

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY



Diplomová práce

Kompozitní kování křídla sportovního letounu

Bc. Jan Grenar

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Jan Grenar
Název diplomové práce:	Kompozitní kování křídla sportovního letounu
Anglický název:	Composite wing fittings for sports aircraft
Akademický rok:	2019/2020
Obor studia:	Letectví a kosmonautika
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Karel Barák
Bibliografické údaje:	Počet stran: 99 Počet obrázků: 37 Počet příloh: 0

Klíčová slova: Kompozit, FML, Kování, Lokální hybridizace, Letoun

Keywords: Composite, FML, Fittings, Local hybridization, Airplane

Anotace: Diplomová práce obsahuje rešerši na téma kompozitních spojů a konstrukčních řešení kování křídla. Samotná rešerše kompozitních spojů přiblíží problematiku vlákno-kovových kompozitů a jejich přínos na vlastnosti mechanických spojů. Další kapitoly obsahují popis postupu při dimenzování kování křídla a prezentují výsledky při použití tradičního materiálu kování oproti kompozitnímu kování.

Annotation: The diploma thesis contains research on the topic of composite joints and structural solutions of wing fittings. The search of composite joints will approach the issue of fiber-metal composites and their contribution to the properties of mechanical joints. The next chapters describe the procedure for dimensioning the wing fittings and present the results using the traditional fitting material compared to composite fittings.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne

Bc. Jan GRENDAR

Podpis.....

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grenar** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **437284**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kompozitní kování křídla sportovního letounu

Název diplomové práce anglicky:

Composite wing fittings for sports aircraft

Pokyny pro vypracování:

Kompozitní kování křídla sportovního letounu

- 1) Rešerše kompozitních spojů
- 2) Pevnostní optimalizace kování křídla
- 3) Experimentální nebo MKP ověření navrženého spoje.

Seznam doporučené literatury:

P Camanho, Stephen Hallett, 2011. Composit joints and connections, Principles, Modelling and Testing. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN: 9780857094926

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Barák, ústav letadlové techniky FS


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


Datum zadání diplomové práce: **24.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Karel Barák
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlovi Barákovi za odborné vedení diplomové práce, i přes komplikovanou komunikaci v době pandemie Covid-19. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Kristíně Bartůňkové za jazykovou korekturu.

Obsah

Anotační list.....	4
Prohlášení.....	5
Kopie zadání	6
Poděkování.....	7
Obsah	8
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků.....	14
Seznam tabulek	16
Seznam grafů	18
1 Cíl práce.....	19
2 Šroubové a lepené spoje v kompozitech.....	20
2.1 Mechanické spoje	22
2.1.1 Únosnost šroubových spojů v kompozitech	23
3 Metody hybridizace a použité materiály.....	25
3.1 Materiály.....	25
3.1.1 Výstužná vlákna.....	25
3.1.1.1 Aramidová vlákna	25
3.1.1.2 Skleněná vlákna.....	26
3.1.1.3 Uhlíková vlákna.....	26
3.1.2 Výstužný kov	27
3.1.2.1 Hliník.....	28
3.1.2.2 Titan.....	29
3.1.2.3 Nerezová ocel	29
3.2 Fiber metal laminate - FML.....	29
3.2.1 ARALL	31

3.2.2	GLARE	34
3.2.3	CARALL a ostatní FML s uhlíkovým vláknem	37
3.2.4	Příprava kovů pro lepení	39
3.3	Lokální hybridizace	42
3.3.1	Přechodová oblast	42
3.3.2	Vliv obsahu kovu na únosnost šroubového spoje	44
4	Uložení křídla v trupu	47
4.1	Rozdělení	47
4.2	Závěsy křídla	49
4.3	Spojení křídla s trupem	50
4.3.1	Jednonosníkové křídlo	53
4.3.2	Dvou a vícenosníkové křídlo	53
4.3.2.1	Příklad spojení dvounosníkového křídla čtyřmi závěsy	55
5	Návrh zkušební kování	61
5.1	Postup návrhu kování křídla	61
5.1.1	První pevnostní výpočet	61
5.1.2	Druhý pevnostní výpočet s ohledem na deformaci	62
5.2	Návrh kování křídla experimentálního sportovního letounu Mermaid výrobce CSA. 63	
5.2.1	Návrh kování z hliníkové slitiny 6061-T6	64
5.2.1.1	Materiálové vlastnosti	64
5.2.1.2	Naznačení výpočtu pro kování horní pásnice hlavního nosníku	64
5.2.1.3	První pevnostní výpočet	67
5.2.1.4	Druhý pevnostní výpočet	68
5.2.1.5	Geometrie kování	69
5.2.1.6	Hmotnost kování	69
5.2.2	MKP analýza kování ze slitiny hliníku	70

5.2.2.1	Hlavní Závěs.....	70
5.2.2.2	Pomocný závěs	72
5.2.3	Návrh kování z FML.....	73
5.2.3.1	Materiálové vlastnosti	73
5.2.3.2	První pevnostní výpočet	78
5.2.3.3	Druhý pevnostní výpočet.....	78
5.2.3.4	Geometrie kování	80
5.2.4	MKP analýza.....	81
5.2.4.1	Návrh přechodové oblasti.....	81
5.2.4.1.1	Hlavní kování	81
5.2.4.1.2	Pomocné kování	81
5.2.4.2	Hmotnost kování	82
5.2.4.3	Hlavní závěs	83
5.2.4.4	Pomocný závěs	88
5.2.4.5	Přechodová oblast hlavního závěsu.....	93
5.2.4.6	Přechodová oblast pomocného závěsu	95
6	Závěr	97
	Použitá literatura a zdroje	99

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
/Zkratka		
+X	-	Kladný směr osy X
+Y	-	Kladný směr osy Y
+Z	-	Kladný směr osy Z
A	-	Závěs A
a	mm	Vzdálenost středu oka od předního okraje kování
$A_{(H,D,I,2)}$	mm^2	Plocha pásnic
a, d, B	mm	Vzdálenost hlavního a vedlejšího nosníku
ARALL	-	Aramid Reinforced Aluminum Laminate
$A_{x,y,z}$	N	Síly v závěsu A ve směru osy X, Y a Z
B	-	Závěs B
b	mm	Šířka kování v místě oka
B1	mm	Šířka kování za okem
$B_{x,y,z}$	N	Síly v závěsu B ve směru osy X, Y a Z
C	-	Závěs C
c	mm	Vzdálenost pomocného závěsu od osy X
c	mm	Vzdálenost okraje díry od horního okraje oka
CARALL		Carbon Reinforced Aluminum Laminate
CFRP	-	Carbon fiber reinforced plastic
$C_{x,y,z}$	N	Síly v závěsu C ve směru osy X, Y a Z
d	mm	Průměr díry šroubového spoje
d	mm	Průměr díry kování
e	mm	Vzdálenost díry šroubového spoje od okraje
$E_{(t)}$	GPa	Youngův modul pružnosti v tahu
E_d	GPa	Youngův modul pružnosti v tlaku
$EJ_{(1,2)}$	GPamm^3	Ohybová tuhost
F	N	Síla
F_1	-	Zvyšující koeficient dle tloušťky kování a vzdálenosti otvoru od okraje
F_2	-	Zvyšující koeficient dle vlivu deformace oka

F_3	-	Zvyšující koeficient dle vůle při výrobě
F_4	-	Zvyšující koeficient dle druhu zatížení a části letounu
FML	-	Fiber metal laminates
G	GPa	Modul pružnosti ve smyku
GFRP	-	Glass fiber reinforced plastic
GLARE	-	Glass reinforced aluminium
$h_{(1,2)}$	mm	Výška nosníku
HM	-	Vysoko modulová vlákna
HS	-	Vysokopevnostní vlákna
IM	-	Středo modulová vlákna
K1	-	Zvyšující koeficient dle vlivu zúžení za okem
K2	-	Zvyšující koeficient dle směru působení síly
L	-	Orientace podél vláken
LM	-	Nízko modulová vlákna
LT	-	Orientace šikmo na vlákna (skos)
Mk	Nm	Kroutící moment
MKP	-	Metoda konečných prvků
M_o	Nm	Ohybový moment
MVF	-	Metal volume fraction
M_{vt}	Nm	Maximální tečný moment v kořenovém řezu
$M_{x,y,z}$	Nm	Moment podél osy X, Y a Z
N	N	Síla působící na oko
NDT	-	Non-Destructive testing
n_{metal}	-	Počet kovových vrstev
PU	-	Povrchová úprava
Rm	MPa	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Mez kluzu
T	N	Posouvající síla
t	mm	Tloušťka kování
$T_{x,y,z}$	N	Posouvající síla v ose X, Y a Z
w	mm	Efektivní šířka šroubového spoje
$w_{(1,2)}$	mm	Rozteč středů kování
$X_{(FML, F, M)}$	různé	Mechanická charakteristika FML, vláken a kovu

z	m	Polorozpětí křídla
α	10^{-6}mmK^{-1}	Součinitel tepelné roztažnosti
ϵ_{ult}	%	Prodloužení při poruše
ν	-	Poissonovo číslo
ν	-	Poissonovo číslo
ρ	Kgm^{-3}	Hustota
$\tau_{0,2}$	MPa	Mez kluzu ve smyku
f	-	Součinitel bezpečnosti
f_d	-	Součinitel bezpečnosti s uvažováním deformace
f_{dotl}	-	Součinitel bezpečnosti otláčení s uvažováním deformace
f_{otl}	-	Součinitel bezpečnosti otláčení oka
σ	MPa	Napětí v oku
σ^*_{pkotl}	MPa	Maximální napětí otláčení oka s uvažováním deformace
σ_{PK}	MPa	Maximální napětí v oku s uvažováním deformace
σ_{otl}	MPa	Napětí při otláčení oka
σ_{pkotl}	MPa	Maximální napětí otláčení oka

Seznam obrázků

Obrázek 1 Poruchy šroubového spoje v kompozitech [1]	22
Obrázek 2 Koncepce FML [1]	30
Obrázek 3 Příklad přeměrování toku zatížení skrze kompozitní vrstvu [1].....	31
Obrázek 4 Příklad šroubového spoje pomocí lokální hybridizace [1].....	43
Obrázek 5 Příklad přechodové oblasti a spoje hybridního materiálu CFRP/nerezová ocel [11]	44
Obrázek 6 Schématické rozdělení dle dělicí roviny [3].....	47
Obrázek 7 Příklad centroplánu u letounu L-29 [3]	48
Obrázek 8	50
Obrázek 9	52
Obrázek 10 Schéma uložení s vůlí.....	52
Obrázek 11 Průběh ohybových momentů u jendonosníkového křídla [3]	53
Obrázek 12	54
Obrázek 13	55
Obrázek 14	56
Obrázek 15	57
Obrázek 16	58
Obrázek 17	59
Obrázek 18 Schematický náčrt závěsu [9]	61
Obrázek 19 Schéma kování	63
Obrázek 20 Deformace hlavního hliníkového závěsu	70
Obrázek 21 Rozložení napětí hlavního hliníkového závěsu	71
Obrázek 22 Deformace pomocného hliníkového závěsu	72
Obrázek 23 Rozložení napětí pomocného hliníkového závěsu	73
Obrázek 24 Deformace hlavního kompozitového závěsu	83
Obrázek 25 Rozložení napětí hlavního kompozitového závěsu ve vrstvě uhlíku	84
Obrázek 26 Rozložení napětí hlavního kompozitového závěsu ve vrstvě kovu	85
Obrázek 27 Index porušení vrstvy ve vrstvě kompozitu hlavního kování	86
Obrázek 28 Index porušení vrstvy v kovové vrstvě hlavního kování.....	87
Obrázek 29 Deformace pomocného kompozitového závěsu.....	88
Obrázek 30 Rozložení napětí pomocného kompozitového závěsu v uhlíkové vrstvě.....	89
Obrázek 31 Rozložení napětí pomocného kompozitového závěsu v kovové vrstvě.....	90

Obrázek 32 Index porušení vrstvy ve vrstvě kompozitu pomocného kování.....	91
Obrázek 33 Index porušení vrstvy v kovové vrstvě pomocného kování.....	92
Obrázek 34 Rozložení deformace v přechodové oblasti hlavního závěsu.....	93
Obrázek 35 Rozložení napětí v přechodové oblasti hlavního závěsu v třicáté vrstvě.....	94
Obrázek 36 Rozložení deformace v přechodové oblasti pomocného závěsu.....	95
Obrázek 37 Rozložení napětí v přechodové oblasti pomocného závěsu ve třicáté vrstvě vrstvě.....	96

Seznam tabulek

Tabulka 1 Výhody a nevýhody lepených a mechanických spojů [2]	21
Tabulka 2 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů aramidových vláken.....	25
Tabulka 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů skelných vláken	26
Tabulka 4 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů uhlíkových vláken.....	27
Tabulka 5 Třídy Arallu [6].....	32
Tabulka 6 Mechanické vlastnosti tříd Arallu ("-" chybějící data) [6]	33
Tabulka 7 Třídy Glare [6].....	35
Tabulka 8 Mechanické vlastnosti Glare 1 až Glare 3 ("-" chybějící data) [6].....	36
Tabulka 9 Mechanické vlastnosti Glare 4 až Glare 63 ("-" chybějící data) [6].....	37
Tabulka 10 Vlastnosti Carall [6].....	38
Tabulka 11 Vliv přípravy povrchu na pevnost spoje u hliníku a nerezů	39
Tabulka 12 Povrchové úpravy titanu [8]	41
Tabulka 13 Seznam zvyšujících součinitelů u výpočtu oka	62
Tabulka 14 Materiálové vlastnosti hliníkové slitiny 6061-T6.....	64
Tabulka 15 Zvyšující součinitele horního závěsu hlavního nosníku	65
Tabulka 16 Geometrie horního závěsu hlavního nosníku	67
Tabulka 17 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka hliníkových závěsů	67
Tabulka 18 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka hliníkových závěsů.....	67
Tabulka 19 Zvyšující součinitele pro výpočet oka hliníkových závěsů	68
Tabulka 20 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka včetně deformace hliníkových závěsů.....	68
Tabulka 21 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka včetně deformace hliníkových závěsů.....	69
Tabulka 22 Geometrie hliníkových závěsů	69
Tabulka 23 Hmotnost kování z hliníku.....	69
Tabulka 24 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka závěsů z FML	78
Tabulka 25 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka závěsů z FML.....	78
Tabulka 26 Zvyšující součinitele pro výpočet oka kování z FML	78
Tabulka 27 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka včetně deformace závěsů z FML	79
Tabulka 28 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka včetně deformace závěsů z FML	79

Tabulka 29 Geometrie závěsů z FML.....	80
Tabulka 30 Hmotnost kování z FML.....	82

Seznam grafů

Graf 1 Vliv w/d a e/d [2].....	23
Graf 2 Účinnost spoje vůči poměru w/d [1]	24
Graf 3 Únosnost vůči prodloužení pro různé materiály [1]	24
Graf 4 Únavová odolnost ARALLu v tahu [1]	34
Graf 5 Únavové chování GLARE [1]	35
Graf 6 Vliv obsahu kovu na únosnost [1]	44
Graf 7 Únosnost v závislosti na prodloužení díry u spojení s titanem [1]	45
Graf 8 Únosnost v závislosti na prodloužení díry u spojení s nerezovou ocelí [1]	46
Graf 9 Průběh R_m pro různé MVF po směru vláken.....	75
Graf 10 Průběh $R_{p0,2}$ pro různé hodnoty MVF po směru vláken.....	75
Graf 11 Průběh modulu pružnosti v závislosti na MVF po směru vláken.....	76
Graf 12 Průběh poissonova koeficientu v závislosti na MVF po směru vláken.....	76
Graf 13 Průběh mechanických vlastností v závislosti na MVF kolmo na směr vláken.....	77
Graf 14 Průběh poissonova koeficientu v závislosti na MVF kolmo na směr vláken.....	77

1 Cíl práce

Cílem této práce je seznámení s podstatou FML. S materiály, technologiemi a postupy používaných při aplikaci tohoto hybridního materiálu v reálných aplikacích. Dále se koncepčně seznámíme s konstrukčními řešeními uložení křídla do trupu a dimenzováním potřebného závěsného kování.

Získané poznatky aplikujeme do návrhu kování z hliníku 6061-T6, které porovnáme s kovááním navrženého za použití hybridního materiálu složeného z uhlíkového kompozitu a nerezové oceli. V druhém kováání se zaměříme na navržení vhodné přechodové oblasti mezi hybridním materiálem a čistým uhlíkovým kompozitem.

Za normálních okolností by následovalo experimentální ověření obou navržených kováání. To však vzhledem k opatřením ohledně onemocnění COVID-19 není možné. Proto bude provedena MKP simulace obou navržených kováání s následným porovnáním výsledků a případné hmotnostní úspory.

2 Šroubové a lepené spoje v kompozitech

Letecké konstrukce sestávají ze spojení jednotlivých dílců do sestav a tím vytvoření cesty pro přenos zatížení. Spoje jednotlivých součástí představují potencionální nejslabší články pomyslného řetězu. Proto jsou vyvíjeny snahy o zredukování počtu spojů a snížení jejich komplexnosti. Zde přichází v úvahu hlavní výhoda kompozitních materiálů, které vzhledem ke své povaze umožňují snazší výrobu tvarově komplexních dílů. Čím pomáhají snížit potřebný počet spojů.

Není však možné eliminovat veškeré spoje. Z toho důvodu se v leteckých konstrukcích setkáme nejčastěji se dvěma možnostmi spojování dílčích součástí. První možností jsou mechanické spoje, kam spadá šroubování či nýtování. Druhou možností je provedení spoje pomocí lepení. Případně kombinace obou možností. Lepené spoje přenášejí zatížení primárně pomocí smyku styčných ploch a lepidla. Oproti tomu při mechanickém spojení součástí dochází k přenosu zatížení pomocí tlaku na vnitřním povrchu díry a dřívku. V obou případech jsou prostředky přenosu zatížení (lepidlo nebo spojovací materiál) namáhány primárně na stříh.

Výhody a nevýhody lepených a mechanických spojů jsou porovnány v tabulce níže. Přesto, že je mnoho výhod při použití lepených spojů v kompozitních strukturách. Musíme si uvědomit i hlavní problémy, mezi které patří náročná povrchová úprava styčných ploch před samotným lepením. Tuto přípravu a samotné lepení je nutné provést tak, aby si spoj zachoval požadované mechanické vlastnosti po celou dobu provozu, což může být i pár desítek let. Zároveň se jedná o nerozbitelný spoj, což může být problém při případných opravách či kontrolách stavu struktury. V neposlední řadě lepení spadá mezi takzvané speciální procesy, což jsou procesy, při kterých není možné ověřit správnost provedení v podstatě jinak než destruktivní zkouškou výrobku. Pro kontrolu lepených spojů v kompozitních materiálech je sice možné použití některé NDT metody, ale jejich vyhodnocení a spolehlivost je nutné brát s určitou rezervou.

V rámci této práce se zaměříme primárně na mechanické spoje v kompozitech. Proto nebudeme dále rozebírat lepené spoje jako takové. Nicméně přípravu ploch pro lepení při spojování kov-kompozit budeme řešit v kapitole o FML a lokální hybridizaci. [1][2][6][7]

Tabulka 1 Výhody a nevýhody lepených a mechanických spojů [2]

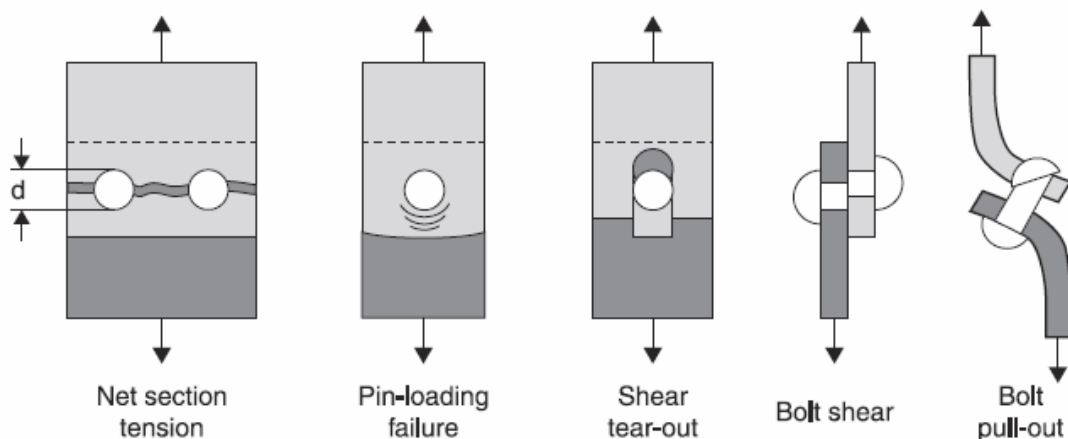
Výhody	Nevýhody
Lepené spoje	
Malá koncentrace stresu v adherendech	Omezení tloušťky, kterou lze spojit pomocí jednoduchého spoje
Tuhé spojení	Obtížná detekce drobnějších vad
Vynikající únavové vlastnosti	Náchylné k degradaci vlivem prostředí
Utěsněno proti korozi	Citlivé na odlupování
Hladký obrys povrchu	Problémy se zbytkovým napětím při spojování s kovy
Relativně lehký	Nelze rozebrat
Tolerance poškození	Může vyžadovat nákladné nástroje a zařízení
	Vyžaduje vysoký stupeň kontroly kvality
	Potenciální zátěž pro životní prostředí
Mechanické spoje	
Pozitivní spojení, nízké počáteční riziko	Značná koncentrace stresu
Lze rozebrat	Náchylné k únavovému praskání
Žádná omezení tloušťky	Vrtání otvorů může poškodit kompozit
Jednoduchá konfigurace spoje	Poměrně nízká únosnost kompozitů
Jednoduchý výrobní proces	Náchylné ke korozi (klasická i galvanická)
Jednoduchý postup kontroly	Může vyžadovat dodatečné vypořádání
Šetrné k životnímu prostředí	
Poskytuje zesílení skrze celou tloušťku materiálu	
Není citlivý na odlupování	
Žádný problém se zbytkovým napětím	

2.1 Mechanické spoje

Na první pohled se může zdát mechanické spojování kompozitů jako nepraktické. Při tvorbě děr pro šroub či nýt dojde k přerušení vláken. Je pravda, že typicky dochází k poklesu polovičnímu poklesu pevnosti oproti původnímu materiálu. Avšak mnohdy se jedná o jedinou možnost spojení tlustších kompozitů. Zároveň se většinou jedná o finančně méně náročný proces oproti lepení.

Jak už bylo zmíněno dříve, valná většina zatížení je přenesena pomocí smyku. Část zatížení je pak přenesena pomocí tření překrývajících se ploch, ale pouze v případě dostatečného sevření spoje. Velikost tohoto sevření je dána počátečním utažením spoje. Je však pravděpodobné, že během užívání dojde k určitému povolení vlivem opotřebení a otláčení v místě spojů. U šroubového spoje lze tento problém řešit dotažením, avšak u nýtovaného spoje dochází k poklesu únosnosti.

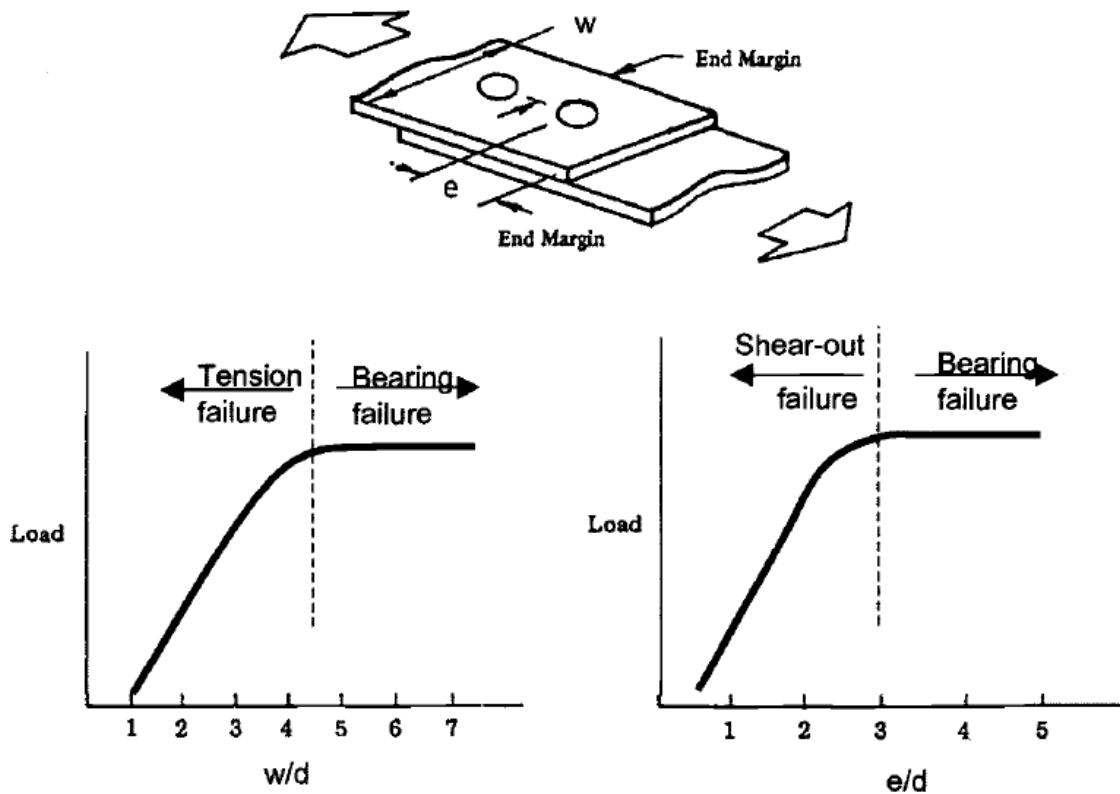
Nicméně vzhledem k vyztužení kompozitu v celé jeho tloušťce (pomocí dřívku) odpadá problém s odlupováním spoje, což poskytuje výhodu oproti lepeným spojům. Problémy ovšem mohou nastat kvůli relativně nízké nosnosti a příčné pevnosti kompozitu oproti monolitickému kovu. Porucha únosnosti vede k prodloužení díry. To vede k ohybu a následné poruše dřívku případně protažení hlavy materiálem.



Obrázek 1 Poruchy šroubového spoje v kompozitech [1]

Typ poruchy je závislý na poměru mezi efektivní šířkou spoje a průměrem díry w/d . Dále závisí na poměru vzdálenosti díry od okraje a jejím průměru e/d . Možnosti poruch zatížení u quasi isotropického kompozitu v závislosti na předchozích poměrech jsou znázorněny na grafu níže. Pro veliké poměry w/d a e/d se vyskytují poruchy únosnosti a

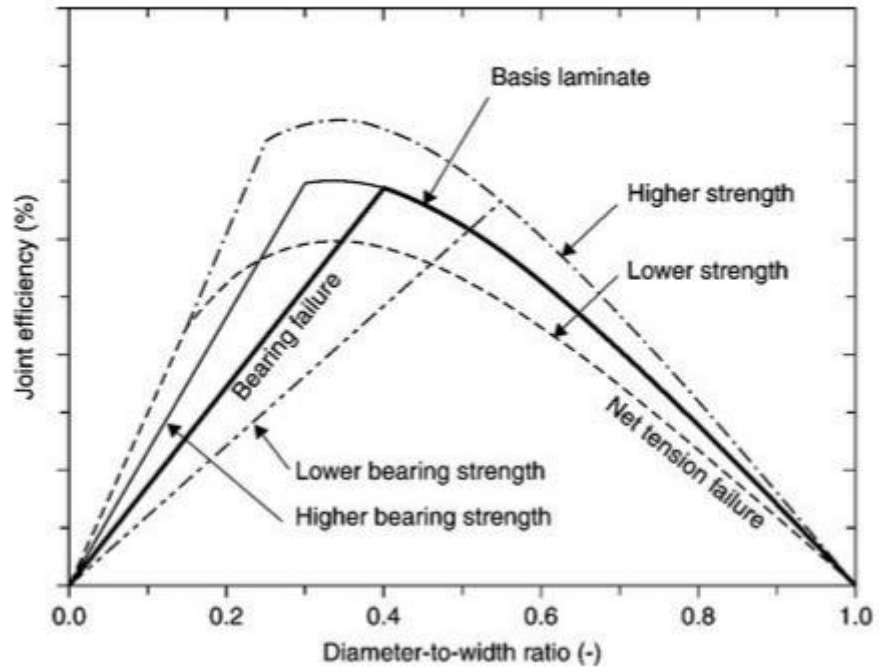
samotná porucha je nezávislá na poměrech w/d a e/d . Pokud snížíme poměr w/d nastávají tahové poruchy. Pevnost klesá až do poměru $w/d=1$, kdy spoj přestává plnit svou funkci. Při snižování poměru e/d začíná docházet k poruchám smyku a pevnost spoje klesá až do poměru 0,5, kde přestává plnit svou funkci. [1][2][6][7]



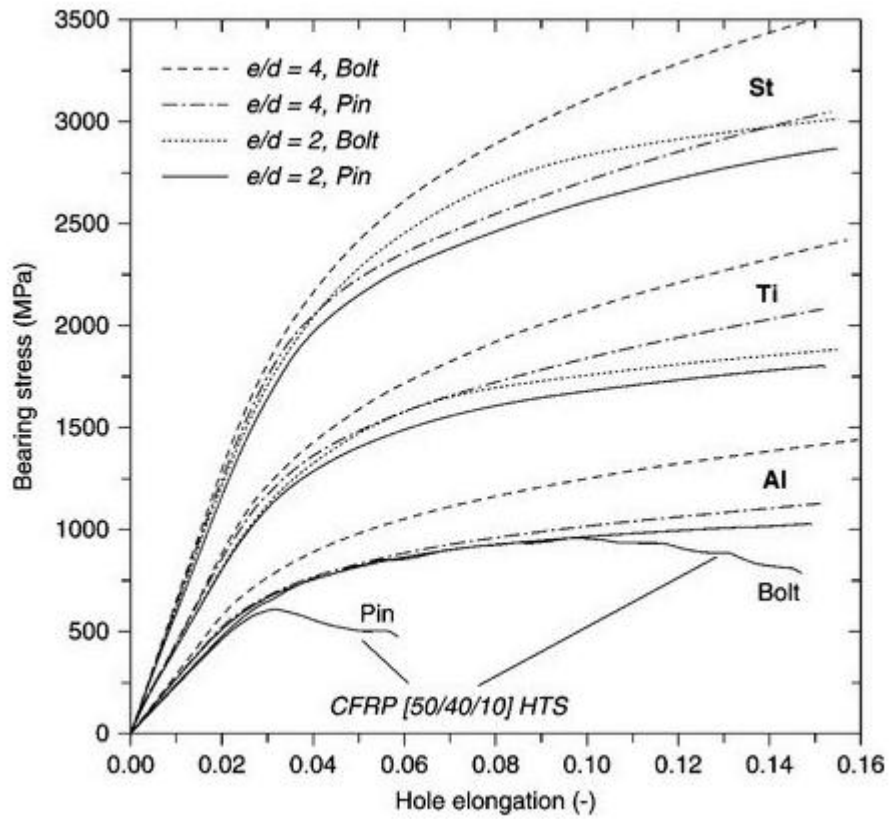
Graf 1 Vliv w/d a e/d [2]

2.1.1 Únosnost šroubových spojů v kompozitech

Únosnost hraje hlavní roli v návrhu šroubového spoje. Definuje nosnost šroubového spoje. To je obzvláště podstatné u jednořadých spojů. Kompozitní materiály vyžadují minimální w/d a e/d poměry k dosažení maximální únosnosti a výskytu poruch únosnosti. Vliv šířky na účinnost jednořadého spoje (s dostatečnou vzdáleností od hrany) ve standardním kompozitu znázorňuje následující graf. [1][2]



Graf 2 Účinnost spoje vůči poměru w/d [1]



Graf 3 Únosnost vůči prodloužení pro různé materiály [1]

3 Metody hybridizace a použité materiály

3.1 Materiály

3.1.1 Výstužná vlákna

Základem je kompozitní materiál, který může být na bázi skelných vláken (GFRP), uhlíkových vláken (CFRP), aramidových nebo jiných exotických vláken. Mechanické a fyzikální vlastnosti tohoto materiálu se snažíme vylepšit zavedením výstužných kovových materiálů. Výsledný efekt záleží na vlastnostech všech materiálů účastnících se hybridizace. [2][7]

3.1.1.1 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna, známá pod obchodní značkou kevlar, se objevují na trhu koncem sedmdesátých let minulého století. Jedná se aromatický polyamid. Výhodou těchto vláken jsou lepší dielektrické vlastnosti oproti skleněným vláknům, vysoká chemická odolnost a odolnost proti plameni (jsou samozhášivá a netaví se). Nicméně vykazují nízkou pevnost v tlaku, což značně omezuje jejich použití.

Vzhledem k tomu, že teplota tavení se nachází nad teplotou tepelného rozkladu, není možné jejich spřádání z taveniny. Jsou tudíž tažena z krystalického roztoku polyparafenyl tereftalamidu v koncentrované kyselině sírové. Pro další zpracování je nutné vlákna propláchnout a neutralizovat. [2][7]

Armamidová vlákna můžeme rozdělit do následujících skupin:

- Nízko modulová (LM) – určená pro použití v ochranných prostředcích (rukavice, vesty) a k výrobě lan
- Vysoko modulová (HM) – určena pro použití v leteckém průmyslu

Tabulka 2 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů aramidových vláken

	Nízko modulová (LM)	Vysoko modulová (HM)
ρ [g/cm ³]	1,44	1,45
R_m [MPa]	2800	2900
E [GPa]	59	127
Tažnost [%]	4	1,9
R [$\mu\Omega m$]	1015	1015
α [$10^{-6}mm/K$]	-2,3	-4,1
Absorpce vlhkosti [%]	7	3,5

3.1.1.2 Skleněná vlákna

Jedná se o vlákna na bázi křemene (SiO_2). První použití je zaznamenáno v počátku šedesátých let minulého století. Kdy byly použity nejdříve jako výztuž tlakových nádob a dále i na těla raket. V porovnání s ostatními vlákny se jedná poměrně levný materiál. Obrovské zastoupení má v interiérech moderních letadel. Avšak pro použití na strukturální části velkých letadel je vzhledem ke svému nízkému modulu pružnosti málo používán.

Výroba probíhá tavením sklářského kmene, což je směs vápence, potaše, písku a kolemanitu, při teplotě $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Z této taveniny jsou tažena vlákna, jejichž průměr závisí na průměru otvoru na dně kotle. Současně bývá taženo 400 až 8000 vláken. Typický průměr se pohybuje mezi 5 až 20 μm . Rychlost tažení se pohybuje okolo 50 m/s. Vlákna jsou následně ochlazená vodní mlhou, potažena lubrikantem a spojena do svazků, které se používají pro další zpracování a k výrobě tkanin. [2][7]

Rozlišujeme následující druhy skla, které se liší složením a svými vlastnostmi:

- E-sklo – bezalkalické, nejnižší cena
- S-sklo – vyšší cena ale lepší mechanické vlastnosti
- D-sklo – dielektrické vlastnosti
- C-sklo – zvýšená chemická odolnost

Tabulka 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů skelných vláken

	<i>E-sklo</i>	<i>S-sklo</i>	<i>D-sklo</i>	<i>C-sklo</i>
ρ [g/cm^3]	2,60	2,53	2,14	2,45
R_m [MPa]	3400	4400	2500	3100
E [GPa]	73	86	55	70
Tažnost [%]	3,85	4,50	3	3,85
R [$\mu\Omega\text{m}$]	1015	1014,5	-	1016
α [$10^{-6}\text{mm}/\text{K}$]	5	4	2,5	7,2

3.1.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou charakteristická vysokým modulem pevnosti. Proto jsou často využívána pro výrobu strukturálních částí v leteckých a kosmických aplikacích. Uvedení komerčních uhlíkových vláken na trh bylo na přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století. Výhodou uhlíkových vláken je vysoká pevnost a tuhost při nízké

hmotnosti. Avšak nevýhodou je křehkost vlákna, vysoká cena a nežádoucí oxidace již při 400 °C.

Tato vlákna jsou vyráběna z organických materiálů, které projdou procesem zvaným karbonizace. Při tomto procesu se z materiálu odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Valná většina vláken použitých v leteckém průmyslu je vyrobena z polyakrylonitrilových vláken (PAN). Nicméně je možné uhlíková vlákna vyrábět i z pyrolyzních olejů a smol označovaných jako PITCH. Jedná se o produkty vznikající při rafinaci ropy.

V případě výroby uhlíkových vláken na základě PAN je výchozí materiál již ve formě vláken. Ta jsou nejprve peroxidována a následně při teplotách v rozmezí 1200–1600 °C karbonizována. Karbonizační proces probíhá v inertní dusíkové atmosféře. Tím vznikají vysokopevnostní typy vláken. Případně nastává další proces, při kterém jsou vysokopevnostní vlákna vystavena teplotám v rozmezí 2200-2500 °C. Tím se podpoří vznik grafitické struktury. Tento proces je nejčastěji prováděn v argonové inertní atmosféře. Důsledkem růstu grafitické struktury jsou vlákna s vyšším modulem pružnosti. [2][7]

Uhlíková vlákna můžeme rozdělit do následujících kategorií:

- HM (Typ 1) – vlákna s vysokým modulem pružnosti
- HS (Typ 2) – vlákna s vysokou pevností
- IM (Typ 3) – vlákna se středním modulem pružnosti

Tabulka 4 Mechanické a fyzikální vlastnosti různých druhů uhlíkových vláken

	HM	HS	IM
ρ [g/cm ³]	1,9	1,8	1,8
R_m [MPa]	2415-2555	3105-4555	4800
E [GPa]	376-380	228-241	296
Tažnost [%]	0,65	1,65	2
R [$\mu\Omega m$]	9,5	16,5	-
α [$10^{-6}mm/K$]	0,7	0,5	-
Tepelná vodivost [W/m.K]	64-70	8,1-9,3	-

3.1.2 Výstužný kov

Při výběru vhodného výstužného materiálu je nutné dbát na několik faktorů, které mohou značně ovlivnit výsledný efekt. Jedná se například o odolnost proti korozi a

galvanickou kompatibilitu mezi kovem a kompozitním materiálem. Je důležité, aby výstužný materiál vykazoval větší únosnost a kujnost než kompozit. Můžeme říci, že čím vyšší je pevnost a tuhost kovové výztuhy, tím významnější roli má ve výsledných vlastnostech celku. Což nemusí vždy znamenat zlepšení. Pokud bude tuhost mnohem větší u jednoho než u druhého materiálu účastnícího se hybridizace, dojde k tomu, že přetížení tužšího členu vede k poruše mnohem dříve, než druhý člen dosáhne své maximální nosnosti. Tudíž je vždy nutné najít optimální poměr vlastností.

Při výběru vhodného kovu je dobré zaměřit se na tyto vlastnosti:

- Tuhost
- Nízká teplotní roztažnost
- Dostatečná kujnost
- Odolnost proti korozi
- Chemická kompatibilita s použitým kompozitem
- Spojitelnost
- Tvářitelnost za studena
- Obrobitelnost

Valná většina kovem vyztužených vláknových kompozitů využívá jako kovovou složku hliník (GLARE, ARALL, CARE/CARALLL). Avšak je možné jako výstužný kov použít i jiné kovové materiály, jako například nerezovou ocel, titan nebo slitiny hořčíku.

Důvody pro použití jiných kovů, než je hliník, jsou různé. Může se jednat o elektrochemickou a pevnostní kompatibilitu mezi vláknem a kovem (zejména u použití uhlíkového vlákna). Případně snahu vyvinout materiál lépe odolávající vysokým teplotám pro použití například u vysokorychlostních letounů [1]

3.1.2.1 Hliník

Vzhledem k nízké hustotě hliníku, snadné zpracovatelnosti, dostupnosti a rozšíření v leteckém průmyslu bylo jeho použití v rámci FML nasnadě. Jedná se o první kovový substituent, který byl touto formou použit a dodnes je používán nejčastěji.

Mezi nejpoužívanější slitiny hliníku v rámci FML řadíme 3,1355 (AlCu4Mg1) a 3,4384 (AlZn5.5MgCu(A)).

Bohužel při kombinaci hliníku s uhlíkovým vláknem dochází k nežádoucí galvanické korozi, která musí být odstraněna zavedením izolačních vrstev nebo povlaků. [1][2][6][7]

3.1.2.2 Titan

Titan je vhodnou náhražkou hliníku u FML na bázi uhlíku. Odpadají problémy s galvanickou korozi a zlepšuje se poměr tuhostí titanu a uhlíku oproti titanu a hliníku. Dobré tepelné vlastnosti Titanu zároveň umožňují aplikace v oblastech se zvýšenou teplotou.

Nevýhodou je náročná povrchová příprava pro lepení a také pořizovací cena. Tyto dva aspekty brání rozšíření FML s titanem.

Slitina titanu, která je často používaná v těchto aplikacích je 3,7165 (Ti-6AL-4V). [1][2][6][7]

3.1.2.3 Nerezová ocel

Nerezová ocel je vhodná alternativa oproti hliníku, zejména při použití uhlíkových vláken. Vyřešíme tím problém s galvanickou korozi. Zároveň má vyšší tuhost než titan, a tudíž lepe koresponduje celkově vysokým modulem pružnosti uhlíkových vláken. Nevýhodou je však větší hustota nerezových ocelí. Ta klade důraz na maximální tloušťku kovové vrstvy. Valná většina výzkumu pracuje s ocelí 1,4404 o tloušťce 0,1mm případně s ocelí 1,4301 o tloušťce 0,6mm.

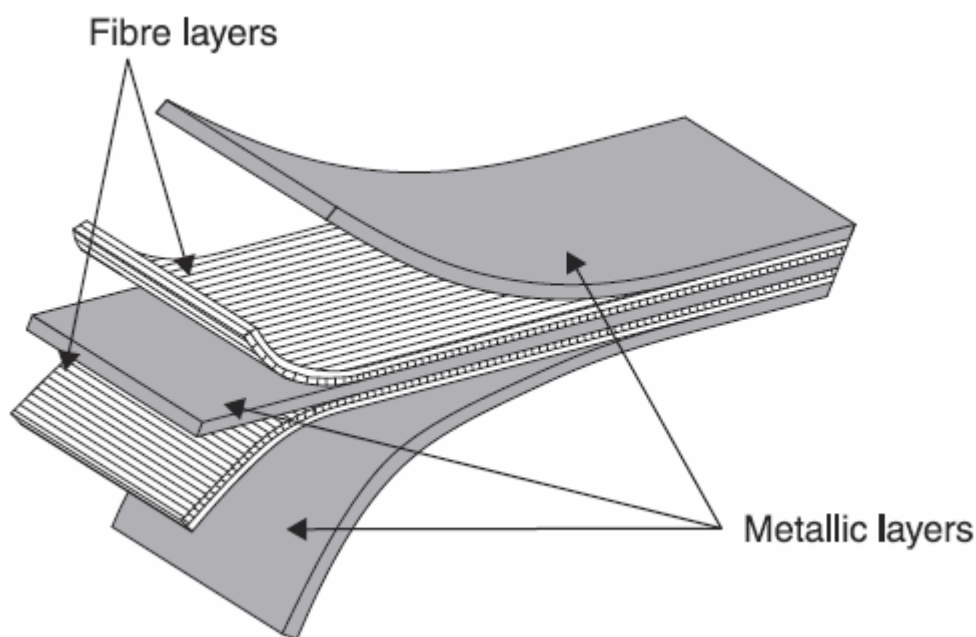
FML na bázi nerezové oceli mají obecně vyšší tahové a únavové vlastnosti oproti těm na bázi hliníku. Vysoká tuhost v tahu naznačuje velikou výhodu, avšak vzhledem k nízké tloušťce kovové vrstvy, zejména 0,1mm, nastává problém se stabilitou vrstvy při zatěžování tlakem. Tato nestabilita vede ke vzniku vzpěru. Pro zvýšení stability je nutné zvětšit tloušťku vrstvy, což vede k nežádoucímu nárůstu hmotnosti. Další možností je aplikace FML na bázi nerezové oceli v konstrukcích primárně namáhaných tahem. [1][2][6][7]

3.2 Fiber metal laminate - FML

Jedná se o spojení kovu s kompozitním materiálem. Z dřívějšího pohledu se jednalo o kov vyztužený vláknovým kompozitem. Toto označení bylo nasnadě, jelikož koncept FML vznikl po druhé světové válce, kdy letecký výrobce Fokker hledal levnější technologii pro výrobu potahu křídla s proměnnou tloušťkou. Protože nebylo ve finančních možnostech výrobce pořídit si velkoformátové obráběcí stroje, které používala konkurence k obrábění a tvorbě potahů z hliníkových ingot. Proto Fokker přišel s nápadem slepit k sobě několik

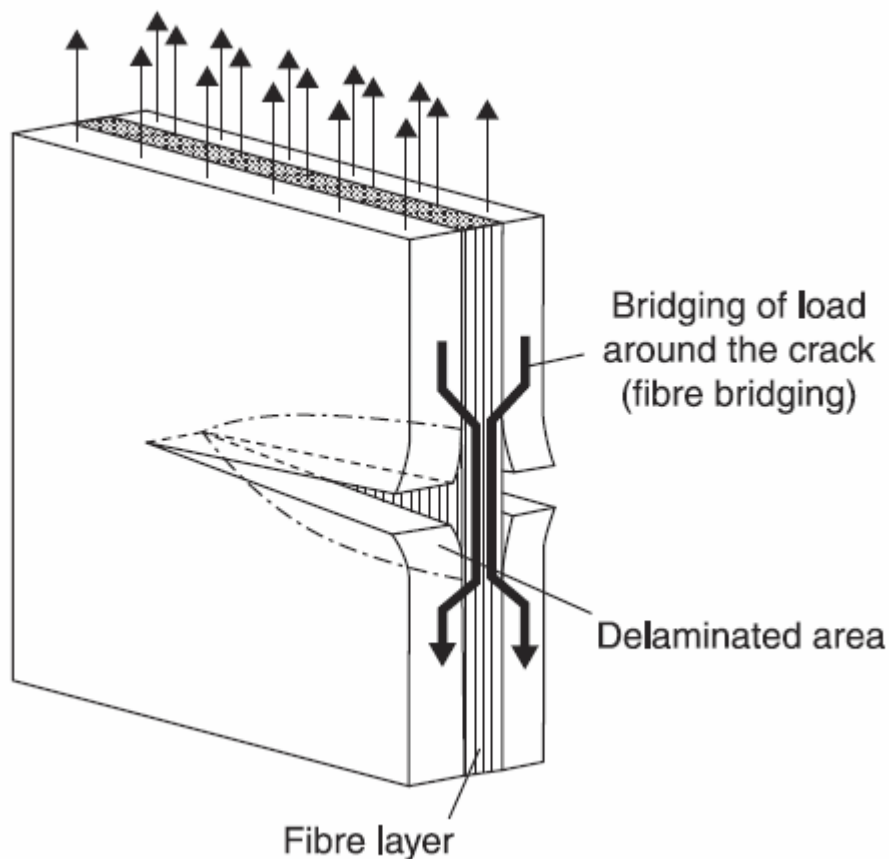
tenkých hliníkových plechů a tím dosáhnout požadovaných tloušťek. Tato metoda se projevila značnou únavovou odolností materiálu. Tato odolnost byla přisuzována zejména těmto třem faktorům:

- Stav rovinného napětí tenkých plechů
- Oddělení jednotlivých vrstev kovu adhezí vrstvou, což zabraňuje šíření trhliny skrze tloušťku materiálu.
- Možnost přemostění trhliny skrze nepoškozené vrstvy a tím snížení intenzity napětí ve špičce trhliny



Obrázek 2 Koncepce FML [1]

Počátkem sedmdesátých let dvacátého století byla odolnost takto tvořeného materiálu zvýšena použitím výstužných vláken v lepené vrstvě. Tato vlákna pomohla ještě lépe přemostit případnou trhlinu a rozložit zatížení do nepoškozeného zbytku materiálu. Zároveň tato vlákna byla méně náchylná na únavové poškození, a proto mohla svojí funkci plnit déle než následná kovová vrstva. Odtud pramení pohled na FML jako na kov vyztužený vláknovým kompozitem. [1][2][6][7]



Obrázek 3 Příklad přeměrování toku zatížení skrze kompozitní vrstvu [1]

3.2.1 ARALL

Jedna se o spojení aramidových vláken a hliníkového plechu. První použitá verze vláknového kompozitu vyztuženého kovem. Původně byl vyvinut pro potah spodní části křídla letounu Fokker F27 a F50. V této době se však nejednalo o materiál jako takový. FML bylo považováno za strukturu, spojení různých dílů pomocí lepení.

Z nepřeberného množství slitin hliníku, lepidel a druhů vláken se výzkum zaměřil na následující kombinace. Byly uvažovány dvě možné hliníkové slitiny 3,1355 (AlCu4Mg1) a 3,4384 (AlZn5.5MgCu(A)). Kde 3,4384 se vykazuje vyšší pevností, ale nižší únavovou odolností. Proti tomu slitina 3,1355 s nižší pevností, ale vysokou únavovou odolností. Pro slitinu 3,4384 bylo po vytvrzení FML nutné dodatečné tažení, aby se dosáhlo požadovaných vlastností. Zatím co při použití slitiny 3,1355 byl materiál po vytvrzení připraven k použití. Jako pojivo bylo zvoleno lepidlo na bázi epoxidu AF163-2 značky 3M. Další výzkum již probíhal ve spolupráci s dodavatelem materiálu ALCOA pro hliník, 3M pro lepidlo a AKZO pro aramidová vlákna. Toto partnerství umožnilo certifikaci ARALLu jako materiálu. A umožnilo komerční výrobu a dodávání FML obdobně jako čistého hliníku. Tímto způsobem

vznikla skupina materiálů označovaná ARALL-1 až ARALL-4. Tato standardizace byla snahou vyhnout se nespočetným kombinacím tloušťek hliníku a skladby kompozitní vrstvy.

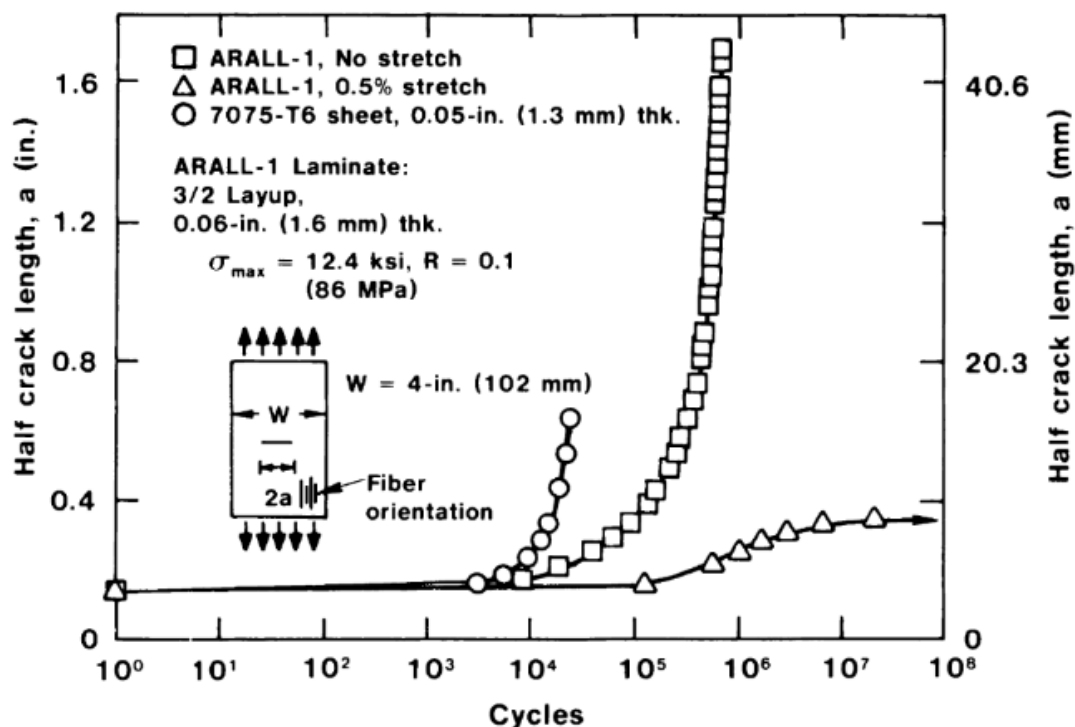
Tabulka 5 Třídy Arallu [6]

<i>Třída</i>	<i>Slitina hliníku</i>	<i>Tloušťka hliníku</i>	<i>Orientace vláken</i>	<i>Vlákn</i>	<i>Epoxydová matrice</i>	<i>Teplota zrání [°C]</i>
ARALL-1	7075-T6	0,3	0/0	HM aramid	AF163-2	120
ARALL-2	2024-T3	0,3	0/0	HM aramid	AF163-2	120
ARALL-3	7475-T761	0,3	0/0	HM aramid	AF163-2	120
ARALL-4	2024-T81	0,3	0/0	HM aramid	AF191	175

Mechanické vlastnosti typického komerčního FML na bázi aramidových vláken lze najít v tabulce níže. Hodnoty uvedené v tabulce jsou pro skladbu 3/2-0,3 (tři vrstvy hliníku o tloušťce 0,3mm a dvě vrstvy prepregu). A při orientaci zatížení L-podíl vláken a LT – napříč orientaci vláken.

Tabulka 6 Mechanické vlastnosti tříd Arallu ("-" chybějící data) [6]

	Vlastnost	Orientace	ARALL-1	ARALL-2	ARALL-3	ARALL-4
Tah	Rm	L	800	717	828	731
	[MPa]	LT	386	317	373	338
	Rp0,2	L	641	359	587	373
	[MPa]	LT	331	228	317	317
	Et	L	67,6	64,1	68	64,1
	[GPa]	LT	48,3	49	51	49
	eult	L	1,9	2,5	2,2	2,6
	[%]	LT	7,9	12,7	8,8	4,6
v	L	0,33	0,32	-	-	
	LT	0,25	0,26	-	-	
Tlak	Rp0,2	L	372	262	345	-
	[MPa]	LT	393	234	365	-
	Ed	L	70	67	66	-
	[GPa]	LT	52	52	50	-
Střih	τ0,2	L	-	117	-	-
	[MPa]	LT	-	114	-	-
	G	L	17	17	-	-
	[GPa]	LT	-	16	-	-
Únosnost	Rme/D=2	L	655	531	-	-
	[MPa]	LT	703	545	-	-
	Rme/D=3	L	738	565	-	-
	[MPa]	LT	724	545	-	-
	Rp0,2 e/D=2	L	586	386	-	-
	[MPa]	LT	607	386	-	-
	Rp0,2 e/D=3	L	703	455	-	-
	[MPa]	LT	669	441	-	-



Graf 4 Únavová odolnost ARALLu v tahu [1]

Přesto, že ARALL má vynikající vlastnosti v tahu, tak vzhledem k povaze aramidových vláken, jeho odolnost v tlaku je nesrovnatelně nižší, jak je naznačeno v tabulce 6. Tato skutečnost značně limituje jeho uplatnění. A to pouze pro aplikace, kde převažuje tahové namáhání. [1][2][6][7]

3.2.2 GLARE

FML na bázi skelných vláken bylo vyvinuto vzhledem k potřebě materiálu, který bude oproti ARALLu odolný jak v tahu, tak v tlaku. V tomto ohledu jsou skelná vlákna lepší vzhledem k jejich větší stabilitě v tlaku oproti aramidovým vláknům.

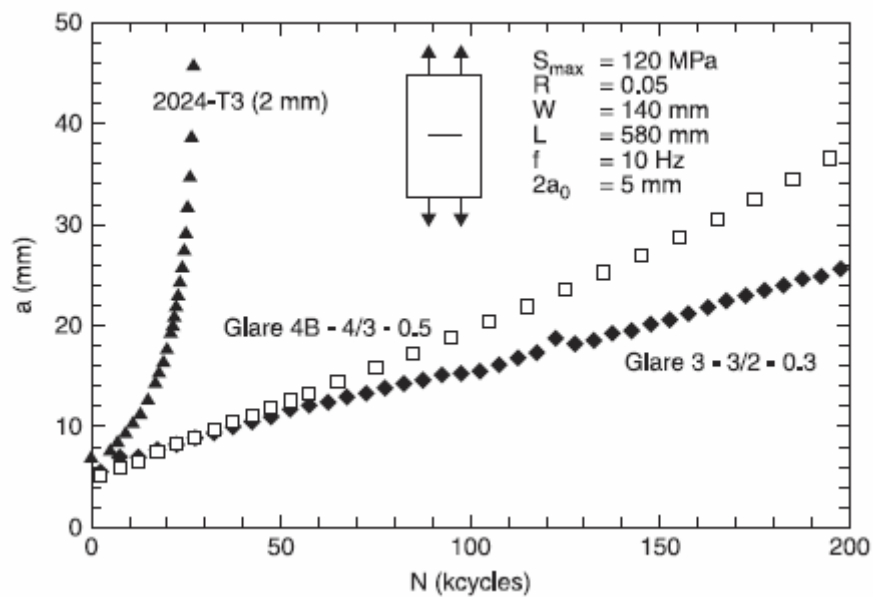
Vzhledem k tomu, že v původním patentovém znění již byla zmínka o skelných vláknech, nebylo proto možné vytvořit nový patent. Nicméně vzhledem k tomu, že skelná vlákna značně zvyšovala odolnost v tlaku a ovlivňovala rychlost deformace a tím i odolnost vůči nárazu FML materiálů. Bylo ve výzkumu pokračováno i přes nemožnost nových patentů.

Základem GLARE byli stejné slitiny hliníku jako u ARALLu. A lepidlo FM94, modifikovaná verze lepidla na bázi epoxidu určená pro spojení kov-laminát. Stejně jako u ARALLU byly i u GLARE vytvořeny sjednocené třídy. Tato standardizace umožnila snazší certifikaci a aplikaci materiálu v leteckých aplikacích. V následující tabulce jsou znázorněny

standardní třídy GLARE. Každá se skládá z vrstev jednosměrného prepregu s S-sklem a nominálním zastoupením vláken 59%. Mechanické vlastnosti jednotlivých tříd a podtříd jsou pak uvedeny v tabulce 8 a 9. [1][2][6][7]

Tabulka 7 Třídy Glare [6]

Třída	Slitina hliníku	Tloušťka hliníku	Orientace vláken	Hlavní zlepšená charakteristika
Glare 1	7475-T761	0,3-0,4	0/0	Únava, Pevnost, Mez kluzu
Glare 2 A	2024-T3	0,2-0,5	0/0	Únava, Pevnost
Glare 2 B	2024-T3	0,2-0,5	90/90	Únava, Pevnost
Glare 3	2024-T3	0,2-0,5	0/90	Únava, odolnost nárazu
Glare 4 A	2024-T3	0,2-0,5	0/90/0	Únava, směrová pevnost 0°
Glare 4 B	2024-T3	0,2-0,5	90/0/90	Únava, směrová pevnost 90°
Glare 5	2024-T3	0,2-0,5	0/90/0/90	Odolnost nárazu
Glare 6 A	2024-T3	0,2-0,5	45/-45	Střih, mimosové vlastnosti
Glare 6 B	2024-T3	0,2-0,5	-45/45	Střih, mimosové vlastnosti



Graf 5 Únavové chování GLARE [1]

Tabulka 8 Mechanické vlastnosti Glare 1 až Glare 3 ("-" chybějící data) [6]

Skladba	Vlastnost	Orientace	Glare 1		Glare 2A		Glare 3	
			2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2
Tah	Rm	L	1077	1282	992	1101	640	678
	[MPa]	LT	436	352	335	307	627	666
	Rp0,2	L	525	545	343	343	298	287
	[MPa]	LT	342	333	225	209	267	260
	Et	L	66	65	67	64	59,2	56,4
	[GPa]	LT	54	50	57	48,5	59	56,2
	ϵ_{ult}	L	4,2	4,2	4,7	4,7	4,7	4,7
	[%]	LT	7,7	7,7	10,8	10,8	4,7	4,7
	ν	L	-	-	-	-	-	-
	[-]	LT	-	-	-	-	-	-
Tlak	Rp0,2	L	447	424	357	367	295	292
	[MPa]	LT	427	403	255	237	305	298
	Ed	L	63	67	67	65,6	61,6	58,9
	[GPa]	LT	56	51	57	53,2	62,1	59,6
Střih	$\tau_{0,2}$	L	-	-	122	112	125	115
	[MPa]	LT	-	-	122	112	125	115
	G	L	-	-	16,1	13,6	18,4	16,4
	[GPa]	LT	-	-	16,1	13,6	18,4	16,4
Únosnost	Rme/D=2	L	-	832	-	703	-	782
	[MPa]	LT	-	-	-	-	-	-
	Rme/D=3	L	-	-	1019	980	1050	1018
	[MPa]	LT	-	-	1013	973	1050	1018
	Rp0,2 e/D=2	L	-	713	-	530	-	545
	[MPa]	LT	-	-	-	-	-	-
	Rp0,2 e/D=3	L	-	-	723	729	682	680
	[MPa]	LT	-	-	557	528	682	680

Tabulka 9 Mechanické vlastnosti Glare 4 až Glare 63 ("- " chybějící data) [6]

Skladba	Vlastnost	Orientace	Glare 4A		Glare 5		Glare 6A	
			2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2
Tah	Rm	L	831	898	683	916	-	-
	[MPa]	LT	545	562	681	-	-	-
	Rp0,2	L	304	296	297	276	-	-
	[MPa]	LT	236	225	275	-	-	-
	Et	L	58,5	56	59	51	-	-
	[GPa]	LT	52,4	48,7	59	-	-	-
	ϵ_{ult}	L	4,7	4,7	4,7	-	-	-
	[%]	LT	4,7	4,7	4,7	-	-	-
	ν	L	-	-	-	-	-	-
	[-]	LT	-	-	-	-	-	-
Tlak	Rp0,2	L	316	317	283	-	-	-
	[MPa]	LT	278	267	280	-	-	-
	Ed	L	59,1	57,2	61	-	-	-
	[GPa]	LT	54,4	51,7	61	-	-	-
Střih	$\tau_{0,2}$	L	111	100	-	-	-	-
	[MPa]	LT	111	100	-	-	-	-
	G	L	15,6	13,4	-	-	-	-
	[GPa]	LT	15,6	13,4	-	-	-	-
Únosnost	Rme/D=2	L	-	-	-	-	-	-
	[MPa]	LT	-	-	-	-	-	-
	Rme/D=3	L	972	931	-	-	-	-
	[MPa]	LT	1003	968	-	-	-	-
	Rp0,2 e/D=2	L	-	-	-	-	-	-
	[MPa]	LT	-	-	-	-	-	-
	Rp0,2 e/D=3	L	651	643	-	-	-	-
	[MPa]	LT	593	575	-	-	-	-

3.2.3 CARALL a ostatní FML s uhlíkovým vláknem

Přes skutečnost, že GLARE je neúspěšnější a nejpoužívanější variantou FML, existují i jiné modifikace. Jednou z nich je CARALL. Jedná se o kombinaci hliníku a kompozitu na bázi uhlíkových vláken.

Vzhledem k celkově větší pevnosti uhlíkových vláken, oproti skleněným, má výsledný uhlíkový kompozit větší pevnost než skleněný. To vede k možnosti přenést větší zatížení skrze vlákna v případě porušení kovové vrstvy. Tudiž CARALL vykazuje ještě větší odolnost vůči růstu trhlin než GLARE.

CARALL má však jednu zásadní nevýhodu oproti jeho předchůdcům. Tou je existence galvanické koroze styčných ploch mezi hliníkem a uhlíkem. Eliminace toho nežádoucího jevu vyžaduje izolování hliníku od uhlíku. Toho lze docílit povrchovou úpravou hliníku, která však může mít za následek zhoršení adheze s lepidlem, nebo vložením dodatečné vrstvy skelného kompozitu. K těmto opatřením musíme přidat nutnost dodatečné izolace v místě kde jsou vrtány díry.

Další problém nastává vlivem značně rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti uhlíkových vláken vzhledem k hliníku, a i skelným vláknům. Díky této skutečnosti má CARALL po vytvrzení velká zbytková napětí. Což může mít za následek rychlejší vznik únavového poškození.

Tabulka 10 Vlastnosti Carall [6]

Vlákno	Matrice	objem vláken [%]	Tloušťka vrstvy uhlíku [mm]	Teplota zrání [°]	Skladba	Tloušťka laminátu [mm]	Rm [MPa]	E [MPa]
HM	AF163-2	58	0,22	120	UD-2/1	0,82	800	105
HTA	AF163-2	58	0,27	120	UD-2/1	0,82	984	89,9
T300	DLS1095	60	0,2	120	UD-2/1	0,8	747	85,2
IM600	Fibredux 924C	60	0,105	180	UD-2/1	0,705	896	87,6
					CP-3/2	1,3	585	71,3
			0,21			0,81	1218	99,3
			0,315			0,915	1395	108,1
T800	Fibredux 924C	60	0,2	180	UD-2/1	0,8	1030	100
FT700	AF163-2	55	0,23	120	UD-2/1	0,93	675	170
					CP-3/2	1,3	728	75,1

Možným řešením problému s elektrochemickou a teplotně roztažností kompatibilitou uhlíku s hliníkem, je nahrazení hliníku jiným vhodnějším kovem. Může jít například o titan.

Tato kombinace vykazuje dobré mechanické a teplotní vlastnosti. Umožňuje FML za vyšších teplot. Vzhledem k nízké hustotě titanu se jedná o velice atraktivní materiál. Problém je však vysoká cena materiálu, zpracování a také problematika povrchové úpravy titanu pro lepení.

Spojení titanu 3,7165 (Ti-6AL-4V), uhlíkovými vlákny IM600 a fenolitickou pryskyřicí. Dosáhneme FML, který má takřka dvakrát vyšší mez pevnosti v tahu oproti GLARE, modul pružnosti okolo 100GPa a je schopný odolávat teplotám okolo 315 °C.

Další kovem, který je vhodný pro nahrazení hliníku je nerezová ocel. Výhody a nevýhody nerezové oceli v FML byly probírány již dříve. [1][2][6][7]

3.2.4 Příprava kovů pro lepení

Jelikož základem FML je spojení kompozitu s kovem, musíme zajistit pevné a trvalé spojení těchto dvou nesourodých materiálů. Aby bylo možné tohoto dosáhnout, je nutné připravit si povrch kovového plechu pro lepení. Jedná se o kritický krok ve výrobě FML, jeho špatné provedení může mít za následek nevyhovující mechanické vlastnosti výrobku.

Cílem povrchové přípravy je zvýšení smáčivosti kovu lepidlem. Základem přípravy je odstranění organických nečistot (odmaštění) a odstranění volných částic, a to buď mechanicky nebo chemicky. Během tohoto procesu a po něm je nezbytné použití čistých rukavic, aby se zabránilo opětovné kontaminaci povrchu. U přípravy kovů je, vzhledem tomu, že povrch je stále aktivní (oxiduje), nutné odstranění této aktivní vrstvy. A to buď mechanicky nebo chemicky.

Po odmaštění, mechanickém a chemickém očištění může následovat takzvané primerování. Tedy nanesení základního nátěru (obvykle zředěný roztok lepidla). Jeho funkce je opět zvýšení smáčivosti povrchu. Dále pomáhá chránit povrch před oxidací a tím prodlužuje dobu zpracovatelnosti.

Tabulka 11 Vliv přípravy povrchu na pevnost spoje u hliníku a nerez

<i>Kov</i>	<i>Úprava povrchu</i>	<i>Druh lepidla</i>	<i>Smyková pevnost [MPa]</i>
<i>Hliník</i>	Jak bylo obdrženo	Epoxid	3,06
<i>Hliník</i>	Odmaštění	Epoxid	5,77
<i>Hliník</i>	Mechanické čištění	Epoxid	12,1
<i>Hliník</i>	Leptání kyselinou	Epoxid	19
<i>Hliník</i>	Jak bylo obdrženo	Vinil-fenolické	16,87
<i>Hliník</i>	Odmaštění	Vinil-fenolické	19,9
<i>Hliník</i>	Leptání kyselinou	Vinil-fenolické	35,7
<i>Nerez</i>	Jak bylo obdrženo	Vinil-fenolické	36
<i>Nerez</i>	Odmaštění	Vinil-fenolické	43,5
<i>Nerez</i>	Leptání kyselinou	Vinil-fenolické	49,7

Příprava titanu pro lepení je problematická. Při použití pouze nejjednodušších metod (odmaštění, pískování atp.) bylo dosaženo velmi špatných mechanických vlastností

slepeného spoje. Experimenty ukázaly, že nejlepších výsledků se dosáhne metodami, které zdrsňují povrch v mikroskopickém měřítku. Mezi metody s nejlepšími výsledky patří tryskání plazmou a aplikace Sol gelu.

Tryskání plazmou spočívá v rychlém zahřátí prášku TiO_2 , TiSi_2 , MgO nebo SiO_2 do nataveného nebo roztaveného stavu a následného vysokorychlostního tryskání ošetřovaného povrchu. Jedná se o velice ekologickou metodu, která nepředstavuje riziko pro životní prostředí. Současně není nákladná a povrch ošetřený touto metodou má takřka neomezenou dobu zpracovatelnosti, což se lepení týče.

Sol gel představuje moderní a energeticky nenáročnou metodu povrchové přípravy. Jedná se o substanci na bázi vody, tudíž neobsahuje žádné nebezpečné a znečišťující látky. Systém pracuje na principu hybridního organického a anorganického povlakování.

Tabulka 12 Povrchové úpravy titanu [8]

Druh PU	Slitina	Mechanismus PU	Povrchová hrubost	Velikost oxidované vrstvy [nm]	Pevnost lepeného spoje	Odolnost PU
Obrusění a odmaštění	Ti-6Al-4V	Odstranění hrubých nečistot a odmaštění	Macro	-	Nizká	nizká
	Ti-6Al-4V	Odstranění hrubých nečistot a odmaštění	Macro	-	zvýšená	přiměřená
Pískování	Ti-6Al-4V	Odstranění hrubých nečistot a odmaštění	Macro	-	Dobrá	nizká
	Ti-6Al-4V	Odstranění hrubých nečistot a odmaštění	Macro	-	přiměřeně nízká	nizká
Leptání kyselinou	Ti-6Al-4V	Leptání	Micro	60-200	Dobrá	dobrá
	Ti-6Al-4V	Leptání	Micro	20	přiměřená	nizká
Alkalické leptání	Ti-6Al-4V	Leptání	-	8	přiměřená	nizká (lepší než Fosfátfluorid)
Fosfátfluorid	Ti-6Al-4V	Leptání a oxidace	Macro	17,5	přiměřená	přiměřená
Modifikovaný fosfát fluorid	Ti-6Al-4V	Oxidace	Macro	6	zvýšená	dobrá
TURCO	Ti-6Al-4V	oxidace	Macro	.10-20	přiměřená	přiměřená
DAPCO	Ti-6Al-4V	oxidace	Micro	40-140	Vysoká	výborná
Pasajell	Ti-6Al-4V	oxidace	Micro	80-90	Vysoká	výborná
Eloxování kyselinou chromovou	Ti-6Al-4V	Ablace a oxidace	Micro	130	Vysoká	výborná
Eloxování hydroxidem sodným	Ti-6Al-4V	Spojování a oxidace	-	-	Vysoká	dobrá
Tryskání plasmou	Ti-6Al-4V	Ablace a oxidace	Macro	-	Vysoká	nizká
Sol gel	Ti-6Al-4V	Ablace a oxidace	Macro	-	Vysoká	nizká
Lasarová úprava	Ti-6Al-4V	Ablace a oxidace	Macro	-	Vysoká	nizká

3.3 Lokální hybridizace

Prakticky jde od druh FML s tím rozdílem, že u klasického FML je vrstva kovu kontinuální, tedy přes celý rozměr dílu. Zatím co při lokální hybridizaci, jak už název napovídá, je kompozit proložen kovovou vrstvou pouze v určité části, kde vyžadujeme vyšší únavové vlastnosti. Může se jednat například o místa mechanických spojů (šrouby, nýty nebo čepy) případně jiné prostupy a kontrolní otvory.

Předpokladem této metody je nahrazení části tkaniny kovovou folií stejné tloušťky. To vše v rámci jedné vrstvy. Tento přístup má oproti ostatním výztuhám kompozitu výhodu v tom, že nedochází ke změně tloušťky. Což je zejména z hlediska aerodynamiky nežádoucí jev.

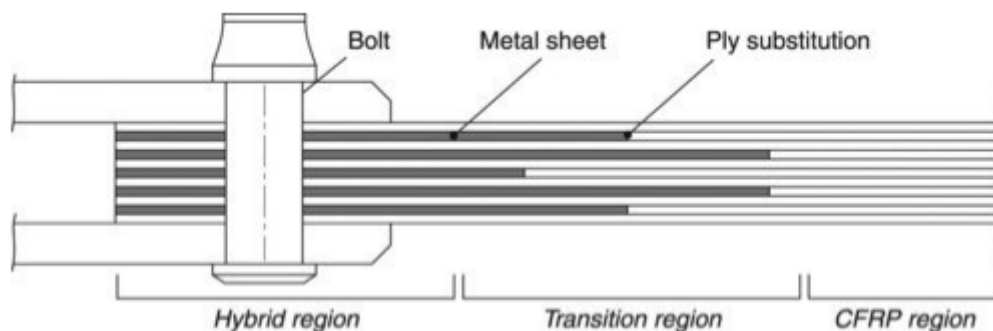
Původně bylo spojení kovových vrstev s laminátem nutno podpořit nanesením primeru (filmu zředěného adheziva), který se nanášel na kovovou folii, a který zajišťoval dostatečné spojení kompozitu a kovu. Tato praxe však požadovala zmenšení tloušťky kovové folie tak, aby byla dodržena rovnost mezi tloušťkou tkaniny a fólie s adhesivem. Což mělo vzhledem k už tak malým tloušťkám značný vliv na obsah kovové výztuže v hybridním materiálu, a tudíž i na zlepšení jeho vlastností. Nicméně s následujícím vývojem v oblasti matric kompozitu a v zejména v povrchových úpravách kovů před lepením bylo dosaženo toho, že bylo možné primer vynechat. Tím se zvýšil efektivní obsah kovové výztuže vzhledem k počtu nahrazených vrstev.

Při nahrazování je nutné dbát na charakter zatěžování. Je důležité začít nejdříve nahrazovat ty vrstvy, které přenášejí nejméně zatížení. Například při dominantním zatížením pomocí tahu nebo tlaku začneme nejdříve nahrazovat ty vrstvy, které jsou orientovány pod úhlem 90° , následované pak vrstvami pod úhlem 45° . Až poté, je-li to potřeba, můžeme nahrazovat vrstvy orientované ve směru dominantního zatížení. Tedy vrstvy orientované pod úhlem 0° . S rostoucím obsahem kovu jsou vrstvy, které přenášejí hlavní napětí, stále více odlehčovány. To je způsobeno větší tuhostí kovu oproti tuhosti vrstev s vlákny orientovanými mimo směr hlavního napětí. [1][11]

3.3.1 Přejídná oblast

Aby bylo možné využít plný potenciál lokální hybridizace, je nutné, aby přejídná oblast, tedy místo, kde hybridní materiál přechází v čistý vláknový kompozit, dosahovala stejnou nebo větší efektivitu spojení jako použitý šroubový spoj.

Pevností omezení přechodové oblasti určují dva mechanismy. Delaminace přerušených vrstev kovu a tkaniny na jedné straně a přetížení průběžných vrstev kompozitu na straně druhé. Redukce delaminace je podmíněna vlastnostmi matrice, vzájemným působením vláken s matricí a pevností lepeného spoje mezi laminátem a vláknovým kompozitem. Vysoká pevnost pojení kov-kompozit je značně ovlivněna, jak již bylo uvedeno dříve, povrchovou úpravou kovu před samotným lepením. To a použití tenkých kovových fólií stejně jako rozložení napojení přerušených vrstev do širší oblasti zajistí hladkou změnu podélné a ohybové tuhosti.



Obrázek 4 Příklad šroubového spoje pomocí lokální hybridizace [1]

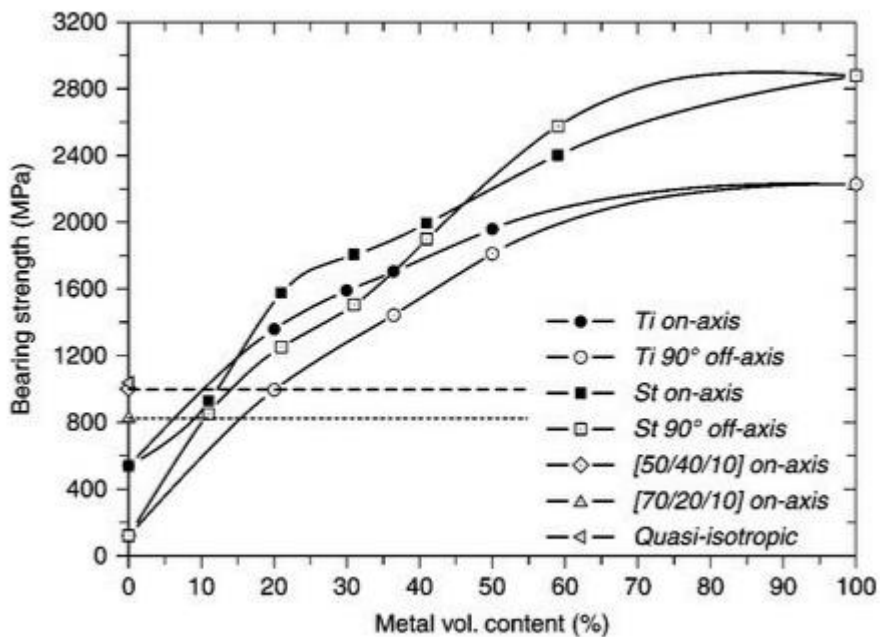
Při zachování všech vrstev kompozitu, které přenášejí hlavní zatížení (vlákna ve směru zatížení 0°), dosahuje účinnost přechodového regionu takřka 100 % při zatěžování tahem, bez závislosti na tloušťce metalických fólií. Případně nahrazení těch kompozitních vrstev, které přenášejí hlavní zatížení, vede ke snížení nosnosti. Toto snížení je pak patrnější u materiálů s větší tloušťkou metalických fólií. I přesto se však účinnost přechodové oblasti nachází mezi 70-90 %, což je stále značně vyšší než účinnost případného šroubového spoje. [1][11]



Obrázek 5 Příklad přechodové oblasti a spoje hybridního materiálu CFRP/nerezová ocel [11]

3.3.2 Vliv obsahu kovu na únosnost šroubového spoje

S rostoucím obsahem kovové složky únosnost materiálu roste. To je dáno tím, že kov postupně přebírá dominantní roli. Z následujícího grafu je patrné, že s rostoucím obsahem kovu také roste schopnost laminátu odolávat zatížení kolmému na osu hlavního napětí.

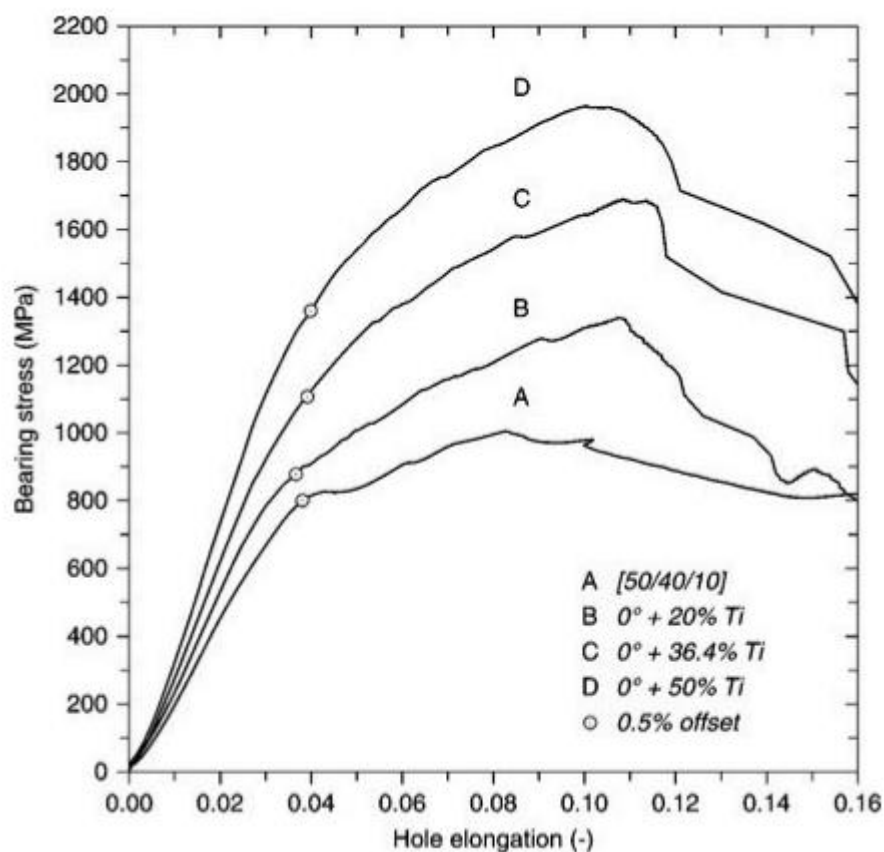


Graf 6 Vliv obsahu kovu na únosnost [1]

Výše zobrazený graf zobrazuje rostoucí únosnost hybridního materiálu složeného z jednosměrného prepregu (HTS-977) ve spojení s různým obsahem titanu (2.4856, pevnost v tahu 1370 MPa, 0.25 mm) nebo nerezové oceli (1,4301, pevnost v tahu 1610 MPa, 0.3 mm). Zároveň jsou v grafu uvedeny hodnoty únosnosti pro dva čisté kompozitní materiály. Jedná se o materiály složené z jednosměrného prepregu (HTS-977) v orientacích [50/40/10] a [70/20/10].

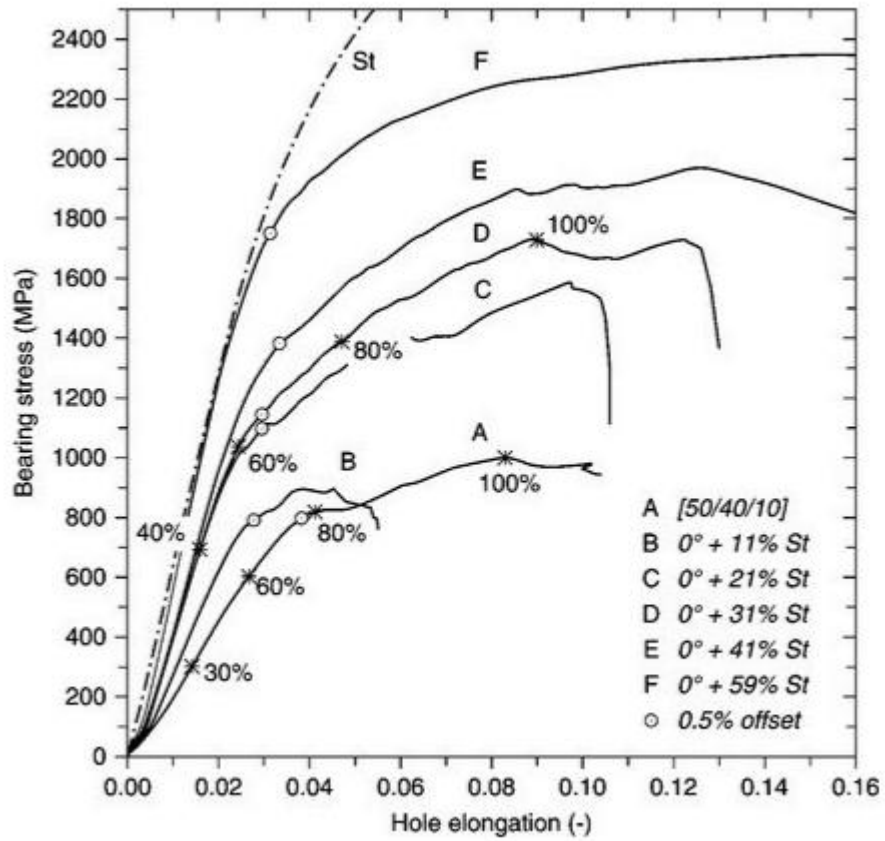
Z grafu je patrné, že hybridní materiál překoná čistý kompozit už při obsahu kovové složky 10 % u nerezové oceli a 20 % u titanu.

Následující graf zobrazuje únosností křivky vůči prodloužení díry šroubového spoje u hybridních laminátů s obsahem titanu 20%, 36,4% a 50% v porovnání s čistým uhlíkovým kompozitem [50/40/10]. V grafu je vyznačené 0,5% prodloužení, které by mělo být považováno za počátek nepružné deformace, a tudíž označeno za mez kluzu. U titanových laminátů dochází k nelineárnímu průběhu okolo 4% prodloužení díry.



Graf 7 Únosnost v závislosti na prodloužení díry u spojení s titanem [1]

Obdobný průběh znázorňuje další graf, který však ukazuje hybridní materiál s nerezovou ocelí. Nelineární průběh zde nastává již při prodloužení okolo 3%. Což naznačuje nižší mez kluzu oceli oproti titanu. [1][11]



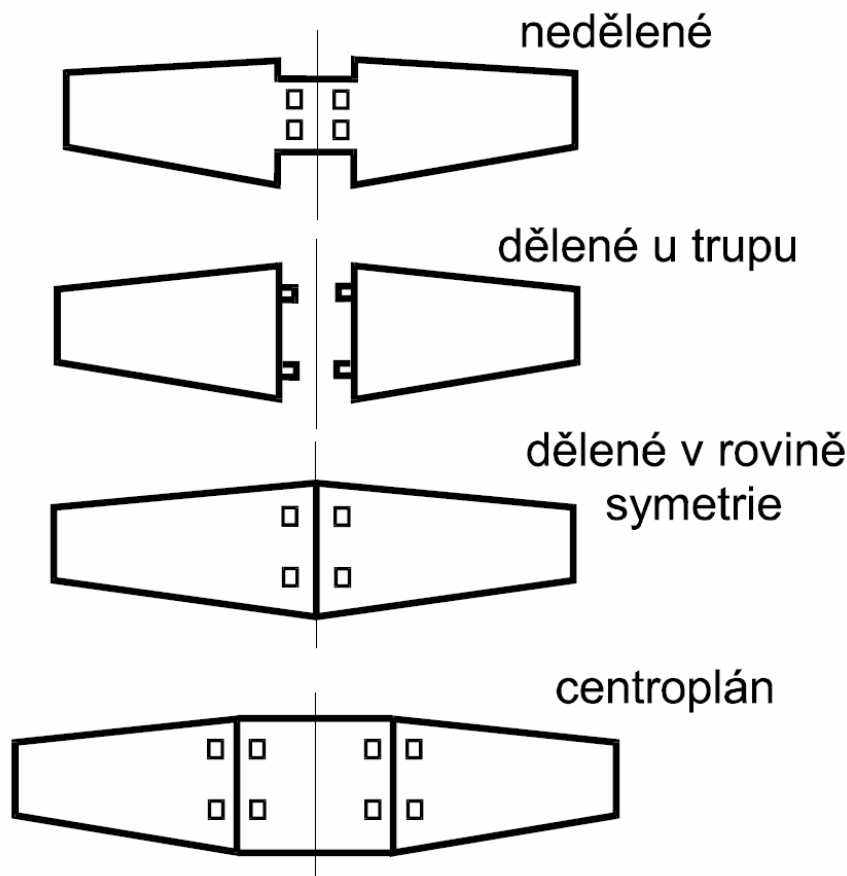
Graf 8 Únosnost v závislosti na prodloužení díry u spojení s nerezovou ocelí [1]

4 Uložení křídla v trupu

4.1 Rozdělení

Konstrukční řešení uložení křídla v trupu se odvíjí od samotné konstrukce křídla, a tudíž základní rozdělení je vztaženo k dělicí rovině křídla. Každé toto řešení má svoje výhody a nevýhody. Dle dělicí roviny se křídla dělí na:

- Nedělená
- Dělená
 - v rovině symetrie
 - u trupu
 - s centroplánem



Obrázek 6 Schématické rozdělení dle dělicí roviny [3]

Nedělená křídla jsou použita u letounů, u kterých jejich rozpětí umožňuje výrobu a montáž křídla v jednom kuse. Toto konstrukční řešení přináší nižší hmotnost oproti děleným křídélům. Křídlo nepřenáší ohybové zatížení do trupu. Na druhou stranu klade velký

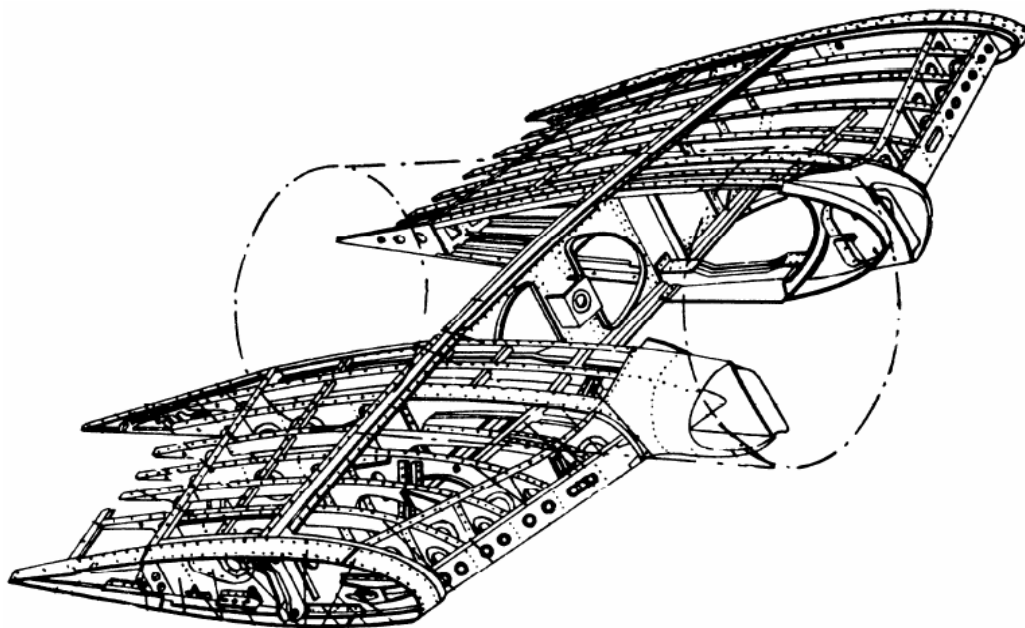
požadavek na přesné uložení křídla v trupu. Což zvyšuje požadavky na výrobní tolerance lícovaných spojů. Zároveň průběžně křídlo omezuje zastavitelný prostor v trupu letounu.

Menší celky jsou snazší jak na výrobu, tak i montáž. Z tohoto hlediska jsou dělená křídla výhodnější. Avšak každé dělení znamená zvýšení hmotnosti (spojovací kování). Dělit je také nutné prvky výstroje křídla (cesty řízení, palivový, hydraulický, elektrický systém). Každý takový spoj vytváří další místo potenciální poruchy. Zároveň dochází ke stažení vnitřních sil do míst závěsů, a tudíž k jejich koncentraci.

Dělená křídla v rovině symetrie zachovávají výhodu nepřenosu ohybových momentů, jelikož jsou obě poloviny křídla vzájemně spojeny. Umožňují demontovatelnost pro snazší transport a uskladnění.

Křídla dělená u trupu vynikají tím, že odpadá omezení vnitřní zástavby trupu kořenovou částí křídla. Toto řešení přenáší zatížení od křídla do trupu. Řešením je zesílení trupu v inkriminovaných místech a rozvedení sil dále do konstrukce trupu. Velkou výhodou má poté rámová konstrukce trupu, kde lze snadno zajistit redistribuci přenášených sil.

Posledním způsobem dělení křídla je křídlo s centroplánem. Fakticky se jedná průběžně křídlo dělené na tři části. Kde střední část (centroplán) je průběžně spojena. Tím se eliminuje přenos ohybových momentů přes skořepinu trupu. Toto řešení se užívá i u velkých dopravních letadel.



Obrázek 7 Příklad centroplánu u letounu L-29 [3]

Bližší rozdělení dále upřesňuje způsob samotného uchycení křídla v trupu letadla. Toto uchycení může být realizováno buď přírubově anebo pomocí závěsného kování, kterému se bude dále věnovat tato práce. Konečné řešení uchycení je pak specifické pro každé uspořádání křídla. Závisí na tom, zda je křídlo samonosné nebo polosamosné konstrukce, a také na počtu nosníků křídla. Principiálně jsou si však jednotlivá řešení podobná. [3][4]

4.2 Závěsy křídla

Zajišťují spojení křídla s trupem, a tudíž musí být schopny přenesení všech složek zatížení. Při tomto spojení je potřeba odebrat všech 6° volnosti.

Nedělená křídla bývala zavěšena ve čtyřech bodech, což vzhledem k symetrii vedlo na staticky určité spojení. S rostoucími požadavky na bezpečnost letectví a tím spojenou návrhovou filosofií „provozu bezpečného při poruše“ došlo k navýšení počtu bodů, ve kterých je křídlo zavěšeno. Ze staticky určitého spojení vzniklo tudíž spojení staticky neurčité.

U dělených křídel se závěsy umísťují na hlavní a vedlejší nosník, případně nosníky. Pokud se jedná o dělené křídlo s centroplánem, který často bývá integrální částí trupu a nosník centroplánu tedy prochází trupem, kde je spojen s hlavními přepážkami. Jsou na trupu závěsy umístěny právě na tyto nosníky, které trupem probíhají. U křídel dělených u trupu jsou potom na křídle závěsy umístěny opět na nosnících a na trupu na zesílených místech, ze kterých jsou přenášené síly následně redistribuovány do zbytku konstrukce trupu. Jedná se hlavně o přenos ohybového momentu. U dělených křídel jsou síly v závěsech řádově větší než u průběžných křídel. Pokud máme vícenosníkové křídlo, dochází k redistribuci ohybového momentu na nosníky, a tím i na příslušné závěsy v poměru příslušných ohybových tuhostí nosníků.

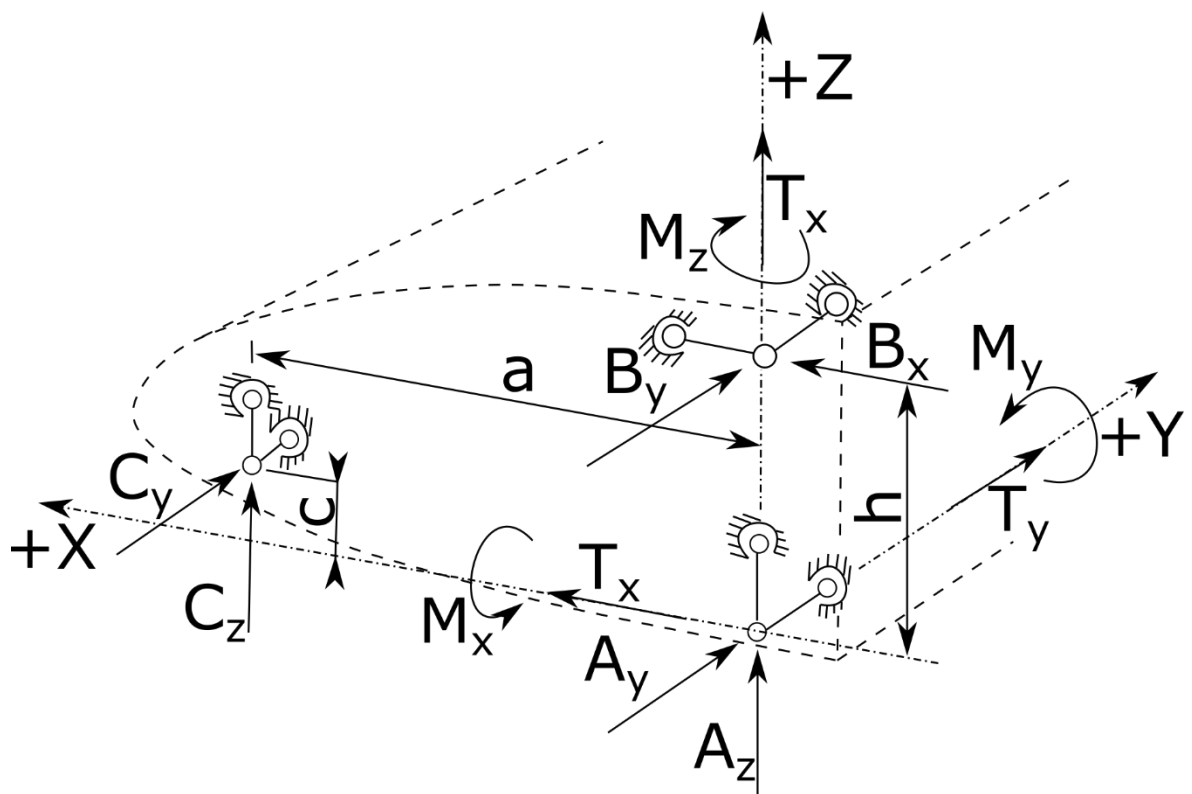
Rozvedení jednotlivých zatížení závisí na orientaci závěsu. Předpokládáme přenesení sil pouze v rovině závěsu. Avšak pokud dostatečně vymezíme vůli oka a vidlice ve směru osy čepu, můžeme přenést i sílu kolmou na rovinu závěsu. To však vyžaduje dimenzování závěsu nejen na tah/tlak, ale i na ohyb.

Při správném návrhu závěsu je nutné se vyvarovat koncentrátorům napětí (ostré rohy atp.). Zajistit vhodné rozvedení sil z kování do zbytkové konstrukce, nízké vůle v konstrukci. A hlavně provést pečlivý výpočet včetně uvážení případných deformací a možných poruch.

Proto se síly v závěsech nejčastěji určují pomocí MKP, kde se modeluje část trupu a křídla. A následně se provádějí simulace se symetrickým i nesymetrickým zatížením případně s poruchami jednotlivých závěsů. [3][4]

4.3 Spojení křídla s trupem

K tuhému spojení obou částí je nutné minimum tří bodových spojů. Staticky určitého spojení v dělicí rovině (ABC) dosáhneme takovým konstruktivním řešením závěsu, že každý závěs bude mít jeden posuvný stupeň volnosti a volnost otáčení kolem tří os. Díky tomu odebírá každý ze tří závěsů dva stupně z šesti stupňů volnosti křídla. Bod A, který leží v počátku souřadného systému XYZ je tuhý ve směru os Y a Z. Bod B leží na ose Z a je tuhý ve směru os X a Y. Poslední bod C je tuhý ve směru os X a Y.



Obrázek 8

Posouvající síly, působící v počátku souřadného systému, T_x , T_y a T_z jsou spolu s momenty M_x , M_y a M_z zachyceny v závěsech A, B a C pomocí sil A_y , A_z , B_x , B_y , C_y a C_z . Tyto síly

jsou jednoznačně určeny pomocí šesti rovnovážných rovnic. Které vycházejí z podmínky, že $A_x = B_z = C_x = 0$.

Rovnovážné rovnice potom vypadají následovně:

$$1: T_x + A_x + B_x + C_x = 0$$

$$2: T_y + A_y + B_y + C_y = 0$$

$$3: T_z + A_z + B_z + C_z = 0$$

$$4: M_x - B_y h - C_y c = 0$$

$$5: M_y + B_x h - C_z a = 0$$

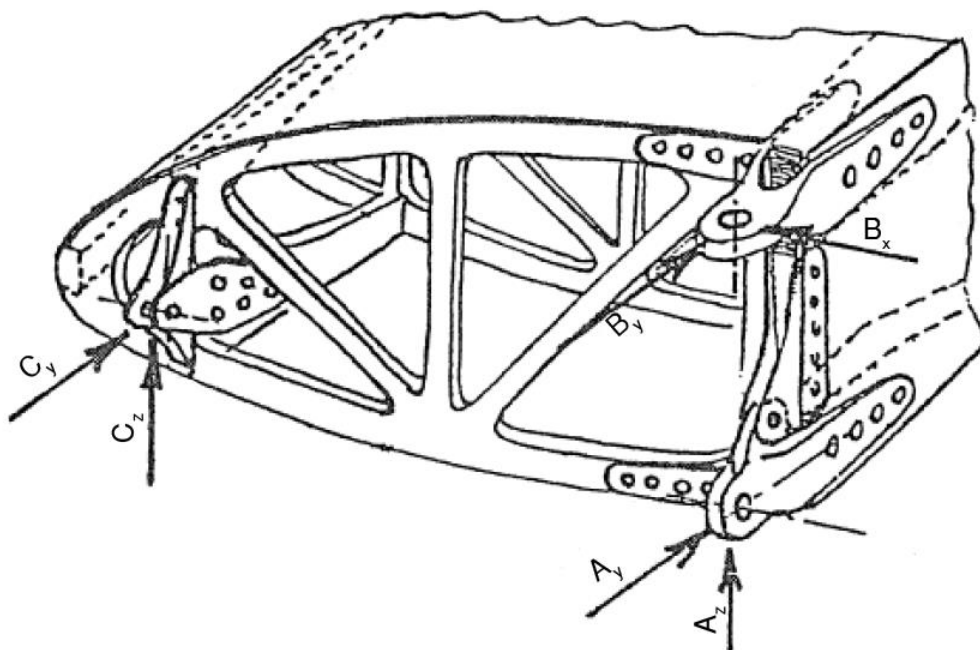
$$6: M_z + C_y a = 0$$

Po dosazení podmínky a úpravě dostaneme:

$$A_y = -T_y + \frac{M_z(h-c)}{ah} - \frac{M_x}{h} \quad A_z = -T_z + \frac{T_x h}{a} - \frac{M_y}{a}$$

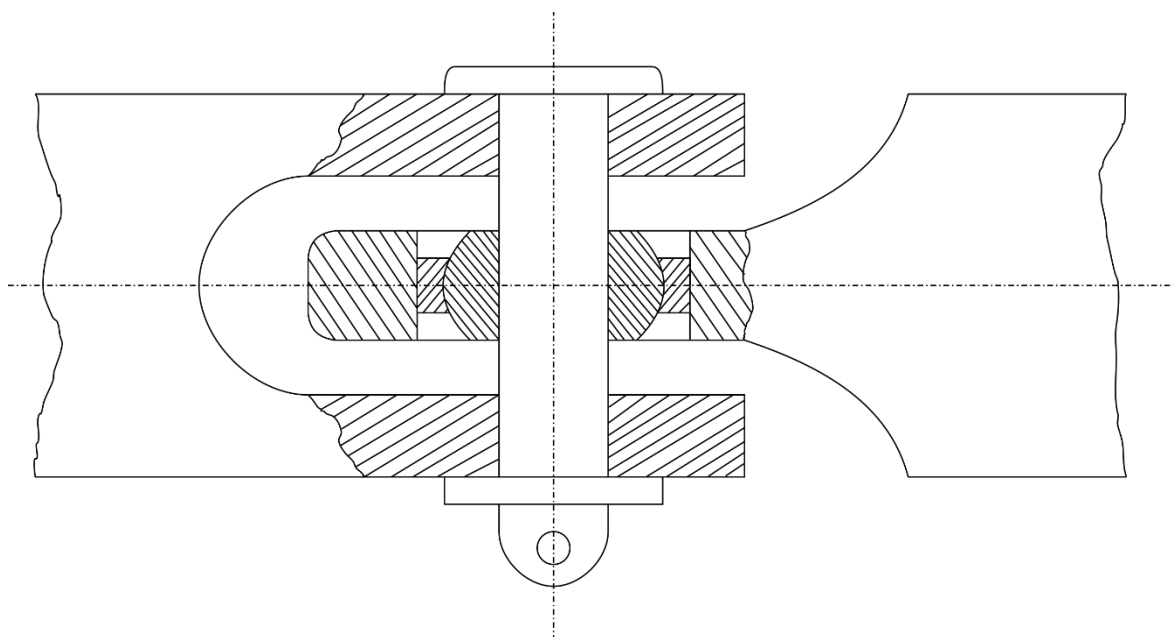
$$B_x = -T_x \quad B_y = \frac{M_x}{h} + \frac{M_z c}{ah}$$

$$C_x = -\frac{M_z}{a} \quad C_z = -\frac{T_x h}{a} + \frac{M_y}{a}$$



Obrázek 9

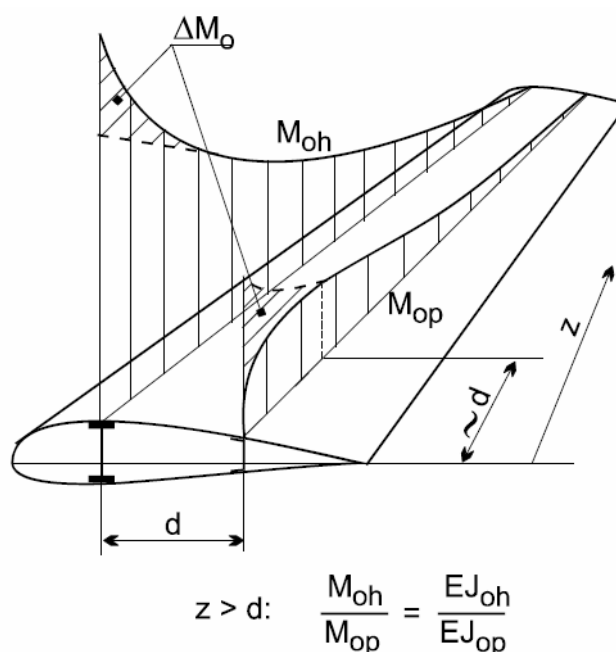
Podmínka $A_x = B_z = C_x = 0$ vychází z toho, že spojení je provedeno pomocí čepových závěsů s kulovým uložením čepu. A to s dostatečnou axiální vůlí ve vidlici, která postačí k vyrovnání výrobních nepřesností i případnému přetvoření při zatížení, takovou měrou, že nedojde k dosednutí ve směru osy čepu. [5]



Obrázek 10 Schéma uložení s vůlí

4.3.1 Jednonosníkové křídlo

U jednonosníkové konstrukce se dva hlavní závěsy umísťují na pásnice hlavního nosníku. Třetí je poté umístěn na pomocném nosníku. Obdobně jako naznačuje Obrázek 9. Pomocný nosník musí být spojen minimálně se dvěma zesílenými žebry, která pomohou rozvést sílu ze závěsu do potahu a výztuh. Díky kloubovému uložení není pomocný nosník schopen přenést ohybový moment v kritické (kořenové) části křídla. Jeho účelem je zejména přenos kroutícího momentu, ideálně na co největším rameni, a případné uzavření torzní dutiny.



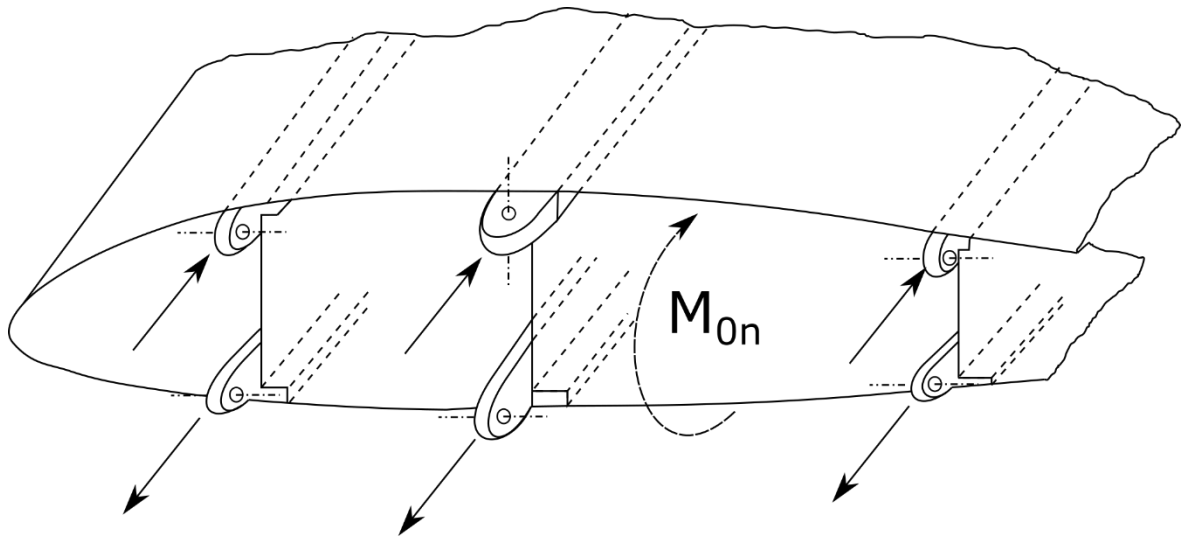
Obrázek 11 Průběh ohybových momentů u jednonosníkového křídla [3]

Jedná se o staticky určité spojení, které je z konstrukčního hlediska výhodné. Umožňuje volnější tolerance, a tudíž snazší montáž. Na druhou stranu však koncentruje silové účinky pouze do tří bodů. Což vyžaduje lokální zesílení a s tím spojený nárůst hmotnosti. Další nevýhoda spočívá v bezpečnosti provozu. Jelikož se jedná o staticky určité spojení, tak porucha kteréhokoli závěsu vede k fatálnímu selhání konstrukce a následné havárii. [3][5]

4.3.2 Dvou a vícenosníkové křídlo

Spojení obou částí můžeme provést různými způsoby. První způsobem je případ, kdy každý nosník má obě pásnice spojené kováním. Tudíž ohybový moment, který představuje

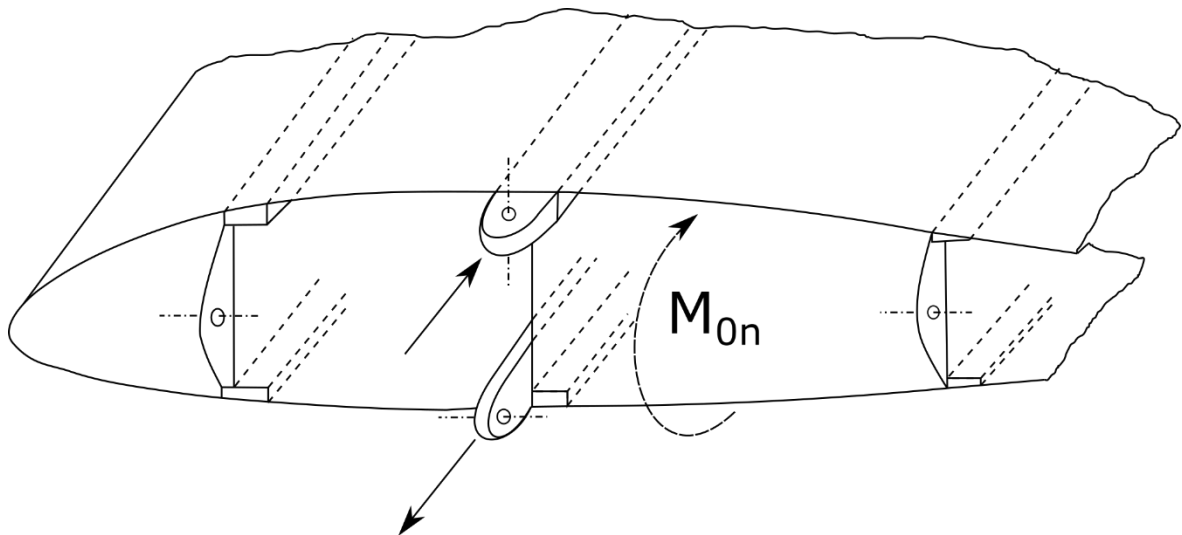
hlavní komponentu zatížení, je přenesen v takovém poměru, ve kterém působí na jednotlivé nosníky. Tedy v poměru jejich ohybových tuhostí.



Obrázek 12

Tento způsob spojení klade vyšší náročnost na přesnost výroby, ale umožňuje efektivní využití všech nosníků. Podélná napětí, která se soustředí v pásnicích, jsou beze změny přenesena, pokud je spojovací kování lokalizováno v ose pásnice. Tato konstrukce je vhodná i pro větší a těžší letouny. Zajišťuje totiž rozložení momentu na všechny nosníky křídla. Zároveň přispívá bezpečnosti, neboť při poruše některého závěsu je staticky neurčité spojení schopno dále plnit svojí funkci, avšak při snížené únosnosti.

Druhý způsob spojuje kování pouze pásnice hlavního nosníku. Zbylé nosníky jsou opatřeny pouze jedním závěsem. V tomto případě je ohybový moment přenesen pouze kováním na hlavní nosník. Obdobně jako u jedno nosníkového křídla.



Obrázek 13

Takový přístup je vhodnější pro menší letouny, kde je ohybový moment menší, a tudíž jeho přenesení pouze jedním nosníkem a jedním párem kování nepředstavuje takový problém. Snižují se tím požadavky na výrobní tolerance. Nicméně z hlediska bezpečnosti se jedná o nevhodné řešení. Při poruše jednoho z hlavních kování nastává havarijní stav, neboť zbylé závěsy nejsou schopny udržet zatížení v rovnováze. [3] [5]

4.3.2.1 Příklad spojení dvounosníkového křídla čtyřmi závěsy

Předpokládáme čepové uložení v kulové vložce s dostatečnou axiální vůlí, které bylo popsáno dříve. Při použití tohoto uložení bude spojení pomocí čtyř závěsů dvakrát staticky neurčitě. Jelikož každý závěs odebírá dva stupně volnosti.

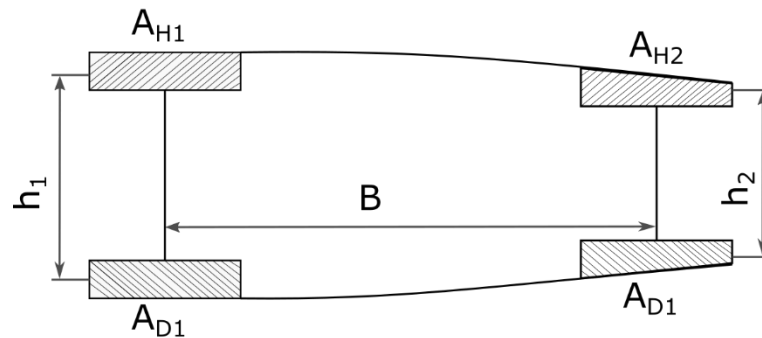
Jelikož se jedná o staticky neurčitou úlohu, je k jejímu vyřešení potřeba deformační podmínka. Přesné určení této podmínky by bylo velice složité, a proto se v praxi užívá přibližného postupu.

Zavádí se předpoklad, že ohybový moment M_{on} a posouvající síla T_n , oboje působící v dělicí rovině křídla, jsou rozděleny na oba nosníky v poměru jejich ohybových tuhostí. Z toho plyne, že:

$$M_{on} = M_{n1} + M_{n2}$$

$$T_n = T_{n1} + T_{n2}$$

Průřezy pásnic prvního nosníku, v místě dělení, A_{H1} a A_{D1} . Průřezy pásnic druhého nosníku A_{H2} a A_{D2} . Vzdálenost těžišť průřezu h_1, h_2 a vzdálenost obou nosníků B. Viz Obrázek 14. Modul pružnosti jednotlivých pásnic E_{H1}, E_{H2}, E_{D1} a E_{D2} .



Obrázek 14

Ohybové tuhosti pak vycházejí následovně:

$$(EJ)_1 = \frac{E_{H1} A_{H1} E_{D1} A_{D1}}{E_{H1} A_{H1} + E_{D1} A_{D1}} h_1^2$$

$$(EJ)_2 = \frac{E_{H2} A_{H2} E_{D2} A_{D2}}{E_{H2} A_{H2} + E_{D2} A_{D2}} h_2^2$$

První nosník potom přenáší ohybový moment M_{n1} a posouvající sílu T_{n1} , která je rovna:

$$M_{n1} = M_{on} \frac{(EJ)_1}{(EJ)_1 + (EJ)_2}$$

$$T_{n1} = T_n \frac{(EJ)_1}{(EJ)_1 + (EJ)_2}$$

Ohybový moment M_{n1} bude přenesen pomocí dvojice sil F_{n1}

$$F_{n1} = \pm \frac{M_{n1}}{w_1} = \pm \frac{M_{on} \frac{(EJ)_1}{(EJ)_1 + (EJ)_2}}{w_1}$$

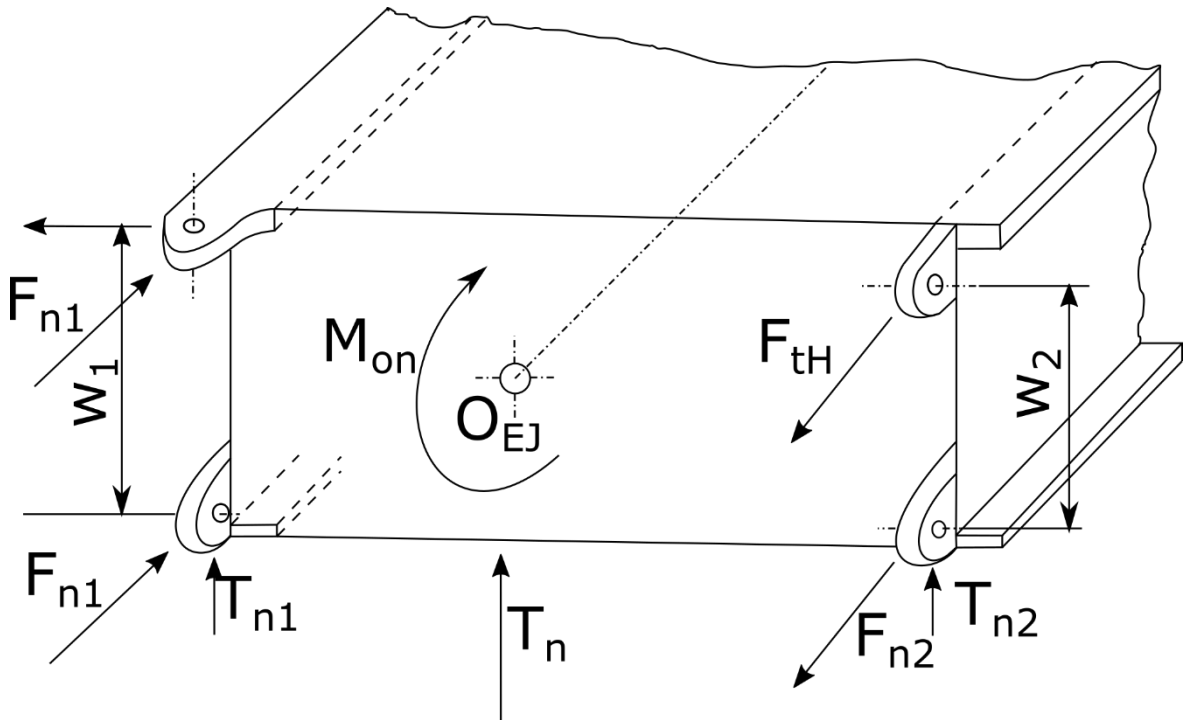
Kde w_1 je rozteč středů kování.

Analogicky pak pro druhý nosník:

$$M_{n2} = M_{on} \frac{(EJ)_2}{(EJ)_1 + (EJ)_2}$$

$$T_{n2} = T_o \frac{(EJ)_2}{(EJ)_1 + (EJ)_2}$$

$$F_{n2} = \pm \frac{M_{n2}}{w_2} = \pm \frac{M_{on} \frac{(EJ)_2}{(EJ)_1 + (EJ)_2}}{w_2}$$



Obrázek 15

Analogicky můžeme ohybový moment M_{ot} a posouvající sílu T_t v tečné rovině, rozdělit mezi dvojici nosníků. Horní nosník skládající se z horních pásnic a potahu mezi nimi. Doplní pak z dolních pásnic a potahu mezi nimi. Rozdělení zatížení opět předpokládáme v poměru ohybových tuhostí těchto imaginárních nosníků. Tedy $(EJ)_H$ pro horní nosník a $(EJ)_D$ pro dolní nosník. Z Obrázek 15 pak vychází že:

$$(EJ)_H = \frac{E_{H1} A_{H1} E_{H2} A_{H2}}{E_{H1} A_{H1} + E_{H2} A_{H2}} B^2$$

$$(EJ)_D = \frac{E_{D1} A_{D1} E_{D2} A_{D2}}{E_{D1} A_{D1} + E_{D2} A_{D2}} B^2$$

Opětovně horní nosník přeneše ohybový moment M_{tH} , který bude přenesen silovou dvojicí F_{tH} .

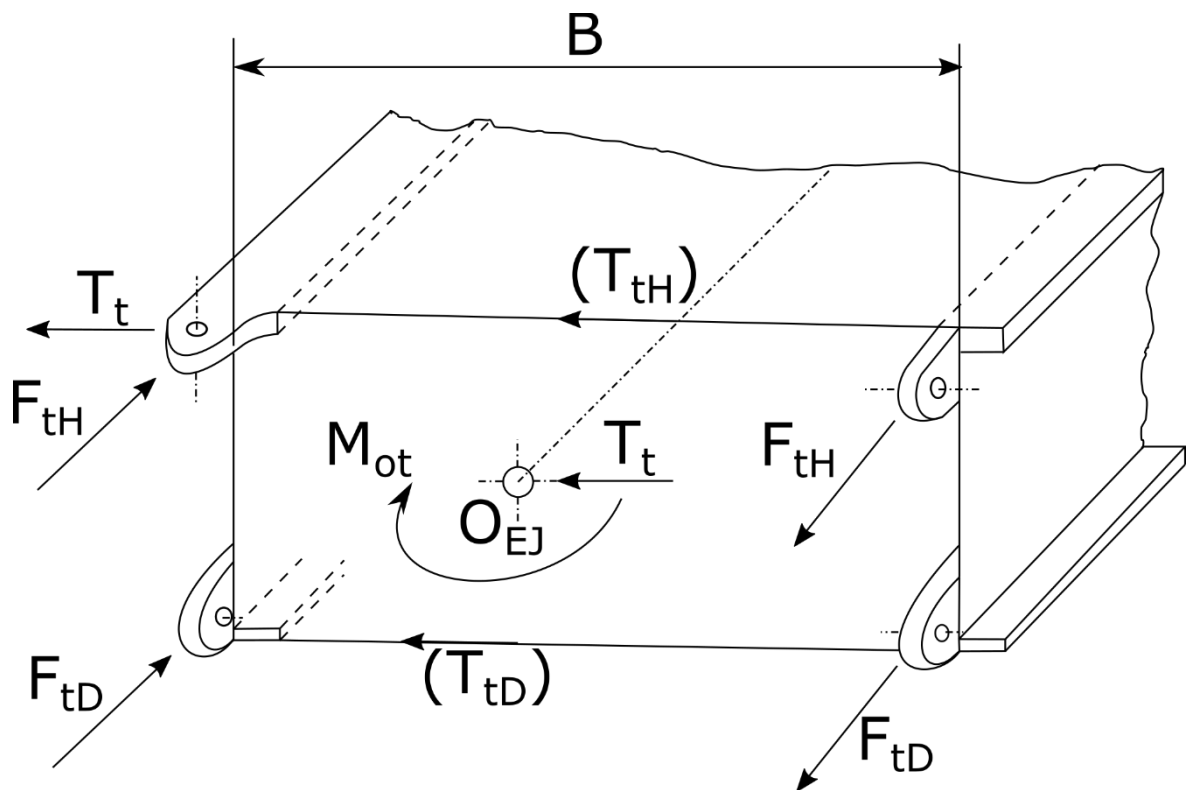
$$M_{tH} = M_{ot} \frac{(EJ)_H}{(EJ)_H + (EJ)_D}$$

$$F_{tH} = \pm \frac{M_{tH}}{B} = \pm \frac{M_{ot} \frac{(EJ)_H}{(EJ)_H + (EJ)_D}}{B}$$

Pro dolní nosník pak:

$$M_{tD} = M_{ot} \frac{(EJ)_D}{(EJ)_H + (EJ)_D}$$

$$F_{tD} = \pm \frac{M_{tD}}{B} = \pm \frac{M_{ot} \frac{(EJ)_D}{(EJ)_H + (EJ)_D}}{B}$$



Obrázek 16

Při provedení horního závěsu prvního nosníku tak jak je na Obrázek 16, tedy se svislým čepem. Pak horní závěs přeneše sám celou posouvající sílu T_t . Tudiž její složka T_{tD} přenesená dolním potahem vyvolá moment, který se skládá s kroutícím momentem

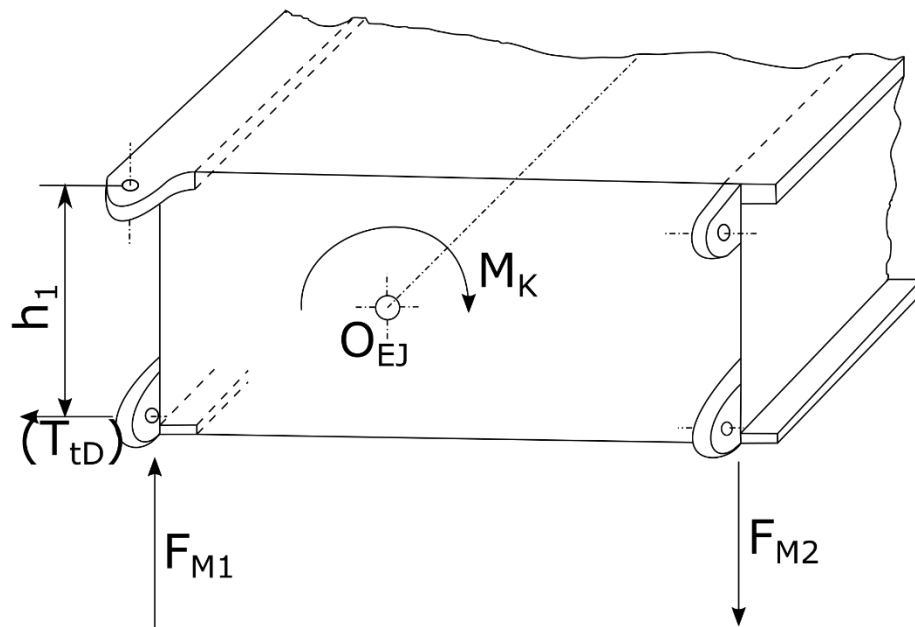
M_K vyvozeným vnějším zatížením křídla. Moment vyvolaný složkou T_{tD} má, při předpokladu malého rozdílu w_1 a w_2 , hodnotu.

$$w_1 T_{tD} = w_1 T_t \frac{(EJ)_D}{(EJ)_H + (EJ)_D}$$

$$M_{KC} = M_K + w_1 T_{tD}$$

Celkový krouťící moment M_{KC} převedeme na silovou dvojici F_{M1}, F_{M2}

$$F_{M1} = -F_{M2} = \frac{M_{KC}}{B} = \frac{M_K + w_1 T_{tD}}{B}$$



Obrázek 17

Vzhledem ke konstrukci předního nosníku bude výsledná příčná síla F_{N1} celá přenesena dolním závěsem.

$$F_{N1} = F_{n1} + F_{M1} = F_{n1} + \frac{M_K + w_1 T_{tD}}{B}$$

Vzhledem k provedení závěsů zadního nosníku bude rozdělení výsledné síly F_{N2} na oba závěsy staticky neurčitě. Předpokládáme proto, že rozdělení bude opět úměrné tuhostem závěsů ve směru síly F_{N2} . [5]

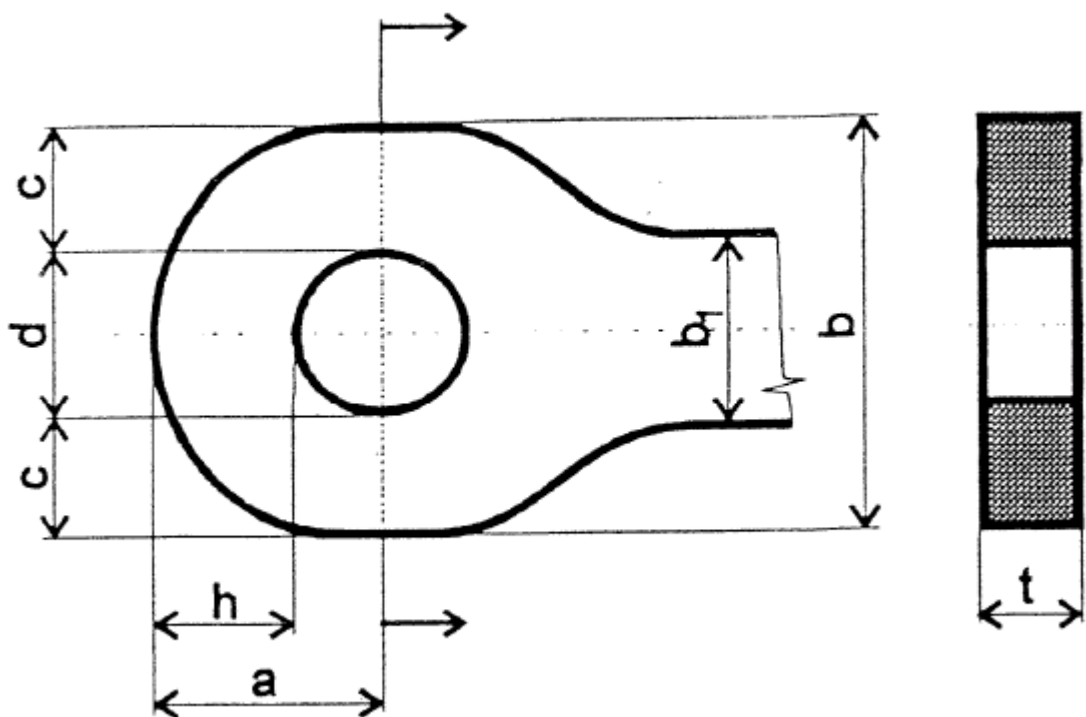
$$F_{N2} = F_{n2} - F_{M2} = F_{n2} - \frac{M_K + w_1 T_{tD}}{B}$$

5 Návrh zkušebního kování

5.1 Postup návrhu kování křídla

Kování křídla musí být dimenzováno na utržení závěsu a na vysmeknutí čepu a roztržení oka. Nejdříve pomocí výpočtu zanedbávajícím deformaci poté s ohledem na deformaci.

5.1.1 První pevnostní výpočet



Obrázek 18 Schematický náčrt závěsu [9]

Zvolím si průměr čepu d .

Zvolím si poměry t/d a a/d a z těchto poměrů určím poměr σ_{pkotl} a meze pevnosti materiálu závěsu (viz [9])

Provedu kontrolu otláčení

$$\sigma_{otl} = \frac{N}{A_2} = \frac{N}{d * t} \leq \sigma_{pkotl}$$

$$f_{otl} = \frac{\sigma_{pkotl}}{\sigma_{otl}} \geq 1,2$$

Následně provedu optimalizaci výpočtu tak abych se co nejlíže přiblížil požadovanému součiniteli bezpečnosti.

Pomocí tohoto postupu získáme 3 ze čtyř parametrů závěsu. Poslední parametr získáme z kontroly na utržení závěsu.

$$\sigma = (1,15 \div 1,2) * \frac{N}{A_1} = (1,15 \div 1,2) * \frac{N}{2 * t * c} \leq R_m$$

$$c \geq \frac{N * (1,15 \div 1,2)}{2 * t * R_m}$$

5.1.2 Druhý pevnostní výpočet s ohledem na deformaci

Nejprve je nutné určit součinitele vycházející z geometrie závěsu, uložení čepu a smyslu zatížení.

Tabulka 13 Seznam zvyšujících součinitelů u výpočtu oka

f_1	Vliv tloušťky oka a vzdálenost otvoru od okraje oka
f_2	Vliv dovolené deformace oka
f_3	Vliv vůle dovolené při výrobě
f_4	Vliv druhu zatížení a významu části letounu
k_1	Vliv zúžení za okem
k_2	Vliv směru působení síly na oko

Určení koeficientů viz [9]

Nejprve kontrola utržení oka při zohlednění deformace

$$\sigma_{PK} = 0,735 * R_{p0,2} * f_2 * f_3 * f_4 * k_1 * k_2 * \frac{1}{0,75}$$

$$\sigma = \frac{N}{A_1} \leq \sigma_{pk}$$

$$f_d = \frac{\sigma_{pk}}{\sigma}$$

Poté kontrola vysmeknutí čepu a roztržení oka se zohledněním deformace

$$\sigma_{pkotl}^* = R_{p0,2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * k_1 * k_2 * \frac{1}{0,75}$$

$$f_{dotl} = \frac{\sigma_{pkotl}^*}{\sigma_{otl}}$$

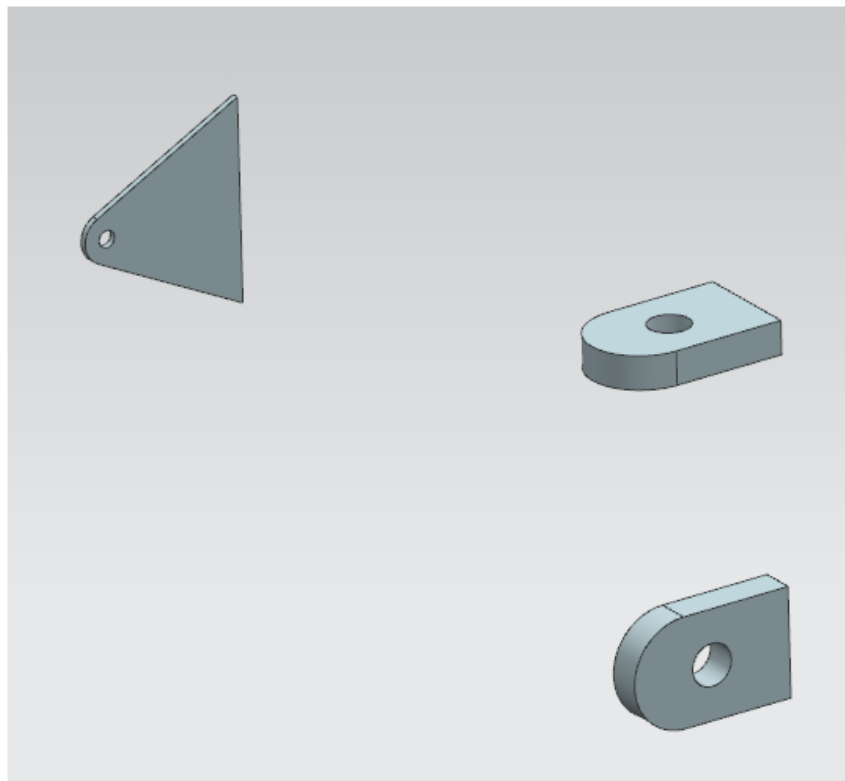
5.2 Návrh kování křídla experimentálního sportovního letounu Mermaid výrobce CSA.

Pro návrh kování letounu Mermaid byli vzaty hodnoty provozního zatížení v závěsech kování použité v diplomové práci pana Martina Světlíka [10]

$N_{pH} = 133793,94 \text{ N}$ – posouvající síla v horní pasnici hl.nosníku

$N_{pD} = 115147,06 \text{ N}$ – posouvající síla v dolní pasnici hl.nosníku

$N_{pP} = 11636,85 \text{ N}$ – posouvající síla v pomocném zavěsu



Obrázek 19 Schéma kování

Návrh byl proveden pro dva materiály. Konvenční hliníková slitina 6061-T6 a FML složené z uhlíkového kompozitu a 45% obsahu nerezové oceli. Pro oba případy byla provedena MKP analýza a následné porovnání výsledku a zhodnocení přínosů/problému spojených s aplikací FML.

5.2.1 Návrh kování z hliníkové slitiny 6061-T6

5.2.1.1 Materiálové vlastnosti

Tabulka 14 Materiálové vlastnosti hliníkové slitiny 6061-T6

R_m [MPa]	290
$R_{p0,2}$	240
E [GPa]	68,9

5.2.1.2 Naznačení výpočtu pro kování horní pásnice hlavního nosníku

Na následujících řádcích bude naznačen konkrétní výpočet kování. Výpočet bude již optimalizovaný tak, aby nejnižší koeficient bezpečnosti dosahoval hodnoty alespoň 1,2. Vzhledem k nutnosti neustálého odečítání zvyšujících součinitelů z grafu a snaze pro zachování celočíselných rozměrů kování (snažší a levnější výroba) je možné, že nejnižší součinitel bezpečnosti bude lehce vyšší než 1,2.

Číselný výpočet bude uveden pouze pro jeden závěs. Zbytek výsledků bude shrnut v příslušných tabulkách.

Nejprve provedeme přepočítání provozního zatížení na početní, se kterým budeme následně dimenzovat kování. Uvažujeme zvyšující koeficient 1,5.

$$N_{pH_{poč}} = N_{pH} * 1,5 = v1$$

Volím nerezový čep o průměru $d = 25mm$.

Zvolím poměry $t/d = 1,2$; $a/d = 2,2$.

Tím dostanu hodnoty t a d .

$$t = d * 1,2 = 25 * 1,2 = 30mm$$

$$a = d * 2,2 = 25 * 2,2 = 55mm$$

Z grafu [9 - Tab. 4.4 – Výpočet oka II] odečtu poměr $\frac{\sigma_{pkotl}}{R_m} = 2,05$. Z toho dopočtu σ_{pkotl}

$$\sigma_{pkotl} = R_m * 2,05 = 290 * 2,05 = 594,5 MPa$$

Dále vypočítám napětí v otláčení.

$$\sigma_{otl} = \frac{N_{pH_{poč}}}{A_2} = \frac{200690,9}{d * t} = \frac{200690,9}{25 * 30} = 267,5879 MPa$$

A provedu kontrolu bezpečnosti.

$$f_{otl} = \frac{\sigma_{pkotl}}{\sigma_{otl}} = \frac{594,5}{267,5879} = 2,22$$

Následuje kontrola na utržení oka.

$$\sigma = 1,18 * \frac{N_{pH_{poč}}}{A_1} = 1,18 * \frac{N_{pH_{poč}}}{2 * t * c} \leq R_m$$

Z toho plyne

$$c \geq \frac{N_{pH_{poč}} * 1,18}{2 * t * R_m} = \frac{200690,9 * 1,18}{2 * 30 * 290} = 16,33mm$$

Hodnota c vypočtená pomocí tohoto vzorce je minimální hodnota, která vyhovuje. Nicméně zavedením následujících výpočtů, které zohledňují vliv deformace zjistíme, že součinitel bezpečnosti s uvažováním deformace bude nižší než 1. Je proto nutná optimalizace kování. Která vyžaduje určitý počet iterací. Z důvodu ušetření místa proto budu pro další výpočty používat již optimalizovanou hodnotu $c = 20mm$. Výpočet napětí v oku bude potom následovný:

$$\sigma = 1,18 * \frac{N_{pH_{poč}}}{2 * t * c} = \frac{200690,9 * 1,18}{2 * 30 * 20} = 197,3461 MPa$$

Součinitel bezpečnosti pak:

$$f = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{290}{197,3461} = 1,469$$

Následují výpočty utržení a otláčení oka s uvažováním deformace. Před samotným výpočtem je nutné stanovit zvyšující koeficienty f_1 až f_4 , k_1 a k_2 . Koeficienty určíme dle metodiky a grafů v tab. 4.4 – Výpočet oka I až IV [9].

Tabulka 15 Zvyšující součinitele horního závěsu hlavního nosníku

$f1$	1,35
$f2$	0,835
$f3$	1
$f4$	1
$k1$	1,025
$k2$	1

Kontrola utržení oka s vlivem deformace. Deformace nám snižuje maximální dovolené napětí.

$$\sigma_{PK} = 0,735 * R_{p0,2} * f_2 * f_3 * f_4 * k_1 * k_2 * \frac{1}{0,75}$$

$$\sigma_{PK} = 0,735 * 240 * 0,835 * 1 * 1 * 1,025 * 1 * \frac{1}{0,75} = 201,3018 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{N_{pH_{poč}}}{A_1} \leq \sigma_{pk}$$

$$\sigma = \frac{N_{pH_{poč}}}{A_1} = \frac{200690,9}{979,93} = 167,2424 \text{ MPa}$$

$$f_d = \frac{\sigma_{pk}}{\sigma} = \frac{201,3018}{167,2424} = 1,204$$

Následuje kontrola oka na otlačení s uvažováním deformace. Deformace nám opět snižuje maximální dovolené napětí.

$$\sigma_{pkotl}^* = R_{p0,2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * k_1 * k_2 * \frac{1}{0,75}$$

$$\sigma_{pkotl}^* = R_{p0,2} * 1,35 * 0,835 * 1 * 1 * 1,025 * 1 * \frac{1}{0,75} = 369,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{otl} = \frac{N_{pH_{poč}}}{A_2} = 267,5879 \text{ MPa}$$

$$f_{dotl} = \frac{\sigma_{pkotl}^*}{\sigma_{otl}} = \frac{347,836}{267,5879} = 1,38$$

Z výpočtů vychází nejnižší součinitel bezpečnosti $f_d = 1,204$ pro utržení oka s uvažováním deformace. Výsledná geometrie závěsu tedy bude.

Tabulka 16 Geometrie horního závěsu hlavního nosníku

a [mm]	55
c [mm]	20
t [mm]	30
d [mm]	25
b [mm]	65
b_1 [mm]	65

5.2.1.3 První pevnostní výpočet

Kontrola na utržení závěsu.

Tabulka 17 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{poč}$ [N]	200690,91	172720,59	17455,27
A_1 [mm ²]	979,93	843,35	85,23
σ [MPa]	197,35	169,84	234,91
f	1,47	1,71	1,23

Kontrola závěsu na vysmeknutí čepu a roztržení oka.

Tabulka 18 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{poč}$ [N]	200690,91	172720,59	17455,27
A_2 [mm ²]	750,00	750,00	54,80
σ_{otl} [MPa]	267,59	230,29	318,53
σ_{pkotl} [MPa]	594,50	594,50	382,80
f_{otl}	2,22	2,58	1,20

5.2.1.4 Druhý pevnostní výpočet

Součinitele.

Tabulka 19 Zvyšující součinitele pro výpočet oka hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
f_1	1,35	1,35	1,02
f_2	0,84	0,84	0,92
f_3	1,00	1,00	1,00
f_4	1,00	1,00	1,00
k_1	1,03	1,03	2,29
k_2	1,00	1,00	1,00

Kontrola na utržení závěsu s uvažováním deformace.

Tabulka 20 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka včetně deformace hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{poč}$ [N]	200690,91	172720,59	17455,27
A_1 [mm ²]	979,93	843,35	85,23
σ_{pk} [MPa]	201,31	201,31	492,92
σ [MPa]	167,24	143,93	196,57
f_d	1,20	1,40	2,48

Kontrola závěsu na vysmeknutí čepu a roztržení oka s uvažováním deformace.

Tabulka 21 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka včetně deformace hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{poč}$ [N]	200690,91	172720,59	17455,27
A_2 [mm ²]	750,00	750,00	54,80
σ_{otl} [MPa]	267,59	230,29	318,53
σ^*_{pkotl} [MPa]	369,75	369,75	684,05
f_{dotl}	1,38	1,61	2,15

5.2.1.5 Geometrie kování

Pro zjednodušení a zlevnění výroby je horní a dolní závěs hlavního nosíku stejný.

Tabulka 22 Geometrie hliníkových závěsů

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
a [mm]	55	55	14
c [mm]	20	20	8
t [mm]	30	30	5,48
d [mm]	25	25	10
b [mm]	65	65	26
b_1 [mm]	65	65	120

5.2.1.6 Hmotnost kování

Hustota hliníkové slitiny 6061-T6 je $2,7 \frac{g}{cm^3}$. Hmotnosti kování potom vycházejí následovně.

Tabulka 23 Hmotnost kování z hliníku

	Hlavní	Pomocné
$Objem$ [cm ³] (určeno pomocí NX12)	166,673	37,199
$Hmotnost$ [kg]	0,450	0,100

5.2.2 MKP analýza kování ze slitiny hliníku

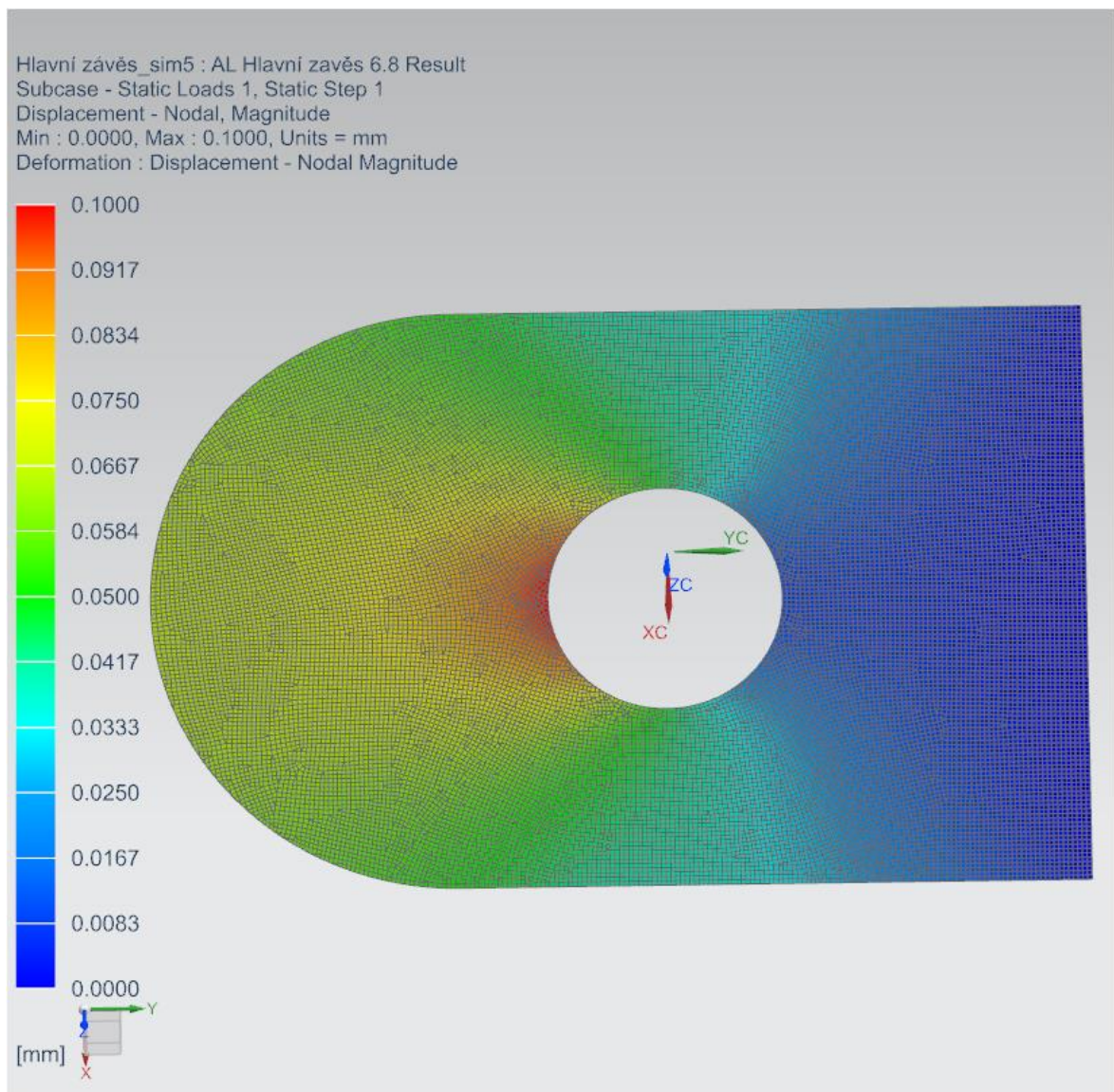
2D MKP analýza provedena pomocí programu NX12

Typ sítě – 2D CQUAD4 s velikostí elementu 0,5mm.

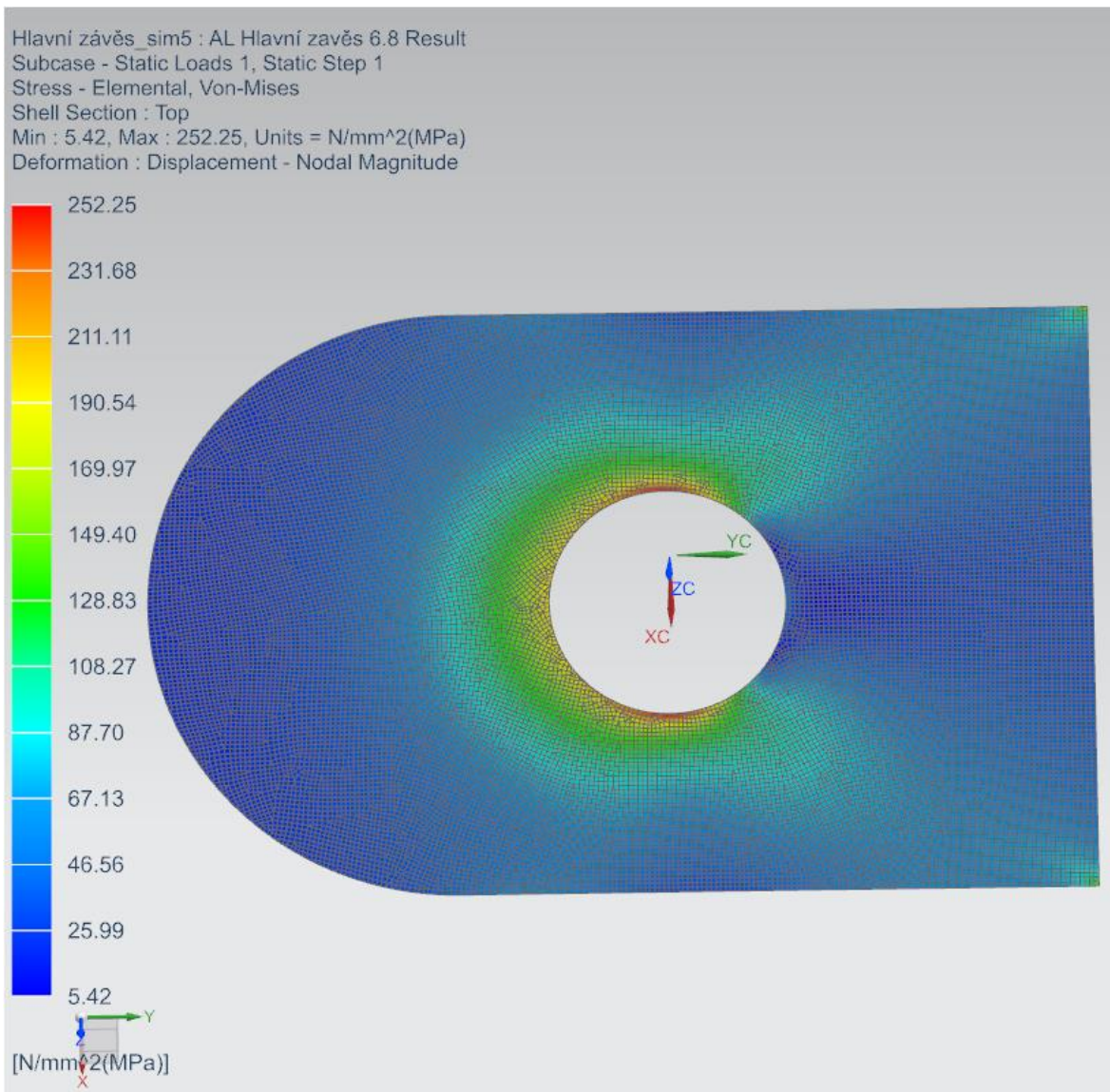
Materiálové vlastnosti z obsahové knihovny programu NX12 pro slitinu hliníku 6061.

5.2.2.1 Hlavní Závěs

Vzhledem ke stejné geometrii horního a dolního závěsu na hlavním nosníku bude MKP analýza provedena pouze pro horší případ zatížení tedy namáhání horního závěsu.

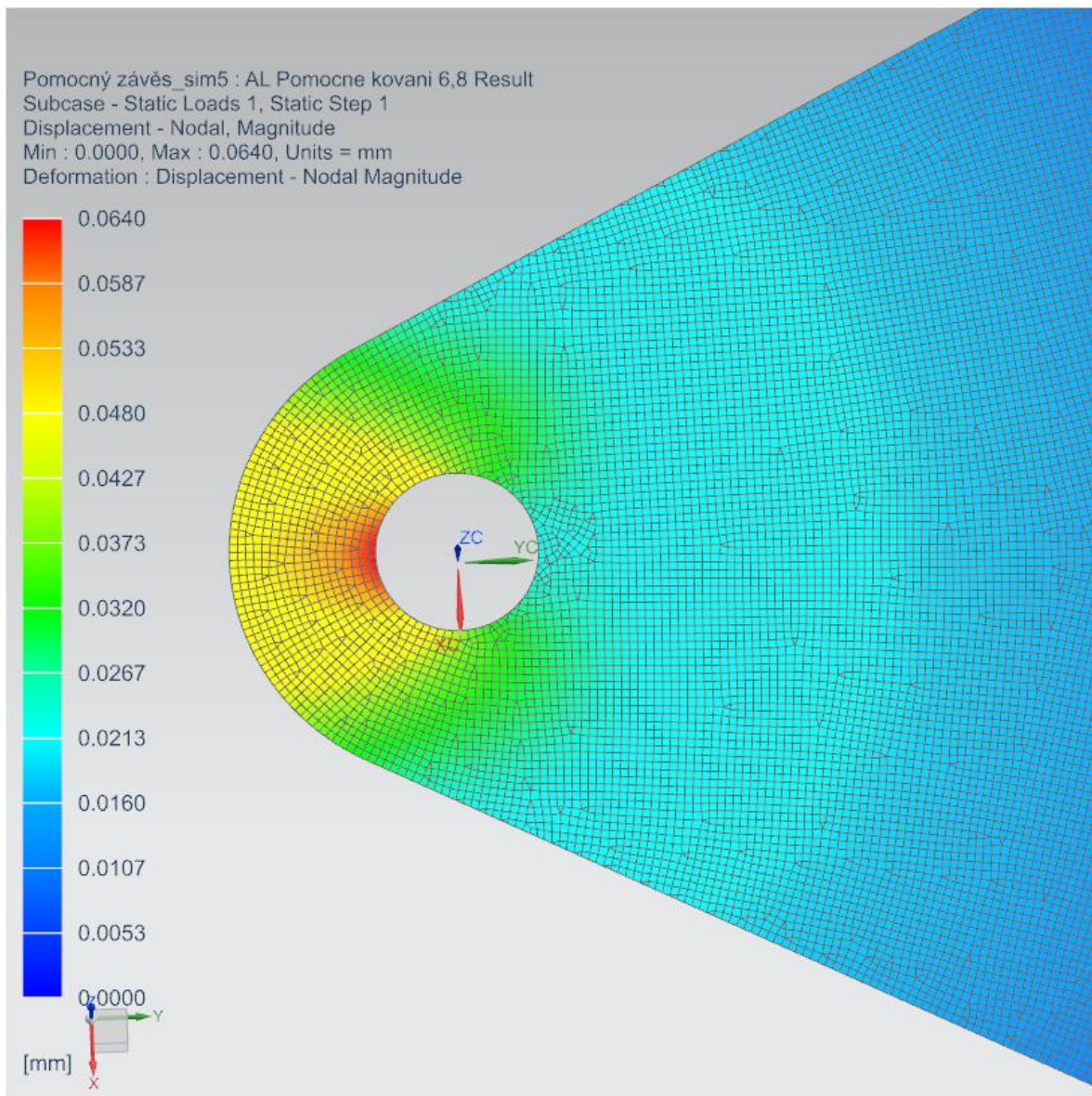


Obrázek 20 Deformace hlavního hliníkového závěsu

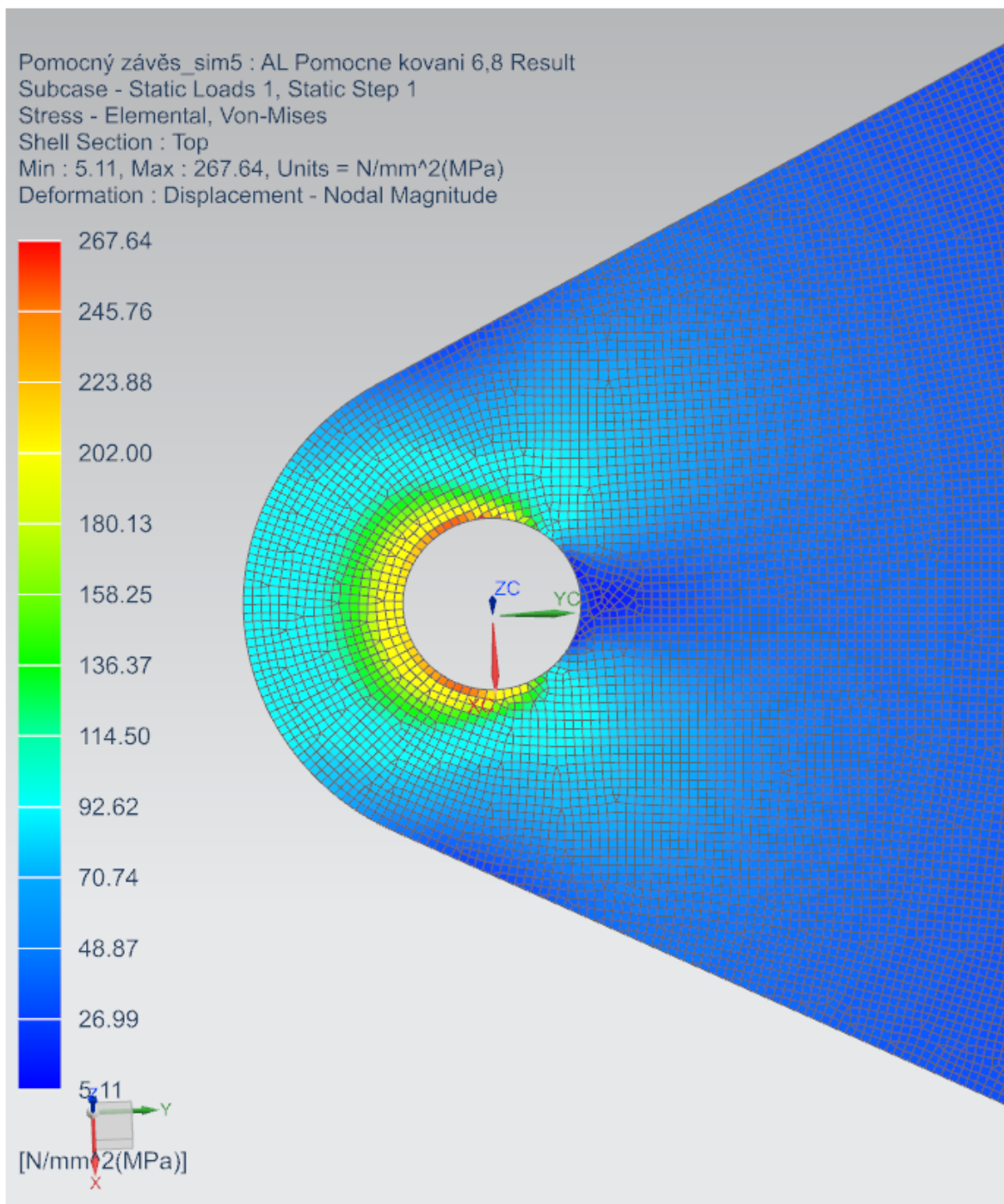


Obrázek 21 Rozložení napětí hlavního hliníkového závěsu

5.2.2.2 Pomocný závěs



Obrázek 22 Deformace pomocného hliníkového závěsu



Obrázek 23 Rozložení napětí pomocného hliníkového závěsu

5.2.3 Návrh kování z FML

5.2.3.1 Materiálové vlastnosti

Zjištění materiálových vlastností FML není tak jednoduché jako u standardních materiálu, u kterých můžeme snadno dohledat tabulkové hodnoty.

Jednou z možností, jak zjistit potřebné materiálové vlastnosti FML je experimentální ověření, které je vcelku zdlouhavé a nákladné. Zároveň vzhledem k nutnosti přechodové oblasti by se zkoušení materiálu ještě zkomplikovalo o nutnost testovat více poměru kompozitu a kovové výztuže.

Další možností jako rychle a snadno určit statické mechanické vlastnosti kombinace materiálu je použití metody na bázi MVF (Metal Volume Fraction). Jedná o přístup odvozený od směšovacíh pravidel u kompozitu. Směšovací rovnice má potom tvar:

$$X_{FML} = MVF * X_M + (1 - MVF) * X_F$$

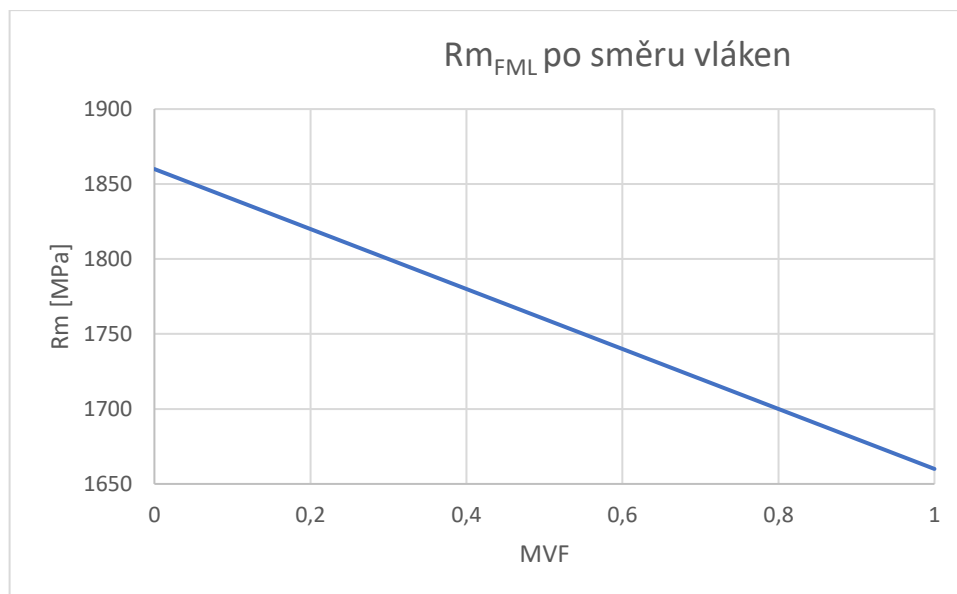
Kde X je určitá materiálová charakteristika. Index M označuje charakteristiku čistého kovu a index F označuje charakteristiku výztužných vláken kompozitu. MVF potom označuje obsah kovu v FML.

Využitím této rovnice můžeme získat mez pevnosti FML složeného z uhlíkového kompozitu a 45% nerezové oceli.

Uvažujeme uhlíková vlákna typu T300 s $R_m = 3530 \text{ MPa}$, nicméně tato hodnota platí pouze pro samotná uhlíková vlákna je proto nutné pracovat s hodnotou již vytvrzeného laminátu. Produktový list vlákna T300 udává hodnotu $R_m = 1860 \text{ MPa}$ pro laminát s obsahem 60% vláken a epoxidovou matricí Toray 250°F. Dále do FML vstupuje nerezová ocel 1.4310 s $R_m = 1660 \text{ MPa}$. Dosazením do rovnice výše získáme:

$$R_{m_{FML}} = 0,45 * 1660 + (1 - 0,45) * 1860 = 1770 \text{ MPa}$$

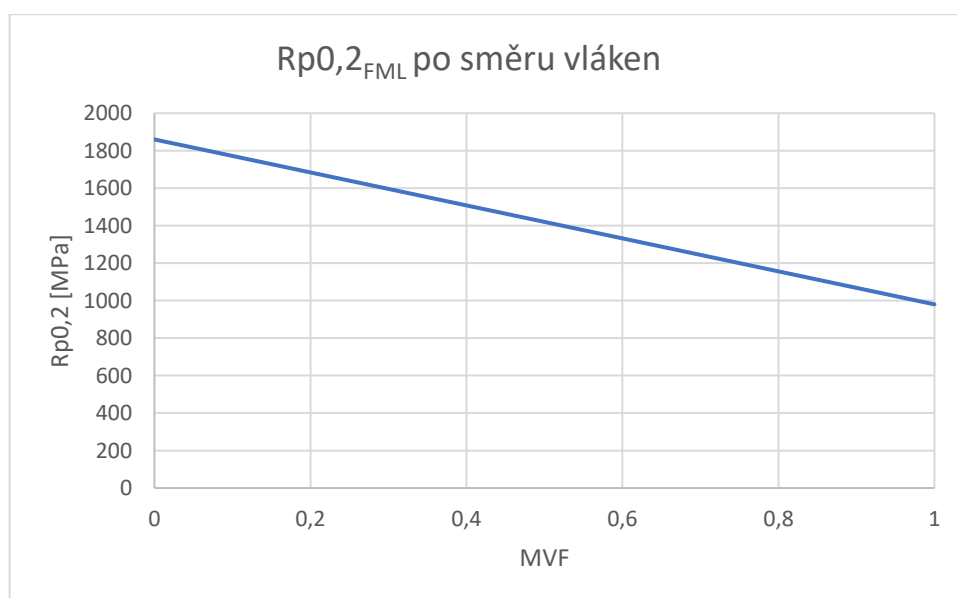
Výpočtem pro různé podíly kovové složky získáme průběh meze pevnosti. Ten se nám bude hodit při pozdějším návrhu přechodové oblasti.



Graf 9 Průběh Rm pro různé MVF po směru vláken

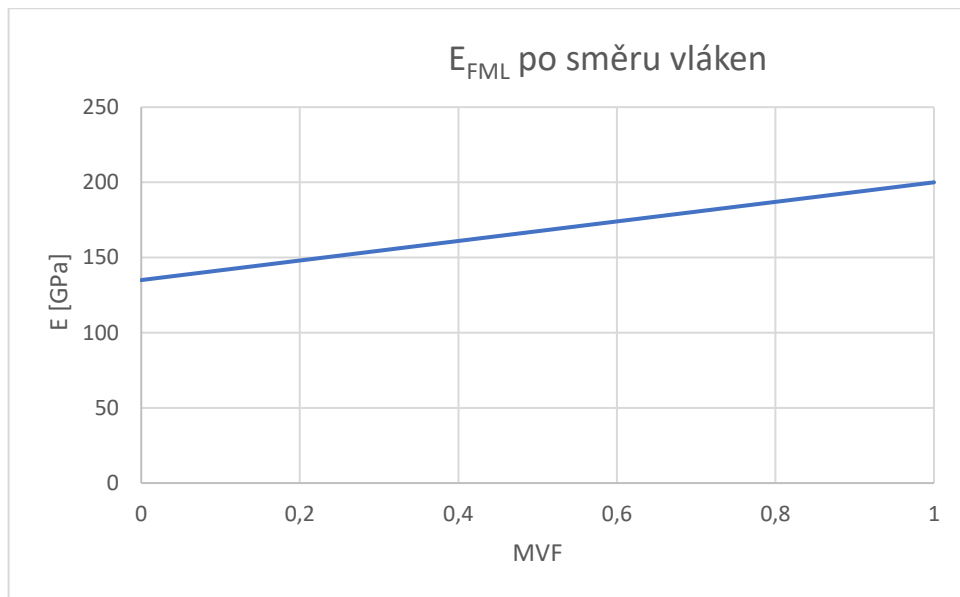
Obdobným způsobem přepočítáme mez kluzu. Bereme v úvahu to, že uhlíkový kompozit se chová elasticky do poruchy. Tudiž uvažují mez kluzu uhlíkových vláken rovnou mezi pevnosti. Mez kluzu oceli 1.4310 je 980 MPa. Výpočet pro obsah kovové složky 45% vypadá následovně.

$$Rp_{0,2_{FML}} = 0,45 * 980 + (1 - 0,45) * 1860 = 1208,4 \text{ MPa}$$



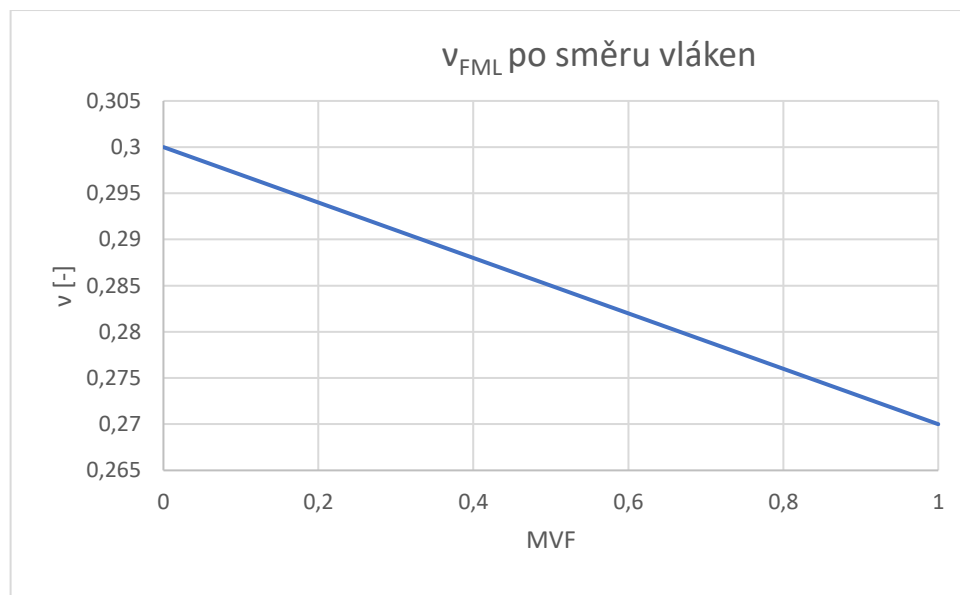
Graf 10 Průběh Rp0,2 pro různé hodnoty MVF po směru vláken

Pro MKP a návrh přechodové oblasti budeme také potřebovat průběh modulu pružnosti, který opět vypočteme pomocí směšovacího pravidla. Modul pružnosti uhlíkového kompozitu je dle datasheetu $E = 135 \text{ GPa}$ a nerezové oceli $E_m = 200 \text{ GPa}$.



Graf 11 Průběh modulu pružnosti v závislosti na MVF po směru vláken

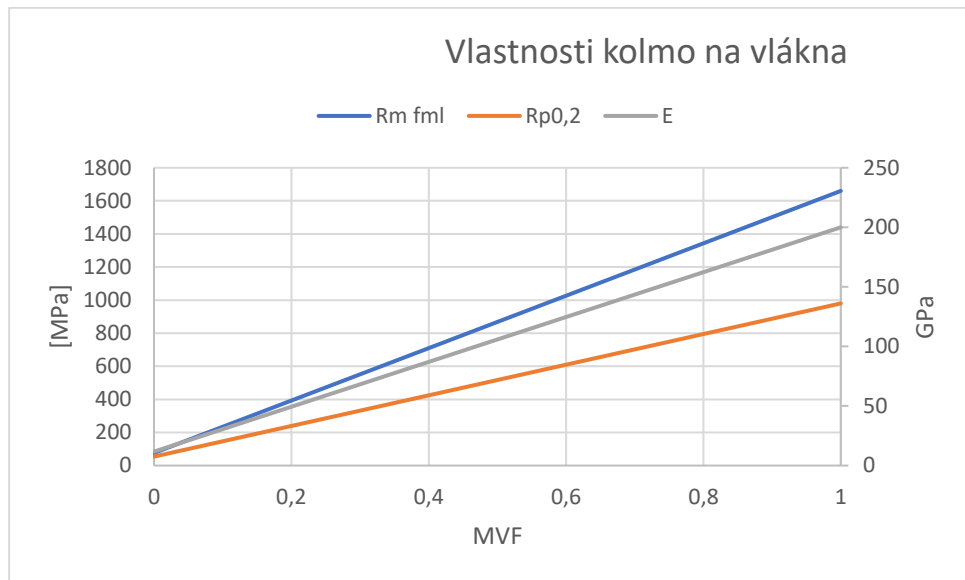
Dále průběh poissonova koeficientu, který získáme stejně jako předchozí charakteristiky.



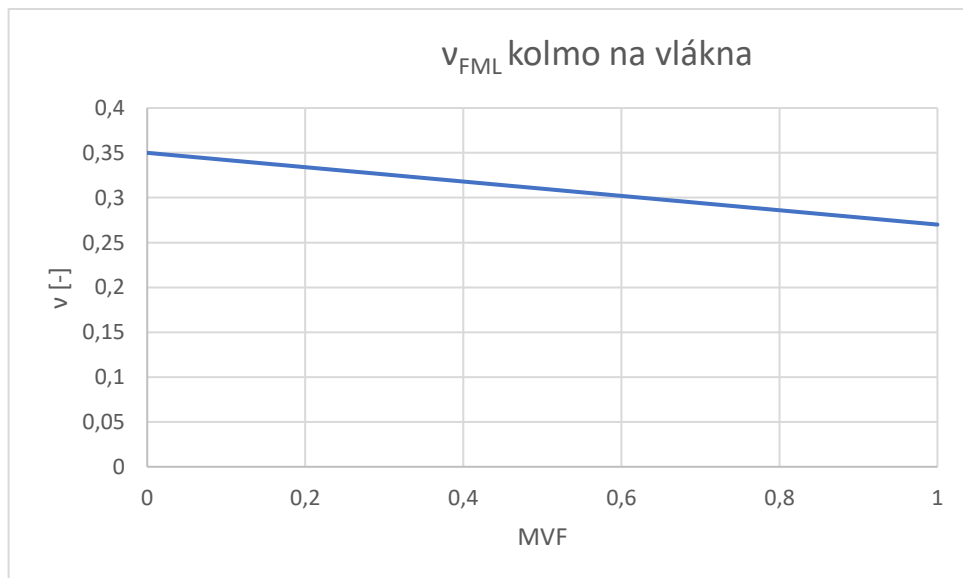
Graf 12 Průběh poissonova koeficientu v závislosti na MVF po směru vláken

Pevnostní výpočty kování, které jsou použity v této práci jsou primárně určeny pro izotropní materiály. Avšak navržený hybridní materiál je složen z ocelové folie a jednosměrného kompozitu, který je orientován ve směru hlavního zatížení. Pro prvotní orientační analytický výpočet můžeme považovat toto zjednodušení problému za adekvátní.

Avšak při provádění MKP výpočtů, je již vhodné uvažovat materiálové vlastnosti i v dalších směrech. Proto napočítáme materiálové charakteristiky FML při zatěžování kolmo na směr vláken kompozitu. K tomu použijeme stejné směšovací pravidlo, jako v předchozích výpočtech. S tím rozdílem, že vlastnosti kompozitu se směru vláken nahradíme vlastnostmi kolmo na vlákna. Tyto výpočty již nebudou rozepsány pouze zobrazeny graficky. Jedná se o analogický postup.



Graf 13 Průběh mechanických vlastností v závislosti na MVF kolmo na směr vláken



Graf 14 Průběh poissonova koeficientu v závislosti na MVF kolmo na směr vláken

[1][6][12]

5.2.3.2 První pevnostní výpočet

Při navrhování kompozitních konstrukcí přidáváme k početnímu zatížení ještě zvyšující součinitel kompozitu 1,5. Výsledné zatížení je proto počítáno následovně:

$$N_{poč-kompozit} = 1,5 * 1,5 * N = 2,25 * N$$

Kontrola na utržení závěsu.

Tabulka 24 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka závěsů z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{počkomp} [N]$	301036,37	259080,89	26182,91
$A_1 [mm^2]$	204,092	175,648	17,751
$\sigma [MPa]$	1227,718	1056,610	1435,466
f	1,442	1,676	1,233

Kontrola závěsu na vysmeknutí čepu a roztržení oka.

Tabulka 25 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka závěsů z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{počkomp} [N]$	301036,37	259080,89	26182,91
$A_2 [mm^2]$	383,125	383,125	22,800
$\sigma_{otl} [MPa]$	785,739	676,231	1148,373
$\sigma_{pkotl} [MPa]$	1858,500	1858,500	1380,600
f_{otl}	2,365	2,748	1,202

5.2.3.3 Druhý pevnostní výpočet

Součinitele

Tabulka 26 Zvyšující součinitele pro výpočet oka kování z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
f_1	0,940	0,940	0,740
f_2	0,835	0,835	0,915
f_3	1,000	1,000	1,000
f_4	1,000	1,000	1,000

k_1	1,230	1,230	3,008
k_2	1,000	1,000	1,000

Kontrola na utržení závěsu s uvažováním deformace.

Tabulka 27 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu utržení oka včetně deformace závěsů z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{počkomp} [N]$	301036,37	259080,89	26182,91
$A_1 [mm^2]$	204,092	175,648	17,751
$\sigma_{pk} [MPa]$	1473,417	1473,417	3949,319
$\sigma [MPa]$	1227,718	1056,610	1435,466
f_d	1,200	1,394	2,751

Kontrola závěsu na vysmeknutí čepu a roztržení oka s uvažováním deformace

Tabulka 28 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtu otláčení oka včetně deformace závěsů z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
$N_{počkomp} [N]$	301036,37	259080,89	26182,91
$A_2 [mm^2]$	383,125	383,125	22,800
$\sigma_{otl} [MPa]$	785,739	676,231	1148,373
$\sigma^*_{pkotl} [MPa]$	1884,370	1884,370	3976,185
f_{dotl}	2,398	2,787	3,462

5.2.3.4 Geometrie kování

Pro zjednodušení a zlevnění výroby je horní a dolní závěs hlavního nosíku stejný.

Tabulka 29 Geometrie závěsů z FML

Nosník	Hlavní nosník		Pomocný nosník
	Horní	dolní	
Závěs			
a [mm]	30,00	30,00	10,00
c [mm]	8,00	8,00	4,00
t [mm]	15,33	15,33	2,28
d [mm]	25,00	25,00	10,00
b [mm]	41,00	41,00	18,00
b_1 [mm]	65,00	65,00	120,00

5.2.4 MKP analýza

2D MKP analýza provedena pomocí programu NX12

Typ sítě – 2D CQUAD4 s velikostí elementu $0,5\text{mm}$.

V programu NX byly vytvořeny lamináty s příslušnou skladbou, která byla naznačena výše. Současně byly vytvořeny skladby přechodových oblastí. Tyto materiálové vlastnosti byly následně aplikovány v příslušných polích 2D modelů.

Laminát vytvořený na základně tloušťky, kterou jsme získaly pomocí analytického výpočtu, Pevnostně nevyhověl. Tloušťka laminátu byla proto postupně navyšována tak aby výsledné kování splňovalo pevnostní parametry. Finální tloušťka hlavního kování, taky aby vyhovělo MKP analýze, je tedy $58,8\text{mm}$ a pomocného kování $14,2\text{mm}$. Pro tuto skladbu pak vycházejí následující MKP výsledky. Drobné odchylky v indexu porušení vrstvy, je nejpravděpodobněji způsobenou lokální poruchou sítě.

5.2.4.1 Návrh přechodové oblasti

Přechodovou oblast je potřeba navrhnout tak, aby při přechodu z FML na čistý kompozit nedošlo ke skokové změně tuhosti. V ideálním světě by byl přechod dokonale plynulý, ale vzhledem k tomu, že tuhost FML měníme obsahem kovu, který je přítomen ve formě folie dané tloušťky a zároveň máme pevně daný počet vrstev, je jasné, že k určitým skokům v tuhosti dojde. Naším úkolem je to, aby tyto skoky byli co nejmenší. Plynulost přechodu se odvíjí od počtu vrstev, a tudíž od možnosti lépe alternovat uhlíkový kompozit a nerezovou folii. [1][6][12]

5.2.4.1.1 Hlavní kování

Vzhledem k počtu kovových vrstev volím délku jednoho přechodového elementu 2mm a budeme nahrazovat 4 kovové vrstvy najednou. To nám při 132 kovových vrstvách, které jsou obsaženy ve finální skladbě, dává 33 přechodových elementů a tím i délku přechodové oblasti 66mm .

5.2.4.1.2 Pomocné kování

U pomocného závěsu nám ve finální skladbě vychází 32 kovových vrstev. Volíme proto nahrazení po dvou vrstvách s délkou přechodového elementu 2mm . Dostaneme tedy 16 přechodových elementů s délkou přechodové oblasti 32mm .

5.2.4.2 Hmotnost kování

Hustotu FML použité při návrhu tohoto kování vypočteme opět pomocí směšovacího pravidla. Hustota uhlíkového kompozitu je $1,76 \frac{g}{cm^3}$ a hustota oceli potom $8 \frac{g}{cm^3}$. Hustota FML složeného z 45 % nerezové oceli potom bude:

$$\rho_{FML} = 0,45 * 8 + (1 - 0,45) * 1,76 = 4,568 \frac{g}{cm^3}$$

Honosnosti kování potom vycházejí následovně:

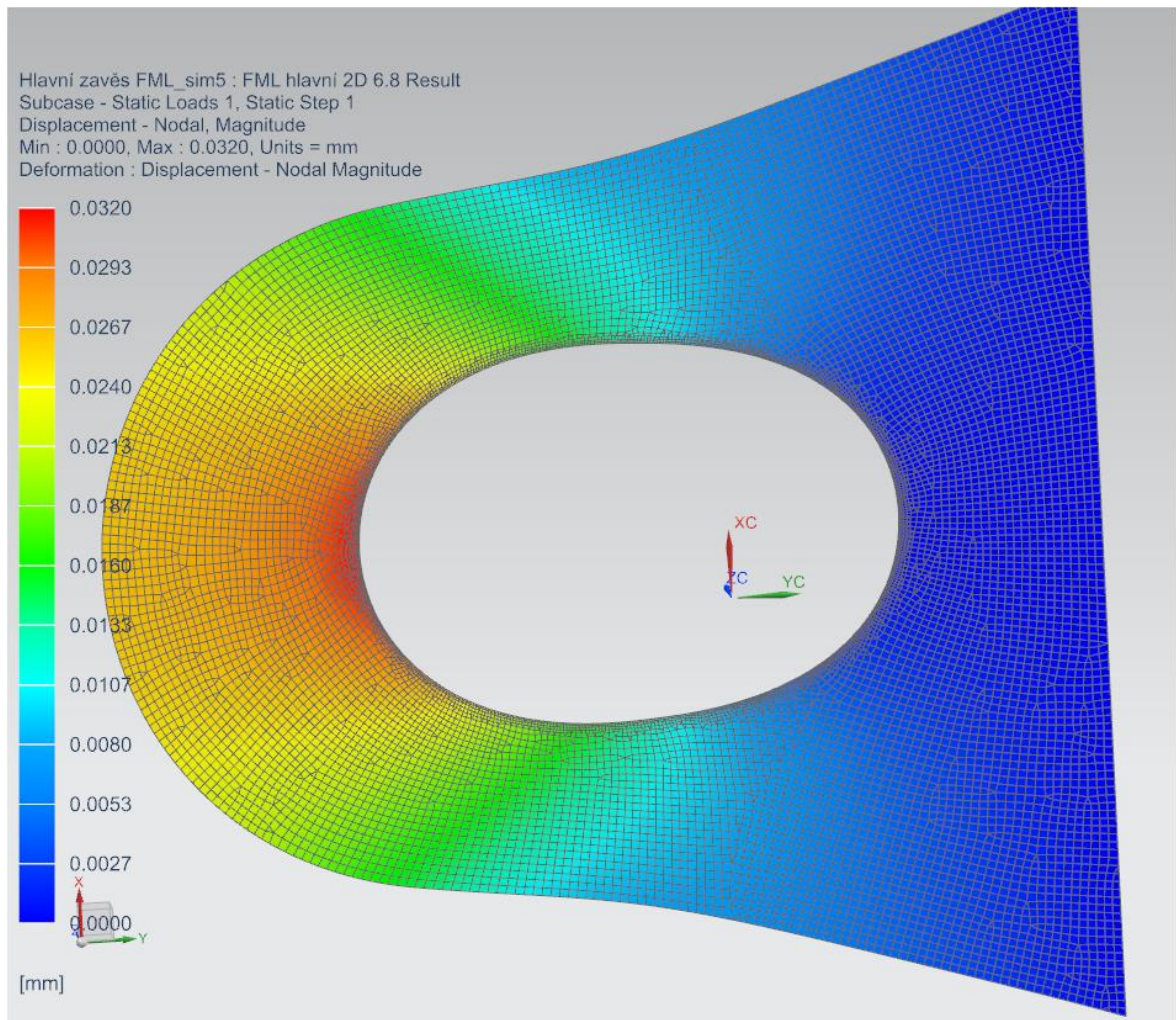
Tabulka 30 Hmotnost kování z FML

	Hlavní	Pomocné
Objem [cm ³] (určeno pomocí NX12)	122,076	92,577
Hmotnost [kg]	0,558	0,423

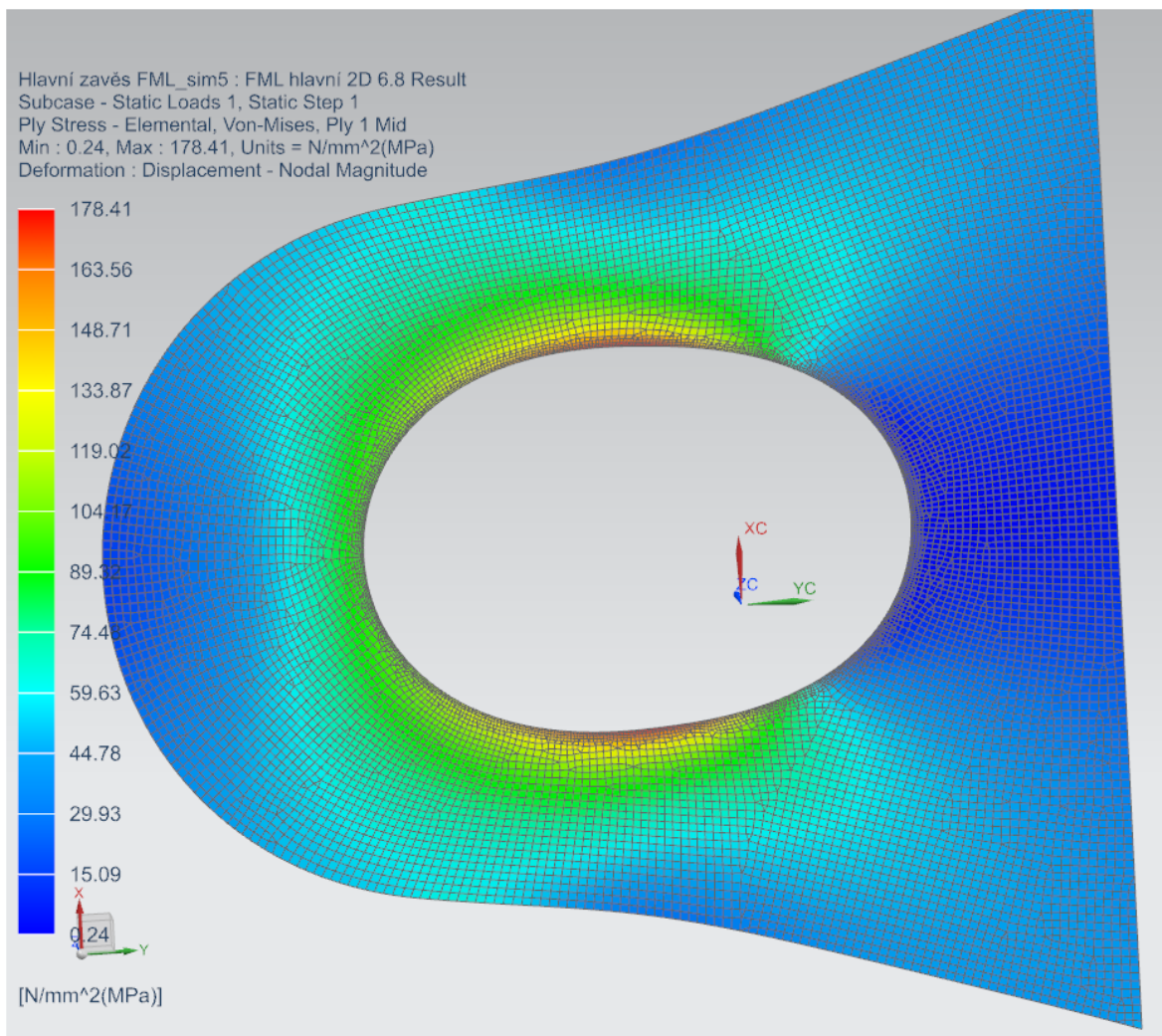
[1][6][12]

5.2.4.3 Hlavní závěs

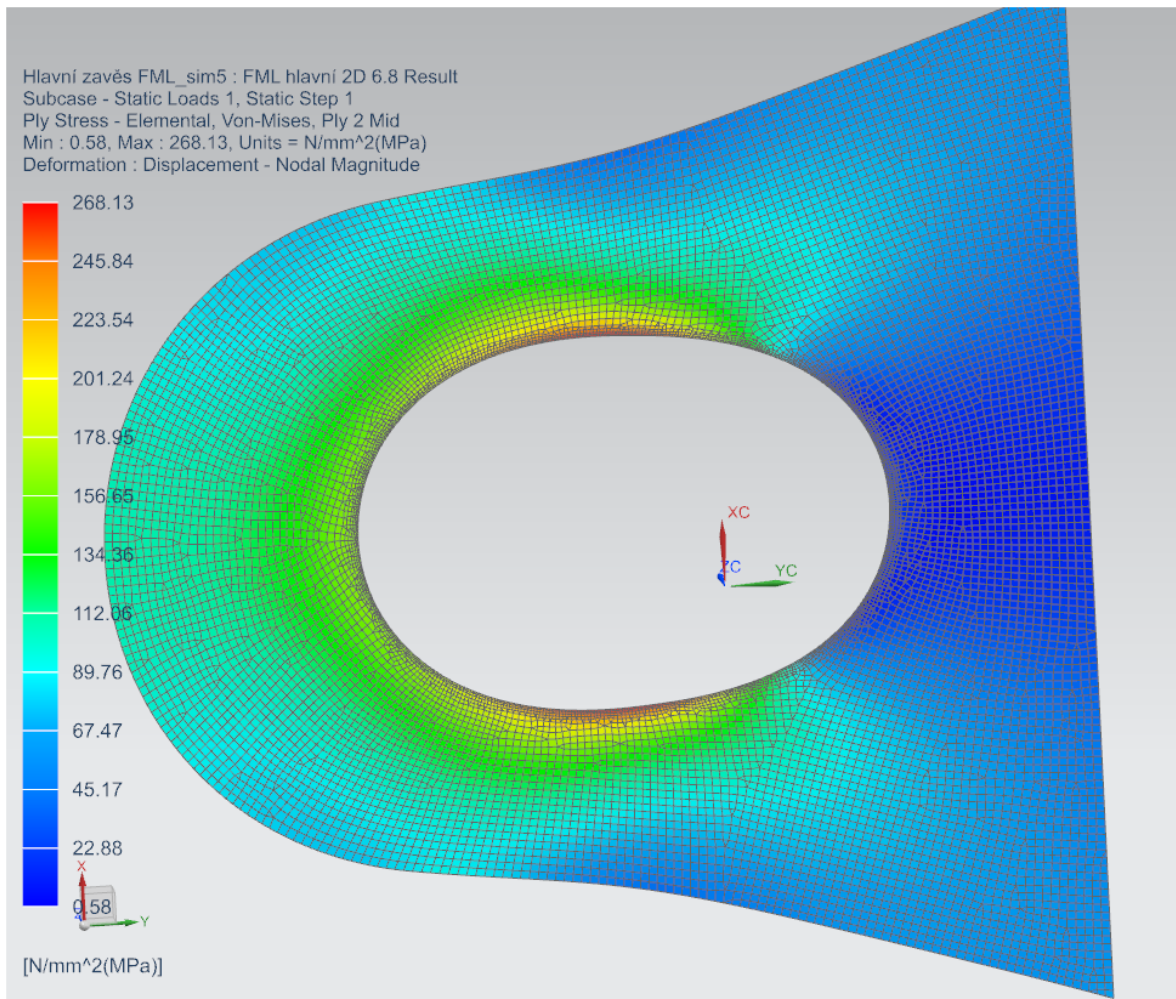
Vzhledem ke stejné geometrii horního a dolního závěsu na hlavním nosníku bude MKP analýza provedena pouze pro horší případ zatížení tedy namáhání horního závěsu.



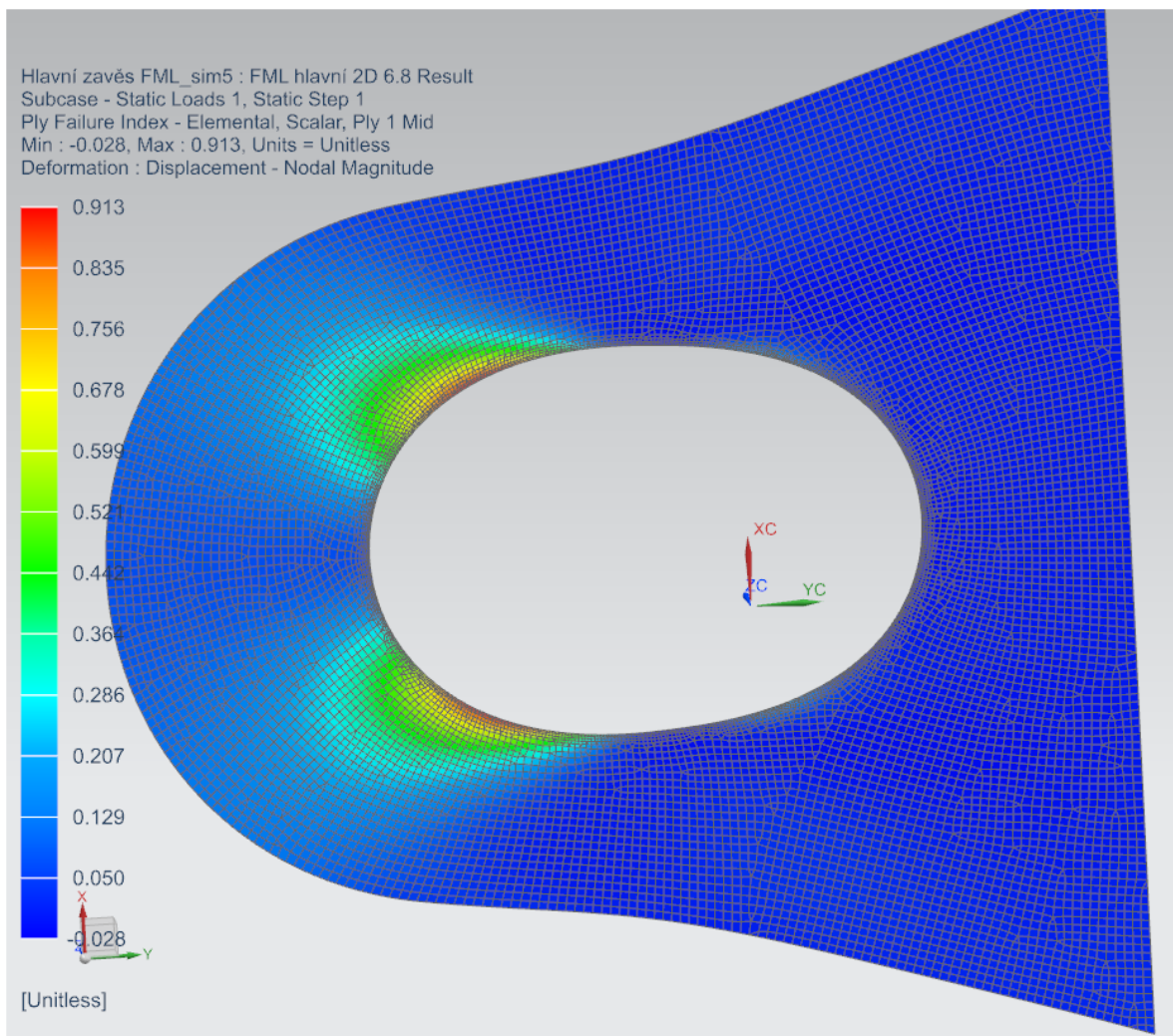
Obrázek 24 Deformace hlavního kompozitového závěsu



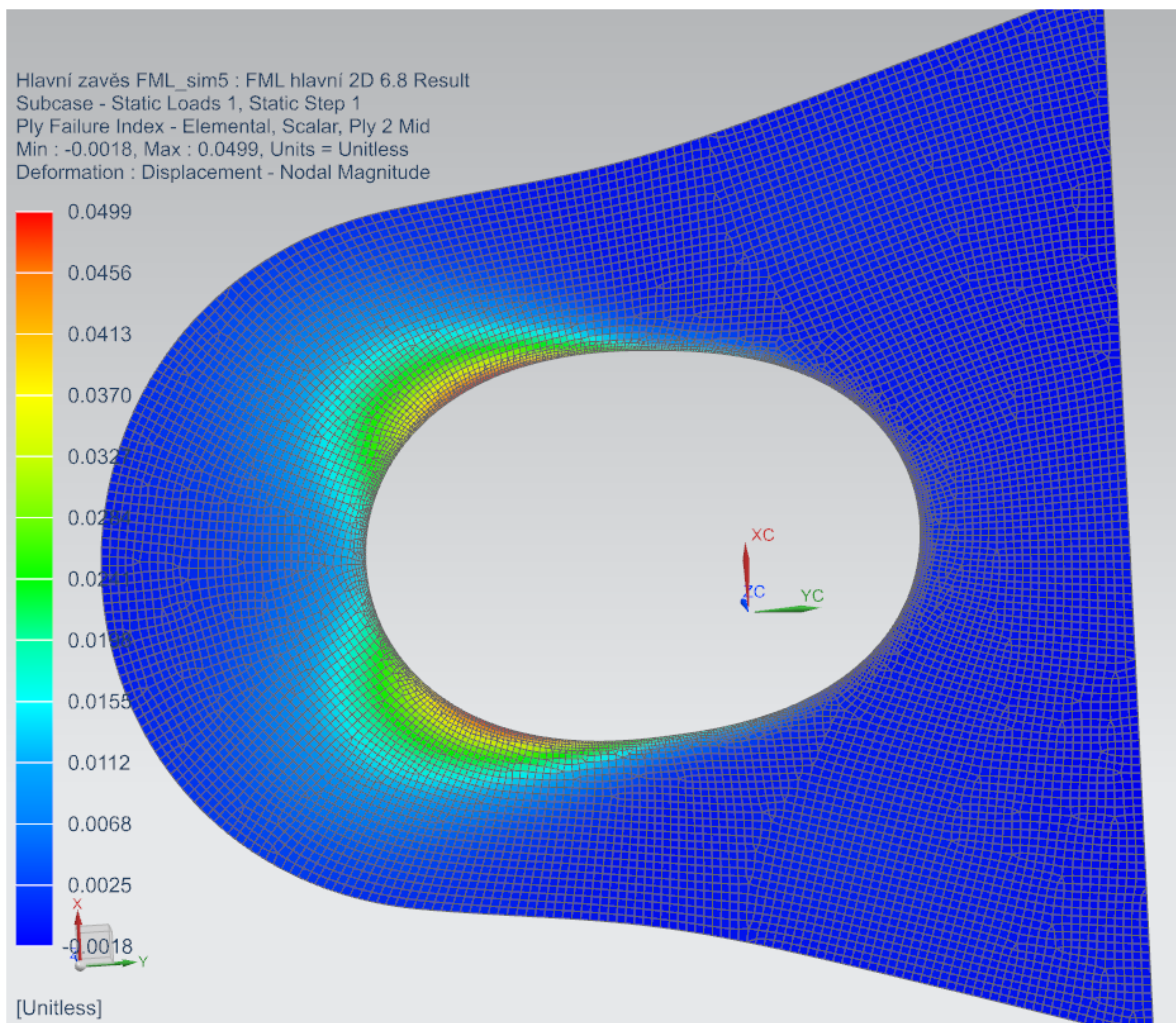
Obrázek 25 Rozložení napětí hlavního kompozitového závěsu ve vrstvě uhlíku



Obrázek 26 Rozložení napětí hlavního kompozitového závěsu ve vrstvě kovu

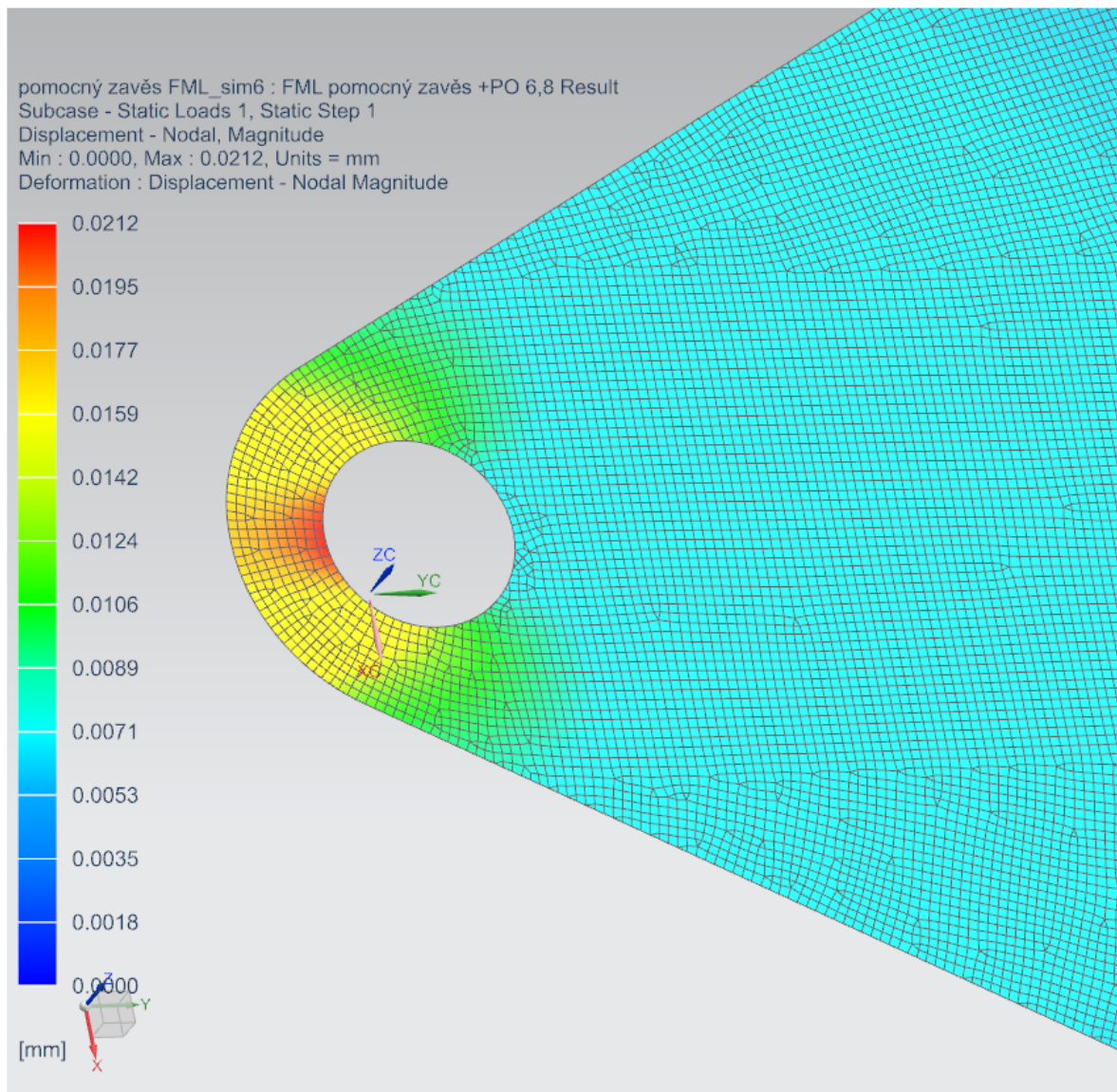


Obrázek 27 Index porušení vrstvy ve vrstvě kompozitu hlavního kování

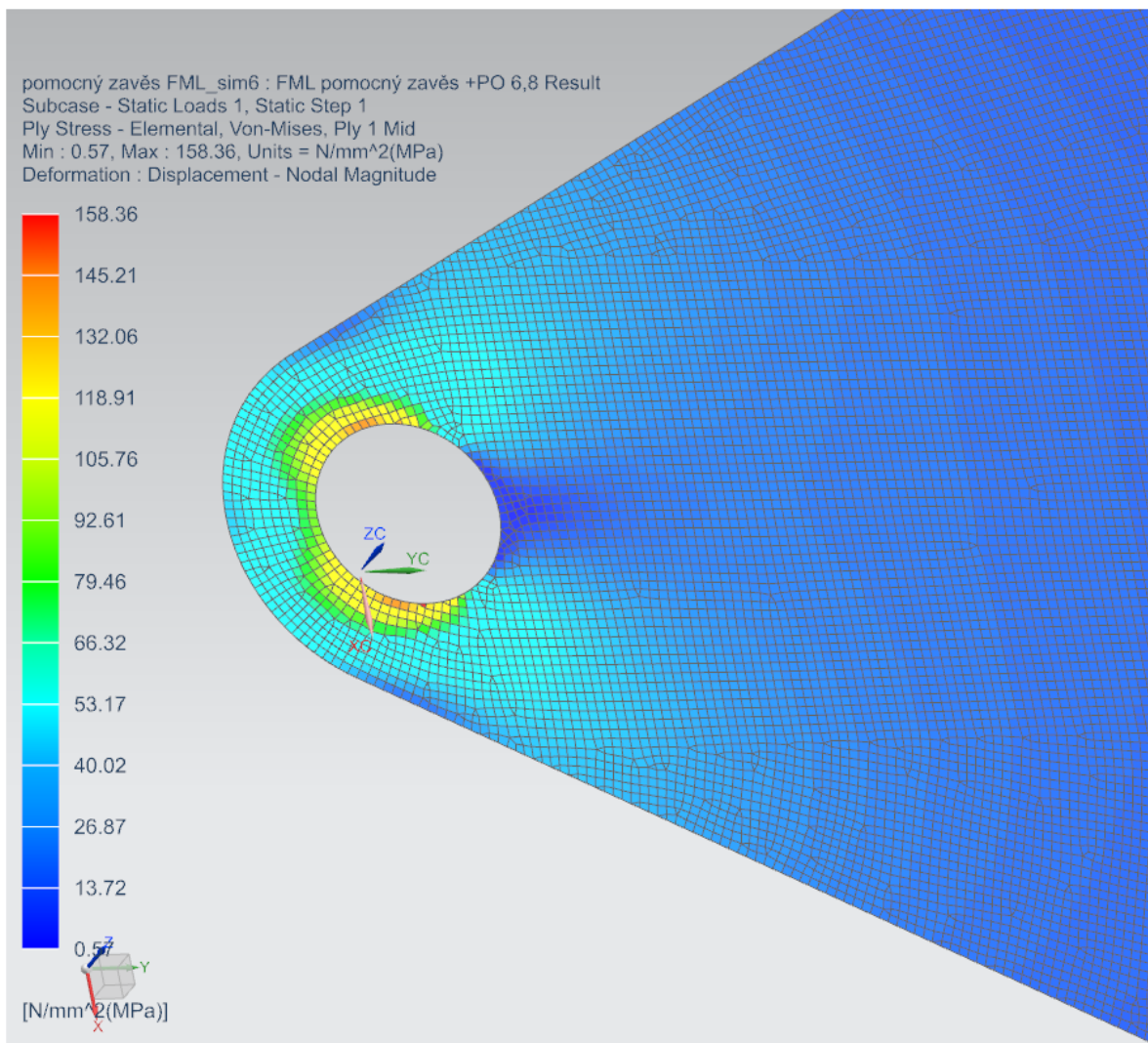


Obrázek 28 Index porušení vrstvy v kovové vrstvě hlavního kování

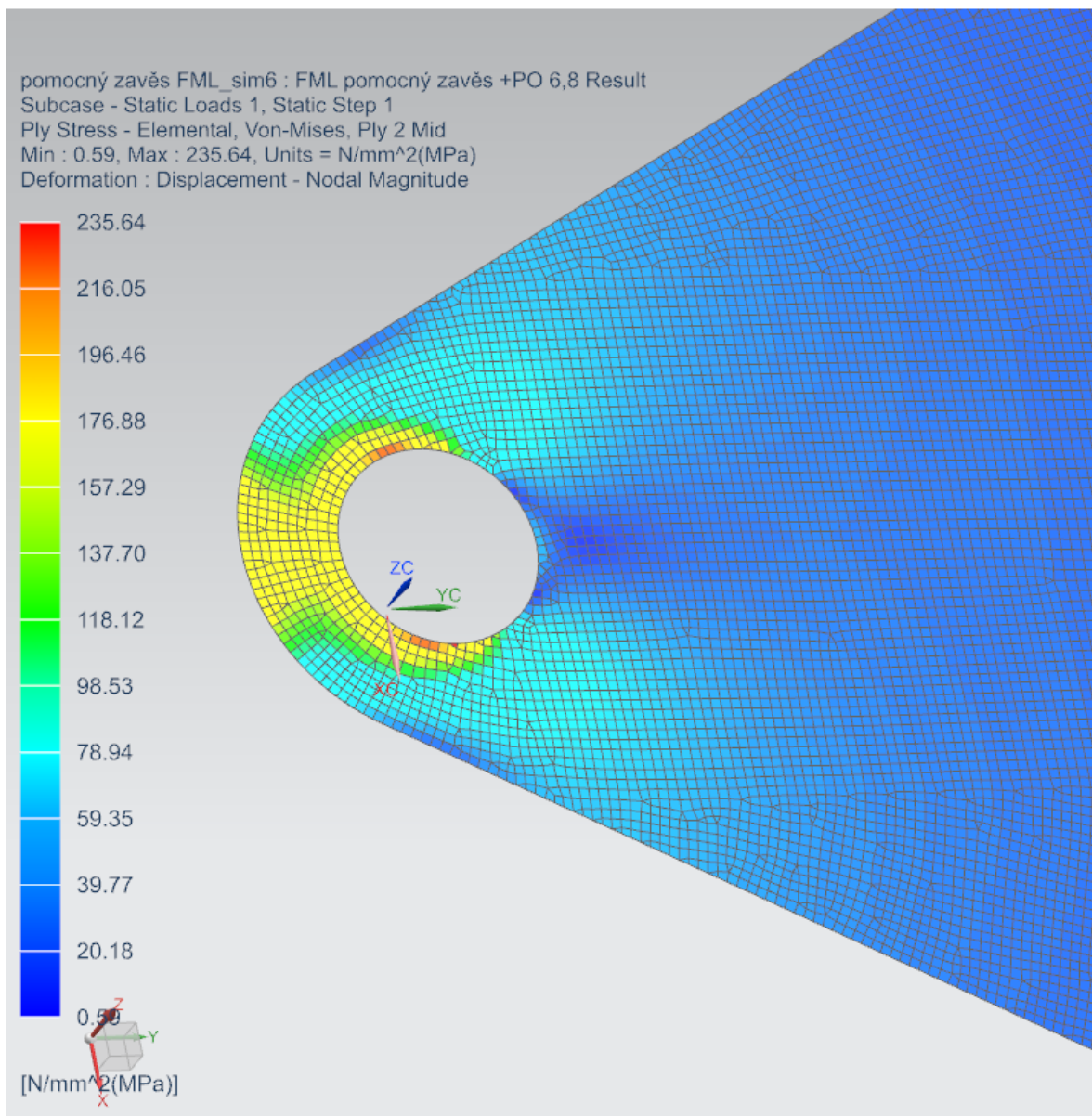
5.2.4.4 Pomocný závěs



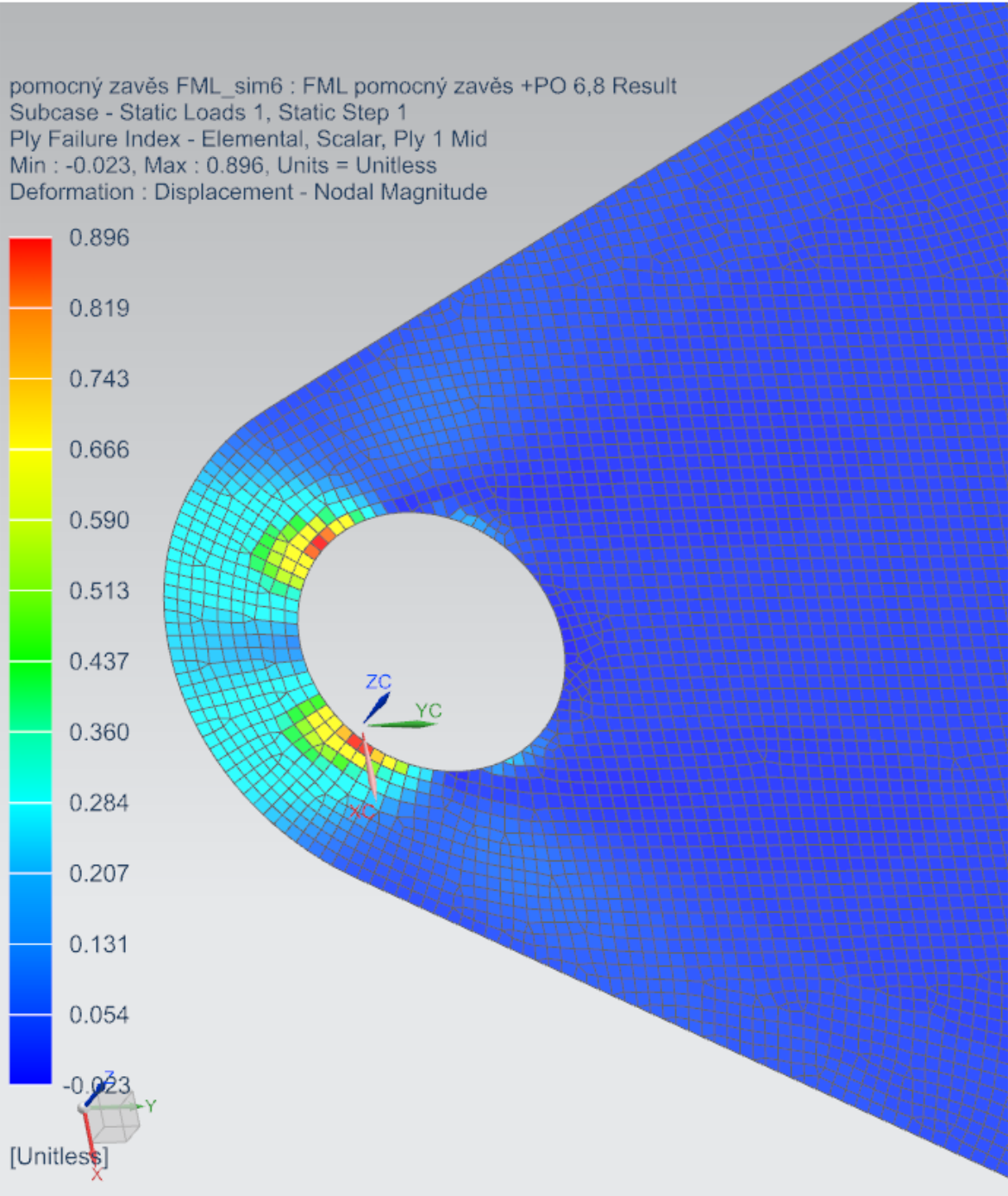
Obrázek 29 Deformace pomocného kompozitového závěsu



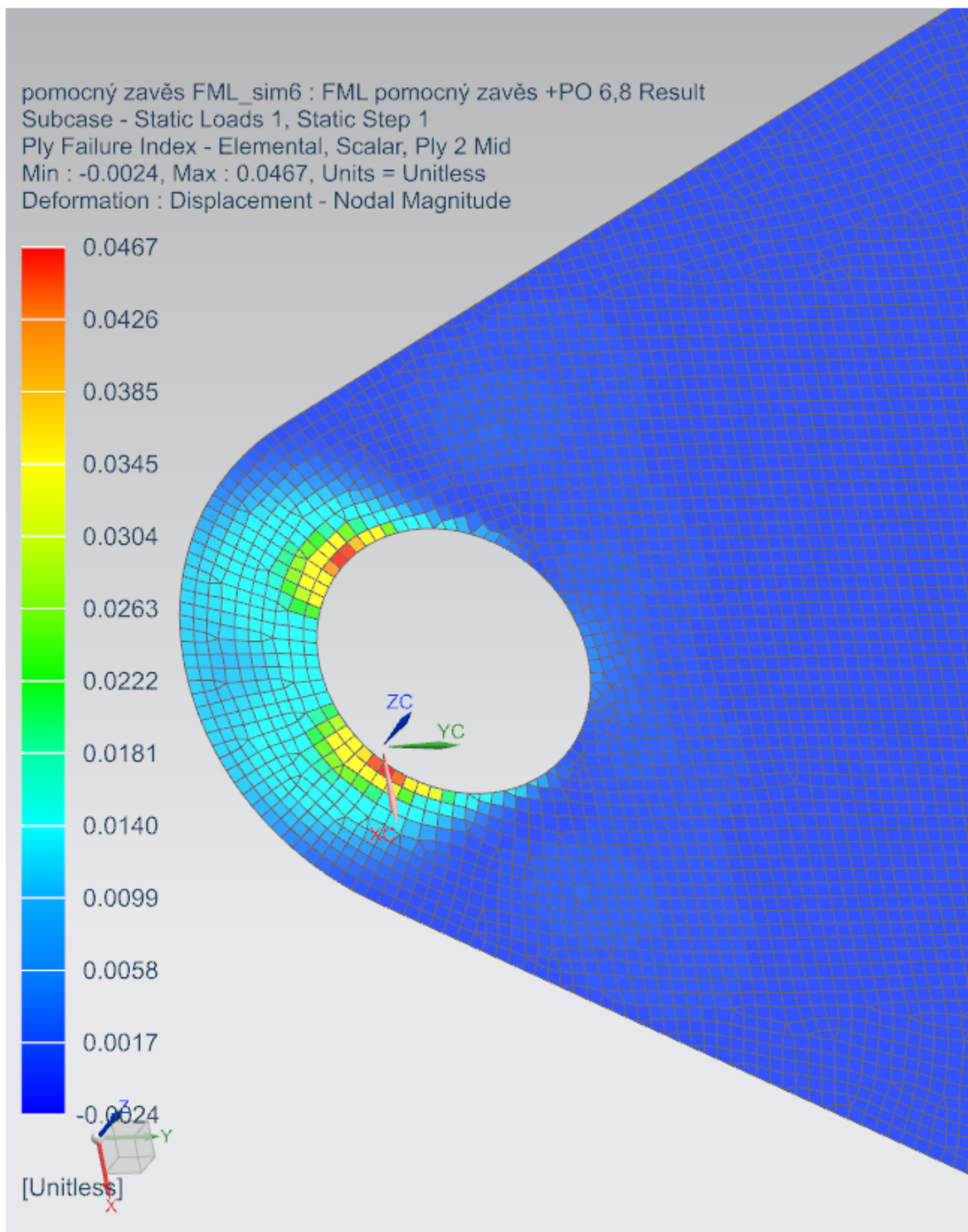
Obrázek 30 Rozložení napětí pomocného kompozitového závěsu v uhlíkové vrstvě



Obrázek 31 Rozložení napětí pomocného kompozitového závěsu v kovové vrstvě

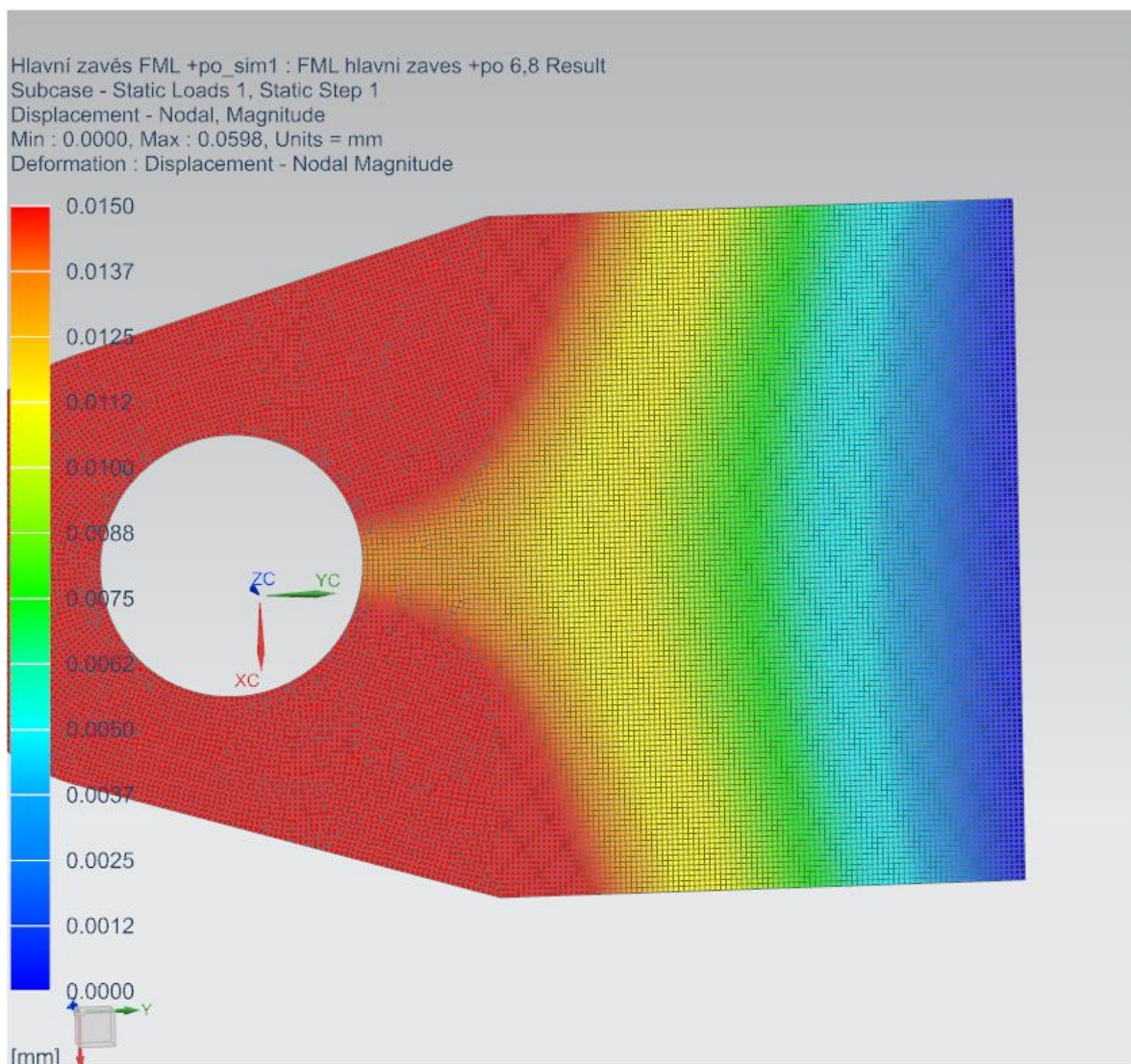


Obrázek 32 Index porušení vrstvy ve vrstvě kompozitu pomocného kování

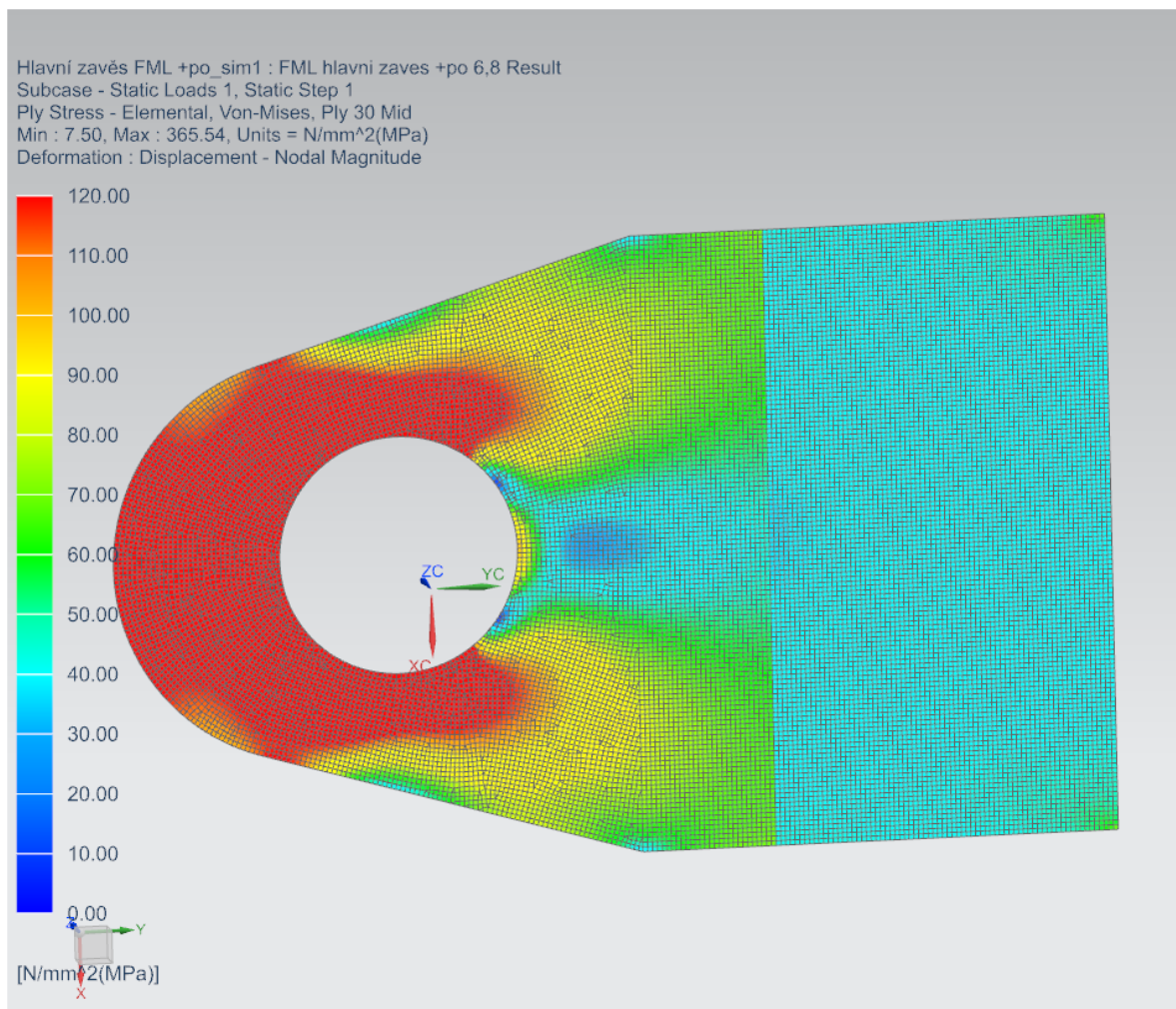


Obrázek 33 Index porušení vrstvy v kovové vrstvě pomocného kování

5.2.4.5 Přechodová oblast hlavního závěsu



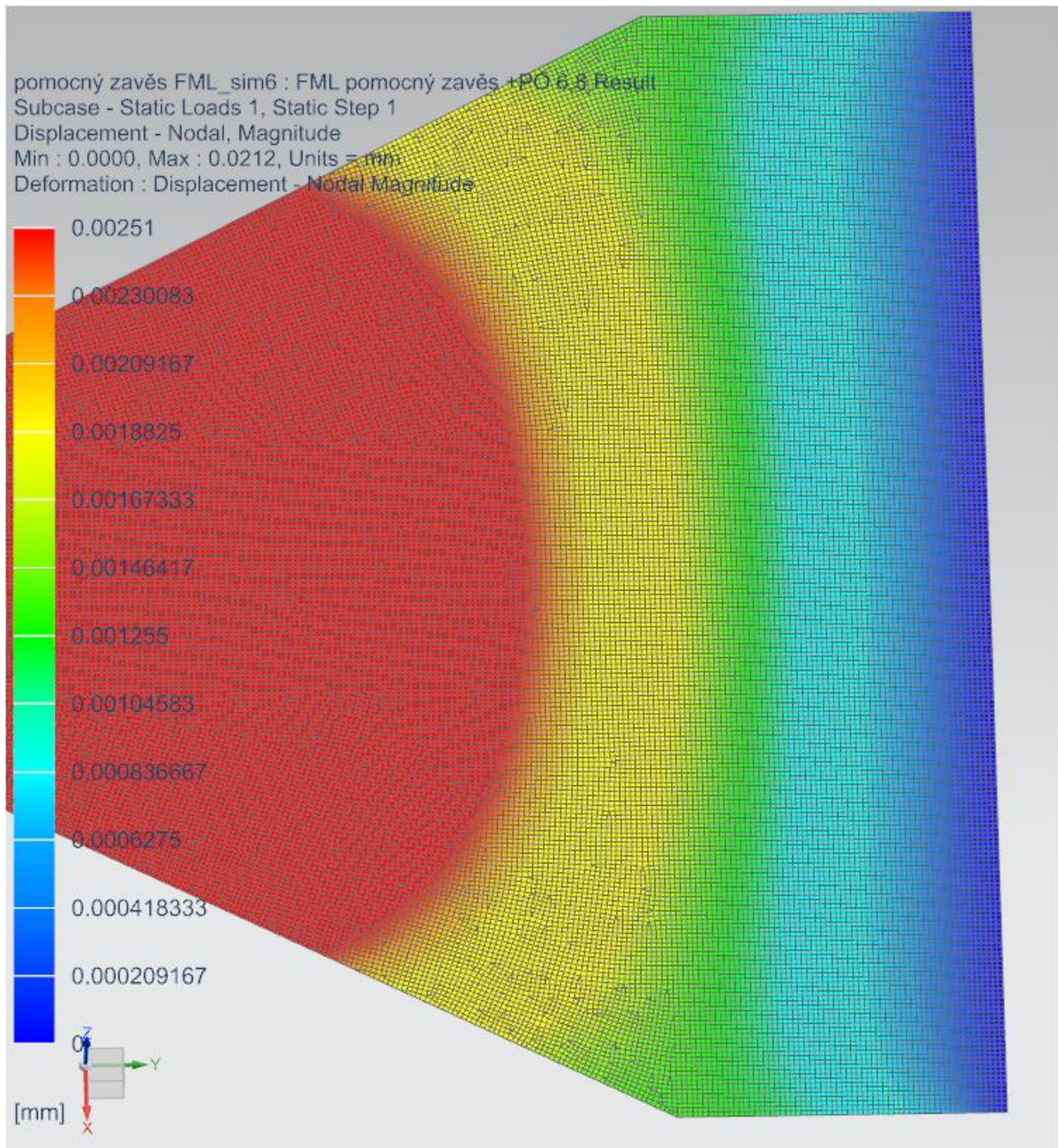
Obrázek 34 Rozložení deformace v přechodové oblasti hlavního závěsu



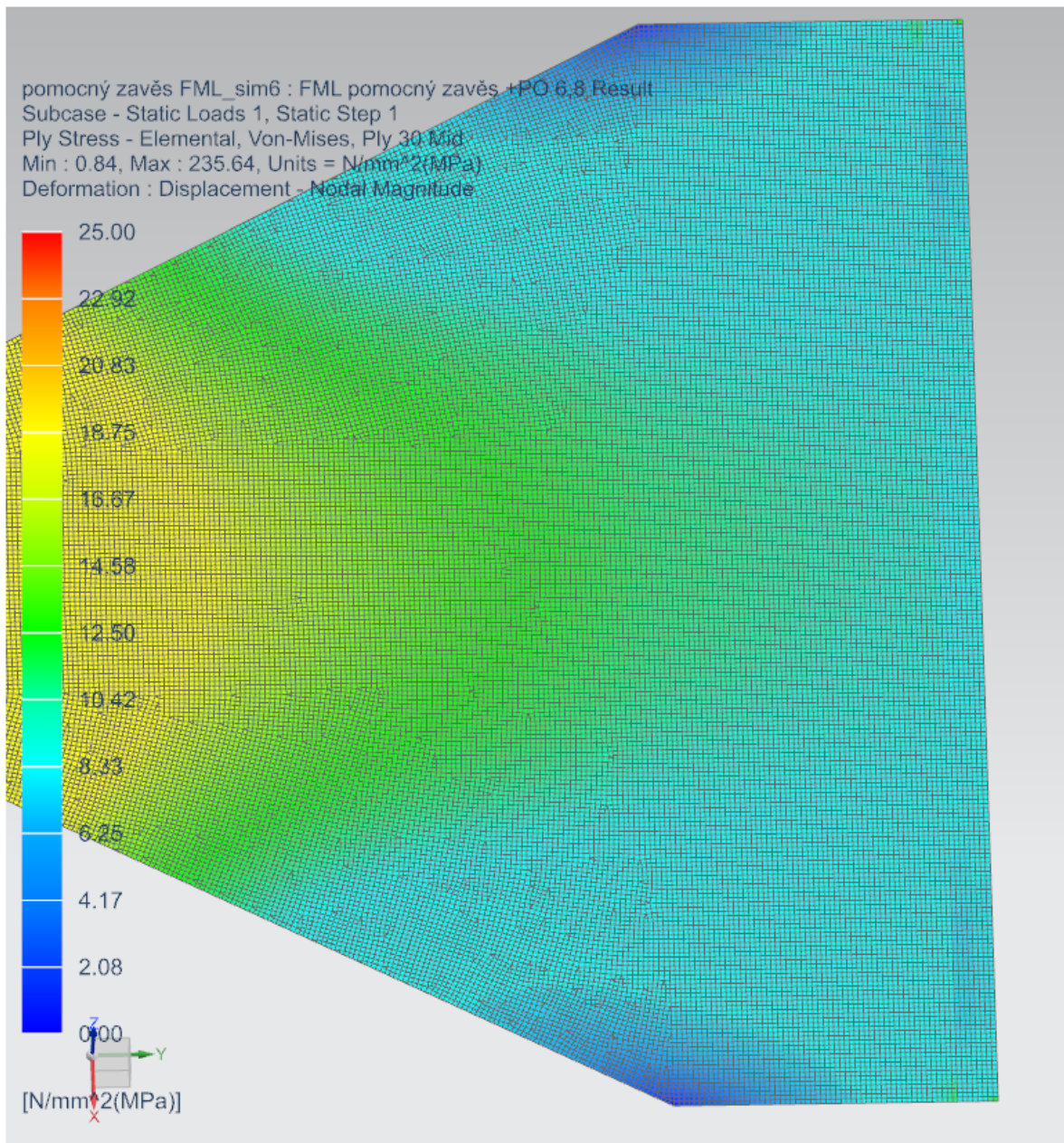
Obrázek 35 Rozložení napětí v přechodové oblasti hlavního závěsu v třicáté vrstvě

Z obrázku více je patrné rozhraní uhlíkové a kovové vrstvy. Napravo od rozhraní je již vrstva kovu nahrazena jednosměrným uhlíkem. Tím vzniká skokové rozhraní a nenávaznost rozložení napětí.

5.2.4.6 Přechodová oblast pomocného závěsu



Obrázek 36 Rozložení deformace v přechodové oblasti pomocného závěsu



Obrázek 37 Rozložení napětí v přechodové oblasti pomocného závěsu ve třicáté vrstvě vrstvě

6 Závěr

Cílem práce, jak již bylo zmíněno na začátku, bylo navrzení závěsného kování křídla z hybridního kompozitního materiálu.

Nejprve byla provedena rešerše zabývající se problematikou FML a lokální hybridizace. Současně byla zpracována oblast zabývající se samotným uložením křídla v trupu letadla. Byla nastíněna různá konstrukční řešení závěsného kování křídla spolu s příslušnými rozloženými silami.

S pomocí znalostí nabytých zpracováním rešerše, bylo následně navrženo kování experimentálního letounu Mermaid. Návrh byl proveden pro dva různé materiály. Prvně bylo navrženo kování z tradičního materiálu, kterým byla hliníková slitina 6061-T6. Pro druhý návrh byl uvažován materiál s koncepcí FML, který byl složen z uhlíkového kompozitu a 45 % nerezové oceli. Obě kování byla podrobena sérii kontrolních pevnostních výpočtů a dimenzována tak, aby nejnižší součinitel bezpečnosti dosahoval hodnoty 1,2. Jednalo se však o výpočty, které jsou primárně určené pro isotropní materiály. Z toho plyne, že použití tohoto výpočtu pro kompozitní materiál je pouze orientační, a to i přes skutečnost, že uvažujeme primární namáhání ve směru oka a tím pádem i vláken kompozitu.

Součástí návrhu kování z FML byl i návrh přechodové oblasti mezi FML a čistým kompozitem. Kde byla snaha provést co nejhladší přechod materiálových vlastností. A tím předejít nežádoucím skokovým změnám.

Obě napočtená kování byla po analytickém dimenzování vymodelována a podrobena MKP analýze v programu NX12.

Kování vyrobené z hliníkové slitiny 6061-T6 úspěšně prošlo MKP analýzou. Tím byla ověřena použitelnost analytické metodiky pro izotropní materiály. Hlavní kování se vlivem provozního zatížení prodloužilo o $0,1\text{mm}$ a pomocné kování o $0,064\text{mm}$. Napětí ani v jednom případě nepřekročilo mez pevnosti.

Na druhou stranu MKP analýza kování vyrobeného z FML, která již zohledňovala směrovost kompozitní vrstvy, ukázala zásadní nedostatky v návrhu kování dne analytické metodiky použité pro izotropní materiál. Při analýze takto navrženého kování docházelo v obou závěsech k nepřijatelnému přetížení vrstev, které by vedlo k destrukci kování. Proto byla provedena, na základě MKP analýzy, úprava skladby a tloušťky laminátu tak, aby již nedocházelo k přetížení vrstev. Tím došlo k nárůstu tloušťky hlavního kování z $15,33\text{mm}$ na $58,8\text{mm}$, tedy nárůst tloušťky o 384 % oproti analytickému výpočtu. U pomocného pování byl poté nárůst z $2,28\text{mm}$ na $14,2\text{mm}$ tedy nárůst o 623 %.

Je tedy jasné, že použití analytického výpočtu, který je primárně určený pro izotropní materiál, je naprosto nevhodné pro kompozitní materiály. Avšak můžeme jej využít pro prvotní odhad tvaru kování.

Vezme-li v potaz hmotnosti obou kování dostaneme u hlavního kování nárůst hmotnosti $0,108\text{kg}$ při použití kování vyrobeného z FML. U pomocného kování pak dojde k nárůstu hmotnosti o $0,323\text{kg}$. To nejsou vzhledem ke komplexnosti výroby ideální výsledky. Je však nutné vzít v potaz to, že použijeme-li kování vyrobené z FML, tak si tím

usnadníme a zefektivníme napojení na kompozitní zbytek křídla. To může přinést dodatečnou úsporu hmotnosti a vyvážit nedostatky samotného kování. Zároveň se jedná pouze o prvotní výpočty, je pravděpodobné, že by se po experimentálním ověření vlastností daného FML dala provést značná optimalizace kování.

Vzhledem úpravám páté a šesté kapitoly krátce před odevzdáním nebyla provedena jazyková korektura těchto kapitol. Za překlepy a chyby v textu se autor omlouvá.

Použitá literatura a zdroje

- [1] CAMANHO, Pedro P. Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-1845699901.
- [2] BAKER, A. A. a Murray L. SCOTT. Composite materials for aircraft structures. Third edition. Reston, Virginia: AIAA/American Institute of Aeronautics and Astronautics, [2016]. ISBN 978-1624103261.
- [3] SLAVÍK, Svatomír. Stavba letadel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1671-4.
- [4] MERTL, Vlastimil. Konstrukce a projektování letadel. Brno: PC-DIR Real, 2000. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1789-7.
- [5] ŠPUNDA, Jaromír. Pevnost leteckých konstrukcí. Druhé doplněné. VTA AZ, 1955.
- [6] ALDERLIESTEN, René. *Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Solid Mechanics and Its Applications. ISBN 978-3-319-56226-1.
- [7] *Fibre Metal Laminates An Introduction*. Netherlands: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2001. ISBN 978-1-4020-0391-2.
- [8] MOLITOR, P., V. BARRON a T. YOUNG. Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2001, **21**(2), 129-136. DOI: 10.1016/S0143-7496(00)00044-0. ISSN 01437496. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749600000440>
- [9] ČTVERÁK, J., V. MERTL a A. PÍŠTĚK. *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*. 1. VUT Brno, 1997.
- [10] SVĚTLÍK, MARTIN. *VÝPOČET ZATÍŽENÍ A PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA A OCASNÍCH PLOCH LETOUNU MERMAID*. Brno, 2008. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT. Vedoucí práce Ing., IVO JEBÁČEK, Ph.D.
- [11] *Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures*. Londýn: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. ISBN 978-3-642-29189-0.
- [12] *300 DATA SHEET* [online]. , 2 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.fibermaxcomposites.com/shop/datasheets/T300.pdf>