlastnosti celého kompozitu, kterými jsou teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti nebo smrštění při vytvrzování. Základní požadavek na materiál matrice je, aby se při působení vnějších sil neporušila dříve než výztuž. [1][4]

VÝZTUŽ

Výztuž je diskontinuální, nespojitá fáze kompozitu, která je zpravidla pevnější, tužší a tvrdší než matrice. Hlavní funkcí výztuže je přenos zatížení, dále však i vyztužení materiálu a zlepšení jeho mechanických vlastností. [1][4]

4. ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ

Kompozitní materiály se dělí podle mnoha kritérií, konkrétně podle typu disperzní fáze, rozměru výztuže, tvaru výztuže, materiálu výztuže a materiálu matrice. [1][6]

4.1. ROZDĚLENÍ PODLE DISPERZNÍ FÁZE

Každý kompozit se skládá ze spojité fáze – matrice, která zajišťuje soudržnost materiálu. Zbylé fáze jsou nespojitě a v matrici jsou rozptýleny – dispergovány, a proto se označují jako disperze. [1][5]

KOMPOZITY PRVNÍHO TYPU

Jedná se o materiály, které mají disperzi tvořenou alespoň jednou pevnou fází. Tyto materiály mají v technické aplikaci nejširší využití. [1][5]

KOMPOZITY DRUHÉHO TYPU

Takové kompozity mají disperzi tvořenou alespoň jednou kapalnou fází. Nejčastěji se jedná o otevřené nebo uzavřené pórovité struktury, které jsou vyplněny kapalinou – např. olejem. Typickým příkladem kompozitu druhého typu v technické praxi je samomazné ložisko. [1][5]

KOMPOZITY TŘETÍHO TYPU

Jedná se o všechny kompozity s plynnou disperzní fází. V praxi se jedná například o pěnový polystyrén, případně různé druhy kovových pěn. [1][5]

4.2. ROZDĚLENÍ PODLE ROZMĚRU VÝZTUŽE

MAKROKOMPOZITY

Kompozitní materiály, u kterých se průřez výztuže pohybuje řádově od jednotek do stovek mm. Takové materiály se využívají především ve stavebnictví a typickým příkladem je železobeton. [1][7]

MIKROKOMPOZITY

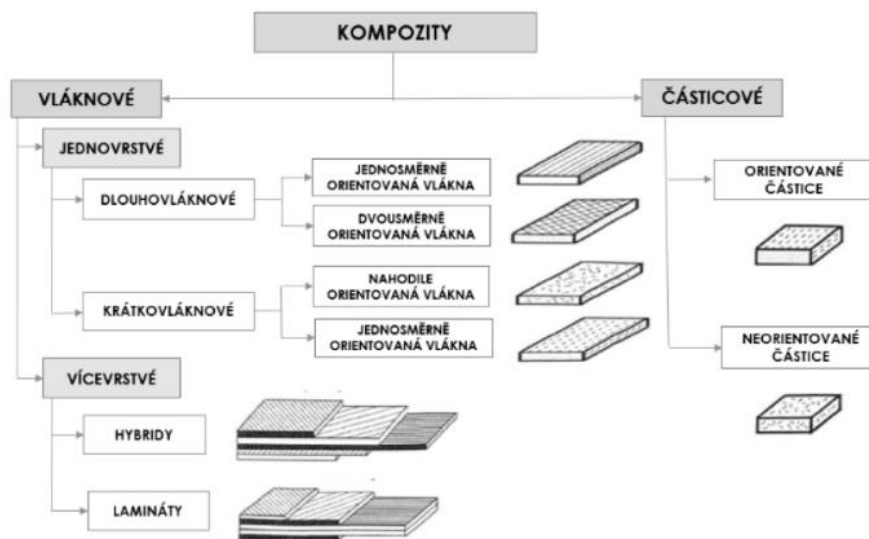
Výztuž má průměr řádově od jednotek do stovek mikrometrů. Jedná se o nejrozsáhlejší skupinu kompozitů a v průmyslu mají největší význam. Takové materiály často dosahují velkého měrného modu (E/ρ) a velké měrné pevnosti (σ_{pt}/ρ). [1][7]

NANOKOMPOZITY

Rozměr výztuže nanokompozitů se pohybuje v řádu desítek nanometrů. Nejčastěji se jako materiál jejich výrobě používá celulóza a keratin. Výjimku však tvoří ani keramika a sklo. Kompozity zhotovené ze skleněných a keramických nanovláken se používají jako bioaktivní materiál sloužící k náhradě kostí. [1][8]

4.3. ROZDĚLENÍ PODLE TVARU VÝZTUŽE

Výztuž se v kompozitu vyskytuje buď v podobě částic různého tvaru, nebo v podobě vláken o různých délkách. Obě podskupiny se dále dělí podle tvaru, délky a uspořádání vláken. V případě vícevrstevných kompozitů se bere v potaz i vrstvení dílčích vrstev. Rozdělení je graficky znázorněno na Obr. 3. [1][4]



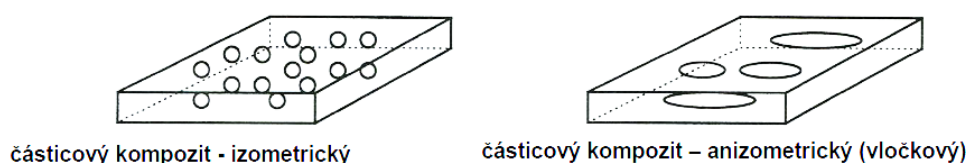
Obr. 3 – Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru jejich nosné části. [9]

Samostatnou a velmi četnou skupinu vedle částicových a vláknových kompozitů tvoří sendvičové kompozity. Jedná se o materiál, který je zhotoven slepením nebo svařením dvou tenkých, pevných vrstev spolu s lehkým, často dutým jádrem. Tyto kompozity jsou charakteristické svou nízkou hmotností, vynikající ohybovou pevností a tuhostí a skvělými izolačními vlastnostmi. Mají však i své nežádoucí vlastnosti v podobě rizika ztráty stability při tlakovém namáhání a vysoké hořlavosti z důvodu tenkých vrstev materiálu a velkému množství vzduchu ve struktuře. [1][10]

ČÁSTICOVÉ KOMPOZITY

Za částicovou výztuž se považují kuličky, destičky, trubičky a obecně tvary, u nichž rozměr v jednom směru výrazně nepřesahuje rozměry ve směrech ostatních. [1][11]

Částice jako takové se dále dělí podle svého tvaru na izometrické, které se pro lepší ilustraci dají chápat jako kuličky, a anizometrické, které svým plochým tvarem připomínají vločky. Oba případy jsou znázorněny na Obr. 4. [1][12]



Obr. 4 – Tvar částicové výztuže. [12]

Hlavním přínosem výztuže v podobě částic je lepší tepelná odolnost, útlum vibrací nebo elektrická vodivost. Zajímavým záměrem použití částicových kompozitů je také ekonomický aspekt. Do řady drahých materiálů lze totiž během jejich zpracování přimíchat částice v podobě prášku, který je zhotoven z mnohem levnějšího materiálu. Typickým příkladem je křemen, korund, mastek či kaolin v podobě prášku smíchaný s různými polymery. [1][5]

Při výrobě částicových kompozitů je nutné věnovat pozornost rovnoměrnému rozložení výztuže v matrici. Pevné částice v roztavené matrici mají vlivem jejího tuhnutí tendenci shlukovat se. Pro správný výsledek je tedy důležité, aby byla směs při tuhnutí stále promíchávána. [1][5]

Ve strojírenské praxi jsou za částicové kompozity považovány slinuté karbidy, z nichž jsou metodou práškové metalurgie vyráběny řezné nástroje. [1][13]

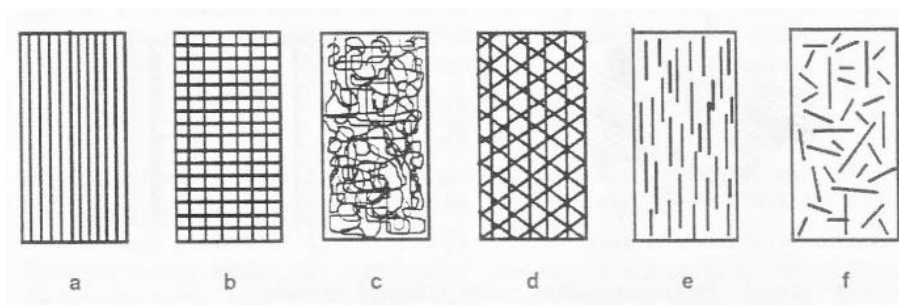
VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

V případě, že je výztuž v kompozitním materiálu v jednom směru rozměrnější než ve druhém, tak se jedná o vláknové kompozity. [1]

Vlákna v kompozitech se rozdělují na dlouhá (spojitá) a krátká (nespojité). Hranice mezi krátkými a dlouhými vlákny není charakterizována jejich délkou, nýbrž jejich uložením ve výrobku. Dlouhá vlákna jsou charakteristická tím, že začínají a končí zpravidla na okrajích výrobku, případně jsou přerušeny z důvodu geometrie. Naopak za krátká vlákna se považují ta, která nejsou spojitá v celé délce výrobku. [1][4]

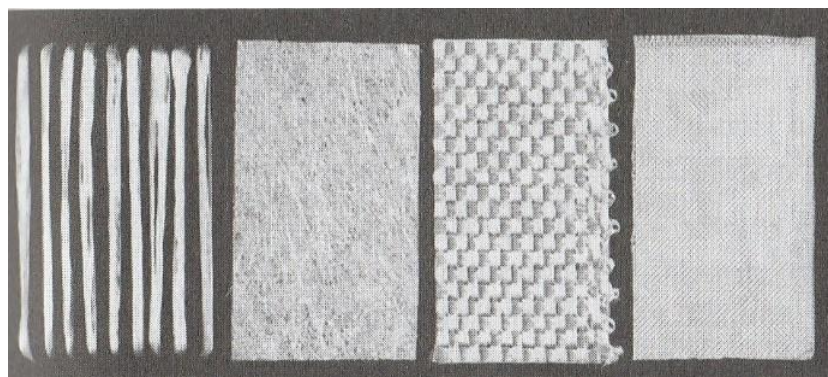
Délka vláken výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu, nejvýraznější účinek mají dlouhá vlákna, ta se však ne vždy dají z technologických nebo jiných důvodů použít. Typickým příkladem technologie, která je schopná fungovat pouze s krátkými vlákny, případně částicemi, je technologie injekčního vstřikování. [1][7]

Jednotlivá vlákna mají v kompozitu své uspořádání, které se uvažuje vždy v jedné vrstvě vláken. Základní příklady uspořádání jsou uvedeny na Obr. 5. Dlouhá vlákna mohou být uspořádána jednosměrně – jednoosá orientace (a), do tkaniny – dvouosá orientace (b), do rohože – nahodilá orientace (c), případně s pravidelnou orientací ve více osách (d). Krátká vlákna se z hlediska orientace dělí na jednosměrně (e) a nahodile (f) orientovaná. [1][3]



Obr. 5 – Struktura vláken v kompozitu. [3]

Jednotlivá výztužná vlákna se ovšem samostatně používají jen velice zřídka. Ze zpracovatelských důvodů se do matrice aplikují upravené produkty vyrobené z jednotlivých vláken. Základní druhy uspořádání vláken jsou k vidění na Obr. 6, jedná se o (zleva) pramenec, rohož, tkaninu z pramenců a tkaninu z vláken. [1][7]



Obr. 6 – Nedůležitější typy sklovláknitých výztuží. [7]

Příze – Vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.

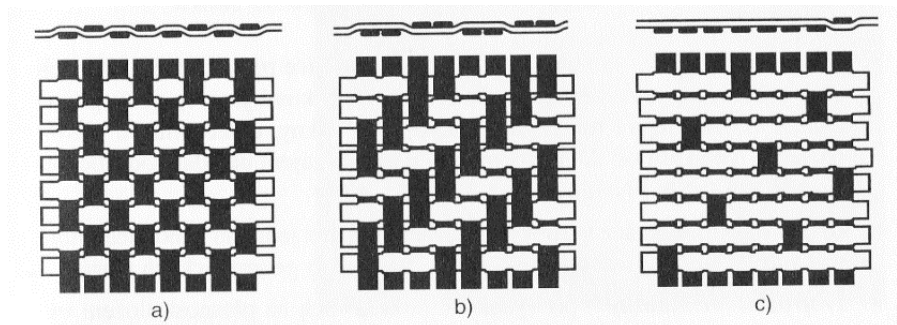
Nitě – Skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny.

Roving (pramenec) – Z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken se skládá pramenec neboli roving.

Spředený roving – Vyrábí se stejným způsobem jako roving, akorát z vláken stočených kolem své podélné osy.

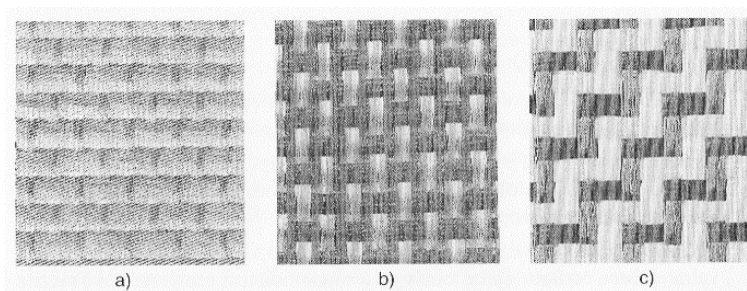
Rohože – Jejich výroba spočívá v nepravidelném uložení vláken, jejich prostříkání pojivem a následným vysušením. Vyrábí se rohože ze sekaných pramenců, rohože z kontinuálních vláken a povrchové rohože.

Tkaniny – Pravidelným uspořádáním vláken nebo pramenců ve dvou směrech vznikají tkaniny. Jak už název napovídá, jedná se o tkané plošné výrobky. Tkaniny jsou tím pádem vyztuženy do dvou směrů, které jsou uloženy pravoúhle. Takto pravoúhle uloženým vláknům, respektive pramencům se říká osnova a útek. Tkaniny se dále rozdělují podle toho, jaká vazba byla použita k jejich zhotovení, k běžně používaným vazbám patří plátňová (a), keprová (b) a atlasová (c) – viz. Obr. 7. [1][7]



Obr. 7 – Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [7]

Tkaniny mají různou skladbu vláken v osnově a útku (Obr. 8). Jednosměrné tkaniny (a) mají osnovu a útek ze stejných vláken, vlákna v útku podporují vlákna v osnově a zvyšují tím výsledný efekt. U směsné tkaniny (b) jsou v osnově a útku použity různé druhy vláken, útek je zpravidla tvořen levnějšími vlákny, s horšími výztužnými vlastnostmi, protože v jeho směru nejsou požadovány tak dobré mechanické vlastnosti, jako ve směru osnovy. Posledním druhem z hlediska skladby vláken jsou tkaniny hybridní (c), kde se vlákna v osnově a útku vybírají podle rozdílných požadavků v daných směrech. Například v jednom směru je vyžadována tuhost a ve druhém rázová houževnatost. [1][7]



Obr. 8 – Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku. [7]

Použití vláknových kompozitů jako konstrukčního materiálu vychází ze čtyř následujících paradoxů, na které se nesmí při dimenzování nikdy zapomenout. [1][7]

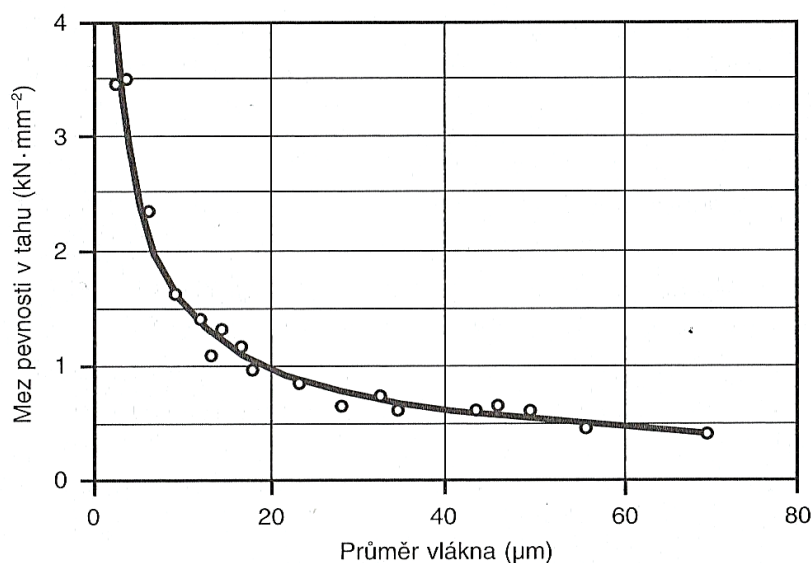
Paradox kompozitního materiálu – Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně. (G. Slayter). Tento paradox platí však jen u zatížení tahem. Při zatížení tlakem, ohybem nebo smykem nemohou jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, z důvodu narušení geometrického uspořádání výztuže v matici. [1][7]

Paradox pevného materiálu – Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky. (F. Zwicky). Porovnání teoretických a naměřených hodnot E-modulu a meze pevnosti jednotlivých materiálů jak v kompaktní, tak ve vláknové formě nabízí Tab. 1. V níže uvedené tabulce je mimo jiné i porovnání kompaktní a vláknové formy materiálu, což úzce souvisí s následujícím paradoxem. [1][7]

Tab. 1 – Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E-modulu a meze pevnosti v tahu některých konstrukčních materiálů. [7]

Materiál	E-modul ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)			Mez pevnosti v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)		
	teoretický	naměřený		teoretická	naměřená	
		Vláknó	Kompaktní hmota		Vláknó	Kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000 (33%)	1 000 (0,33%)	27 000	1 500 (5,5%)	30 (0,1%)
Polypropylen	50 000	20 000 (40%)	1 600 (3,2%)	16 000	1 300 (8,1%)	38 (0,24%)
Polyamid	160 000	5 000 (3%)	2 000 (1,3%)	27 000	1 700 (6,3%)	50 (0,18%)
Sklo	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4 000 (36%)	55 (0,5%)
Ocel	210 000	210 000 (100%)	210 000 (100%)	21 000	4 000 (19%)	1 400 (6,67%)
Hliník	76 000	76 000 (100%)	76 000 (100%)	7 600	800 (10,5%)	600 (7,89%)

Paradox vláknité struktury – *Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.* (A. A. Griffith). Uvedený výrok má vcelku jednoduché vysvětlení. Vlákna v mikrokompozitech dosahují průměrů v řádech jednotek až stovek μm , což mimochodem přibližně odpovídá průměru lidského vlasu. Jejich příčný průřez a plocha povrchu je tedy velmi malá. Například v porovnání s tyčkou o průměru 10 mm a délce 100 mm má vlákno o průměru 50 μm se stejnou délkou jako zmíněná tyčka přibližně 40 000x menší příčný průřez a 200x menší plochu povrchu. Díky těmto rozdílům se snižuje riziko vrozených i povrchových vad materiálu a tím se zvyšuje jeho pevnost. Závislost meze pevnosti v tahu na průměru vlákna je zřetelná z *Obr. 9* a rozdíly hodnot oproti kompaktní formě jsou zaznamenány v *tab. 1* v předešlém odstavci. [1][7]



Obr. 9 – Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost. [7]

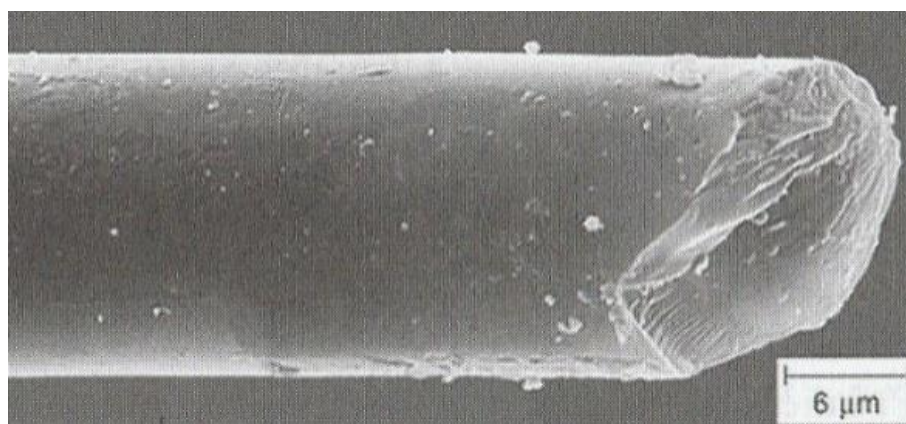
Paradox délky zatížení – *Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím větší je jeho naměřená pevnost.* (A. A. Griffith). S rostoucí délkou zatíženého vlákna klesá jeho pevnost. Tuto skutečnost vysvětluje úplně stejná příčina, jako v případě průměru vlákna. Opět se jedná o výskyt vad materiálu, které v případě prodloužení zatěžované části budou nabývat větších rozměrů, a i do počtu jich bude více, než když je zatěžovaná délka malá. Výhodou rovnoměrného rozmístění vláken v matrici se jejich jednotlivé délky zatížení blíží k nule, právě proto, že se zatížení rozprostře do celého objemu kompozitu. Místní poruchy vláken se tedy projevují mnohem méně a pevnost jednotlivých vláken je tím pádem lépe využita. [1][7]

4.4. ROZDĚLENÍ PODLE MATERIÁLU VÝZTUŽE

Výztuž v kompozitech je z hlediska konkrétního materiálu nejčastěji skleněná (v cca 80 % vláknových kompozitů), dále uhlíková, polymerní, kovová, keramická, sklokeramická, čedičová, borová nebo přírodní. [1][4]

SKLENĚNÁ VLÁKNA

Takzvaná textilní skleněná vlákna jsou jednou z možností výztuže vláknových kompozitů. Sklovinu tvoří přechlazená tavenina směsi oxidů Si, Al, Ca, B a Mg. Jak je patrné z *Obr. 10*, tento typ vlákna má zpravidla kruhový příčný průřez, jehož průměr se pohybuje od 3,5 do 24 μm . [1][7]



Obr. 10 – Skleněné vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem. [7]

Podle vlastností se skloviny, z nichž se textilní skleněná vlákna vyrábí, dále dělí na následující skupiny. Vlákna vyráběná z E-skloviny (elektrické) jsou skvělými elektrickými izolanty a zároveň mají vynikající propustnost záření. Tato skupina je dominantní, jedná se o na trhu nejčastěji používanou sklovinu pro výrobu textilních skleněných vláken se zastoupením cca 90 %. Zvýšením podílu oxidů křemíku, hořčíku a hliníku v tavenině se získá směs pro výrobu vláken s vyšší pevností, řádově se jedná o 40–70% nárůst pevnosti v porovnání s vlákny z E-skloviny. Sklovina na výrobu tohoto typu vlákna má na světovém trhu 3 označení. V Evropě se jedná o R-sklovinu (resistance = odolnost), v USA S-sklovinu (strength = síla) a v Japonsku T-sklovinu. Další skupiny vláken vykazují zpravidla odolnost vůči určitým chemikáliím. C-sklovina a ECR-sklovina jsou vysoce odolné vůči kyselinám a agresivním látkám, AR-sklovina naopak vykazuje odolnost vůči alkáliím. [1][7]

Skleněná vlákna jsou izotropní, což obecně znamená, že jejich materiálové vlastnosti jsou v příčném i podélném směru totožné. Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je v porovnání s ocelí asi třetinový a odpovídá přibližně modulu pružnosti v tahu hliníku. Hodnota meze pevnosti v tahu je podstatně vyšší než u většiny organických i neorganických vláken a je vyšší i v porovnání s ocelí, což je velké plus s ohledem na podstatně nižší hustotu a tím pádem i hmotnost. I v případě tepelných vlastností se skleněná vlákna řadí na nejvyšší příčky. Jedná se o nehořlavé a ohnivzdorné materiály. Ani dlouhodobé tepelné namáhání při teplotách až 250 °C nezhoršuje mechanické vlastnosti. [1][7]

UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna se nejčastěji vyrábí v průměrech 5 až 8 μm , vyznačují se vynikajícími mechanickými vlastnostmi, zejména vysokou pevností a modulem pružnosti a zároveň mají velmi nízkou hustotu. Jsou odolná vůči dlouhodobému dynamickému zatěžování, touto vlastností se vyzdvihují nad všechny ostatní konstrukční materiály včetně ocele a hliníku. Naopak jsou křehká, drahá a nad 400 °C intenzivně oxidují. Dále jsou charakteristická pro svou korozivzdornost, dobrou elektrickou i tepelnou vodivost a v neposlední řadě inertnost vůči lidské tkáni. Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní, modul pružnosti i pevnost mají mnohonásobně vyšší hodnoty ve směru hlavní osy než kolmo na ni. Velice zajímavý vliv má anizotropie na součinitele teplotní roztažnosti. Vlákna se s rostoucí teplotou ve směru hlavní osy nepatrně zkracují, naopak ve směru kolmo na hlavní osu se výrazně roztahují. [1][7]

Na trhu se uhlíková vlákna dělí do 4 základních skupin podle svých předních mechanických vlastností na velmi vysokopevnostní UHS (ultra high strength), vysokopevnostní HS (high strength), velmi vysokomodulová UHM (ultra high modulus) a HM (high modulus). [1][11]

4.5. ROZDĚLENÍ PODLE MATERIÁLU MATRICE

Z hlediska samotného materiálu matrice mají nejčastější zastoupení polymery. Vedle polymerních matic existuje řada jiných, méně zastoupených, mezi které patří kovové, uhlíkové, skleněné a keramické matrice. [1][4]

POLYMERNÍ MATRICE (PMC)

Výroba kompozitů s polymerní matricí začala už v období druhé světové války, kdy se z podobných materiálů stavěly kryty pro vojenské letouny. Konkrétně byla nejvíce používána polyesterová pryskyřice vyztužená skleněnými vlákny. Využití skvělých mechanických vlastností tohoto materiálu však přišlo až o pár dekád později, kdy se začal čím dál častěji používat právě jako konstrukční materiál. [1][4]

Mezi hlavní výhody polymerní matrice patří nízká hustota a tím pádem i hmotnost, dále chemická odolnost a korozivzdornost a dobré dielektrické vlastnosti, v mnoha případech elektrická nevodivost. Vlastnosti kompozitu s polymerní matricí, samotného polymeru s ocelí a hliníkem porovnává Tab. 2. [1][3]

Tab. 2 – Porovnání vlastností sklolaminátu s technickými materiály. [14]

Materiál	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Sklolaminát *	2,10	1000 + 1400	45 000
Ocel	7,85	400 + 1200	210 000
Hliník	2,70	180	70 000
Polyvinylchlorid (PVC)	1,38	45 + 65	3 500

* Vlastnosti lze měnit typem a skladbou výztuže, poměrem množství výztuže a pryskyřice, včetně jejího typu.

Většinou se jako materiál matrice volí reaktivní pryskyřice – termosety, různé aplikace však vyžadují použití termoplastů, z důvodu jejich vlastností. [1][7]

Viskozita reaktivních pryskyřic je řádově desetkrát, někdy až tisíckrát nižší než viskozita termoplastů, proto jsou termosety pro výrobu kompozitních materiálů výhodnější, snadněji se zpracovávají, snadněji smáčejí a lépe prosycují vlákna. V případě termoplastů jsou energetické nároky na výrobu mnohem vyšší, protože výroba probíhá za podstatně vyšších teplot než u termosetů, zároveň zde také figuruje omezení teplotou rozkladu termoplastů. [1][7]

Po prosycení vláken reaktivní pryskyřicí vždy následuje proces vytvrzování přidáním katalyzátoru a urychlovače. Takto získaný kompozit dosahuje vysokých hodnot pevnosti a tuhosti, je ovšem velice křehký. V případě požadavků na lepší houževnatost následuje další proces úprav pomocí modifikačních přísad. [1][7]

Výhody termoplastové matrice spočívají především ve skvělé houževnatosti a také ve skutečnosti, že výroba spočívá pouze v roztavení materiálu na určitou teplotu, kdy dojde k prosycení výztuže a následnému ztuhnutí. Tato technologie s sebou nenese žádný chemický proces, který by jakýmkoliv způsobem mohl ovlivnit jakost výsledného

kompozitu. Rozdílné je také chování při dosažení teploty skelného přechodu, termosety jsou na této teplotě méně závislé, naopak termoplasty výrazně měknou. [1][7]

Nejpoužívanějšími materiály matrice ze skupiny termosetů jsou nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP), ze skupiny termoplastů pak polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). Termosety a aromatické termoplasty se využívají zejména pro svou vysokou teplotní odolnost a tvarovou stálost při vysokých teplotách. [1][4]

Polyesterové pryskyřice – Nenasyčené polyesterové pryskyřice jsou levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné. Vyznačují se velkou variabilitou při zpracování z důvodu možnosti volby obsahu jednotlivých složek (styren, katalyzátor, urychlovač). Při zpracování u nich dochází k velkému smrštění (až 8 %). Mají dobrou odolnost vůči povětrnosti, ale částečně neodolávají alkalickému namáhání a působením styrenu kladou velké nároky na životní prostředí. [1][7]

Vinylesterové pryskyřice – Jsou ve srovnání s nenasyčenými polyesterovými pryskyřicemi houževnatější a dražší. Mají podobnou variabilitu, také z důvodu dávkování styrenu a urychlovače. Jsou korozivzdorné, to je hlavní důvod jejich převážné aplikace v agresivních prostředích. Stejně tak jako nenasyčené polyesterové pryskyřice kladou kvůli styrenu velkou zátěž na životní prostředí. [1][7]

Epoxidové pryskyřice – Ze zmíněných materiálů jsou nejdražší. Mají velmi dobré mechanické vlastnosti, zejména při dynamickém namáhání, dobrou adhezi k široké škále povrchů, dají se tedy použít jako lepidla. Chemická odolnost epoxidových pryskyřic je závislá na druhu tvrdidla a dá se tedy výrobou ovlivnit, nejčastěji jsou vyvolány vlastnosti jako odolnost proti kyselinám, alkáliím nebo horké vodě. Nejpřednější výhodou je v rozsahu tepelné odolnosti, kde epoxidové pryskyřice vynikají. Je tomu tak z důvodu vysoké teploty skelného přechodu, která se pohybuje nad hodnotou 200 °C. Při zpracování epoxidových pryskyřic může dojít k podráždění kůže a alergickým reakcím. [1][7]

Fenolické pryskyřice – Málo zastoupené, avšak vysoce teplotně a chemicky odolné skupiny z oblasti termosetů jsou fenolické pryskyřice, bismaleimidy (BMI) a polyimidy (PI). Fenolické pryskyřice jsou vysoce odolné vůči hoření a pokud chytanou, tak jsou unikátní v produkci kouře. Teplotní odolnost je u fenolických pryskyřic až 280 °C za sucha, mechanické vlastnosti jsou však horší. [1][7]

Bismaleimidy – Používají se zejména v leteckém průmyslu na vstupní součástky motorů a části křidel. Pracovní teploty dosahují 230 °C ve vlhku a až 250 °C v suchu. Ještě větší teplotní odolnost, než bismaleimidy mají polyimidy, ve vlhku do 250 °C, v suchu až do 315 °C. Používají se zejména pro vnitřní součástky tryskových motorů a jejich cena je extrémně vysoká. [1][15]

KOVOVÁ MATRICE (MMC)

Hlavní předností kovových matic je teplotní odolnost, která je vyšší než u polymerních matic. Oproti kovům disponují kompozity s kovovou maticí vyšší pevností a tuhostí. Z hlediska konkrétních prvků se nejčastěji používá hliník, hořčík, titan, nikl a kobalt, případně jejich slitiny. Vedle teplotní odolnosti jsou kovové matrice požívány pro svoji tuhost, pevnost a odolnost vůči únavě. [1][16]

UHLÍKOVÁ MATRICE (CAMC)

Kombinací uhlíkové matrice s uhlíkovými vlákny vzniká tzv. C-C kompozit, který je charakteristický zejména svou teplotní odolností. Jedná se o jediný materiál, který je schopen dlouhodobě vzdorovat teplotám 1 700 – 2 200 °C. Od 500 °C je nutné použít ochranu proti oxidaci uhlíku v podobě povrchové vrstvy z křemíku, ušlechtilých kovů, případně keramiky. C-C kompozity mají navíc nízkou hustotu, tudíž i hmotnost, dobré mechanické vlastnosti včetně lomové houževnatosti a nízkou teplotní roztažnost. Využívají se zejména pro součásti raketoplánů a brzdné ústrojí letadel a závodních vozů Formule 1. [1][17]

KERAMICKÁ MATRICE (CEMC)

Tvrdé materiály vyrobené z vysoce čistých oxidů, nitridů, karbidů nebo boridů. Mezi přednosti keramických matic patří žáruvzdornost, chemická i teplotní stabilita, extrémní tvrdost a odolnost vůči opotřebení. Tyto materiály jsou naopak obtížně zpracovatelné, křehké a mají nevyzpytatelné vlastnosti při cyklickém tepelném zatěžování. [1][4]

5. TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

Široké spektrum kompozitních materiálů přináší i rozmanitost do jejich výroby. Existuje řada různých výrobních technologií, které jsou závislé na finálním polotovaru, případně výrobku. [1]

5.1. RUČNÍ KLADENÍ

Mezi první technologie výroby kompozitních materiálů patřilo ruční kladení za mokra. Tato technologie spočívá v kladení výztuže v podobě tkaniny nebo rohože na otevřenou formu, kde dochází k ručnímu prosycování tekutou pryskyřicí. Pryskyřice se nanáší pomocí štětce či válečku, případně může být proveden nástřik. Velice podobným způsobem se vrství prepreg. Prepreg je polotovar ve formě plátů a slouží k výrobě vláknových kompozitů. Jedná se o předimpregnovanou výztuž v kombinaci s částečně vytvrzenou pryskyřicí. Výhodou při kladení prepregů je oddělení procesu prosycování vláken pryskyřicí, které v tomto případě probíhá na specializovaném pracovišti, a tak se při výrobě kompozitního materiálu pracuje již s předpřipravenou, prosycenou výztuží – prepregem. Správné prosycení výztuže je náročný děj, jehož výsledek má velký vliv na kvalitu polotovaru, potažmo finálního výrobku. Po navrstvení prepregů následuje proces vytvrzování, který je nezbytný ke vzniku pevné matrice. Postupem času dochází k robotizaci ručního kladení a vznikají například technologie známé jako ATL (Automated Tape Laying). [1][4][7]

5.2. LISOVÁNÍ

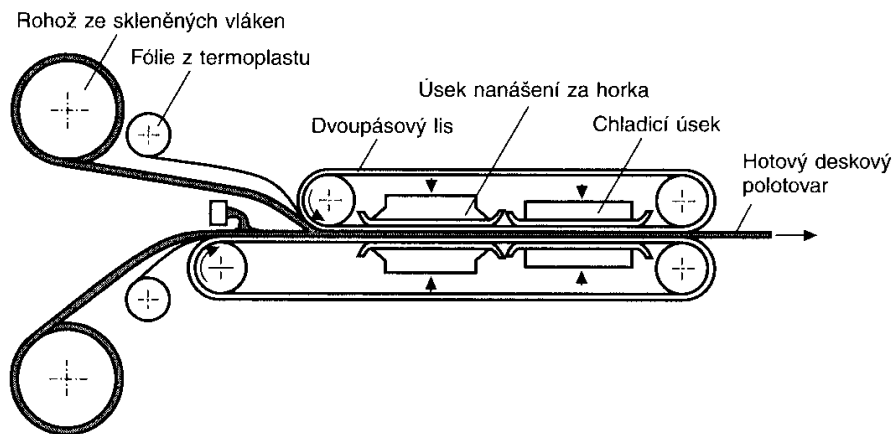
Touto metodou jsou nejčastěji vyráběny ploché polotovary, výjimkou však nejsou ani různě tvarované předměty. Lisování jako takové se dělí dle mnoha hledisek. Například na nízkotlaké a vysokotlaké nebo zda probíhá za tepla, či za studena. [1][7]

Nízkotlaké lisování je podobné ručnímu kladení. Používá se jednodílná forma, do které je navrstvena výztuž, která je následně prosycena pryskyřicí. Poslední vrstvu však zpravidla tvoří neprodyšná fólie. Pomocí podtlaku se odvede přebytečná pryskyřice a zamezí se vzniku bublin, čímž se zvýší kvalita výsledného kompozitu. [1][7][18]

Rozšířenou technologií je mokré lisování. Jedná se o zautomatizovaný proces, kdy se do formy navrství výztuž, která se následně zalije pryskyřicí. Poté dojde k přimáčknutí druhou částí formy lisovacím tlakem v rozsahu 0,5 – 2 MPa. Proces může probíhat jak za studena, tak ve předehřáté formě. [7]

Technologie SMC je vysokotlaké lisování, probíhající v rozmezí tlaku 30 – 140 barů. SMC je realizováno na hydraulických lisech. [7]

Desky z termoplastů vyztužené skleněnou rohoží se vyrábí technologií GMT. Jedná se o kontinuální výrobu ve dvoupásovém lisu – viz. *Obr. 11*. Rohož ze skleněných vláken a fólie z termoplastu jsou odvíjeny a následně vrstveny před lisovací komorou, kde dochází k lisování za tepla. Následně je deska ochlazována. [1][7][18]

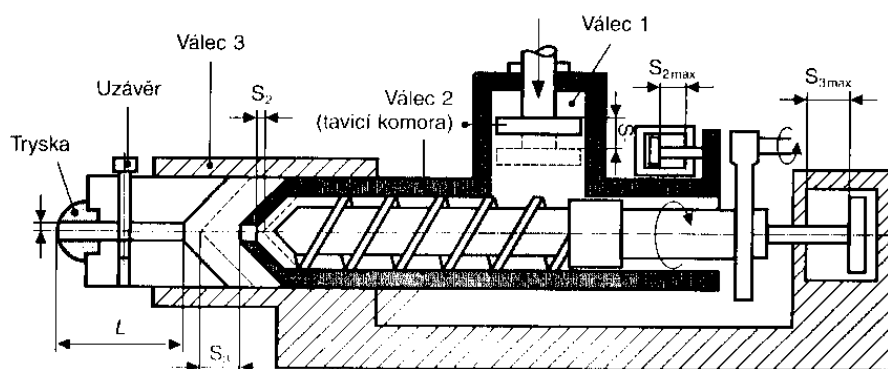


Obr. 11 – Výroba ve dvoupásovém lisu. [7]

V dnešní době je v automobilovém průmyslu velmi rozšířená technologie vysokotlakého vstřikování, tzv. technologie RTM (resin transfer moulding). Tato technologie spočívá ve vložení vyztužných vláken v podobě výstřižků tkanin do formy lisu, která je následně uzavřena a injektorem je pod vysokým tlakem přivedena pryskyřice. Následné použití vakua podporuje prosycení vyztuže a odstranění vzduchových bublin z pryskyřice. Technologie RTM sice nepatří k těm nejrychlejším, ale zaručuje výrobu výlisků s nízkými základními investicemi a dobrou kvalitou. [7]

5.3. INJEKČNÍ VSTŘIKOVÁNÍ

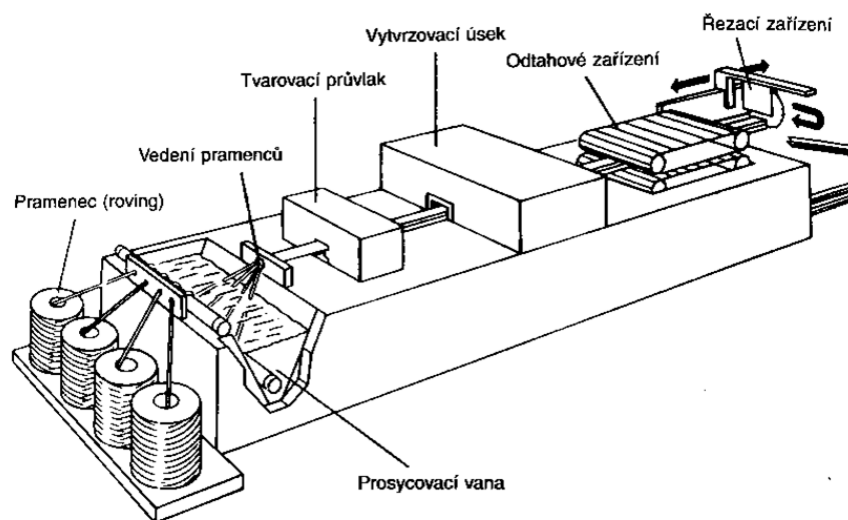
Jedná se o asi nejvýznamnější technologii, kterou se vyrábí kompozity s termoplastovou maticí, nese název ZMC a vstřikovací zařízení je k vidění na *Obr. 12*. V tavicí komoře dochází k roztavení lisovací hmoty (směs plastového granulátu a nasekaných vláken – nejčastěji skleněných), která je za pomoci pístu dopravena do válce se šnekem, který dále dopravuje směs skrz trysku do formy. Nevýhodou této technologie je poškozování vláken a náročná termoregulace. Je totiž důležité, aby k vytvrzování docházelo až ve formě, nikoliv cestou do ní. [1][7]



Obr. 12 – Vstřikovací zařízení ZMC. [7]

5.4. PULTRUZE

Technologie, která se používá na výrobu kompozitních profilů. Jedná se o kontinuální proces, který zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu za pomoci tažného zařízení, které je na Obr. 13. Vstupní materiál je vláknová výztuž navinutá na cívkách, která před vstupem do vyhřívané komory prochází pryskyřičnou lázní. [1][7]

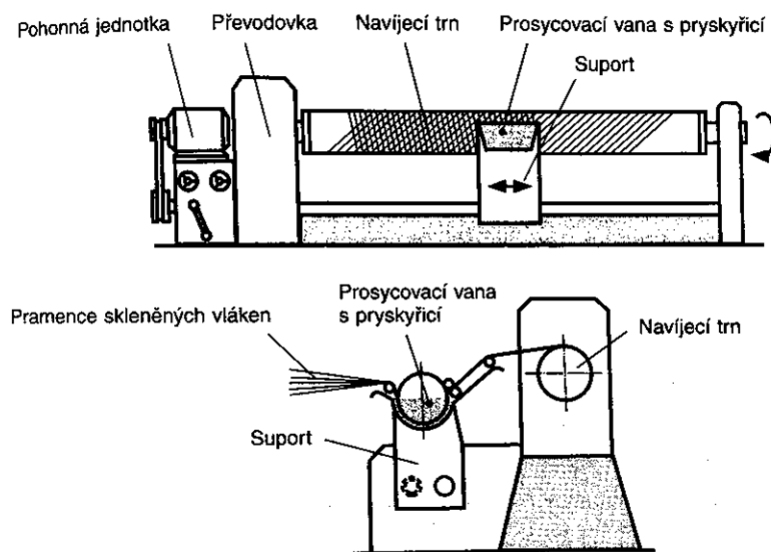


Obr. 13 – Tažení profilů. [7]

5.5. NAVÍJENÍ

Technologie navíjení je velmi populární pro výrobu osově symetrických produktů. Na trn, který má geometrii vnitřku vzniklého kompozitního produktu se navíjí kontinuální výztužná vlákna, která jsou stejně jako v předchozím případě odvíjena z cívek a

před samotným navinutím na trn smáčena v pryskyřičné lázni, tak jak znázorňuje Obr. 14. Vlákna jsou na trn navíjena rotací trnu kolem své osy. Navíjení na trn probíhá s předpětím vláken, aby byla zajištěna geometrie vláken, která je důležitá pro požadované mechanické vlastnosti produktu. Tato technologie umožňuje navíjet vlákna pod definovaným úhlem, který může být ve vrstvách variabilní. Z důvodu pevného navinutí vláken může nastat problém v oddělení výrobku od trnu. Z toho důvodu by i samotný trn měl být navrhnout jako součást z více segmentů, případně by měl být zhotoven ze snadno tavitelného materiálu, který je po navíjení jednoduše rozpuštěn. Tato technologie umožňuje navíjení i na již existující osově symetrickou součást, které nahrazuje trn a po navíjení zůstává s navinutou částí jako celek. [19]



Obr. 14 – Výrobní zařízení pro navíjení. [7]

6. MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ KOMPOZITŮ

Výrobek, respektive polotovár zhotovený z kompozitního materiálu, by měl být navrhnout tak, aby co nejlépe odolával čtyřem základním typům zatížení, kterými jsou tah, tlak, smyk a ohyb. [1][20]

V případě zatížení tahem hrají hlavní roli mechanické vlastnosti vláken. Pokud jsou vlákna uložena ve směru působení síly, pak je životnost kompozitu nejvíce závislá na životnosti vlákna. Čím více je vlákno v kompozitu orientované kolmo na směr působení síly, tím více se musí zohledňovat i mechanické vlastnosti matrice, její adheze s vlákny

a případné bubliny ve struktuře, které mohou výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu. Při tlakovém zatěžování je naopak hlavním parametrem vyztužující schopnost matrice a adheze na rozhraní vlákno – matrice. Smyk v kompozitu je zpravidla založen na principu klouzání vrstev jedna po druhé. Aby se tomuto jevu zabránilo, musí být zajištěna co možná nejvyšší adheze mezi vláknem a matricí. Ohybové namáhání prakticky zahrnuje tlak, tah i smyk dohromady. Horní část vzorku je namáhána tlakem, spodní tahem a uprostřed působí smyk. [1][7][20]

6.1. NAPĚTÍ A DEFORMACE

Vlivem vnějšího mechanického zatížení vzniká v materiálu napjatost a deformace. V každém bodě tělesa je možné zavést systém tří navzájem kolmých os a vyjádřit tím tenzory napětí (Rov. 1) a deformace (Rov. 2) v maticovém tvaru. Vzhledem ke třem osám se jedná o matice rozměru 3x3, které jsou navíc symetrické podle hlavní diagonály. [21]

$$\sigma(P) = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Rov. 1}$$

$$\varepsilon(P) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Rov. 2}$$

Z důvodu symetrie matic napětí a deformace je výhodné zavést vektory napětí (Rov. 3) a deformace (Rov. 4). [21]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Rov. 3}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Rov. 4}$$

Zmíněné osově systémy lze transformovat do jiných systémů pomocí transformační matice. [21]

Vztah mezi napětím a deformací vyjadřuje Hookův zákon (Rov. 5), který pracuje s vektorem napětí, vektorem deformace a maticí tuhosti C . Pro opačný přístup je zavedena matice poddajnosti S , jedná se o inverzní matici tuhosti. Matice C a S mají rozměr 6×6 a jsou stejně tak jako matice napětí a deformace symetrické podle hlavní diagonály. Tvary rovnic Hookova zákona pro vyjádření napětí a deformace jsou Rov. 6, respektive Rov. 7. [21]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad \text{Rov. 5}$$

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad \text{Rov. 6}$$

$$\varepsilon = S \cdot \sigma \quad \text{Rov. 7}$$

Prvky matic tuhosti a poddajnosti je výhodné vyjádřit pomocí tzv. inženýrských konstant. Jedná se o moduly pružnosti E , smykové moduly G a Poissonovy konstanty ν , které jsou obecně definovány vzhledem k zavedenému osovému systému. [21]

Technické materiály vykazují zpravidla určitou materiálovou symetrii v důsledku jejich namáhání – inženýrské konstanty se tedy v některých směrech rovnají a tím se i jejich počet snižuje. Anizotropní materiál s žádnou materiálovou osou symetrie je definován pomocí 21 inženýrských konstant, naopak izotropní materiál, který vykazuje shodné chování ve všech směrech je definován pouze dvěma inženýrskými konstantami. Ostatní druhy materiálů vzhledem k jejich typu anizotropie uvádí Tab. 3. [21][22]

Tab. 3 – Druhy materiálu v závislosti na typu anizotropie. [21]

Druh materiálu – typ anizotropie	Počet nezávislých konstant
Anizotropní materiál	21
Materiál s jedinou rovinou symetrických elastických vlastností	13
Ortotropní materiál	9
Příčně izotropní materiál (hexagonální materiál)	5
Pseudoizotropní materiál (kubický materiál)	3
Izotropní materiál	2

Vláknové kompozity jsou považovány za příčně izotropní materiály, k jejich popisu tedy slouží 5 inženýrských konstant:

Podélný modul pružnosti $E_L = E_1$ (longitudinal);

Příčný modul pružnosti $E_T = E_2$ (transverse);

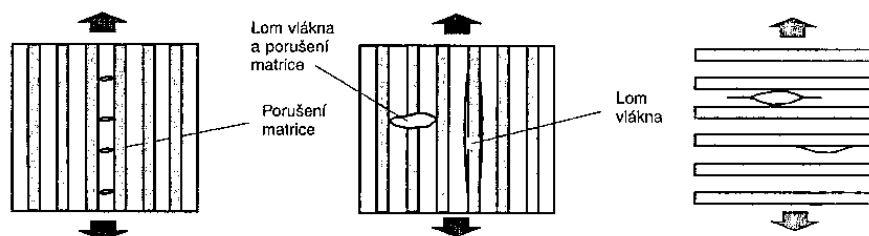
Smykový modul $G = G_{12}$;

Hlavní Poissonova konstanta ν_{12} ;

Vedlejší Poissonova konstanta ν_{23} . [22]

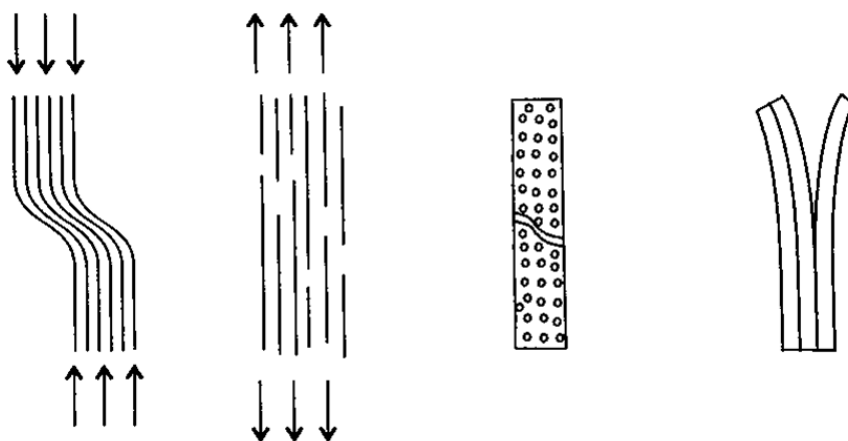
6.2. MECHANISMY PORUŠENÍ KOMPOZITŮ

Mechanické porušení kompozitních materiálů se posuzuje podle toho, jestli je porušené vlákno, nebo matrice. Z tohoto hlediska jsou definovány tři mechanismy porušení kompozitního materiálu – translaminární, intralaminární a interlaminární. Pro ilustraci poslouží Obr. 15. [1][7]



Obr. 15 – Mechanismy porušení kompozitního materiálu (zleva intralaminární, translaminární a interlaminární mechanismus). [7]

Translaminární mechanismus je charakteristický porušením vláken a může být nazýván také jako vláknový mechanismus porušení. Nejčastěji je vlákno přetrženo, vytaženo v matrice, v případě tlakového namáhání zborceno ve vzpěru, případně rozštěpeno. Intralaminární mechanismus, také mezivláknový, se stejně tak jako interlaminární mechanismus vyznačuje porušením matrice, případně hranice v těsné blízkosti vlákna. V případě intralaminárního mechanismu vznikají trhliny, které jsou většinou kolmé na osu vláken a často nemusí být na první pohled zřetelné. Naopak u interlaminárního lomu, známého jako delaminace, dochází k prasknutí materiálu ve směru vláken, trhlina se šíří poměrně rychle a materiál brzy není kompaktní. Na Obr. 16 jsou znázorněny typické mechanismy porušení exaktně. [1][7][20]



Obr. 16 – Mechanismy porušení (zleva zborcení vláken, přetržení vláken, prasknutí matrice a delaminace). [23]

6.3. PEVNOSTNÍ KRITÉRIA

Kritéria porušení jednosměrných kompozitů se dělí na mikromechanická a makromechanická. Mikromechanická kritéria zohledňují pouze průměrná napětí ve vláknech a matrici a objemové poměry vláken a matrice v materiálu, který je testován. Naopak makroskopická kritéria jsou mnohem komplexnější, a právě ony budou ve zbytku kapitoly blíže popisovány. [21][24]

Žádná z podmínek pevnosti není univerzální a na základě doporučení či zkušeností je nutné vybrat tu správnou. Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály obecně vycházejí z podmínek pevnosti pro izotropní homogenní materiály, které jsou příslušně upraveny a rozšířeny. Pracují s materiálem jako homogenním, není tedy rozlišeno vlákno a matrice a

pracuje se s inženýrskými konstantami materiálu jako celku. Dále se uvažuje lineární průběh napětí až do okamžiku porušení. [21]

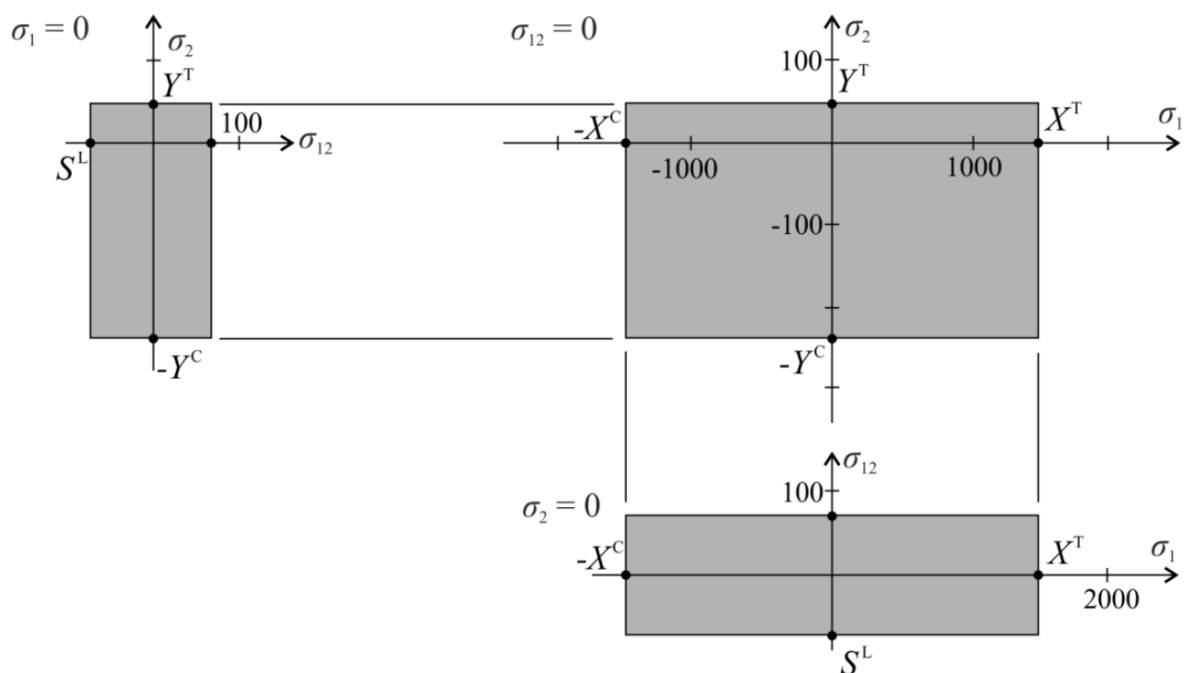
Další možnosti kategorizace pevnostních kritérií jsou založeny na vyhodnocení v závislosti na napětí nebo deformaci, na závislosti na mechanismu porušení nebo na interaktivní a neinteraktivní, kde existuje, případně neexistuje vazba mezi složkami normálových napětí ani mezi normálovými a smykovými složkami napětí. [21][24]

6.3.1. KRITÉRIUM MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ

Jedná se o nejjednodušší a v praxi nejpoužívanější pevnostní kritérium. Toto kritérium je neinteraktivní, neexistují v něm tedy vazby mezi jednotlivými složkami napětí. Dle tohoto kritéria dojde k porušení materiálu v okamžiku, kdy alespoň jedno z napětí dosáhne příslušné meze pevnosti. Meze pevnosti vláken jsou dány vzhledem k jejich hlavní ose, která často nemá stejný směr jako osa, ve které se napětí uvažují. Z toho důvodu je klíčové použít vztahy pro určení mezí pevnosti ve stejném směru jako se uvažují napětí. Pro rovinnou napjatost mají pevnostní podmínky tvar *Rov. 8* a graficky jsou znázorněny na *Obr. 17*.

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{-X^C}{\sigma_1} = 1 & \frac{X^T}{\sigma_1} = 1 & \frac{-S^L}{\sigma_{12}} = 1 \\
 \frac{-Y^C}{\sigma_2} = 1 & \frac{Y^T}{\sigma_2} = 1 & \frac{S^L}{\sigma_{12}} = 1
 \end{array}
 \qquad \text{Rov. 8}$$

, kde σ_1 a σ_2 jsou normálová napětí v hlavních materiálových směrech, σ_{12} smykové napětí v rovině vrstvy, X^C a Y^C meze pevnosti v tlaku v podélném a příčném směru, X^T a Y^T meze pevnosti v tahu v podélném a příčném směru a S^L podélná smyková pevnost. [21][25]



Obr. 17 – Mezní křivky kritéria maximálního napětí. [26]

6.3.2. KRITÉRIUM MAXIMÁLNÍ DEFORMACE

Jedná se o velice podobné kritérium jako předchozí, je také neinteraktivní, akorát místo maximálních napětí pracuje s maximálními deformacemi. Porušení materiálu nastane v případě, že některá ze složek deformace, tedy poměrné prodloužení, případně zkos dosáhnou hodnoty příslušné mezní hodnoty deformace pro daný materiál. Pro rovinnou napjatost mají pevnostní podmínky tvar *Rov. 9* a graficky jsou znázorněny na *Obr. 18*. S použitím Hookova zákona jsou vztahy tohoto kritéria uvedeny v závislosti na Poissonově konstantě (*Rov. 10*).

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{-X_{\varepsilon}^C}{\varepsilon_1} = 1 & \frac{X_{\varepsilon}^T}{\varepsilon_1} = 1 & \frac{-S_{\varepsilon}^L}{\gamma_{12}} = 1 \\
 \frac{-Y_{\varepsilon}^C}{\varepsilon_2} = 1 & \frac{Y_{\varepsilon}^T}{\varepsilon_2} = 1 & \frac{S_{\varepsilon}^L}{\gamma_{12}} = 1
 \end{array}$$

Rov. 9

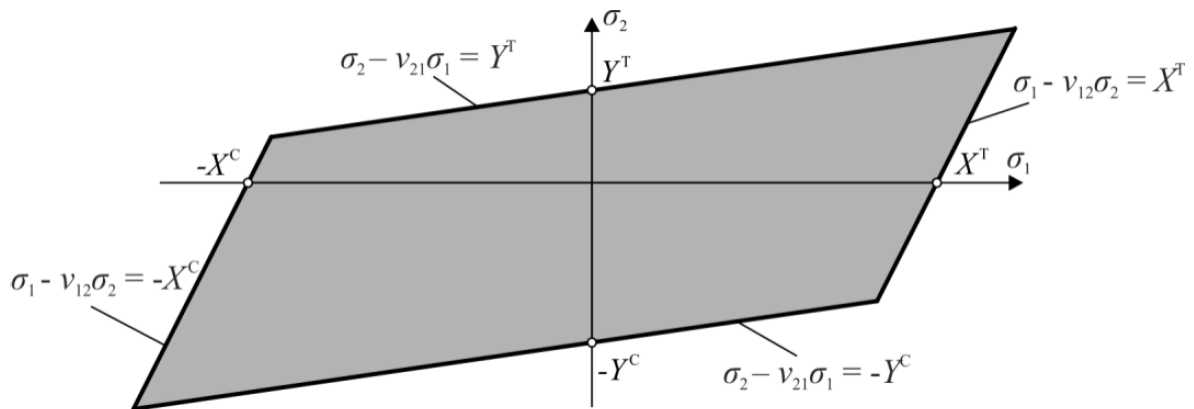
, kde ε_1 a ε_2 jsou deformace v hlavních materiálových směrech, γ_{12} zkos, X_{ε}^C a Y_{ε}^C mezní deformace v tlaku v podélném a příčném směru, X_{ε}^T a Y_{ε}^T mezní deformace v tahu v podélném a příčném směru a S_{ε}^L mezní zkos.

$$\frac{-X^C}{\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2} = 1 \quad \frac{X^T}{\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2} = 1 \quad \frac{-S^L}{\sigma_{12}} = 1$$

$$\frac{-Y^C}{\sigma_2 - \nu_{12}\sigma_1} = 1 \quad \frac{Y^T}{\sigma_2 - \nu_{12}\sigma_1} = 1 \quad \frac{S^L}{\sigma_{12}} = 1$$

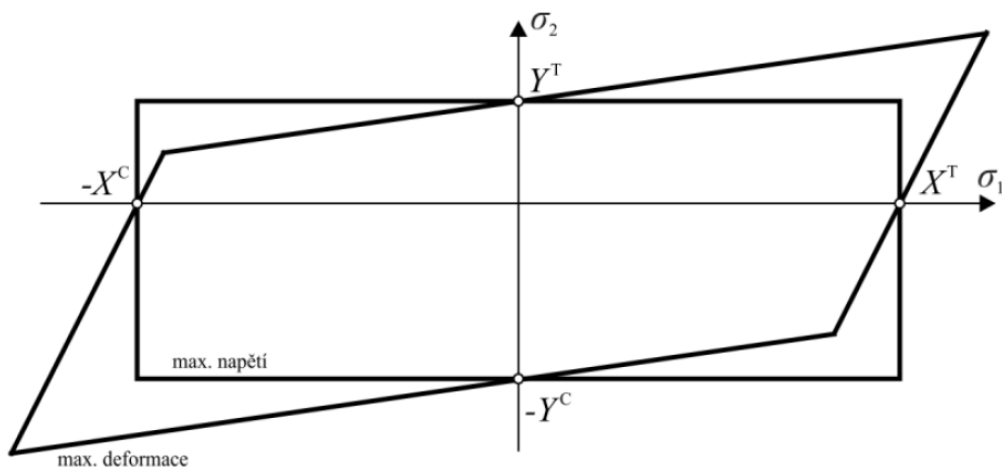
Rov. 10

, kde ν_{12} je Poissonova konstanta. [21][25]



Obr. 18 – Mezní křivka kritéria maximální deformace. [25]

Porovnání mezních křivek kritéria maximálního napětí a kritéria maximální deformace demonstruje Obr. 19.



Obr. 19 – Porovnání mezních křivek pevnosti. [25]

6.3.3. TSAI-HILLOVO KRITÉRIUM

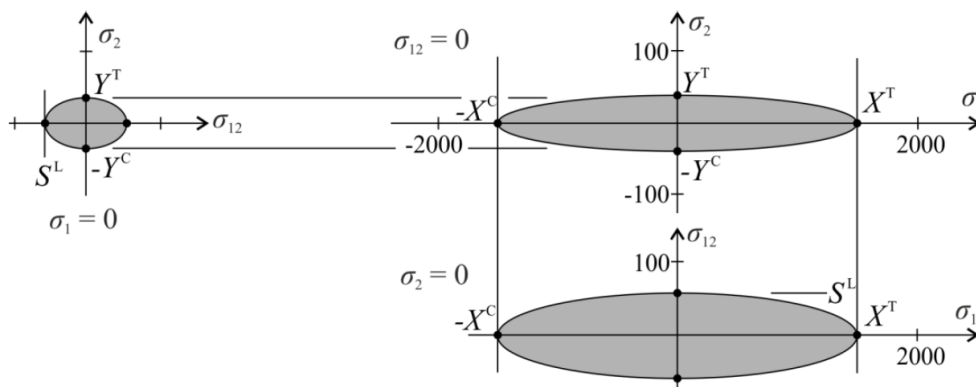
Toto a následující kritéria jsou interaktivní, která jsou založena na energetickém principu. Hill vycházel z von Misesovy metody pro izotropní materiály, kterou upravil pro materiály ortotropní. Úprava spočívala v zahrnutí podmínky, při které dojde k porušení materiálu. Tato podmínka obsahuje materiálové charakteristiky v daných směrech a výsledný vztah (Rov. 11) je vyjádřen v závislosti na pevnostech daného materiálu. V Hillově podmínce je uvažována stejná pevnost materiálu v tahu i tlaku.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y^T}\right)^2 - \left(\frac{1}{(X^T)^2} + \frac{1}{(Y^T)^2} - \frac{1}{(Z^T)^2}\right)\sigma_1\sigma_2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad \text{Rov. 11}$$

, kde X^T , Y^T a Z^T jsou meze pevnosti v tahu v hlavních materiálových směrech. [21][25]

Tsai zjednodušil Hillovo kritérium pro jednosměrné kompozity. Docílil tím předpokladem shodné hodnoty pevností v obou příčných směrech. Tsai-Hillovo kritérium je uvedeno Rov. 12 a graficky znázorněno na Obr. 20. [21][25]

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^T} = 1 \quad \text{Rov. 12}$$

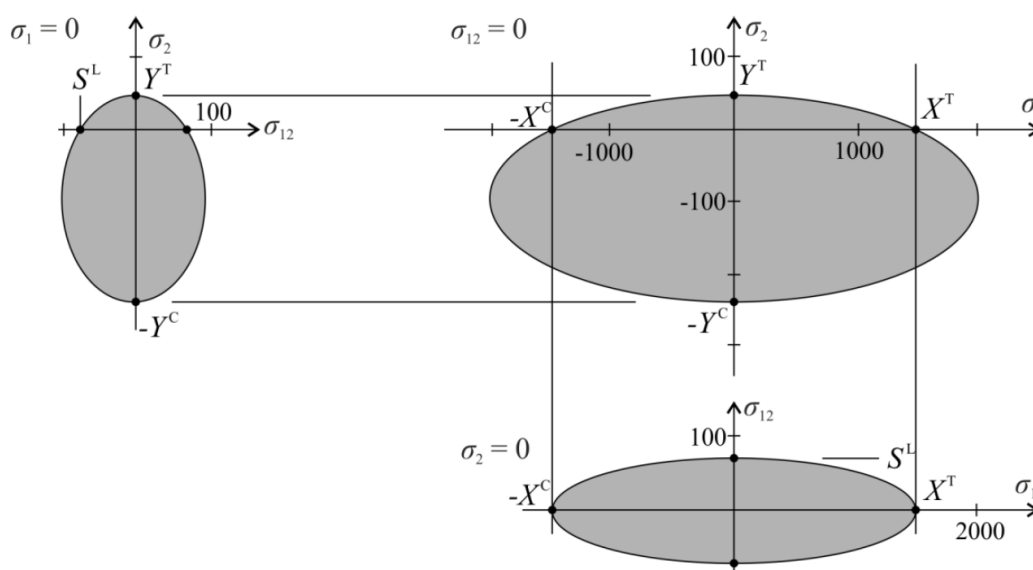


Obr. 20 – Mezní křivky Tsai-Hillova kritéria. [26]

6.3.4. HOFFMANOVO KRITÉRIUM

Jedná se o zobecnění Hillova kritéria ve smyslu respektování rozdílného chování materiálu v tahu a tlaku. Tím pádem jsou zavedeny další podmínky, při kterých dochází k porušení materiálu, výslednou rovnicí lze však jako v předešlých případech zapsat v závislosti na pevnostech materiálu v daných směrech. Pro rovinnou napjatost v rovině vrstvy má podmínka tvar *Rov. 13* a graficky je znázorněna na *Obr. 21*. [21][25]

$$\frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^T X^C} + \frac{X^C - X^T}{X^T X^C} \sigma_1 + \frac{Y^C - Y^T}{Y^T Y^C} \sigma_2 + \frac{\sigma_{12}^2}{(S^L)^2} = 1 \quad \text{Rov. 13}$$



Obr. 21 – Mezní křivky Hoffmanova kritéria. [26]

6.3.5. TSAI-WU KRITÉRIUM

Jeden z prvních pokusů vyvinout obecnou teorii poškození pro anizotropní materiály, která předpoví porušení materiálu při obecném stavu napjatosti. Kritérium stojí na základě tenzoru pevnosti, který má tvar invariantu tvořeného ze složek tenzoru napětí a tenzoru deformace. Tenzor pevnosti bere v úvahu transformaci z jednoho souřadnicového systému do druhého, stejně tak jako rozdíl mezi pevnostmi v tahu a tlaku. Samotné kritérium má tvar polynomu (*Rov. 14*), který obsahuje řadu tenzorů pevnosti. Daný polynom byl dále vyvíjen a modifikován tak, že v něm obsažené tenzory pevnosti obsahovaly pouze složky napětí, nikoliv deformace.

$$f_i \sigma_i + f_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{Rov. 14}$$

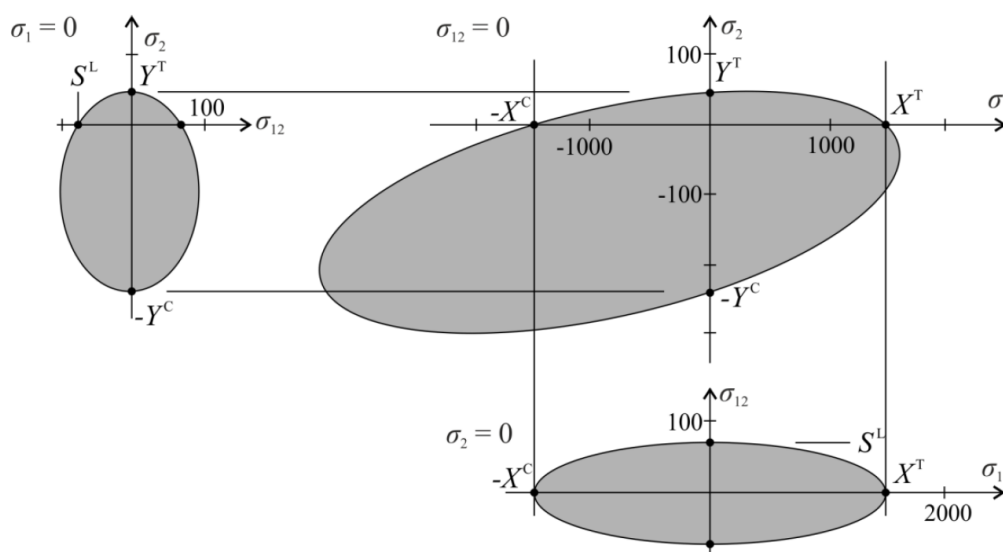
, kde f_i a f_{ij} jsou tenzory pevností prvního a druhého řádu, které byly určeny experimentálně a pro rovinnou napjatost lze Tsai-Wu kritérium zapsat ve tvaru Rov. 15.

$$\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C}\right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C}\right) \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} + \frac{\sigma_{12}^2}{(S^L)^2} + 2f_{12}^* \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^T X^C} = 1 \quad \text{Rov. 15}$$

, kde f_{12}^* je vazebný koeficient, který může být vyjádřen pomocí Rov. 16.

$$f_{12}^* = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ 1 - \left[X^C - X^T + \frac{X^T X^C}{Y^T Y^C} (Y^C - Y^T) \right] \sigma + \left(1 + \frac{X^T X^C}{Y^T Y^C} \right) \sigma^2 \right\} \quad \text{Rov. 16}$$

Vazebný koeficient je empirický koeficient získaný jako funkce z experimentálních výsledků. Zajímavý poznatek je, že při určité hodnotě vazebního koeficientu ($f_{12}^* = -0,5$) přejde Tsai-Wu kritérium na Hoffmanovo kritérium, navíc pokud jsou shodné hodnoty napětí v tahu i tlaku, tak přejde v kritérium Tsai-Hillovo. Je tedy evidentní, různé přístupy zmíněných kritérií se sebou úzce souvisí. Tsai-Wu kritérium je graficky znázorněno na Obr. 22. [21][25]



Obr. 22 – Mezní křivky Tsai-Wu kritéria. [26]

6.3.6. HASHINOVO KRITÉRIUM

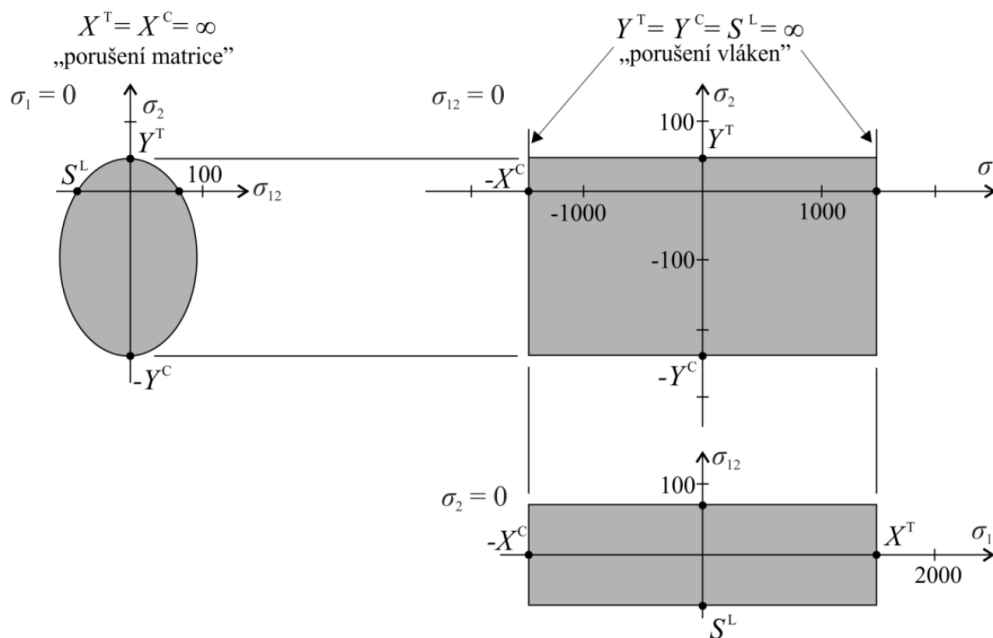
Původně vyvíjeno pro jednosměrné polymerní kompozity, jednalo se o jedno z prvních kritérií, které rozlišovalo různé módy porušení. Pro rovinnou napjatost konkrétně čtyři – mód porušení vláken v tahu (Rov. 17), vláken v tlaku (Rov. 18), matrice v tahu (Rov. 19) a matrice v tlaku (Rov. 20). Mezní křivky znázorňuje Obr. 23. [24][25]

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2}{(S^L)^2} = 1 \quad \text{pro } \sigma_1 \geq 0 \quad \text{Rov. 17}$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^C}\right)^2 = 1 \quad \text{pro } \sigma_1 < 0 \quad \text{Rov. 18}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad \text{pro } \sigma_{22} > 0 \quad \text{Rov. 19}$$

$$\left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right) - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^C}\right) + \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad \text{pro } \sigma_{22} < 0 \quad \text{Rov. 20}$$



Obr. 23 – Mezní křivky Hashinova kritéria. [26]

Původně bylo kritérium dvojdimenzionální, postupně bylo rozšířeno na prostorovou napjatost novými podmínkami porušení vláken v tahu (Rov. 21), vláken v tlaku (Rov. 22), matrice v tahu (Rov. 23) a matrice v tlaku (Rov. 24). [24][25]

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(S^L)^2} = 1 \quad \text{pro } \sigma_1 \geq 0 \quad \text{Rov. 21}$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^C}\right)^2 = 1 \quad \text{pro } \sigma_1 < 0 \quad \text{Rov. 22}$$

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{(Y^T)^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(S^T)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(S^L)^2} = 1 \quad \text{pro } (\sigma_{22} + \sigma_{33}) > 0 \quad \text{Rov. 23}$$

$$\left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y^C}\right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4(S^T)^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(S^T)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(S^L)^2} = 1 \quad \text{Rov. 24}$$

$$\text{pro } (\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$$

6.3.7. PUCKOVO KRITÉRIUM

Jedná se o komplexní přístup, kde jsou současně aplikovány dvě na sobě nezávislá kritéria porušení, a to kritérium pro porušení vláken a kritérium pro porušení mezi vlákny. Dle Puckova přístupu nelze ani jedno z nich vynechat, jelikož jsou obě naprosto odlišného charakteru. Tím pádem nelze jeho pevnostní kritérium popsat jednou podmínkou. Kritérium porušení vláken je založeno na porovnání napětí a pevnosti vláken v tahu a tlaku, s tím že v případě tlaku je uvažované kombinované namáhání. Kritérium pro porušení materiálu mezi vlákny vychází zejména z experimentálního srovnání a dělí se na tři různé módy. Právě z důvodu komplexnosti nelze uvést jedinou rovnici a znázornit mezní křivky kritéria, jelikož vždy záleží na parametrech dané aplikace. [21][27]

6.3.8. KRITÉRIUM LARCO4

Moderní kritérium představené v roce 2004. Toto kritérium počítá v 3D napětovém stavem a rozlišuje šest módů porušení, dvě tahová a čtyři tlaková. Výsledkem je index porušení, který nabývá hodnoty z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kdy v případě hodnoty 1 dochází k porušení. [24][25]

6.3.9. MORI-TANAKA KRITÉRIUM

Jedná se o nekonvenční pevnostní kritérium, které se používá k predikci mechanických vlastností, potažmo inženýrských konstant kompozitních materiálů. Je založeno na myšlence, že vlastnosti kompozitního materiálu lze vypočítat pomocí

průměrování mechanických vlastností jednotlivých složek se zohledněním objemové hmotnosti každé složky a prostorového rozložení složek v kompozitu. Pro jednosměrné kompozity lze vyjádřit diferenciální rovnicí s okrajovými podmínkami dle Rov. 25 a jejím řešením jsou inženýrské konstanty ve tvaru Rov. 26. [28]

$$\begin{aligned}
 & (2k, l, l', n, 2m, 2p) = \\
 & = \left(2K_0 + \frac{2}{3}\mu_0, K_0 - \frac{2}{3}\mu_0, K_0 - \frac{2}{3}\mu_0, K_0 + \frac{4}{3}\mu_0, 2\mu_0, 2\mu_0 \right) + c_1(c, g, h, d, e, f) \\
 & k = K_0 + \frac{1}{3}\mu_0 + \frac{c_1}{2l} \left(\frac{1}{9K^*} + \frac{1}{3\mu^*} + c_0P_4 \right) \\
 & l = K_0 - \frac{2}{3}\mu_0 + \frac{c_1}{l} \left(-\frac{1}{9K^*} + \frac{1}{6\mu^*} - c_0P_2 \right) \\
 & l' = K_0 - \frac{2}{3}\mu_0 + \frac{c_1}{l} \left(-\frac{1}{9K^*} + \frac{1}{6\mu^*} - c_0P_3 \right) \\
 & n = K_0 + \frac{4}{3}\mu_0 + \frac{c_1}{l} \left(\frac{2}{9K^*} + \frac{1}{6\mu^*} + c_0P_1 \right) \\
 & m = \mu_0 + \frac{c_1}{\frac{1}{\mu^*} + 2c_0P_5} \\
 & p = \mu_0 + \frac{c_f}{\frac{1}{\mu^*} + 2c_0P_6}
 \end{aligned}
 \tag{Rov. 25}$$

$$\begin{aligned}
 E_1 &= n - \frac{l^2}{k} & \nu_{12} &= \frac{l}{2k} \\
 E_2 &= \frac{4m(kn - l^2)}{mn + kn - l^2} & \nu_{23} &= p \\
 G &= k
 \end{aligned}
 \tag{Rov. 26}$$

Podrobný přístup k vyjádření všech neznámých obsažených v Rov. 25 obsahuje článek [28].

6.3.10. TEORIE FÁZOVÉHO POLE

Teorie fázového pole (Phase-field theory) je další nekonvenční přístup pro predikci chování kompozitního materiálu. Jedná se o matematický model, který se používá na předpověď vývoje mikrostruktury materiálu v souvislosti s vnějším zatížením. Na rozdíl

od předešlých kritérií, teorie fázového pole nepředpokládá fázovou hranici v podobě diskrétní křivky nebo plochy, nýbrž jako kontinuální pole. Tato teorie se často používá spolu s MKP programy k analýze mechanického chování kompozitních materiálů v závislosti na čase. Jedná se o velmi komplexní přístup, který nelze snadno vyjádřit jedinou rovnicí. [29]

7. SPOJOVÁNÍ KOMPOZITŮ S KOVY

S příchodem kompozitních materiálů do automobilového průmyslu je kladena i otázka ohledně způsobu jejich spojování s ostatními materiály. Tato kapitola bude zaměřena konkrétně na spojení kompozitů a kovových součástí. Nejprve budou představeny konvenční způsoby a následně i možnosti méně běžné, které zajišťují určité požadavky, například spoje pro zajištění přenosu velkého krouticího momentu.

Běžně používané spoje kompozitů a kovů jsou spoje mechanické, chemické a tepelné. Za spoje hybridní jsou označeny takové spoje, které kombinují některé ze zmíněných způsobů. Příkladem nekonvenčního spojení kompozitní a kovové součásti je spoj tvarově lisovaný, který bude blíže představen v jedné z následujících kapitol. [30]

Vedle technologických otázek je třeba prát v potaz i fyzikální vlastnosti obou spojovaných materiálů, zejména pak hodnoty součinitele teplotních roztažností. Jelikož v praxi často nastane situace, kdy je spoj vystaven výrazné změně teploty, bude vlivem teplotní roztažnosti měnit svůj objem. Z důvodu různých součinitelů teplotní roztažnosti bude změna objemu různá a tím pádem je tato skutečnost brát v potaz a zajistit dostatečné vůle vzhledem k predikovanému zatížení.

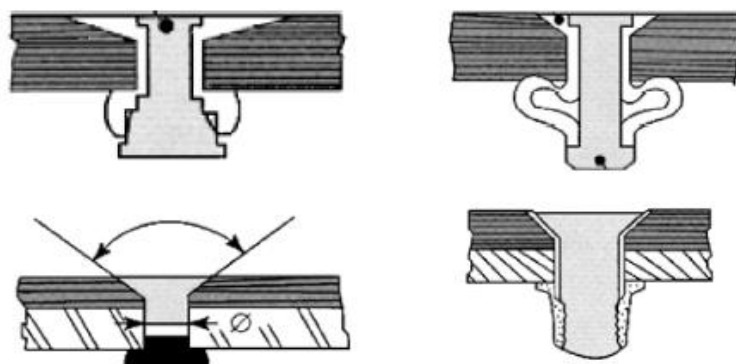
7.1. NÝTOVÉ A ŠROUBOVÉ SPOJE

Jedná se o základní mechanické spoje kompozitu a kovu. Klíčový požadavek na tento typ spoje je zhotovení otvorů do spojovaných součástí z důvodu přítomnosti spojovacího materiálu. Z důvodu přítomnosti takového otvoru je snížena pevnost dané kompozitní součásti, jelikož otvor způsobuje koncentraci napětí. Na degradaci mechanických vlastností má mimo to vliv i otláčení způsobené kontaktními tlaky mezi dřívkem spojovacího materiálu a plochou otvoru v kompozitu a porušení vláken, případně delaminace vzniklá během výroby otvoru. [30]

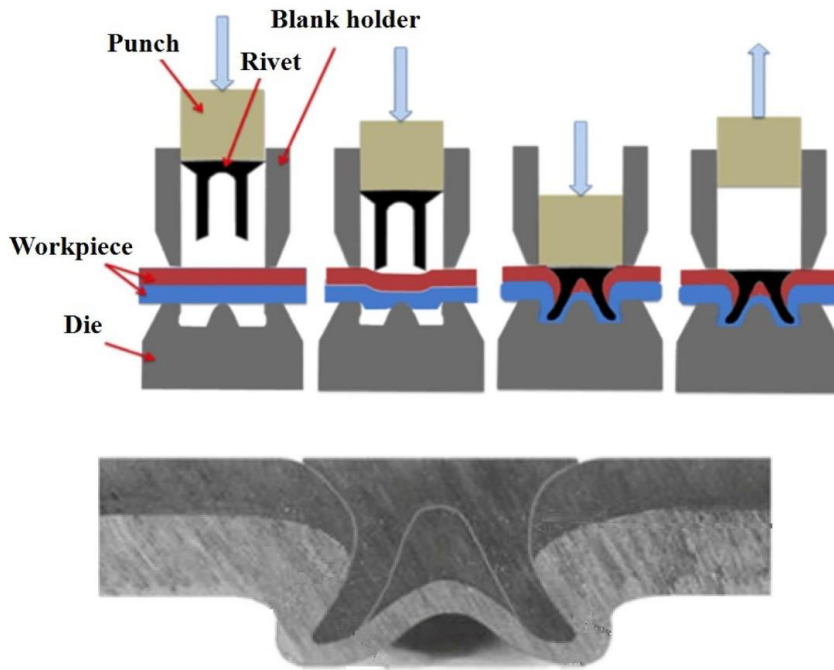
Z důvodu malé tloušťky kompozitního materiálu a obecně větší křehkosti kompozitu v porovnání s kovem je nutné dbát na vytržení hlavy šroubu nebo nýtu z kompozitní části. Tomuto lze předejít vhodným použitím podložek a tím pádem rozložení kontaktního tlaku do větší plochy. [30]

Běžně používané nýtované spoje jsou znázorněny na *Obr. 24*. Se stále rostoucím zájmem o aplikaci kompozitů v průmyslu, zejména v automobilovém a leteckém, přichází i nové technologie nýtování. Technologie SPR (Self-Piercing Riveting), znázorněná na *Obr. 25*, zalisuje nýt skrz spojované vrstvy materiálu do formy umístěné na druhé straně. Dochází tím k plastické deformaci materiálů a jejich vzájemné prolnutí, což zajišťuje jejich soudržnost. Na podobném principu stojí technologie DFR (Difect-Friction Riveting), kdy je nýt rotačně axiálním pohybem zatlačen do vrstev materiálů a opět vlivem plastické deformace dochází k vytlačení části materiálu, což zajišťuje soudržnost spoje – znázorněno na *Obr. 26*. [32][33][34]

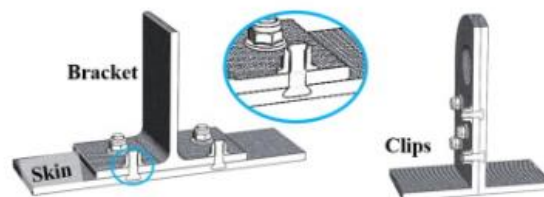
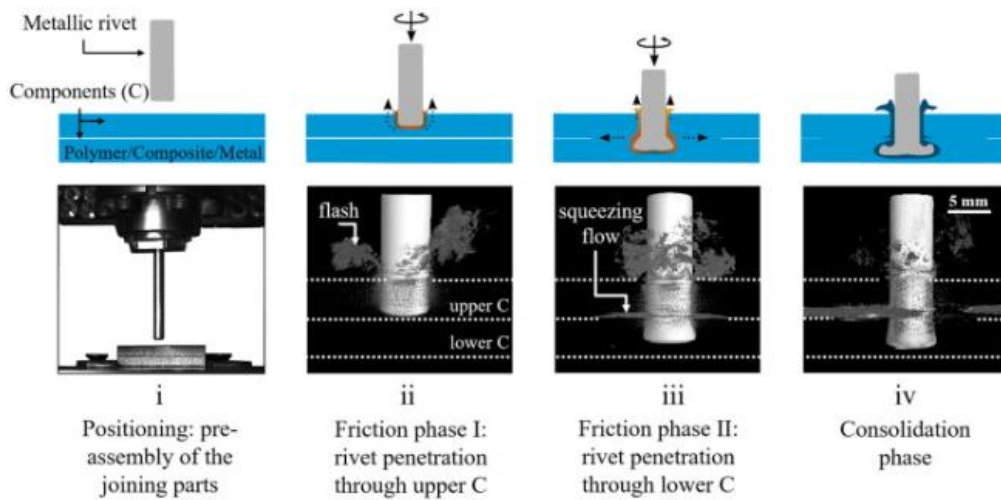
Šroubové a nýtové spoje je možné podlepit. Jedná se tedy o spoje hybridní. V takovém případě může dojít k nárůstu pevnosti spoje až o jednu čtvrtinu oproti spoji nepodlepenému. Spojovací materiál přenáší přechodné napětí kolmé na rovinu spoje a chrání vrstvu lepidla před oloupáním, naopak lepidlo roznese vnější zatížení na celou plochu spoje a nedochází k tak zvýšené koncentraci napětí v okolí otvoru, jako v případě bez lepidla. Použití takového hybridního spoje přináší i zlepšení tlumicích vlastností, nevýhodou je naopak komplikovanější demontáž a vyšší hmotnost. [30]



Obr. 24 – Příklady běžně používaných nýtových spojů. [32]



Obr. 25 – Nýtovací technologie SPR. [33]



Obr. 26 – Nýtovací technologie DFR. [34]

7.2. LEPENÉ SPOJE

V případě diametrálně odlišných vlastností dvou spojovaných součástí bývá lepení často jedinou možností, jak tyto součásti spojit. Výhodou této technologie spojování materiálů je její jednoduchost, nenáročné požadavky na přípravu součástí, možnost spojovat tvarově složité díly a v neposlední řadě velká škála lepidel, které se liší ve svém chemickém složení a tím co nejvíce vyhovují daným podmínkám a materiálům. Před samotným lepením je klíčové znát spojované materiály a způsob zatěžování slepených dílů. V případě lepení kompozitů a kovů je důležitá vysoká přilnavost lepidla k matici kompozitu. Z toho důvodu je důležité lepené plochy před spojením důkladně připravit a vybrat správný druh lepidla. Epoxidová lepidla jsou doporučena pro termosetové matrice, tavná pro termoplastické a kyanoakrylátová lepidla jsou vzhledem k tomuto dělení matrice univerzální. [30]

Chování lepeného spoje je z části adhezivní a z části kohezivní. Za adhezivní se považuje přilnutí lepidla ke spojovaným součástem a za kohezivní soudržnost samotného lepidla. Adhezní síly v lepeném spoji jsou výsledkem sil mechanických, chemických a fyzikálních. Koheze, tedy stav soudržnosti látek, je způsobena mezimolekulárními silami působícími na valenční elektrony. Samotná struktura lepeného spoje je tedy rozdělena na adherendy – slepované součásti, adhezní zónu a kohezní zónu. Mezi kohezní a adhezní zónou se nachází mikrovrstva přechodové kohezní zóny. [30]

Slabší stránkou lepených spojů je jejich teplotní degradace. Vysoké teploty mohou mít negativní dopad na lepené spoje z několika důvodů. Pro každou aplikaci musí být předpokládán teplotní rozsah, pro který je adheze navržena, překročením tohoto rozsahu může lepený spoj ztrácet požadovanou soudržnost. Vysoké teploty navíc ovlivňují i povrch samotných lepených částí, který se může z mikroskopického hlediska stát pórovitým, což značně ovlivňuje kvalitu lepeného spoje. [35]

7.3. NALISOVANÉ SPOJE

Tento způsob spojování kompozitu s kovem je používán velmi zřídka. Důvodem je vedle složité rozebíratelnosti i rozdílný koeficient teplotní roztažnosti, konkrétně kovů a plastů. Z toho důvodu hrozí při výrazných změnách teploty ztráta soudržnosti a tím

pádem se dimenzování spoje zpravidla kontroluje prostřednictvím numerických výpočtů. Naopak výhodou lisovaných spojů je absence vrubů. [30]

7.4. INTEGROVANÉ SPOJE

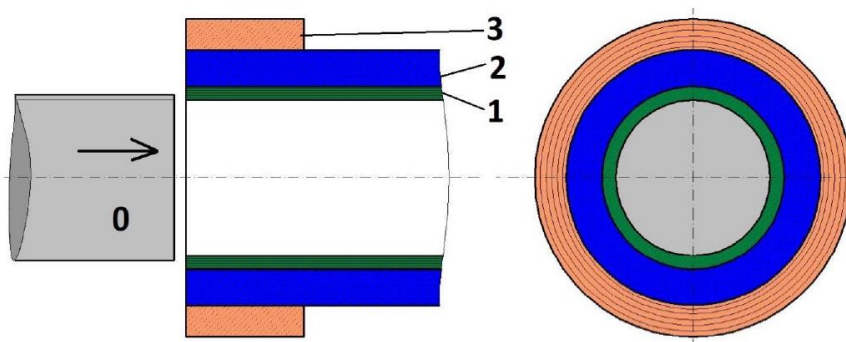
Často nazýván také jako ovíjený spoj je další možnost spojení kompozitního materiálu s kovem, v tomto případě bez vrubu, jelikož nedochází k porušení vláken v kompozitu – Obr. 27. Nevýhodou ovíjeného spoje je jeho komplikovanější výroba a určitá materiálově geometrická omezení spojená se smyslem zatížení. [30]



Obr. 27 – Integrovaný spoj. [31]

7.5. TVAROVĚ LISOVANÉ SPOJE

Jako příklad poslouží konkrétní spoj kompozitní trubky a ocelové hřídele, který je podstatou této práce. Kompozitní trubka je vyrobena technologií navíjení a v řezu je zhotovena ze tří vrstev, viz. Obr. 28. [36]



Obr. 28 – Schéma spoje. [36]

Lisovaná hřídel (0) je vyrobena z oceli a v oblasti spoje se zmíněnou trubkou má po svém obvodu velmi jemné, avšak přesně navržené zuby a drážky. Návrh drážkování bude podrobně popsán v jedné z následujících kapitol. Smyslem takového spoje je, aby se zuby zaryly do první vrstvy trubky a přebytečný materiál zaplnil drážky v hřídeli. Z toho důvodu tvoří výztuž první vrstvy (1) skleněná vlákna s orientací 0° , tedy rovnoběžně s hlavní osou trubky. Takový typ výztuže byl zvolen z důvodu svých vlastností vzhledem k šíření trhlin. Druhou vrstvu (2) tvoří vysokopevnostní uhlíková vlákna (HS). Úkolem této vrstvy je primárně přenos zatížení – v tomto případě krouticího momentu, z toho důvodu mají vlákna orientaci $\pm 45^\circ$. Poslední vrstva (3) je ve smyslu omotávky tvořené ultravysokomodulovými uhlíkovými vlákny (UHM) s orientací kolmo na hlavní osu trubky, tedy navíjené pod 90° . Cílem této vrstvy je zvýšení tečné tuhosti trubky, což vyvolá větší tlak v místě nalisování a tím pádem se zvýší i přípustný krouticí moment. Tato poslední vrstva je navinuta pouze v délce spoje s hřídelí, kde plní svou funkci. [36][37]

8. NÁVRH TVAROVĚ LISOVANÉHO SPOJE

8.1. PEVNOSTNÍ VÝPOČTY

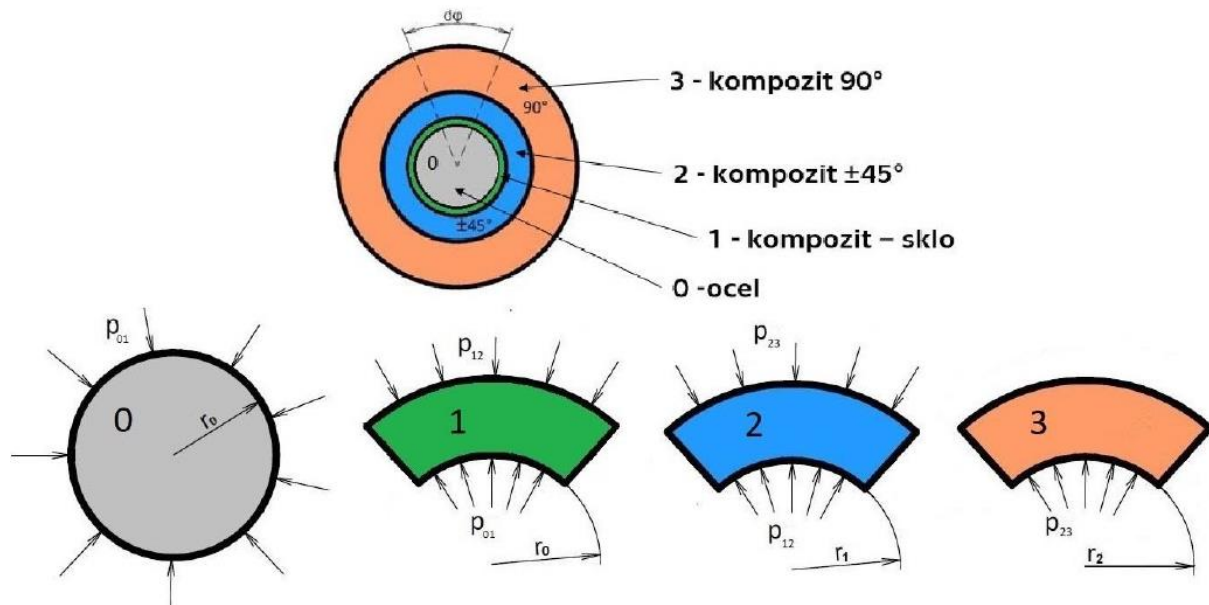
Pro takový druh spoje neexistuje žádný exaktní přístup pro jeho dimenzování, stejně tak není jasné, jakým způsobem dojde k porušení celého systému. Jinými slovy, jestli dojde k porušení skleněné vrstvy, způsobené drážkováním, nebo bude porušeno rozhraní mezi vrstvami skla a uhlíku vlivem interlaminárního napětí. Pro analytický přístup je návrh rozdělen do dvou oblastí – oblast čistého krutu, která nebere v potaz hřídel a poslední vrstvu trubky, a oblast samotného spoje, který je pro zjednodušení uvažován jako lisovaný spoj s hladkými plochami. Drážkování je kvůli svým podstatně menším rozměrům, vzhledem k průměru hřídele, pro tento přístup zanedbáno. [36]

Oblast čistého krutu definuje podmínka pro maximální dovolený krut dle *Rov. 27*.

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_D \quad \text{Rov. 27}$$

, kde τ_k je napětí v krutu, M_k krouticí moment, W_k průřezový modul a τ_D dovolené napětí v krutu. [36][38]

Pro oblast spoje je použita teorie silnostěnných nádob. Jedná se tedy o úlohu čtyř spojených silnostěnných nádob dle Obr. 29. [36]



Obr. 29 – Znárodnění v podobě silnostěnných nádob. [36]

V silnostěnné násobě vzniká tečné a radiální napětí, která figurují ve vztahu pro tečnou deformaci, ze kterého vychází Rov. 28.

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_t} \sigma_t - \frac{\mu_{rt}}{E_r} \sigma_r \quad \text{Rov. 28}$$

, kde ε_t je tečná deformace, E_t tečný modul pružnosti, σ_t tečné napětí, μ_{rt} Poissonova konstanta, E_r radiální modul pružnosti a σ_r radiální napětí. [36][38]

Vztah mezi radiálním a tečným napětím v případě otevřené silnostěnné nádoby uvádí Rov. 29.

$$\sigma_t = 2 \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} - \sigma_r \quad \text{Rov. 29}$$

, kde p_i je vnitřní tlak, r_i vnitřní poloměr, p_e vnější tlak a r_e vnější poloměr. [36][38]

Výše uvedené rovnice slouží jako základ pro výpočet napětí, ale z důvodu složené úlohy není možné z nich všechna potřebná napětí dopočítat. Je tedy na místě zavést deformační podmínky, a to takové, že v místě styku dvou vrstev budou tečné deformace shodné. Rov. 30 tedy v podobě deformační podmínky vyjadřuje rovnost tečných deformací mezi vrstvami 1 a 2, Rov. 31 rovnost tečných deformací mezi vrstvami 2 a 3.

$$\frac{1}{E_{t1}} \sigma_t^{12} - \frac{\mu_{rt}^1}{E_{r1}} \sigma_r^{12} = \frac{1}{E_{t2}} \sigma_t^{21} - \frac{\mu_{rt}^2}{E_{r2}} \sigma_r^{21} \quad \text{Rov. 30}$$

$$\frac{1}{E_{t2}} \sigma_t^{23} - \frac{\mu_{rt}^2}{E_{r2}} \sigma_r^{23} = \frac{1}{E_{t3}} \sigma_t^{32} - \frac{\mu_{rt}^3}{E_{r3}} \sigma_r^{32} \quad \text{Rov. 31}$$

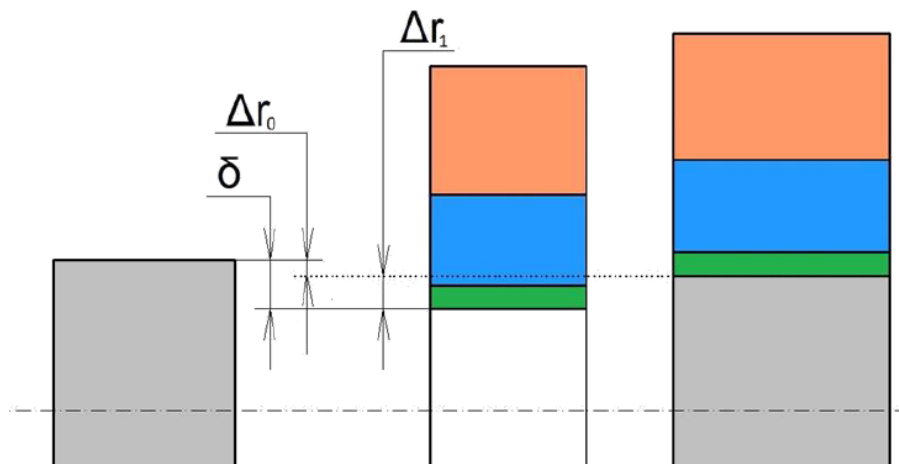
, kde přidaný horní index označuje vrstvy, na jejichž rozhraní tečné deformace působí v pořadí daná vrstva – k ní příslušná vrstva, tedy např. σ_t^{12} je tečné napětí vrstvy 1 na rozhraní s vrstvou 2. [36]

Rov. 30 a Rov. 31 jsou s pomocí Rov. 29 a předpokladu, že radiální napětí je rovno příslušnému tlaku mezi danými vrstvami, vyjádřeny ve tvaru Rov. 32 a Rov. 33 v závislosti na tlacích mezi danými vrstvami. [36]

$$\left(\frac{2r_0^2}{E_{t1}(r_1^2 - r_0^2)} \right) p_{01} + \left(-\frac{2r_1^2}{E_{t1}(r_1^2 - r_0^2)} + \frac{1}{E_{t1}} + \frac{\mu_{rt}^1}{E_{r1}} - \frac{\mu_{rt}^2}{E_{r2}} - \frac{1}{E_{t2}} - \frac{2r_1^2}{E_{t2}(r_2^2 - r_1^2)} \right) p_{12} + \left(\frac{2r_2^2}{E_{t2}(r_2^2 - r_1^2)} \right) p_{23} = 0 \quad \text{Rov. 32}$$

$$\left(\frac{2r_1^2}{E_{t2}(r_2^2 - r_1^2)} \right) p_{12} + \left(-\frac{2r_2^2}{E_{t2}(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{1}{E_{t2}} + \frac{\mu_{rt}^2}{E_{r2}} - \frac{\mu_{rt}^3}{E_{r3}} - \frac{1}{E_{t3}} - \frac{2r_2^2}{E_{t3}(r_3^2 - r_2^2)} \right) p_{23} = 0 \quad \text{Rov. 33}$$

Rov. 32 a Rov. 33 tvoří soustavu dvou lineárních rovnic o třech neznámých, pro jejich řešení je tedy nutné definovat třetí deformační podmínku, kterou je vyjádření lisovacího přesahu dle Obr. 30 a Rov. 34.



Obr. 30 – Znázornění lisovacího přesahu. [36]

$$\delta_{lis} = \Delta r_1 - \Delta r_0 \quad \text{Rov. 34}$$

, kde δ_{lis} je lisovací přesah, Δr_1 změna vnitřního poloměru trubky a Δr_0 změna poloměru hřídele. Jelikož se jedná o zápornou deformaci, znaménko v Rov. 34 je záporné. [36][38]

Vydělením Rov. 34 poloměrem vznikne tvar Rov. 35, který obsahuje tečné deformace, jejichž dosazením vznikne Rov. 36. [36][38]

$$\frac{\delta_{lis}}{r_0} = \varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t0} \quad \text{Rov. 35}$$

$$\left(\frac{1}{E_{t1}} \sigma_t^{10} - \frac{\mu_{rt}^1}{E_{r1}} \sigma_r^{10} \right) - \left(\frac{1}{E_{t0}} \sigma_t^{01} - \frac{\mu_{rt}^0}{E_{r0}} \sigma_r^{01} \right) = \frac{\delta_{lis}}{r_0} \quad \text{Rov. 36}$$

Konečná verze deformační podmínky o lisovacím přesahu je odvozena skutečností, že hřídel je vyrobena z oceli, tedy izotropního materiálu, jehož moduly pružnosti jsou totožné ve všech směrech. Dále je zohledněno, že hřídel není dutá, tím pádem mají radiální i tečná napětí konstantní průběh a rovnají se tlaku mezi hřídel a vrstvou první vrstvou trubky. S pomocí Rov. 29, která umožňuje nahradit tečná napětí tlaky, se po upravení vyjádří Rov. 37. [36]

$$\left(\frac{1-\mu_0}{E_0} + \frac{2r_0^2}{E_{t1}(r_1^2-r_0^2)} + \frac{1}{E_{t1}} + \frac{\mu_{rt}^1}{E_{r1}}\right)p_{01} - \left(\frac{2r_1^2}{E_{t1}(r_1^2-r_0^2)}\right)p_{12} = \frac{\delta_{lis}}{r_0} \quad \text{Rov. 37}$$

Rov. 37 tedy doplňuje Rov. 32 a Rov. 33 v soustavě tří rovnic o třech neznámých p_{01} , p_{12} a p_{23} , které se rovnají radiálním napětím na hranicích vrstev dle Obr. 29. Dále jsou s pomocí Rov. 29 a výsledky výše uvedené soustavy rovnic dopočítány tečná napětí na hranicích těchto vrstev. [36]

Výsledná tečná a radiální napětí jsou následně kontrolována pevnostními kritérii pro kompozitní materiály. Vzhledem k prostorové napjatosti je výhodné použít Hashinovo pevnostní kritérium. Dále jsou porovnány kontaktní tlaky, které nesmí přesáhnout maximální povolenou hodnotu kontaktních tlaků materiálu matrice. Následně je kontrolováno interlaminární napětí mezi vrstvami 1 a 2 s pomocí Rov. 38.

$$\sigma_{IL} = \frac{M_k}{2\pi r_1^2 l_{spoj}} \quad \text{Rov. 38}$$

, kde l_{spoj} je délka spoje. [36]

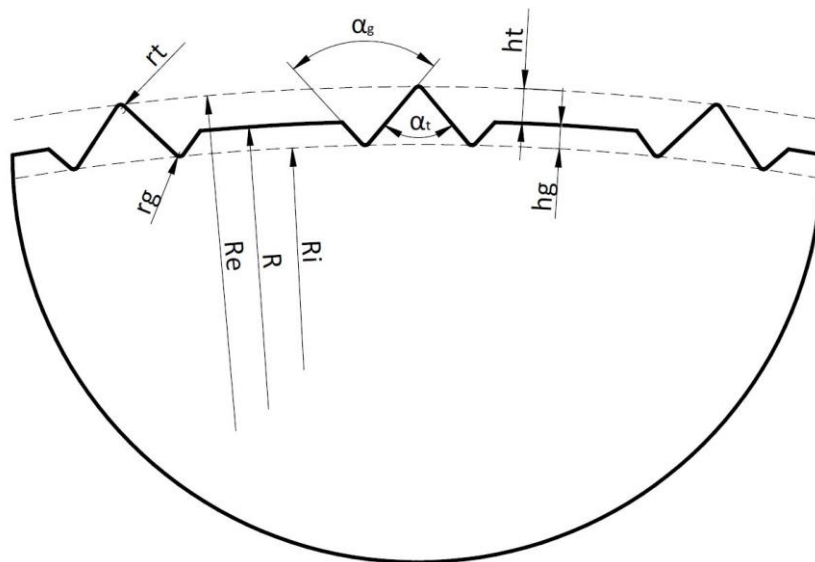
Maximální momentová únosnost spoje je pak odvozena ze vztahu pro kontaktní tlak mezi vrstvami 0 a 1 dle Rov. 39.

$$M_{kMAX} = 2\pi p_{01} r_0^2 l_{spoj} f_{ikt} \quad \text{Rov. 39}$$

, kde f_{ikt} je fiktivní koeficient tření, který bude zjištěn experimentálně. Ve skutečnosti se z důvodu drážek na hřídeli nejedná o lisovaný spoj s hladkými plochami, a tím pádem zde neodchází ke tření jako takovému, nicméně pro účely výpočtu se jako fiktivní uvažuje. [36]

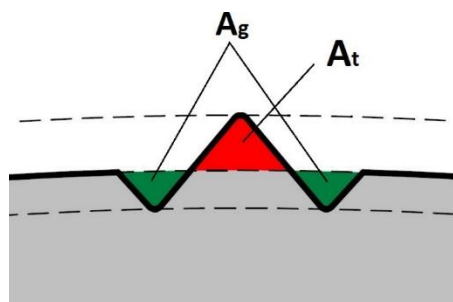
8.2. NÁVRH DRÁŽKOVÁNÍ

Jak už bylo zmíněno, tvarově lisovaný spoj, kterým se tato práce zabývá vyžaduje velmi jemné a přesně navržené drážkování, které bude vyrobeno po obvodu ocelové hřídele. Bylo vybráno drážkování dle [37], které je detailně zobrazeno na Obr. 31.



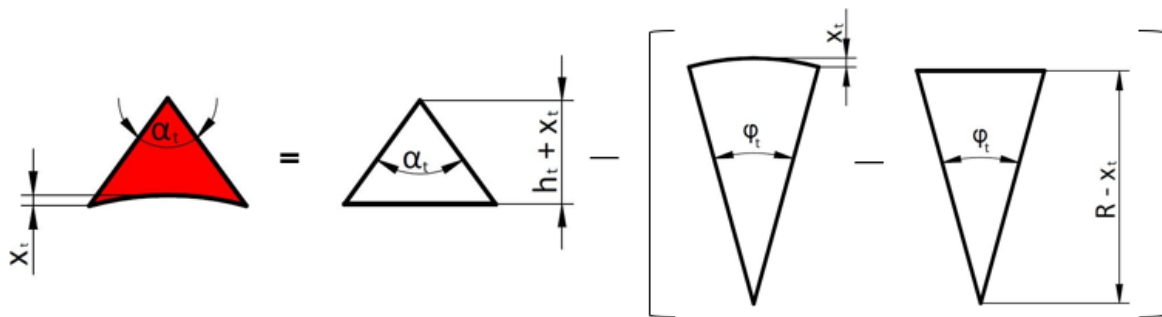
Obr. 31 – Detail drážkování ocelové hřídele. [39]

Principem takového tvarově lisovaného spoje je, aby střední průměr R hřídele tvořil dosedací plochu na vnitřní průměr r_0 kompozitní trubky. Tím pádem zuby, které jsou nad středním průměrem R budou vtlačeny do vrstvy 1 kompozitní trubky a vytlačený materiál by v ideálním případě měl zaplnit drážky, které jsou pod středním průměrem ocelové hřídele. Z toho důvodu je cílem zajistit, aby materiál, vytlačený jedním zubem měl stejný objem, jako dvě drážky vedle daného zubu. Jelikož je délka spoje shodná pro zuby i drážky, je tedy cílem zajistit shodnou plochu zubu a dvou drážek v kolmém řezu ocelovou hřídelí dle Obr. 32.



Obr. 32 – Plocha zubu a přilehlých drážek. [39]

Výpočet plochy zubu je schematicky zobrazen na Obr. 33 a uveden Rov. 40.

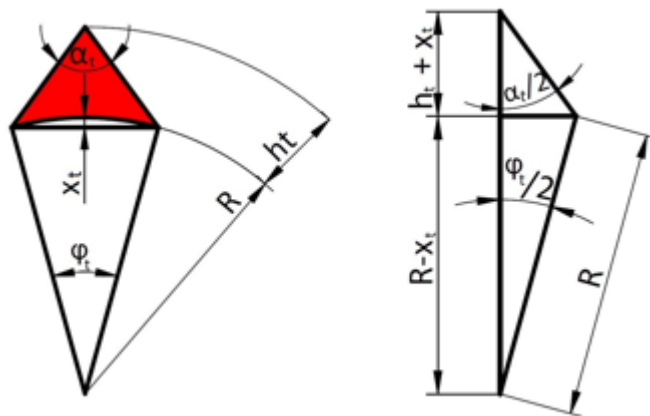


Obr. 33 – Schematický výpočet obsahu zubu. [39]

$$A_t = (h_t + x_t)^2 \tan\left(\frac{\alpha_t}{2}\right) - \left[\frac{1}{2}R^2\varphi_t - (R - x_t)^2 \tan\left(\frac{\varphi_t}{2}\right)\right] \quad \text{Rov. 40}$$

, kde A_t je plocha zubu, h_t výška zubu, x_t výška zaoblené části, α_t úhel zubu, R střední poloměr a φ_t roztečný úhel zubu. [39]

Neznámé x_t a φ_t z Rov. 40 jsou vypočteny na základě trojúhelníků na Obr. 34. a uvedeny v Rov. 41 a Rov. 42, úhel zubu α_t je zvolen. [39]



Obr. 34 – Náčrt trojúhelníků pro výpočet neznámých v rovnici obsahu zubu. [39]

$$R^2 - (R - x_t)^2 = \left[(h_t + x_t) \tan\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right]^2$$

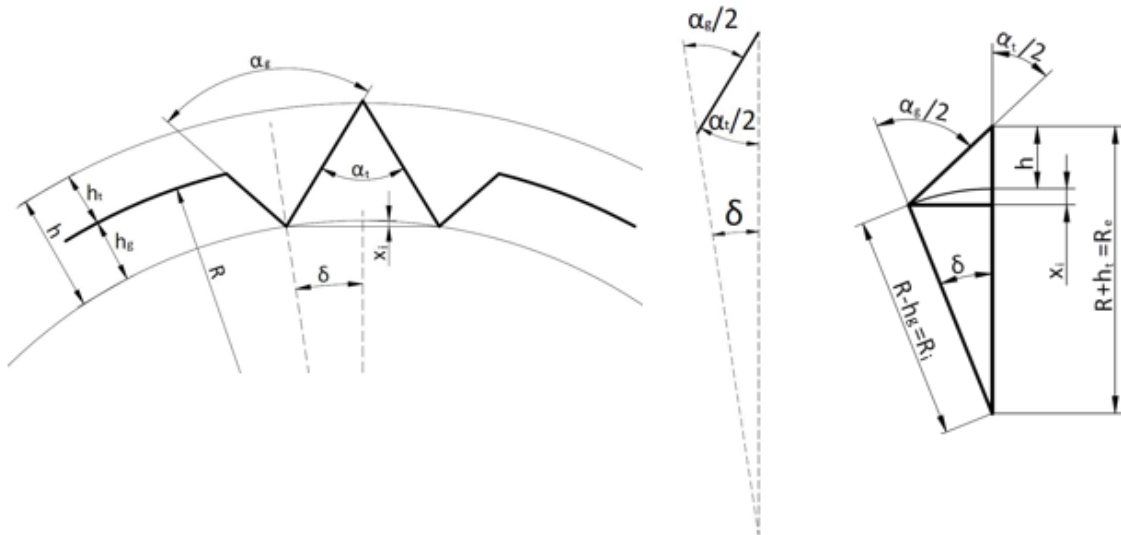
$$\left[1 + \tan^2\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right] x_t^2 + \left[2h_t \tan^2\left(\frac{\alpha_t}{2}\right) - 2R\right] x_t + h_t^2 \tan^2\left(\frac{\alpha_t}{2}\right) = 0 \quad \text{Rov. 41}$$

$$\cos\left(\frac{\varphi_t}{2}\right) = \frac{R - x_t}{R}$$

$$\varphi_t = 2 \cos^{-1}\left(\frac{R - x_t}{R}\right)$$

Rov. 42

Před výpočtem plochy drážky je třeba dopočítat úhel drážky dle Obr. 35 a Rov. 43, Rov. 44 a Rov. 45.



Obr. 35 – Náčrt pro výpočet úhlu mezi drážkou a zubem. [39]

$$\alpha_g = \alpha_t + 2\delta$$

Rov. 43

, kde δ je úhel mezi drážkou a zubem.

$$(R - h_g) \sin(\delta) = (h + x_i) \tan\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)$$

$$\delta = \sin^{-1}\left[\frac{h + x_i}{R - h_g} \tan\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right]$$

Rov. 44

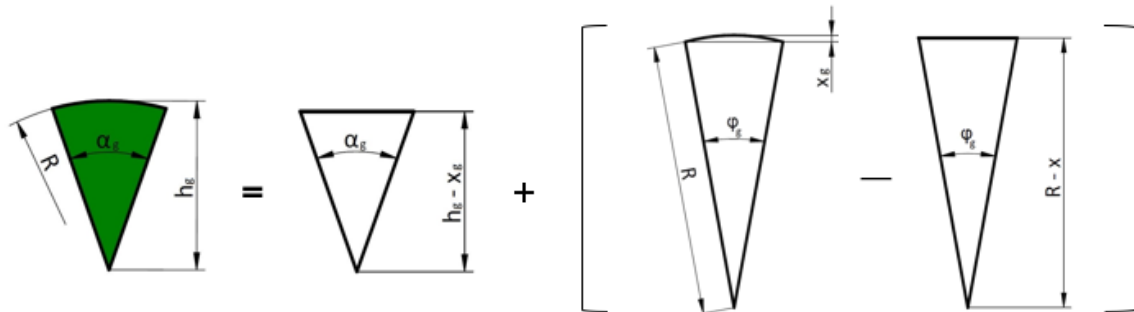
, kde x_i je výška zaoblené části.

$$R_i^2 - (R_i - x_i)^2 = \left[(h + x_i) \tan\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right]^2$$

Rov. 45

$$\left[1 + \cotg^2\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right] x_i^2 + \left[2h - 2R_i \cotg^2\left(\frac{\alpha_t}{2}\right)\right] x_i + h^2 = 0$$

Výpočet plochy drážek je podobně jako pro zub schematicky zobrazen na *Obr. 36* a uveden *Rov. 46*.

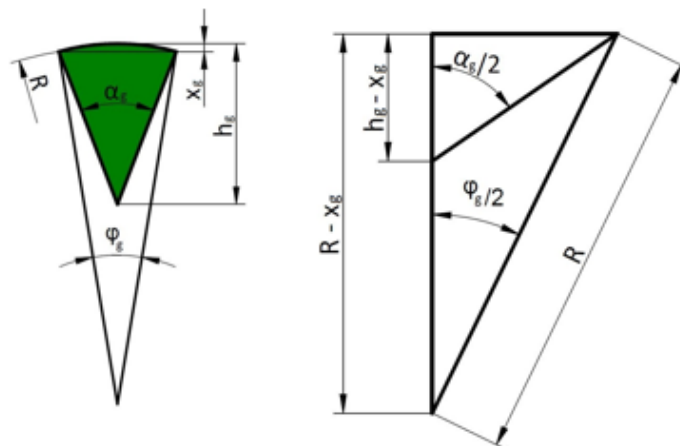


Obr. 36 – Schematický výpočet obsahu drážky. [39]

$$A_g = (h_g - x_g)^2 \tan\left(\frac{\alpha_g}{2}\right) + \frac{1}{2} R^2 \varphi_g - (R - x_g)^2 \tan\left(\frac{\varphi_g}{2}\right) \quad \text{Rov. 46}$$

, kde A_g je plocha drážky, h_g výška drážky, x_g výška zaoblené části, α_g úhel drážky a φ_g roztečný úhel drážky. [39]

Neznámé x_g a φ_g z *Rov. 46* jsou vypočteny na základě trojúhelníků na *Obr. 37*. a uvedeny v *Rov. 47* a *Rov. 48*. [39]



Obr. 37 – Náčrt trojúhelníků pro výpočet neznámých v rovnici obsahu drážky. [39]

$$R^2 - (R - x_g)^2 = \left[(h_g - x_g) \tan\left(\frac{\alpha_g}{2}\right) \right]^2$$

Rov. 47

$$\left[1 + \tan^2\left(\frac{\alpha_g}{2}\right) \right] x_g^2 + \left[-2h_g \tan^2\left(\frac{\alpha_g}{2}\right) - 2R \right] x_g + h_g^2 \tan^2\left(\frac{\alpha_g}{2}\right) = 0$$

$$\cos\left(\frac{\varphi_g}{2}\right) = \frac{R - x_g}{R}$$

Rov. 48

$$\varphi_g = 2 \cos^{-1}\left(\frac{R - x_g}{R}\right)$$

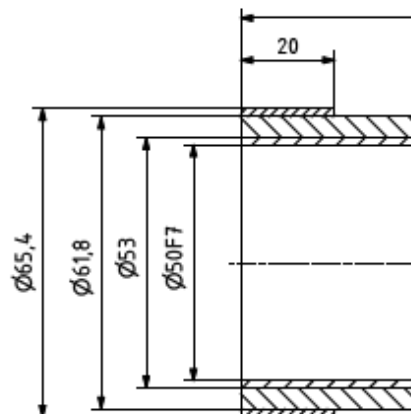
8.3. DESIGN ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Na základě vztahů uvedených v předešlých kapitolách byly navrženy zkušební vzorky o konkrétních rozměrech.

8.3.1. KOMPOZITNÍ TRUBKA

Kompozitní trubky jsou vyrobeny technologií navíjení a skládají se ze tří různých vrstev. Výztuž první vrstvy tvoří skleněná vlákna s orientací 0° (rovnoběžně s osou trubky), druhá vrstva je vyztužena vysokopevnostními (HS) uhlíkovými vlákny s orientací ±45° a třetí vrstvu tvoří ultravysokomodulová (UHM) uhlíková omotávka s orientací vláken 90°. Každá vrstva má konkrétní funkci. Orientace i samotný výběr skleněných vláken v první vrstvě má zajistit snadné zaříznutí zubů hřídele do trubky, HS vlákna ve druhé vrstvě jsou navržena tak, aby vzdorovala co největšímu napětí v krutu a třetí vrstva má za úkol zvýšit radiální tuhost, z toho důvodu je na trubce navinuta pouze v délce spoje. Materiálem matrice je pro všechny vrstvy epoxidová pryskyřice.

Na Obr. 38 je znázorněn 3D model kompozitní trubky společně s pár vybranými detaily výrobního výkresu (Příloha 1) a následující Tab. 4 shrnuje podstatné rozměry. Trubky jsou vzhledem k technologii zkoušení navrženy pro nalisování hřídele na obou koncích.



Obr. 38 – Kompozitní trubka.

Tab. 4 – Vybrané rozměry kompozitní trubky.

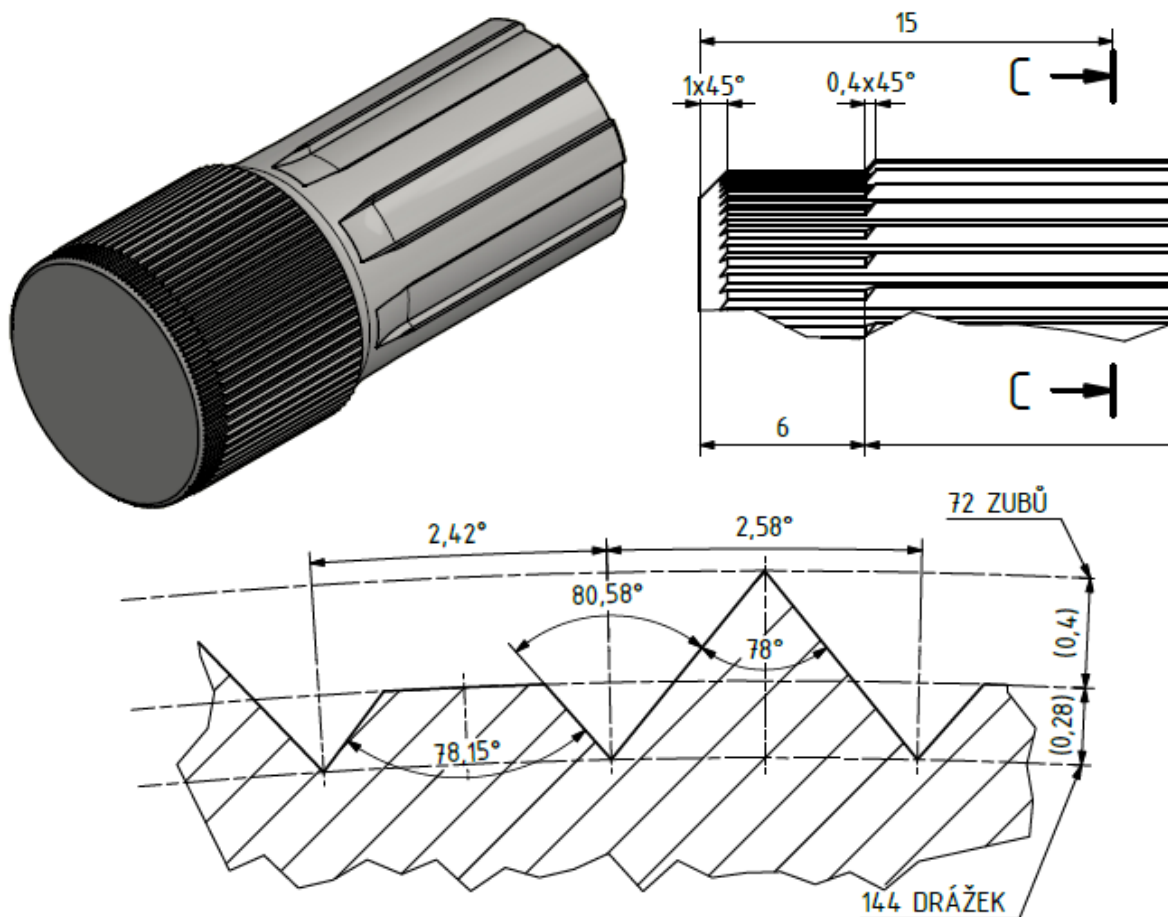
Vnitřní průměr	D_0	50 mm
Tloušťka skleněné vrstvy	t_1	1,50 mm
Tloušťka uhlíkové vrstvy	t_2	4,40 mm
Tloušťka omotávky	t_3	1,80 mm
Délka trubky	l_T	300 mm
Délka omotávky	l_3	20 mm

Trubky s výše uvedenými rozměry byly testovány na krut, mimo to byly vyrobeny i kratší, jednostranné vzorky, které byly po nalisování metalograficky vybroušeny a sloužily ke zkoumání mikrostruktury spoje.

8.3.2. OCELOVÁ HŘÍDEL

Hřídele jsou obrobeny z konstrukční oceli S355. Na jednom konci je vyfrézováno rovnoboké drážkování, které zajišťuje upevnění do zkušebního zařízení. Na druhém konci je technologií elektroerozivního obrábění zhotoveno již zmiňované drážkování, které zajišťuje spoj s kompozitní trubkou.

Na Obr. 39 je 3D model hřídele spolu s vybranými detaily z výrobního výkresu (Příloha 2), následuje Tab. 5, které obsahuje vybrané rozměry hřídele.



Obr. 39 – Ocelová hřídel.

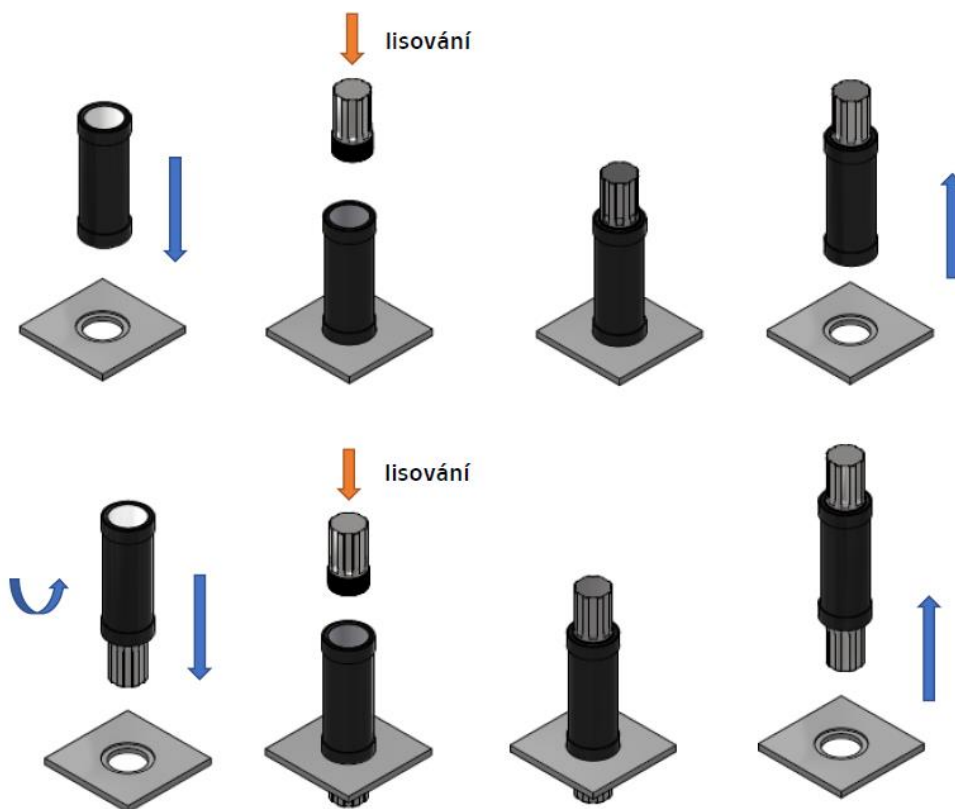
Drážky na hřídeli jsou zhotoveny od samotného čela, zatímco zuby jsou odsazeny. Důvodem je zajištění středící plochy pro lisování. Jak již bylo zmíněno, zuby a drážky jsou navrženy tak, aby se zub zaryl do skleněné vrstvy a vytlačil materiál do dvou drážek vedle něj. S tím souvisí jednak požadavek na shodný objem drážek, respektive obsah jejich řezu, nicméně i celá opakovatelnost drážkování je tím pádem vždy skupina drážka-zub-drážka a mezera. Tato mezera je libovolná a může být modifikována dle výsledků prvních zkoušek. Jedná se také o dosedací plochu se stejným průměrem jako je vnitřní průměr trubky, hraje tedy roli ve správném středění při lisování. Zvětšováním této mezery bude tedy spoj lépe vystředěn, avšak dojde k úbytku skupin drážka-zub-drážka. Proto je zapotřebí najít kompromis mezi nutným počtem těchto skupin vzhledem k přenášenému momentu a velikostí mezery pro zajištění lepšího středění.

Tab. 5 – Vybrané rozměry ocelové hřídele.

Střední průměr	d	50 mm
Výška zubu	h_t	0,40 mm
Úhel zubu	α_t	78,00°
Výška drážky	h_g	0,28 mm
Úhel drážky	α_g	80,58° mm
Délka hřídele	l_H	112 mm
Počet zubů		72
Počet drážek		144

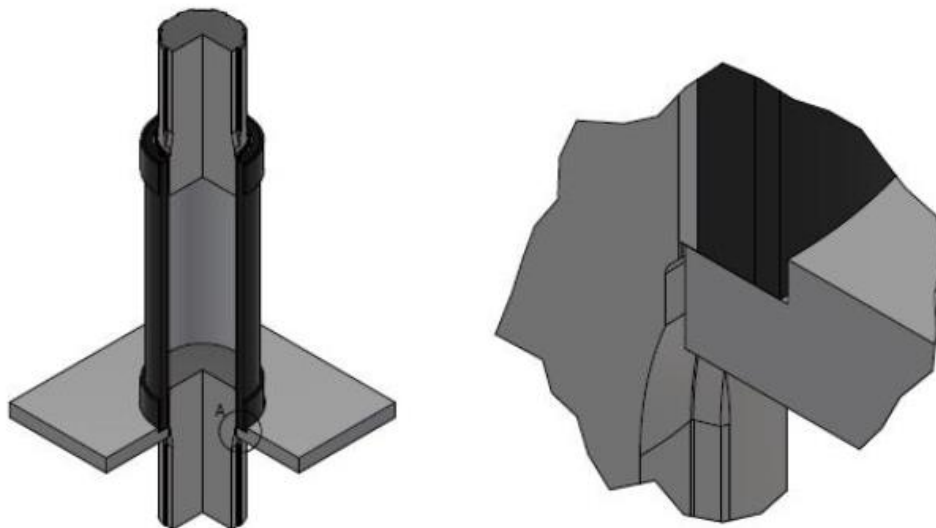
8.3.3. TVAROVĚ LISOVANÝ SPOJ

Lisování probíhá s pomocí lisu s průchozím stolem a lisovací desky s dírou, aby bylo možné nalisovat hřídele do obou konců trubky. Průběh lisování je naznačen na Obr. 40.



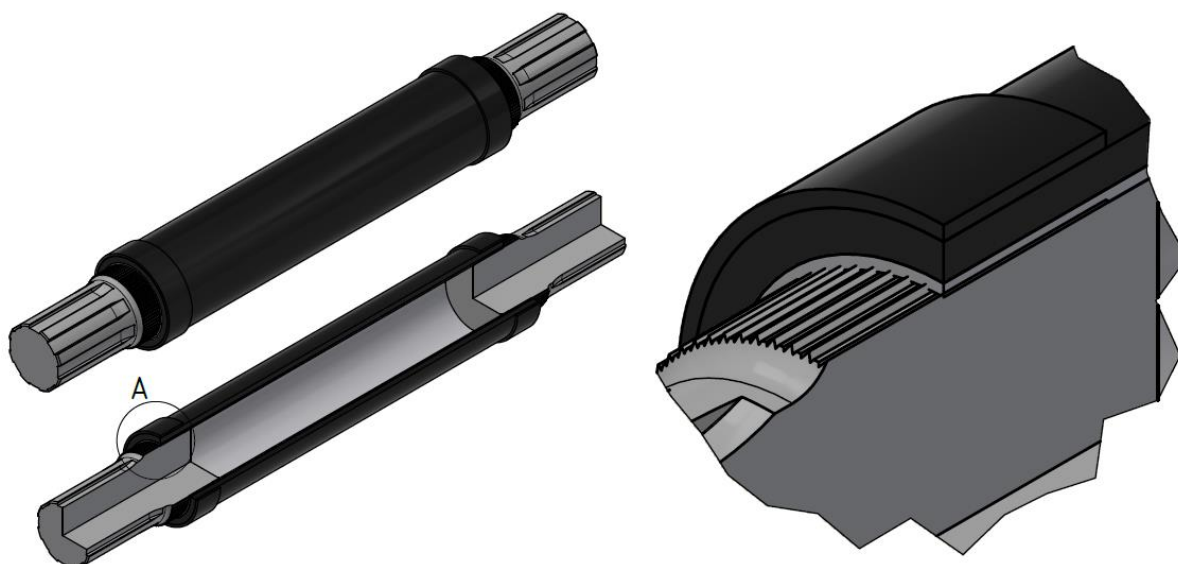
Obr. 40 – Lisování hřídelí do trubky.

Do lisovací desky je vyfrézován otvor, který zajistí přesné dosednutí trubky. Následně je z vrchní části nalisována první hřídel. Poté se trubka otočí, dříve nalisovaná hřídel projde otvorem a trubka opět dosedne do vybrání v lisovací desce. Následuje lisování druhé hřídele stejným způsobem. Detail dosednutí je znázorněn na Obr. 41.



Obr. 41 – Detail kontaktu lisovací desky a trubky při lisování.

Na Obr. 42 je 3D model a vybrané detaily tvarově lisovaného spoje.



Obr. 42 – Tvarově lisovaný spoj kompozitní trubky a ocelových hřídelí.

9. PEVNOSTNÍ KONTROLA SPOJE

Navržený zkušební vzorek byl podroben pevnostním kontrolám jak analytickým přístupem, tak použitím metody konečných prvků. Cílem bylo zjistit hodnoty lisovacího tlaku mezi ocelovou hřídelí a kompozitní trubkou, průběh tohoto tlaku v závislosti na délce vrstvy 3 kompozitní trubky a koeficienty porušení dle Hashina po zatížení krouticím momentem. Pro všechny výpočty bylo vycházeno z geometrie vzorku (8.3) a byly uvažovány materiálové vlastnosti dodané výrobcem kompozitní trubky (Příloha 3).

Do výpočtů vstupují také dva modifikovatelné parametry, které z důvodu drážkované geometrie spoje nelze exaktně určit, avšak použitý model silnostěnných lisovaných nádob, potažmo definice kontaktů pro MKP simulaci hodnoty těchto koeficientů vyžaduje. Zmíněný model silnostěnných nalisovaných nádob uvažuje hladké rozhraní, je tím pádem zanedbáno drážkování na hřídeli, což se promítá do hodnoty lisovacího přesahu definovaného v rovnicích tohoto modelu. Tento parametr byl zvolen, protože se nejedná o spoj s hladkými plochami, a tak nelze jednoznačně určit. Ze stejného důvodu byl zaveden i druhý parametr, kterým je fiktivní koeficient tření mezi ocelovou hřídelí a skleněnou vrstvou kompozitní hřídele. Na základě výsledků analytiky, MKP analýzy a mechanických zkoušek může být laděním těchto zvolených parametrů dosaženo relativně shodných výsledků a takové hodnoty mohou být použity pro jednoduchý návrhový výpočet pro dimenzování únosnosti spoje.

Hodnoty obou zvolených parametrů a hodnota zatížení krouticím momentem jsou uvedeny v *Tab. 6*.

Tab. 6 – Výpočetní parametry.

Fiktivní lisovací přesah	δ_{lis}	0,1 mm
Fiktivní koeficient tření	f_{fikt}	1
Krouticí moment	M_k	1500 Nm

9.1. ANALYTICKÝ PŘÍSTUP

9.1.1. TLAKY MEZI VRSTVAMI PO NALISOVÁNÍ

Dle kapitoly 8.1 byl uvažován model silnostěnných nalisovaných nádob. Vstupními parametry byly rozměry zkušebního vzorku a materiálové parametry jednotlivých vrstev

– inženýrské konstanty. Modul pružnosti a Poissonovo číslo pro ocel, jakožto izotropní materiál, a pro vrstvy kompozitní trubky byly výrobcem dodány hodnotu modulů pružnosti a příslušné Poissonovy konstanty v jednotlivých směrech (*Příloha 3*). Potřebné hodnoty tečných a radiálních modulů pružnosti a příslušných Poissonových čísel byly určeny klasickou laminační teorií v závislosti na orientaci vláken v jednotlivých vrstvách.

Výsledkem jsou tlaky mezi jednotlivými vrstvami (*Tab. 7*) – tedy v případě rozhraní označeném 01 se jedná o lisovací tlak mezi ocelovou hřídelí a kompozitní trubicí. Výsledky 12 a 23 jsou radiální napětí na rozhraní vrstev kompozitní trubky.

Tab. 7 – Analyticky určené hodnoty tlaků mezi jednotlivými vrstvami.

Lisovací tlak	p_{01}	57,72 MPa
Tlak na rozhraní 1-2	p_{12}	48,45 MPa
Tlak na rozhraní 2-3	p_{23}	37,17 MPa

9.1.2. HASHINOVO PEVNOSTNÍ KRITÉRIUM

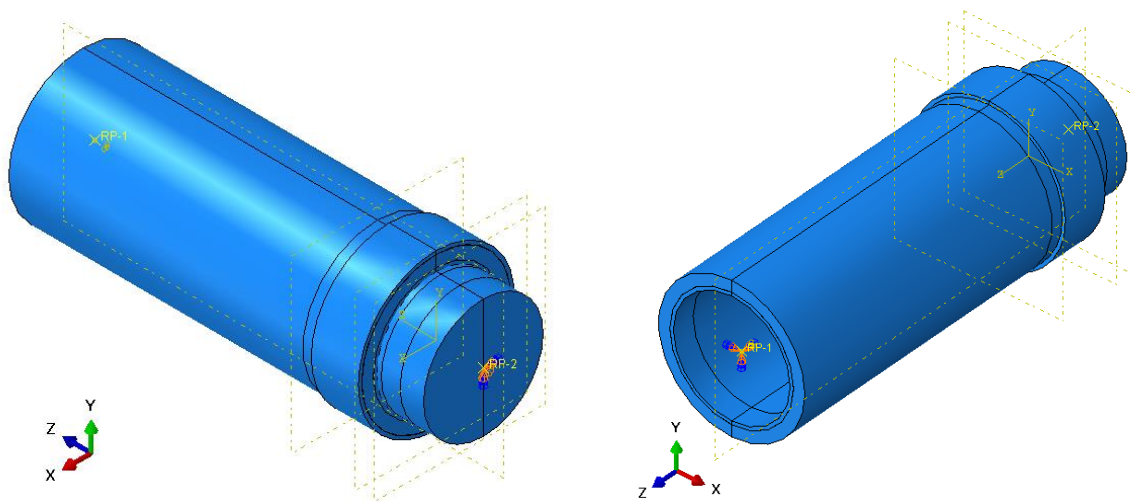
Dle vztahů uvedených v 9.1.2 byly vypočteny koeficienty, které vychází z jednotlivých módů porušení vláken, případně matrice v tahu, případně tlaku. Podmínkou pro vyhovění zvoleného kritéria je, aby vypočtené koeficienty byly menší než 1. Do vztahů pro výpočet těchto koeficientů vstupují prvky tenzoru napětí, které byly spočteny klasickou laminační teorií na základě výsledků lisovacích tlaků a průběhu napětí způsobeného zatížením krouticím momentem. Hashinovy koeficienty nebyly počítány pro vrstvu 1, protože tam dochází k zarytí ocelové hřídele do této skleněné vrstvy a tím pádem k jistému porušení materiálu. V *Tab. 8* jsou uvedeny analyticky získané výsledky Hashinových koeficientů pro vrstvy 2 a 3 v módu, který vychází z podmínky kritéria.

Tab. 8 – Analyticky určené hodnoty Hashinových koeficientů pro jednotlivé vrstvy.

V2 – mód porušení vláken v tahu	D_{FT}^{V2}	0,1180
V2 – mód porušení vláken v tlaku	D_{FC}^{V2}	0,0356
V2 – mód porušení matrice v tahu	D_{MT}^{V2}	2,2704
V2 – mód porušení matrice v tlaku	D_{MC}^{V2}	0,8155
V3 – mód porušení vláken v tahu	D_{FT}^{V3}	0,1333
V3 – mód porušení matrice v tahu	D_{MC}^{V3}	0,2023

9.2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

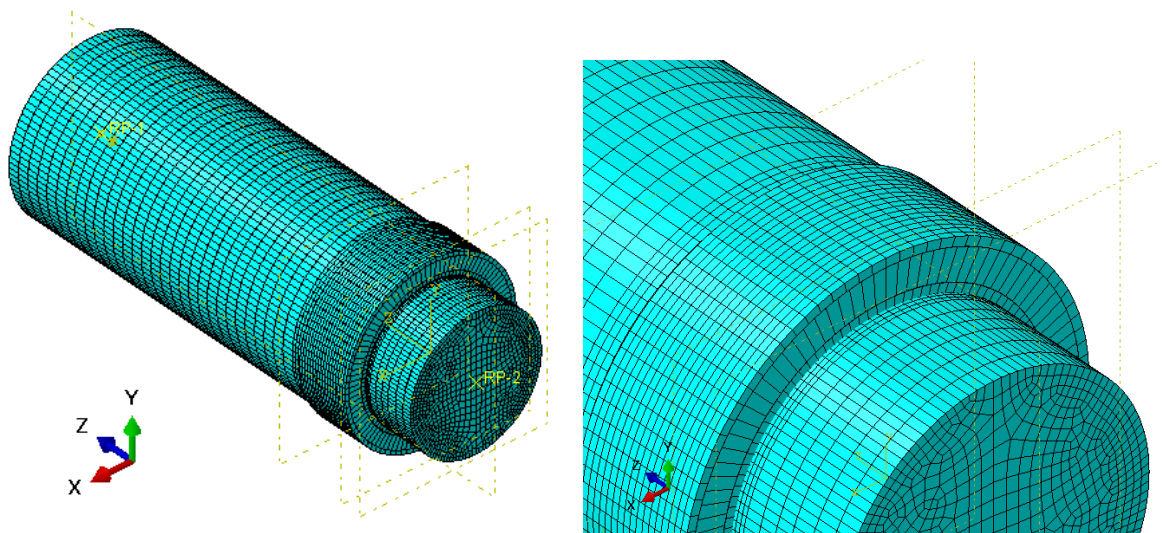
MKP analýzy byly provedeny dvěma různými přístupy, a to s uvažováním rovinné, respektive prostorové napjatosti. Pro oba přístupy byl z hlediska geometrie a zatížení použit stejný model (Obr. 43), který okrajovými podmínkami a způsobem namáhání odpovídá plánované fyzické zkoušce. Z hlediska okrajových podmínek bylo zvoleno vetknutí referenčního bodu svázaného s částí vnitřního pláště kompozitní trubky a dále byla zavedena okrajová podmínka, která zakazuje všechny pohyby kromě rotace kolem osy Z do referenčního bodu, který je svázán s částí pláště ocelové hřídele. Zatížení v podobě krouticího momentu bylo aplikováno do druhého zmíněného referenčního bodu. Kontakt mezi ocelovou hřídelí a první vrstvou kompozitní trubky byl nasimulován jako Hard Contact s definovaným fiktivním koeficientem tření. Do definice kontaktů mezi jednotlivými vrstvami kompozitní trubky byla mimo zmíněných parametrů pro kontakt s ocelovou hřídelí přidána ještě kohezivní vlastnost, která vychází z technologie výroby tak, že vrstvy jsou na sebe navinuty a takový výrobek je nerozebíratelný. Simulace byla rozdělena do více na sebe navazujících kroků, aby bylo možné získat výsledky kontaktních tlaků po nalisování, před zatížením krouticím momentem, naopak výsledky napětí byly počítány po zatížení krouticím momentem. Ostatní parametry se liší v závislosti na metodě výpočtu a budou přiblíženy v následujících odstavcích. Ocelová hřídel byla v obou případech počítána pomocí izotropních 3D elementů, definovaných modulem pružnosti a Poissonovým číslem.



Obr. 43 – MKP model před síťováním.

2D ELEMENTY

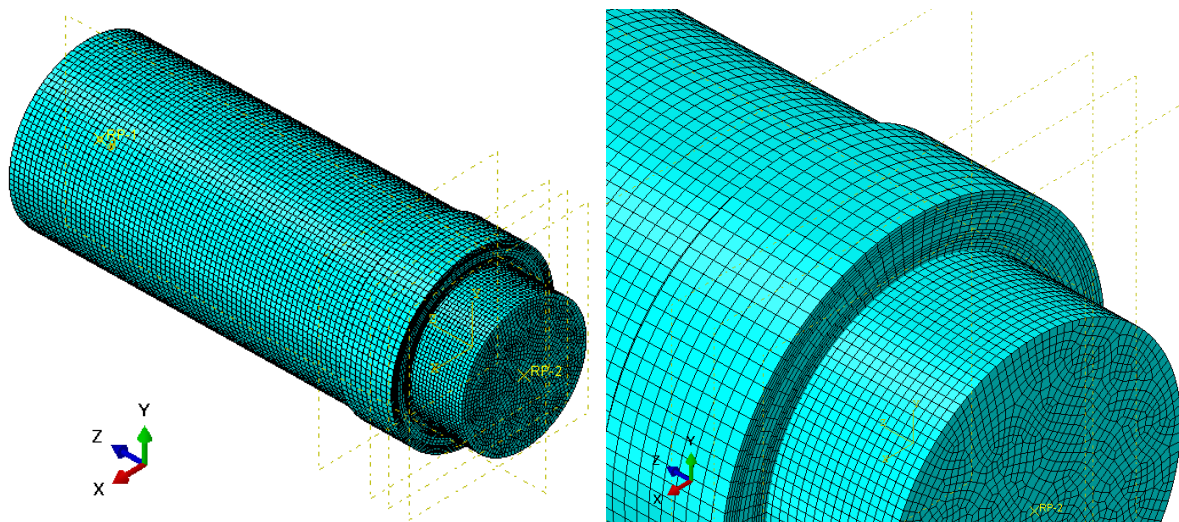
První zmíněný přístup je méně výpočetně náročný, ale jeho nevýhodou je zanedbání tloušťky samotného elementu. Jednotlivé vrstvy kompozitní trubky byly vymodelovány pomocí elementu typu Continuum Shell a funkce Composite Layup dostupné právě pro rovinné úlohy. Přes tloušťku vrstvy byl použit zpravidla jeden element (Obr. 44), aby výsledkem byly hodnoty na rozhraní daných vrstev. Materiálové parametry byly zadány v podobě inženýrských konstant.



Obr. 44 – MKP model se sítí typu Continuum Shell.

3D ELEMENTY

Tento přístup je z hlediska výpočtu podstatně náročnější, avšak mnohem přesnější. Není zanedbána tloušťka vrstev a celý problém je řešen prostřednictvím elementu 3D Stress, jedná se tedy o prostorovou úlohu. Na rozdíl od 2D elementu tento případ neumožňuje použití funkce Composite Layup. Tím pádem musela být každá vrstva z hlediska orientace vláken vymodelována zvlášť. Z hlediska geometrie to nic neměnilo na vrstvách 1 a 3, které mají orientaci 0°, respektive 90°. Na rozdíl od vrstvy 2, která má orientaci +45°/-45° a musela být nahrazena třemi podvrstvami. První, s orientací 45° a tloušťkou 1/4 tloušťky vrstvy 2, druhou, s orientací -45° a tloušťkou 1/2 vrstvy 2, a nakonec třetí, s orientací opět 45° a tloušťkou opět 1/4 vrstvy 2. Cílem bylo nahradit reálnou orientaci vláken do proporčně orientovaných podvrstev. Přes tloušťku vrstvy byly modelovány 3 elementy (Obr. 45). Materiál byl v tomto případě definován jako Orthotropic a vstupními parametry jsou prvky matice, vypočtené dle [40] z inženýrských konstant kompozitů.

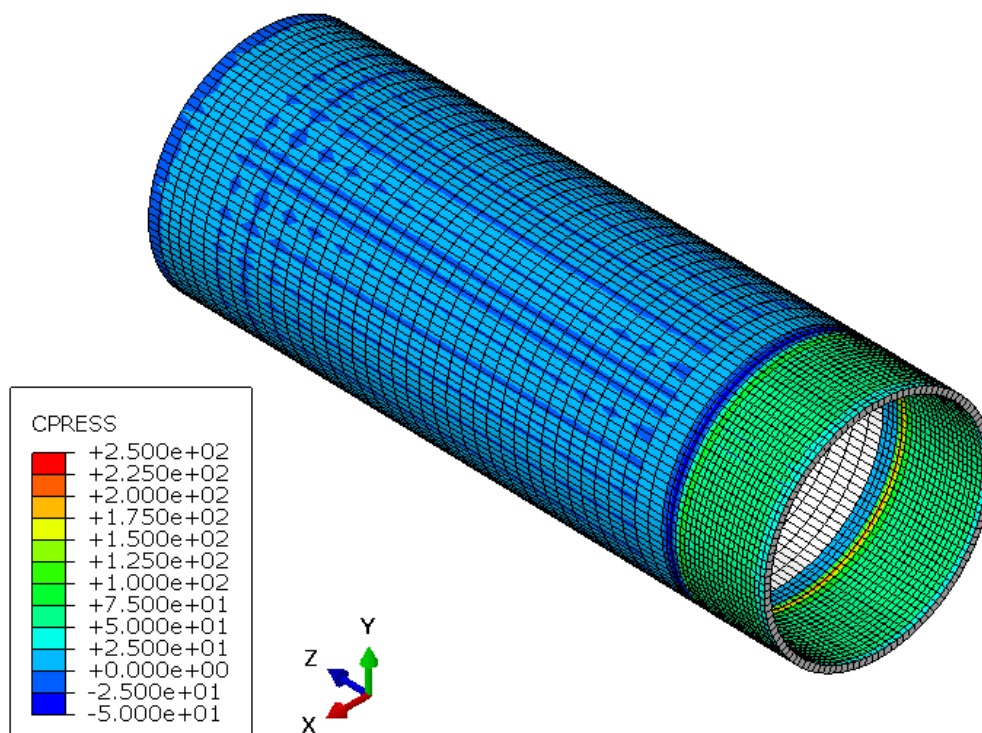


Obr. 45 – MKP model se sítí typu 3D Stress.

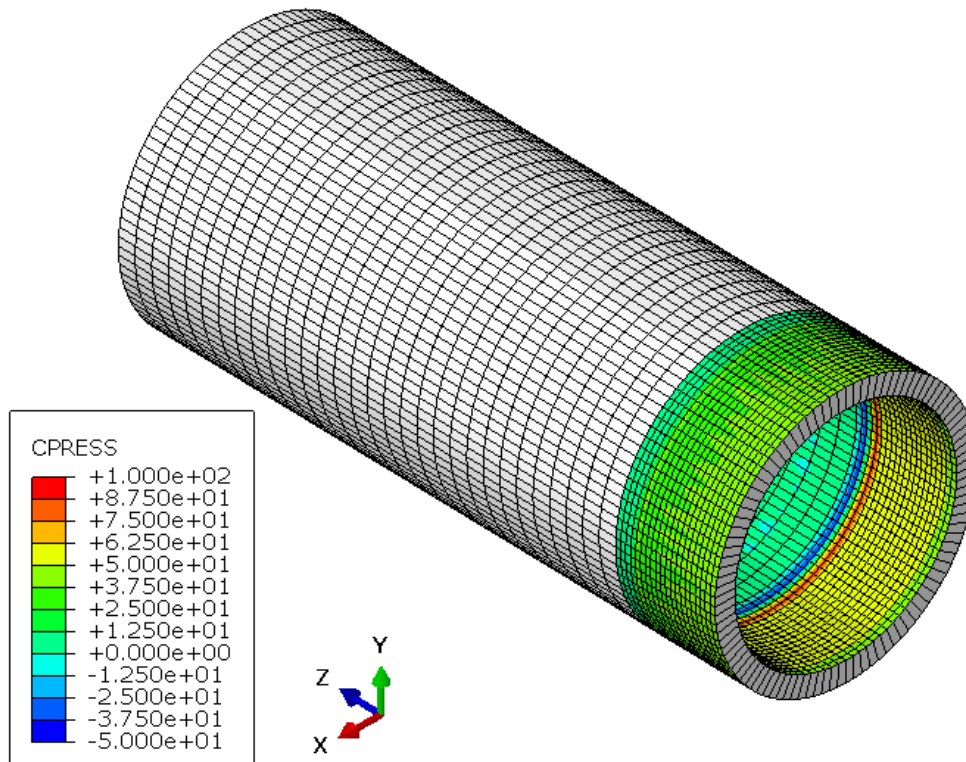
9.2.1. TLAKY MEZI VRSTVAMI PO NALISOVÁNÍ

2D CONTINUUM SHELL ELEMENTY

Na následujících obrázcích jsou znázorněny kontaktní tlaky na rozhraní vrstev s uvažováním rovinné napjatosti.

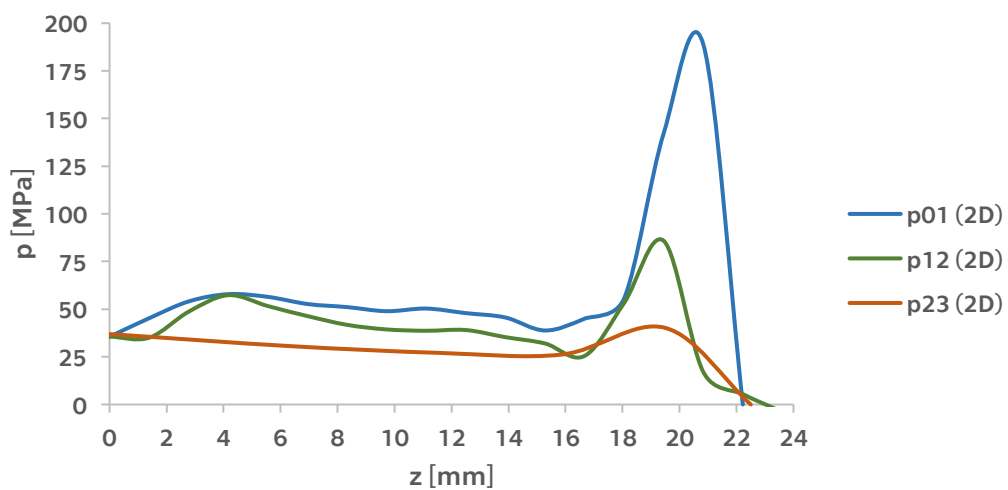


Obr. 46 – Vrstva 1, 2D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 01 a 12.



Obr. 47 – Vrstva 2, 2D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 12 a 23.

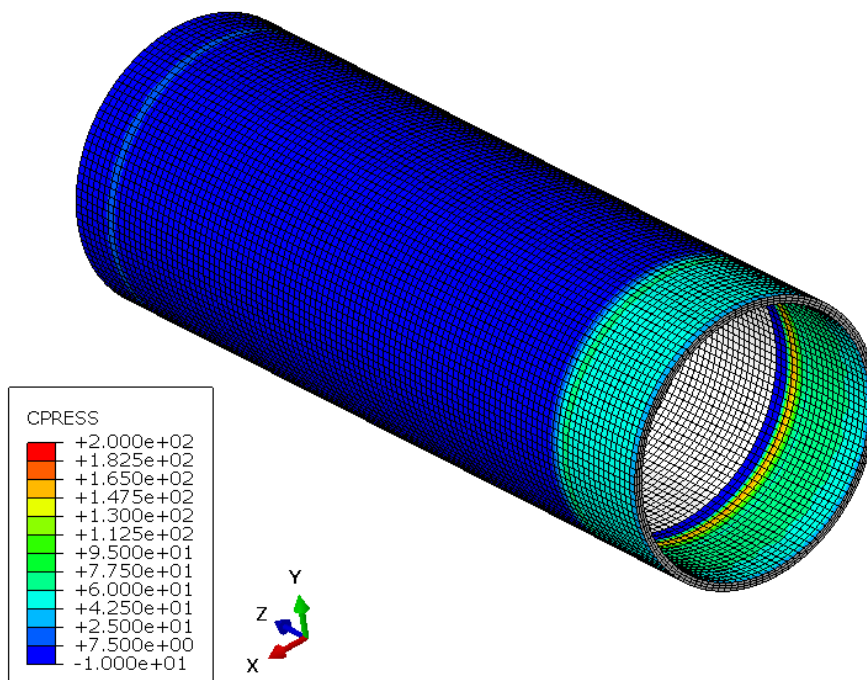
Následující graf (Obr. 48) znázorňuje průběhy tlaků mezi jednotlivými vrstvami v oblasti lisovaného spoje ($z = 0$ mm vždy uvažováno jako čelo trubky ze strany nalisování). Jedná se o průměrnou hodnotu tlaků na rozhraní dílčích vrstev, určenou pro každou souřadnici Z zvlášť.



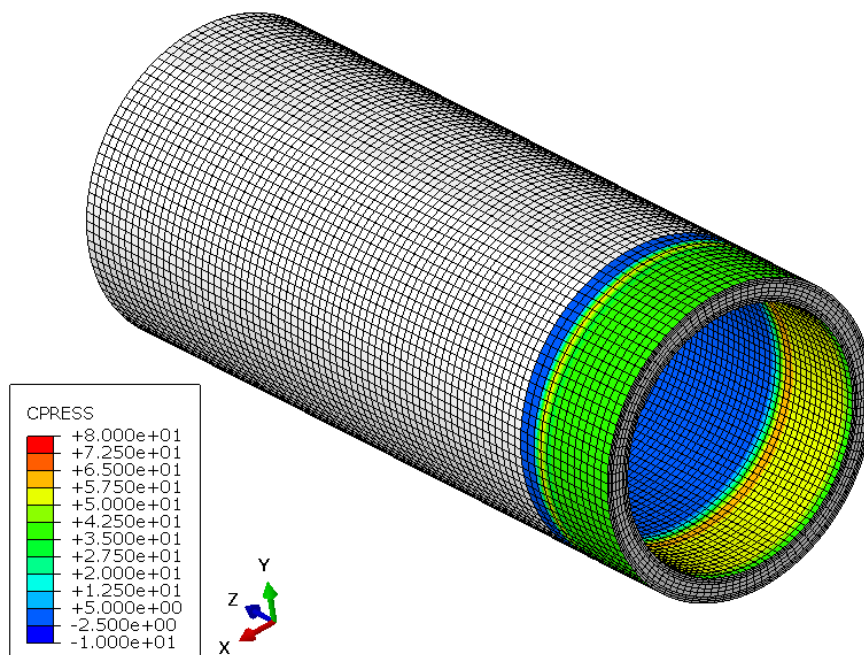
Obr. 48 – Průběh tlaků v oblasti lisovaného spoje, 2D elementy.

3D STRESS ELEMENTY

Na následujících obrázcích jsou znázorněny kontaktní tlaky na rozhraní vrstev s uvažováním prostorové napjatosti.

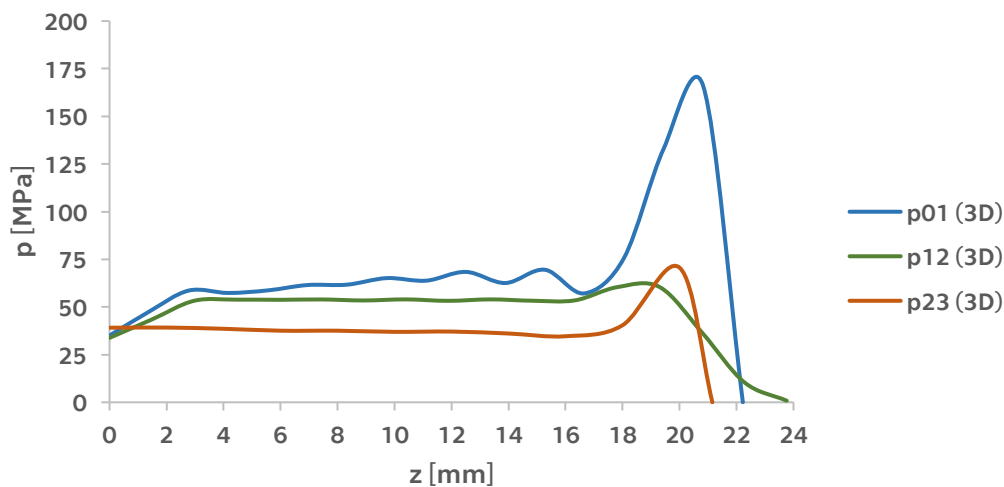


Obr. 49 – Vrstva 1, 3D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 01 a 12.



Obr. 50 – Vrstva 2, 3D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 12 a 23.

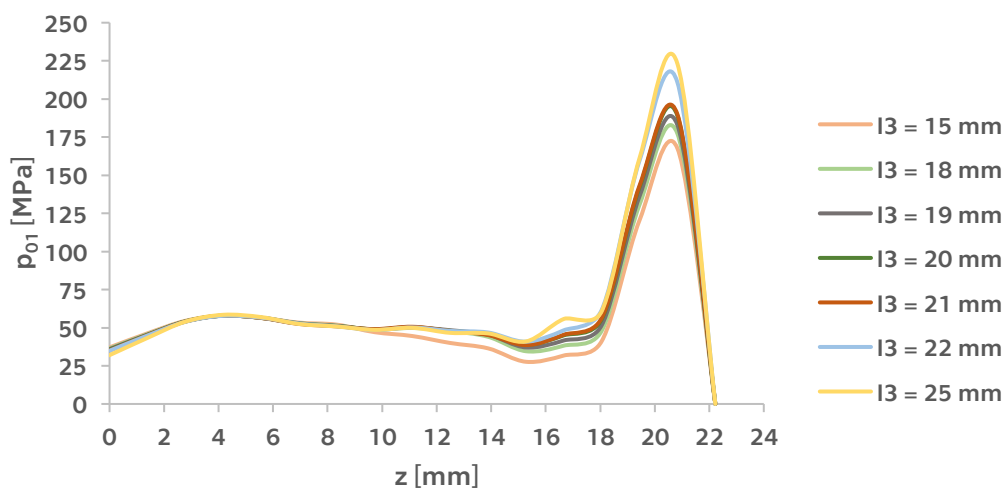
Následující graf (Obr. 51) znázorňuje průběhy tlaků mezi jednotlivými vrstvami v oblasti lisovaného spoje. Jedná se o průměrnou hodnotu tlaků na rozhraní dílčích vrstev, určenou pro každou souřadnici Z zvlášť.



Obr. 51 – Průběh tlaků v oblasti lisovaného spoje, 3D elementy.

9.2.2. VLIV DÉLKY OMOTÁVKY NA LISOVACÍ TLAK

Pro délku spoje 20 mm byly prostřednictvím 2D elementů vymodelovány případy, kdy se délka vrstvy 3 liší v rozmezí -5/+5 mm od délky spoje. Cílem bylo zjistit průběhy lisovacích tlaků v závislosti na délce této vrstvy. Následující graf zobrazuje průběhy pro zmíněné případy.

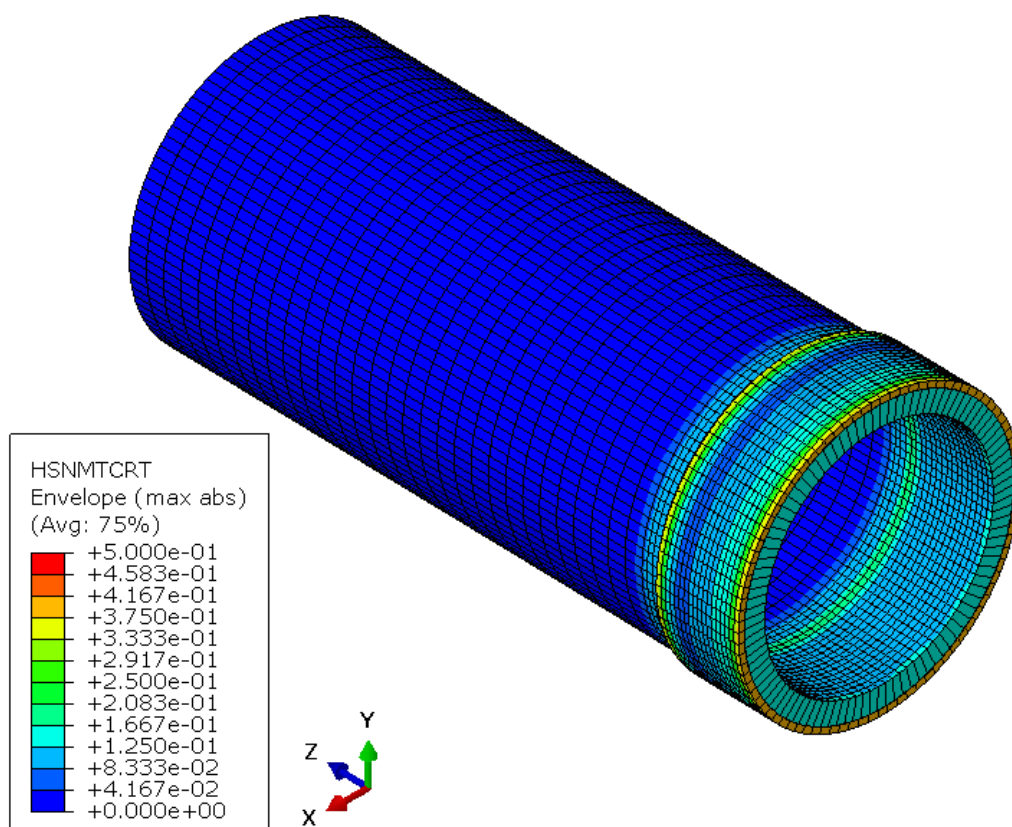


Obr. 52 – Průběhy lisovacích tlaků v závislosti na délce vrstvy 3 (2D).

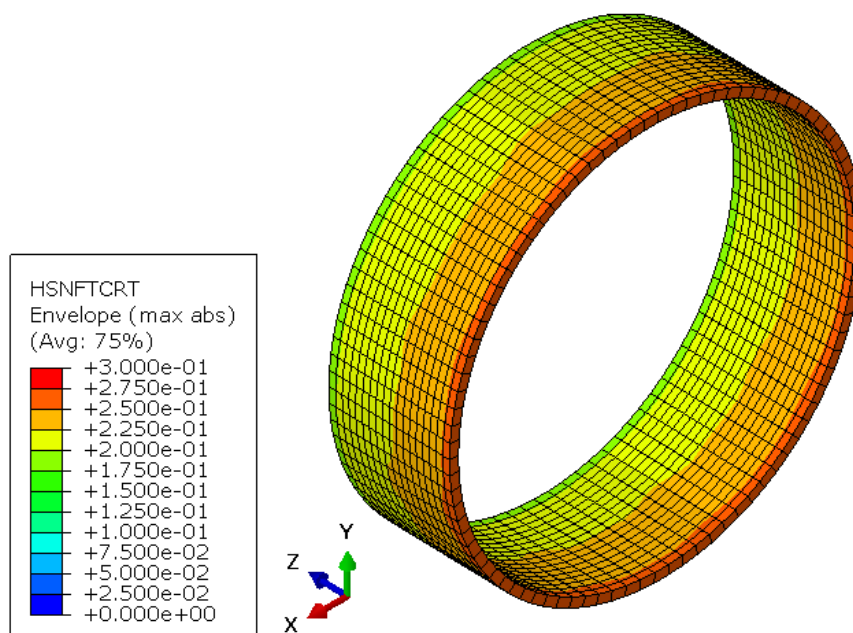
9.2.3. HASHINOVO PEVNOSTNÍ KRITÉRIUM

2D CONTINUUM SHELL ELEMENTY

Pro každý element byl programem vypočten Hashinův koeficient, opět je výsledkem v ideálním případě koeficient menší než 1, vypočtený pro 4 různé módy, a to porušení vláken v tahu (FT), vláken v tlaku (FC), matrice v tahu (MT) nebo matrice v tlaku (MC). Některé hodnoty koeficientů jsem velmi malé, proto takové nebudou ani zmíněny. Pro vrstvu 1 se opět z důvodu drážkování Hashinovo koeficient neurčuje. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny vybrané Hashinovy koeficienty.

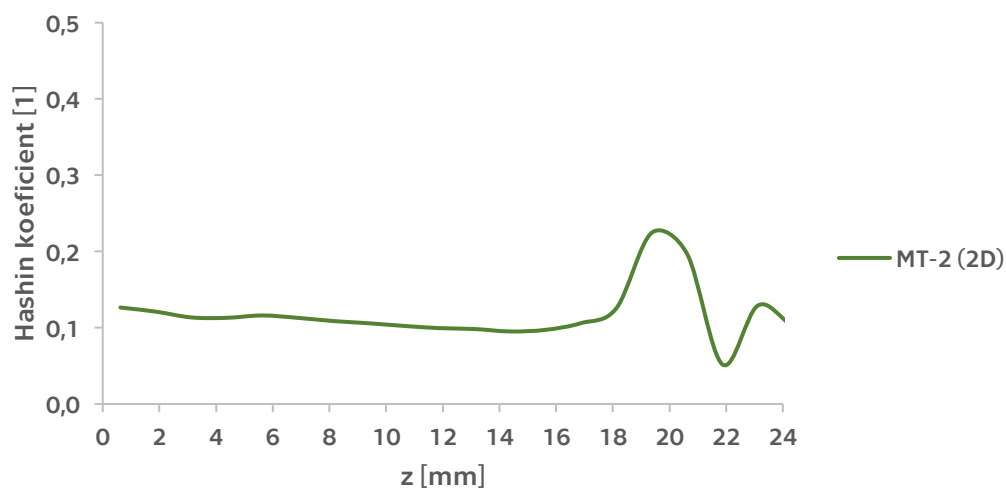


Obr. 53 – Vrstvy 2 a 3, 2D elementy – Hashinovy koeficienty porušení matrice v tahu.

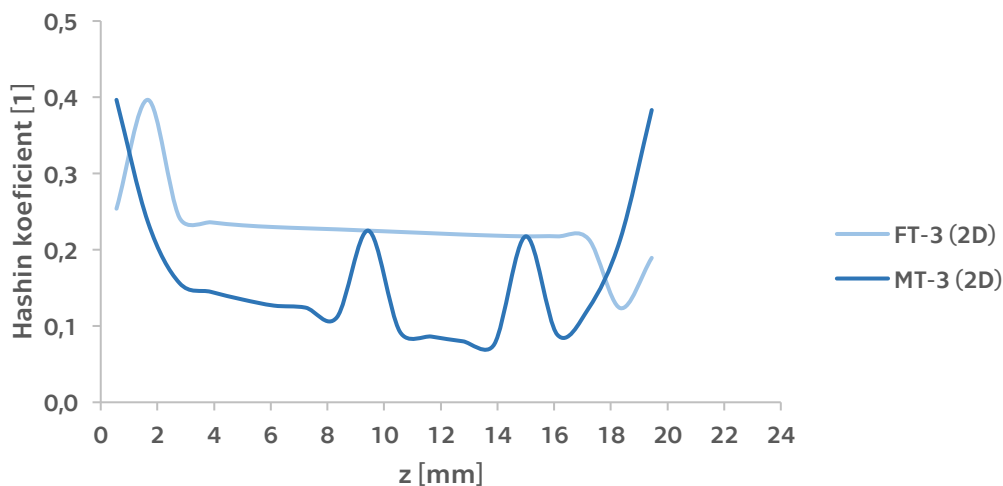


Obr. 54 – Vrstva 3, 2D elementy – Hashinovy koeficienty porušení vláken v tahu.

Následující grafy znázorňují průběh maximálních hodnot Hashinových koeficientů zmíněných na předchozích obrázcích v oblasti spoje.



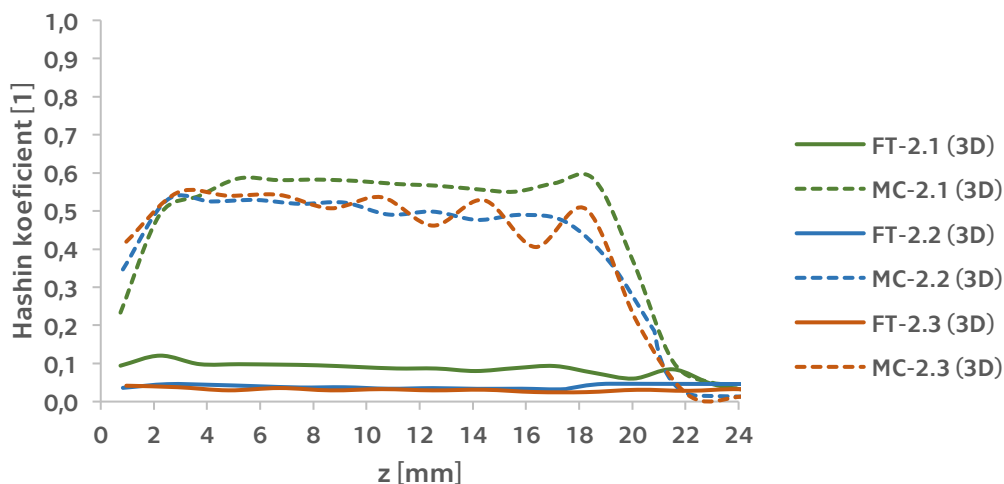
Obr. 55 – Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 2 (2D).



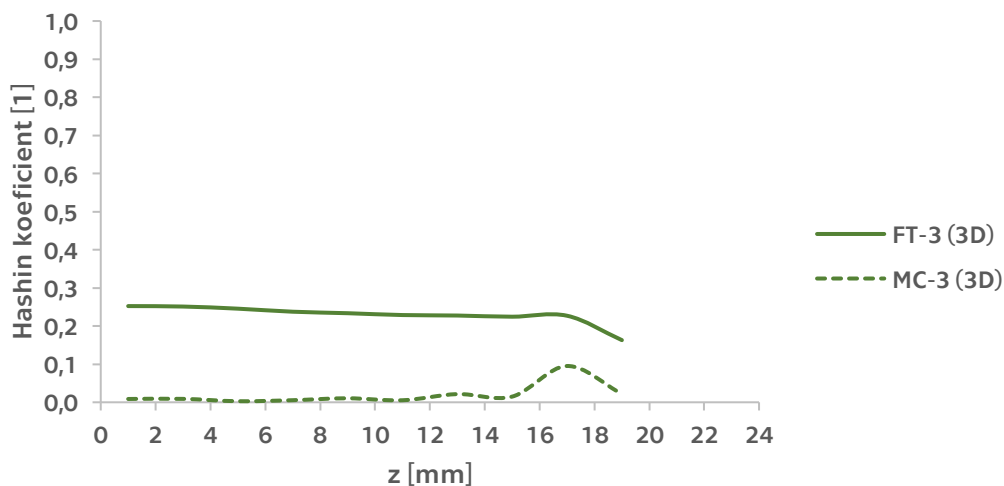
Obr. 56 – Průběh maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 3 (2D).

3D STRESS ELEMENTY

Pro elementy typu 3D Stress nelze použít přímo funkci vykreslení Hashinových koeficientů, jelikož tato funkce je v programu Abaqus dostupná pouze pro 2D elementy. Bylo však možné získat hodnoty tenzoru napětí v každém elementu. Pro tyto hodnoty bylo určeno, jaký mód poškození má být spočten a následně byly Hashinovy koeficienty dopočítány analyticky pro všechny elementy. Na Obr. 57 jsou vykresleny průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů pro dílčí vrstvy, respektive podvrstvy v oblasti spoje v závislosti na vzdálenosti od čela trubky, pro daný mód porušení.



Obr. 57 – Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů v jednotlivých podvrstvách vrstvy 2 (3D).

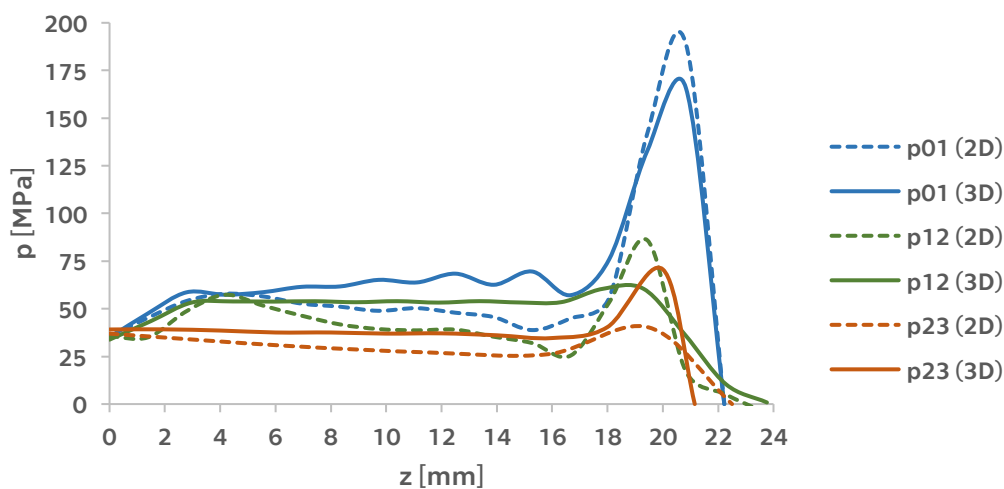


Obr. 58 – Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 2 (3D).

9.3. DISKUSE VÝSLEDKŮ

TLAKY MEZI VRSTVAMI PO NALISOVÁNÍ

Na Obr. 59 jsou srovnány průběhy tlaků mezi vrstvami získané MKP simulací pomocí 2D, respektive 3D elementů. V Tab. 9 jsou uvedeny hodnoty kontaktních tlaků vypočtených analyticky společně z odečtenými hodnotami tlaků v ustálené oblasti z grafu níže. V této tabulce je i procentuálně porovnání jednotlivých MKP přístupů vzhledem k analyticky získaným hodnotám.



Obr. 59 – Srovnání průběhů tlaků v oblasti spoje.

Tab. 9 – Srovnání hodnot tlaků mezi vrstvami.

		analytika	2D	2D/an.	3D	3D/an.
Lisovací tlak	p_{01}	57,72 MPa	50,00 MPa	-13,37 %	63,00 MPa	+9,15 %
Tlak na rozhraní 1-2	p_{12}	48,45 MPa	40,00 MPa	-17,44 %	54,00 MPa	+11,46 %
Tlak na rozhraní 2-3	p_{23}	37,17 MPa	30,00 MPa	-19,29 %	37,00 MPa	-0,46 %

Na základě srovnání v předchozí tabulce je zřejmé, že degradace úlohy na rovinnou a tím pádem zanedbání tloušťky vrstvy vede ke značným rozdílům v hodnotách kontaktních tlaků. Naopak výsledky ze simulace pomocí elementu 3D Stress se blíží k výsledkům získaným analyticky.

VLIV DÉLKY OMOTÁVKY NA LISOVACÍ TLAK

Se zvyšující se délkou třetí vrstvy vůči délce spoje roste i hodnota tlaku mezi hřídělí a skleněnou vrstvou (lisovací tlak). Je tomu tak z důvodu materiálu omotávky, který je velmi tuhý a funkcí celé omotávky je právě zvýšení radiální tuhosti, která vede i mimo jiné ke zvýšení lisovacího tlaku. Pro první experiment byla zvolena délka třetí vrstvy shodná s délkou spoje, tedy 20 mm.

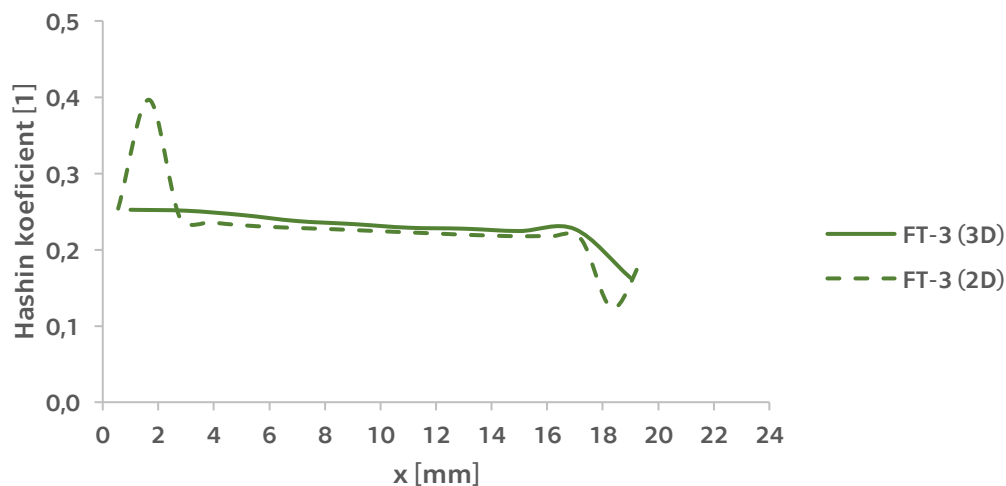
HASHINOVO PEVNOSTNÍ KRITÉRIUM

Z hlediska Hashinova pevnostního kritéria bylo dosaženo různých výsledků. Přístupem MKP s použitím 2D elementů bylo počítáno s módy porušení vláken v tahu a matrice v tahu. U 3D elementů souhlasil mód porušení vláken v tahu (srovnání na *Obr. 60*), avšak matrice byla v módu tlaku. Tyto rozdíly jsou opět dány zjednodušením celého problému na rovinnou úlohu, analyticky určeným hodnotám se blíží spíše hodnoty ze simulace pomocí 3D elementů – srovnání v *Tab. 10*.

Tab. 10 – Srovnání výsledků Hashinovy pevnostní teorie.

		analytika	2D	3D
V2 – mód porušení vláken v tahu	D_{FT}^{V2}	0,12	-	0,12
V2 – mód porušení vláken v tlaku	D_{FC}^{V2}	0,04	-	<0,12
V2 – mód porušení matrice v tahu	D_{MT}^{V2}	2,27	0,22	<0,60
V2 – mód porušení matrice v tlaku	D_{MC}^{V2}	0,82	-	0,60
V3 – mód porušení vláken v tahu	D_{FT}^{V3}	0,13	0,40	0,25
V3 – mód porušení matrice v tahu	D_{MC}^{V3}	0,20	0,40	0,12

Výrazně nevyhovující je analyticky vypočtená hodnota módu porušení matrice v tahu pro vrstvu 2. Výsledky MKP analýzy však pro tento mód vychází uspokojivě.



Obr. 60 – Srovnání průběhů Hashinova koeficientu pro mód porušení vláken v tahu ve vrstvě 3.

10. ZKOUŠENÍ SPOJE

10.1. LISOVACÍ TLAK

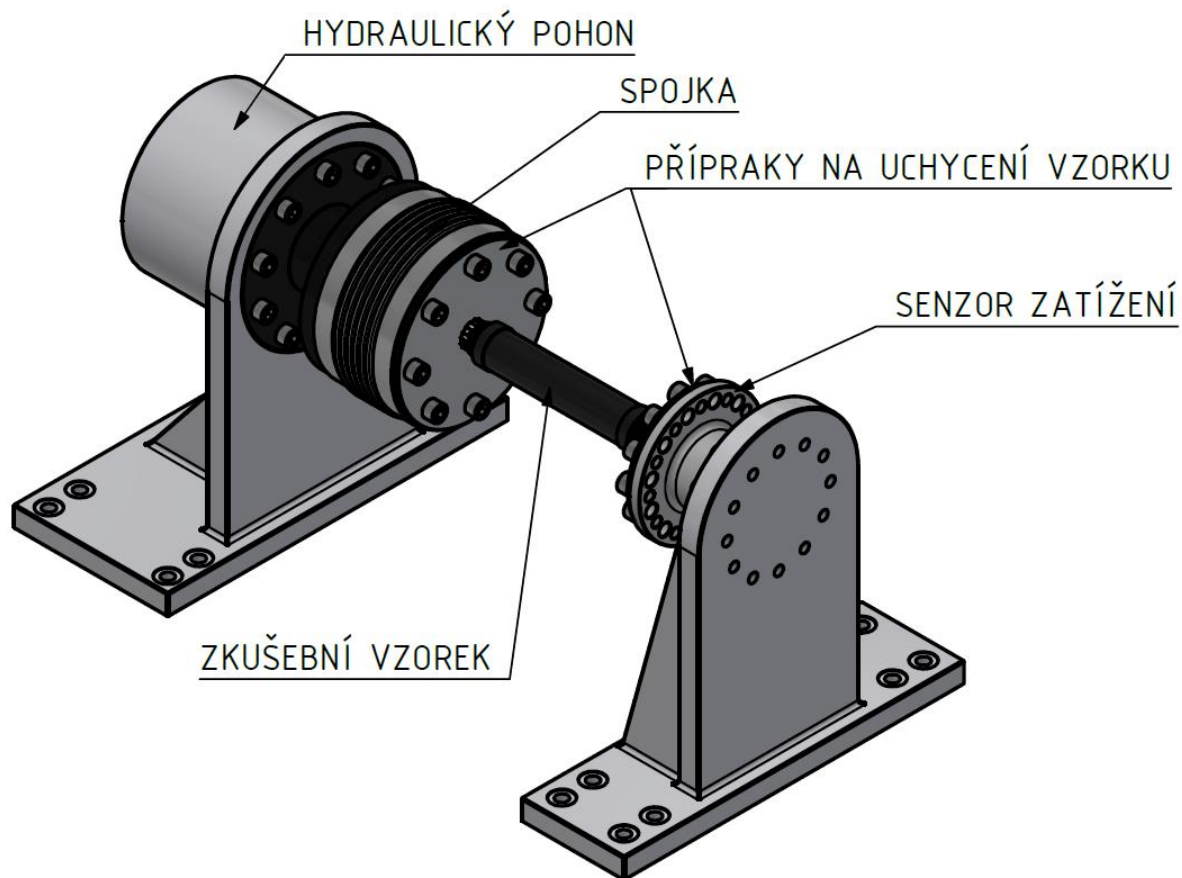
Testy týkající se lisování budou probíhat na vzorcích dle *Obr. 61*. Jedná se o kratších, jednostranné vzorky, oproti těm, které byly představeny v 8.3.1 (výrobní výkres trubky pro kontrolu lisování viz. *Příloha 4*). Měření bude probíhat během lisování pomocí tenzometrů nalepených na omotávce. Výstupem této zkoušky bude radiální napětí ve třetí vrstvě, které bude sloužit ke srovnání výsledků vypočtených teoreticky a získaných metodou MKP. Ideální by bylo to samé provést i pro vrstvy 1 a 2, což ale bohužel v oblasti spoje není možné. Nicméně srovnání výsledků vrstvy 3 alespoň nastíní, jak jsou teoretické a MKP výsledky relevantní.



Obr. 61 – Zkrácený vzorek kompozitní trubky.

10.2. STATICKÝ KRUT

První zkoušení únosnosti spoje bude probíhat při zatížení statickým kroutícím momentem. Zkouška proběhne na hydraulicky řízeném testovacím zařízení dle Obr. 62.



Obr. 62 – Zkušební zařízení na zkoušku statickým krutem.

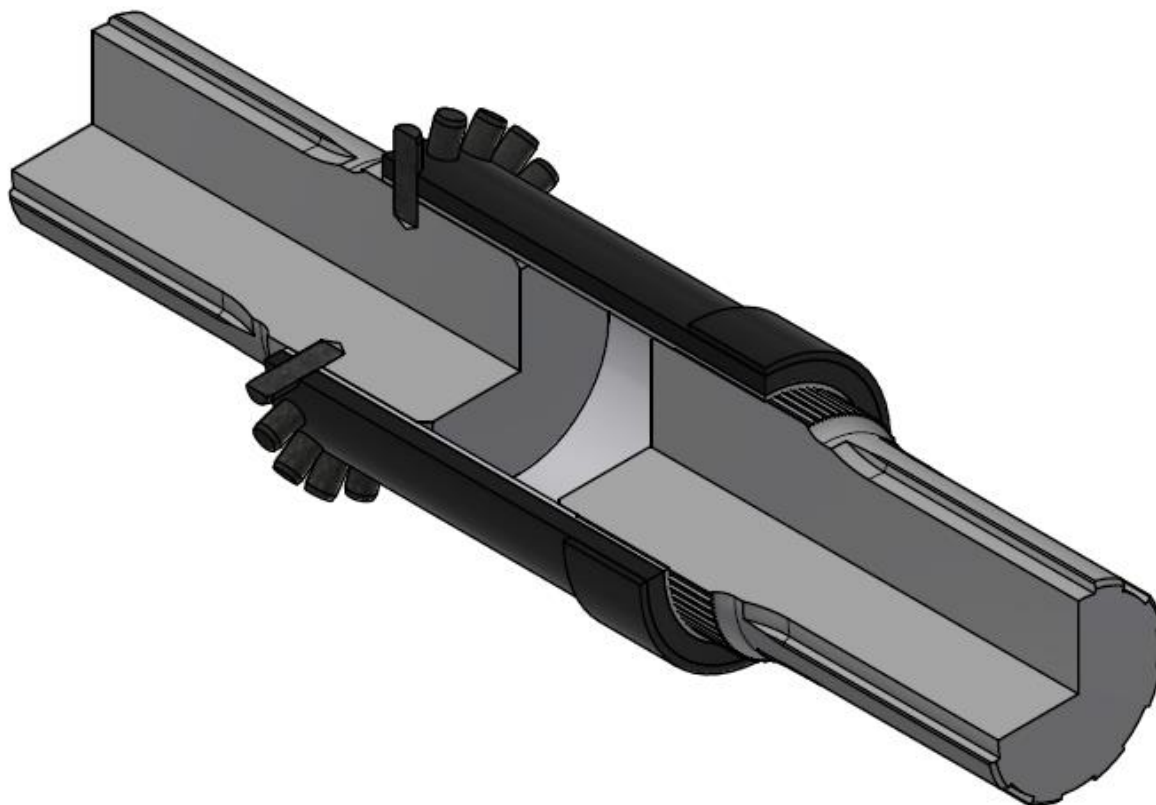
Uchytení zkoušeného vzorku do zkušebního zařízení je zprostředkováno pomocí přírub. Obě příruby byly navrženy na základě nynější konfigurace zkušebního zařízení tak, aby vyhovovaly požadavkům zkoušky. Jinými slovy se jedná o přípravky, které zajistí spojení testovacího vzorku na jedné straně s pohonem a na druhé straně se senzorem zatížení. Obě příruby mají díru s rovnobokým drážkováním, do kterého sedí hřídel, která je součástí zkoušeného spoje. Výrobní výkresy obou přírub viz. *Příloha 5* a *Příloha 6*.

Podklady byly zpracovány pro výše popsané uchytení vzorku, jeho alternativou, uvažovanou zatím teoreticky, může být využití integrovaného spoje (viz. 7.4) a v závislosti na něm modifikovaná hřídel, která bude spojena s přírubou u spojky. Tato hřídel by po svém obvodu neměla drážkování a její průměr by byl shodný s vnitřním průměrem

trubky. Po obvodu této hřídele by byly vyvrtány díry, které by spolu s válcovými kolíky zajišťovaly spojení hřídele s trubicí přímo prostřednictvím integrovaného spoje. Cílem této konfigurace je, aby zkoušení neobsahovalo dva lisované spoje, ale pouze jeden. Příruba u senzoru zatížení by zůstala stejná, do ní by byla nasunuta hřídel se zkoušeným spojem a na druhé straně trubky, směrem ke spojce, by bylo využito integrovaného spoje, který by zajišťoval přenos krouticího momentu přímo do kompozitní součásti. Znázornění obou konfigurací je uvedeno na Obr. 63 a detail konfigurace s integrovaným spojem na Obr. 64.



Obr. 63 – Různé konfigurace upevnění zkoušeného vzorku.



Obr. 64 – Detail konfigurace uchycení přes integrovaný spoj.

Výstupem zkoušky bude hodnota krouticího momentu v okamžiku porušení spoje. Tato hodnota bude porovnána s analytickým vztahem pro výpočet maximálního přenositelného momentu (Rov. 39). Tento vztah obsahuje mimo jiné i již několikrát zmiňované parametry na základě kterých byly provedeny MKP simulace a analytické výpočty. Výsledky zkoušky poslouží i ke správnému naladění těchto koeficientů a tím pádem k větší konvergenci všech výpočetních metod.

11. ZÁVĚR

V této diplomové práci byly nejdříve shrnuty základní vlastnosti kompozitních materiálů, byl věnován prostor jejich výrobě i možnostem jejich použití. Dále byla představena teorie namáhání kompozitních materiálů a pevnostní kritéria, která se zabývají poškozením kompozitů. Následně byl na základě poptávky konkrétní aplikace navrhnout spoj kompozitní trubky s ocelovou hřídelí. Tento spoj byl poté pevnostně kontrolován jak analyticky, tak s pomocí MKP simulace a byly diskutovány výsledky.



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

12. REFERENCE

12.1. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1** Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu.
- Obr. 2** Příklad synergického efektu v kompozitní sktruktuře z hliníkové pěny, kterou je vyztužena tenkostěnná hliníková trubka.
- Obr. 3** Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru jejich nosné části.
- Obr. 4** Tvar částicové výztuže.
- Obr. 5** Struktura vláken v kompozitu.
- Obr. 6** Nedůležitější typy sklovláknitých výztuží.
- Obr. 7** Druhy vazeb vyztužujících tkanin.
- Obr. 8** Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku.
- Obr. 9** Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost.
- Obr. 10** Skleněné vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem.
- Obr. 11** Výroba ve dvoupásovém lisu.
- Obr. 12** Vstřikovací zařízení ZMC.
- Obr. 13** Tažení profilů.
- Obr. 14** Výrobní zařízení pro navíjení.
- Obr. 15** Mechanismy porušení kompozitního materiálu (zleva intralaminární, translaminární a interlaminární mechanismus).
- Obr. 16** Mechanismy porušení (zleva zborcení vláken, přetržení vláken, prasknutí matrice a delaminace).
- Obr. 17** Mezní křivky kritéria maximálního napětí.
- Obr. 18** Mezní křivka kritéria maximální deformace.
- Obr. 19** Porovnání mezních křivek pevnosti.
- Obr. 20** Mezní křivky Tsai-Hillova kritéria.
- Obr. 21** Mezní křivky Hoffmanova kritéria.
- Obr. 22** Mezní křivky Tsai-Wu kritéria.
- Obr. 23** Mezní křivky Hashinova kritéria.
- Obr. 24** Příklady běžně používaných nýtových spojů.

- Obr. 25** Nýtovací technologie SPR.
- Obr. 26** Nýtovací technologie DFR.
- Obr. 27** Integrovaný spoj.
- Obr. 28** Schéma spoje.
- Obr. 29** Znázornění v podobě silnostěnných nádob.
- Obr. 30** Znázornění lisovacího přesahu.
- Obr. 31** Detail drážkování ocelové hřídele.
- Obr. 32** Plocha zubu a přilehlých drážek.
- Obr. 33** Schematický výpočet obsahu zubu.
- Obr. 34** Náčrt trojúhelníků pro výpočet neznámých v rovnici obsahu zubu.
- Obr. 35** Náčrt pro výpočet úhlu drážky.
- Obr. 36** Schematický výpočet obsahu drážky.
- Obr. 37** Náčrt trojúhelníků pro výpočet neznámých v rovnici obsahu drážky.
- Obr. 38** Kompozitní trubka.
- Obr. 39** Ocelová hřídel.
- Obr. 40** Lisování hřídelí do trubky.
- Obr. 41** Detail kontaktu lisovací desky a trubky při lisování.
- Obr. 42** Tvarově lisovaný spoj kompozitní trubky a ocelových hřídelí.
- Obr. 43** MKP model před síťováním.
- Obr. 44** MKP model se sítí typu Continuum Shell.
- Obr. 45** MKP model se sítí typu 3D Stress.
- Obr. 46** Vrstva 1, 2D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 01 a 12.
- Obr. 47** Vrstva 2, 2D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 12 a 23.
- Obr. 48** Průběh tlaků v oblasti lisovaného spoje, 2D elementy.
- Obr. 49** Vrstva 1, 3D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 01 a 12.
- Obr. 50** Vrstva 2, 3D elementy – tlaky na rozhraní vrstev 12 a 23.
- Obr. 51** Průběh tlaků v oblasti lisovaného spoje, 3D elementy.
- Obr. 52** Průběhy lisovacích tlaků v závislosti na délce vrstvy 3.
- Obr. 53** Vrstvy 2 a 3, 2D elementy – Hashinovy koeficienty porušení matrice v tahu.
- Obr. 54** Vrstva 3, 2D elementy – Hashinovy koeficienty porušení vláken v tahu.
- Obr. 55** Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 2 (2D).
- Obr. 56** Průběh maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 3 (2D).

- Obr. 57** Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů v jednotlivých podvrstvách vrstvy 2 (3D).
- Obr. 58** Průběhy maximálních hodnot Hashinových koeficientů ve vrstvě 3 (3D).
- Obr. 59** Srovnání průběhů tlaků v oblasti spoje.
- Obr. 60** Srovnání průběhů Hashinova koeficientu pro mód porušení vláken v tahu ve vrstvě 3.
- Obr. 61** Zkrácený vzorek kompozitní trubky.
- Obr. 62** Zkušební zařízení na zkoušku statickým krutem.
- Obr. 63** Různé konfigurace upevnění zkoušeného vzorku.
- Obr. 64** Detail konfigurace uchycení přes integrovaný spoj.

12.2. SEZNAM TABULEK

- Tab. 1** Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E-modulu a meze pevnosti v tahu některých konstrukčních materiálů.
- Tab. 2** Porovnání vlastností sklolaminátu s technickými materiály.
- Tab. 3** Druhy materiálu v závislosti na typu anizotropie.
- Tab. 4** Vybrané rozměry kompozitní trubky.
- Tab. 5** Vybrané rozměry ocelové hřídele.
- Tab. 6** Výpočetní parametry.
- Tab. 7** Analyticky určené hodnoty tlaků mezi jednotlivými vrstvami.
- Tab. 8** Analyticky určené hodnoty Hashinových koeficientů pro jednotlivé vrstvy.
- Tab. 9** Srovnání hodnot tlaků mezi vrstvami.
- Tab. 10** Srovnání výsledků Hashinovy pevnostní teorie.

12.3. SEZNAM ROVNIC

- Rov. 1** Tenzory napětí v maticovém tvaru.
- Rov. 2** Tenzory deformace v maticovém tvaru.
- Rov. 3** Vektor napětí.
- Rov. 4** Vektor deformace.
- Rov. 5** Hookův zákon.
- Rov. 6** Vektor napětí vyjádřen Hookovým zákonem.
- Rov. 7** Vektor deformace vyjádřen Hookovým zákonem.
- Rov. 8** Pevnostní kritérium maximálního napětí.
- Rov. 9** Pevnostní kritérium maximální deformace.
- Rov. 10** Pevnostní kritérium maximální deformace s Poissonovou konstantou.
- Rov. 11** Hillovo pevnostní kritérium.
- Rov. 12** Tsai-Hillovo pevnostní kritérium.
- Rov. 13** Hoffmanovo pevnostní kritérium.
- Rov. 14** Zobecněný polynom Tsai-Wu pevnostního kritéria.
- Rov. 15** Tsai-Wu pevnostní kritérium.
- Rov. 16** Vazebný koeficient Tsai-Wu pevnostního kritéria.
- Rov. 17** Mód porušení vláken v tahu dle Hashinova pevnostního kritéria.
- Rov. 18** Mód porušení vláken v tlaku dle Hashinova pevnostního kritéria.
- Rov. 19** Mód porušení matrice v tahu dle Hashinova pevnostního kritéria.
- Rov. 20** Mód porušení matrice v tlaku dle Hashinova pevnostního kritéria.
- Rov. 21** Mód porušení vláken v tahu pro prostorovou napjatost dle Hashina.
- Rov. 22** Mód porušení vláken v tlaku pro prostorovou napjatost dle Hashina.
- Rov. 23** Mód porušení matrice v tahu pro prostorovou napjatost dle Hashina.
- Rov. 24** Mód porušení matrice v tlaku pro prostorovou napjatost dle Hashina.
- Rov. 25** Mori-Tanaka kritérium pro jednosměrné kompozity.
- Rov. 26** Predikce inženýrských konstant dle Mori-Tanaka.
- Rov. 27** Maximální dovolené napětí v oblasti čistého krutu.
- Rov. 28** Tečná deformace v silnostěnné nádobě.
- Rov. 29** Vztah mezi radiálním a tečným napětím v otevřené silnostěnné nádobě.
- Rov. 30** Deformační podmínky o rovnosti tečných deformací mezi vrstvami 1 a 2.

- Rov. 31** Deformační podmínky o rovnosti tečných deformací mezi vrstvami 2 a 3.
- Rov. 32** První rovnice soustavy pro výpočet tlaků mezi vrstvami.
- Rov. 33** Druhá rovnice soustavy pro výpočet tlaků mezi vrstvami.
- Rov. 34** Vyjádření lisovacího přesahu.
- Rov. 35** Lisovací přesah vyjádřen tečnými deformacemi.
- Rov. 36** Lisovací přesah po dosažení tečných deformací.
- Rov. 37** Třetí rovnice soustavy pro výpočet tlaků mezi vrstvami.
- Rov. 38** Interlaminární napětí mezi vrstvami 1 a 2.
- Rov. 39** Maximální přenositelný moment tvarově lisovaného spoje.
- Rov. 40** Obsahu zubu.
- Rov. 41** Kvadratická rovnice pro výpočet výšky zaoblené plochy u zubu.
- Rov. 42** Roztečný úhel zubu.
- Rov. 43** Úhel drážky.
- Rov. 44** Úhel mezi drážkou a zubem.
- Rov. 45** Kvadratická rovnice pro výpočet výšky zaoblené plochy nad drážkou.
- Rov. 46** Obsah drážky.
- Rov. 47** Kvadratická rovnice pro výpočet výšky zaoblené plochy u drážky.
- Rov. 48** Roztečný úhel drážky.

12.4. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Výrobní výkres kompozitní trubky (číslo výkresu 1004).
- Příloha 2** Výrobní výkres ocelové hřídele (číslo výkresu 1001).
- Příloha 3** Materiálová data kompozitních vrstev.
- Příloha 4** Výrobní výkres krátké kompozitní trubky (číslo výkresu 1005).
- Příloha 5** Výrobní výkres příruby ke spojce (číslo výkresu 1003).
- Příloha 6** Výrobní výkres příruby k senzoru zatížení (číslo výkresu 1002).

12.5. SEZNAM CITOVANÝCH ZDROJŮ

- [1] MYSLIVEC, Jan. *Vysoce pevné kompozitní materiály pro tepelné izolace*. Praha, 2020. Bakalářské práce. ČVUT v Praze.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [3] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02543-8.
- [4] *Kompozity – Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>.
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Nanokompozity: Druhy vláken* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady__kmt__magistri/NKM/04vlakna.pdf.
- [9] SIGMUND, Ota. *VÝZKUM MATRIC PRO PREPREG APLIKACE* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/edka9s/>.
- [10] LAŠ, Vladislav. *Úvod do modelování v mechanice: Mechanika kompozitních materiálů - 1* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/mhajzman/download/UMM09/UMM__6.pdf.
- [11] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [12] *Návrh a analýza kompozitních konstrukcí: Vlákenné kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2__seminar/1__materialy__technologie.pdf.

- [13] *Slinuté karbidy* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:
<https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03007.html>.
- [14] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [15] *Polymer Properties Database: POLYBISMALEIMIDES (BMI)* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polybismaleimide%20type.html>.
- [16] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [17] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [18] Verbundwerkstoffe. In: *Von Roll* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z:
https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1576751079795980/2.07.02_COMPOSITES_DE.pdf.
- [19] PAOLINO, Davide. *Design of Lightweight and Composite Structures: Manufacturing* [online]. In: . [cit. 2022-10-28]. Dostupné z:
https://didattica.polito.it/pls/portal30/sviluppo.pagina_corso.main?t=3
- [20] CHAWLA, Krishan Kumar. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [21] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [22] PAOLINO, Davide. *Design of Lightweight and Composite Structures: Lamina* [online]. In: . [cit. 2022-11-02]. Dostupné z:
https://didattica.polito.it/pls/portal30/sviluppo.pagina_corso.main?t=3
- [23] KOLLÁR, László P. a George S. SPRINGER. *Mechanics of Composite Structures*. 2003. ISBN 978-0-521-12690-8.
- [24] Zheng, J., Maharaj, C., Liu, J. *et al.* A Comparative Study on the Failure Criteria for Predicting the Damage Initiation in Fiber-Reinforced Composites. *Mech Compos Mater* 58, 125–140 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10016-3>
- [25] KRYSTEK, Jan. *Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály*.

- [26] TSAI, Stephen W. *Strength & life of composites*. Stanford, CA: Composites Design Group, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, c2008. ISBN 978-0-9819143-0-5.
- [27] *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008 [cit. 2022-11-11]. ISBN 978-3-540-75764-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-75765-8.
- [28] Pan, J., Bian, L. A re-formulation of the Mori–Tanaka method for predicting material properties of fiber-reinforced polymers/composites. *Colloid Polym Sci* 297, 529–543 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00396-019-04472-y>.
- [29] J.J. Espadas-Escalante, P. Isaksson, *Mesoscale analysis of the transverse cracking kinetics in woven composite laminates using a phase-field fracture theory*, Engineering Fracture Mechanics, Volume 216, 2019, 106523, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106523>.
- [30] BERNARDIN, Petr. *SPOJOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S KOVEM*. Plzeň, 2016. Disertační práce.
- [31] *CompoTech at JEC Composites Connect 2021* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://compotech.com/compotech-at-jec-composites-connect-2021/>
- [32] GAY, Daniel a Suong V. HOA. *Composite materials: design and applications*. 2nd. ed. Boca Raton: CRC, 2007. ISBN 978-1-4200-4519-2.
- [33] Zhenghua Rao, Liang Ou, Yaqiong Wang, Pei-Chung Wang, *A self-piercing-through riveting method for joining of discontinuous carbon fiber reinforced nylon 6 composite*, Composite Structures, Volume 237, 2020, 111841, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111841>.
- [34] N.Z. Borba, L. Blaga, J.F. dos Santos, S.T. Amancio-Filho, *Direct-Friction Riveting of polymer composite laminates for aircraft applications*, Materials Letters, Volume 215, 2018, Pages 31-34, ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.033>.
- [35] Guofeng Qin, Jingxin Na, Wenlong Mu, Wei Tan, *Effect of thermal cycling on the degradation of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints for automobiles*, International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 95,

2019, 102439, ISSN 0143-7496,

<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102439>.

- [36] KAZDA, Lukáš. NÁVRH ROZMĚRŮ KOMPOZITNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ. 48. *mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů*. 2022.
- [37] TRANSMISSION SHAFT JOINT DESIGN. USA. US 7,874,925 B2. Uděleno 25.01.2011.
- [38] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [39] KAZDA, Lukáš. *Výpočet lisovaného spoje*. Czech Technical University in Prague.
- [40] *ABAQUS Analysis User's Manual* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch17s02abm02.html>