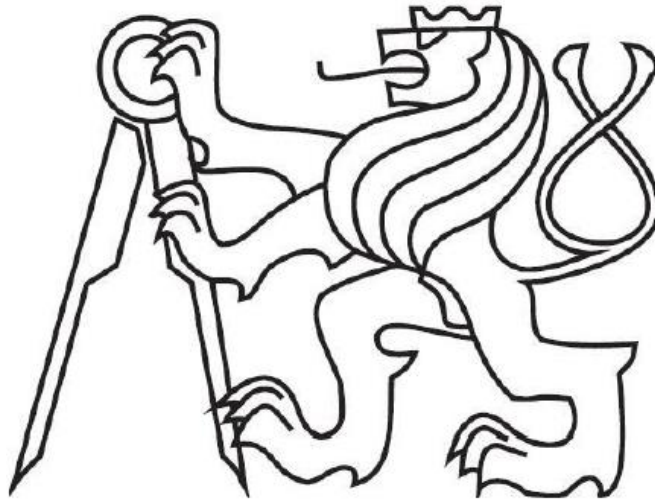


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Odbor pružnosti a pevnosti



Diplomová práce

Návrh a analýza hřídelí pro převodovku elektromobilu

Master's thesis

Design and Analysis of Shafts for Electric Car Gearbox

Bc. Bohumil Kropík

Vedoucí práce: Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.

Studijní program: Strojní inženýrství

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Bohumil Kropík
Název bakalářské práce:	Návrh a analýza hřídelí pro převodovku elektromobilu
Title:	Design and Analysis of Shafts for Electric Car Gearbox
Rok:	2018
Studijní program:	Strojní inženýrství
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Ústav:	Mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí práce:	Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 94 Počet obrázků: 106 Počet tabulek: 45 Počet příloh: 5
Klíčová slova:	Kompozitní hřídel, lepené spoje, MKP, experiment
Keywords:	Composite shaft, bonded joints, FEM, experiment
Abstrakt:	Tato diplomová práce se zaměřuje na problémy spojené s navrhováním kompozitních dílů. Problematika je ukázána na specifickém problému hřídele převodovky elektromobilu. Nejprve byla provedena analýza kovové výstupní hřídele a následně analýza odlehčené varianty s uhlíkovými vlákny. Součástí je rešerše výrobních technologií kompozitních hřídelí a možností spojování kovů s kompozity. Část práce se zaměřuje na testování lepených spojů a jejich MKP analýzu.
Abstract:	This diploma thesis focuses on problems in designing composite parts. The problem is shown in the specific example of a shaft for electric car gearbox. An analysis of steel output shaft of electric car gearbox was done first and then analysis of alternative composite shaft was done. Research on problems of joining metal and composite and research of composite shaft production technologies is followed by. A Part of the thesis focuses also on the testing of bonded joints and FEM analysis of them.

Poděkování

Rád bych poděkoval panu **Ing. Bc. Zdeňku Padovcovi, Ph.D.**, vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné konzultace, poskytnuté rady a připomínky k mé práci a za vstřícný přístup při řešení všech komplikací, které se v průběhu tvorby vyskytly. Dále bych chtěl poděkovat paní **Ing. Tereze Závřelové** za odborné konzultace a pomoc při řešení problémů spojených s řešením této práce.

Velké poděkování si též zaslouží moje **rodina** za neustálou podporu při mém studiu.

Prohlášení

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

V Praze dne 10. srpna 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kropík** Jméno: **Bohumil** Osobní číslo: **396982**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a analýza hřídelí pro převodovku elektromobilu

Název diplomové práce anglicky:

Design and Analysis of Shafts for Electric Car Gearbox

Pokyny pro vypracování:

- proveďte napětově/deformační analýzu současného kovového řešení
- proveďte rešerši možných výrobních technologií kompozitních hřídelí a možných spojení náboj/hřídel pro daný typ konstrukce
- proveďte smykovou zkoušku lepených spojů pro dané materiálové kombinace a vyhodnotte smykové pevnosti a smykové moduly jednotlivých lepidel
- proveďte simulaci smykové zkoušky pomocí MKP pro dané materiálové kombinace
- proveďte napětově deformační analýzu kompozitních variant hřídele

Seznam doporučené literatury:

- LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 9788070436899.
- ČSN EN 1465 Lepidla ? Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav
- <http://drone.fsfd.cvut.cz/mcm.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **17.08.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
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.

30/4/2018
Datum převzetí zadání

[Podpis]
Podpis studenta

Obsah

Použité značení.....	8
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek	14
Úvod	15
1. Výrobní technologie kompozitních hřídelí	16
1.1. Pultruze [1], [2].....	16
1.2. Navíjení předimpregnovaných pásek [2].....	18
1.3. Umísťování vláken [2].....	19
1.4. Navíjení vláken [1], [2].....	20
2. Možnosti spojování kompozitních materiálů	24
2.1. Mechanické spoje.....	24
2.2. Lisované spoje	24
2.3. Integrované spoje.....	25
2.4. Lepené spoje.....	27
2.5. Hybridní spoje.....	28
3. Konstrukce navíjených trubek [4].....	30
4. Analýza stávajícího řešení.....	33
4.1. Základní dělení převodovek.....	33
4.2. Kompozitní převodovky.....	33
4.3. Zkoumaná převodovka	34
4.4. Výstupní hřídel.....	35
4.5. MKP analýza výstupní hřídele.....	36
5. Tahová zkouška plochých lepených vzorků	41
5.1. Detailní popis zkoušek jednotlivých materiálových kombinací.....	42
5.1.1. Acralock SA 10 – 15	43
5.2. Srovnání výsledků všech lepidel	52
6. Tahová zkouška trubkových lepených vzorků	54
6.1. Acralock SA 10 - 35	55
6.1.1. Varianta s drážkou	55
6.1.2. Varianta bez drážky	57
6.2. Celkové vyhodnocení.....	58
7. MKP simulace tahové zkoušky plochých vzorků.....	60
7.1. Teorie výpočtu	60
7.2. Parametry lepidel	64

7.3.	Výsledky výpočtu.....	64
8.	MKP simulace tahové zkoušky trubkových vzorků	66
8.1.	Teorie výpočtu.....	66
8.2.	Parametry lepidel	69
8.3.	Výsledky výpočtu.....	69
9.	Návrh a optimalizace kompozitní varianty.....	72
9.1.	Navrhované geometrie a skladba	72
9.2.	Analýza navrhované hřídele pomocí MKP	74
9.3.	Reálné zatížení zkušebního stání.....	80
9.4.	Optimalizace hřídele	86
9.4.1.	Výpočet bez ocelového trnu	86
9.4.2.	Optimalizace skladby vláken	87
9.5.	Shrnutí výsledků	89
	Závěr.....	91
	Bibliografie	92
	Příloha A – Vyhodnocení tahové zkoušky plochých lepených spojů.....	95
	Příloha B – Vyhodnocení tahové zkoušky trubkových lepených spojů	142
	Příloha C – Závislost síla/posuv ze simulace plochých vzorků.....	148
	Příloha D – Závislost síla/posuv ze simulace trubkových vzorků	152
	Příloha E – Podrobnější zobrazení částí navrhované hřídele	156

Použité značení

A, B, C, D	[-]	Označení významné oblasti hřídele
A	$[mm^2]$	Plocha lepeného spoje
\mathbf{A}	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	Matice tahové tuhosti
\mathbf{B}	[N]	Matice vazební tuhosti
\mathbf{D}	$[N \cdot mm]$	Matice ohybové tuhosti
d, d_a, d_b, d_f, d_w	$[mm]$	Průměr roztečné, hlavové, základní, patní a valivé kružnice ozubeného kola
E	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu
E_x	$[MPa]$	Efektivní modul pružnosti v tahu ve směru osy x
E_L	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu v podélném směru vláken ($L = „Longitudinal“$)
E_T	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu v příčném směru vláken ($T = „Transverse“$)
F	[N]	Silové zatížení
F_1	[N]	Silové zatížení vzorku číslo 1 (obdobně pro vzorky 2-7)
ΔF	[N]	Rozdíl sil lineární části grafu
F_{max}	[N]	Maximální síla při zatěžování vzorku
F_a, F_r, F_t	[N]	Axiální, radiální a tečná složka sil
G	$[MPa]$	Modul pružnosti ve smyku
G_{xy}	$[MPa]$	Modul pružnosti ve smyku v rovině x, y
G_{LT}	$[MPa]$	Modul pružnosti ve smyku v rovině L, T
G_S, G_T	$[mm]$	Součet smykových, respektive všech relativních normálových posuvů
G_n, G_S, G_t	$[mm]$	Normálový, respektive dva smykové normálové posuvy
G^C	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	Disipovaná energie vlivem porušení
G_n^C, G_S^C, G_t^C	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	Maximální hodnoty energie potřebné k porušení v normálovém, respektive dvou smykových směrech.
h	$[mm]$	Tloušťka jednotlivé vrstvy laminátu
h_k	$[mm]$	Tloušťka k -té vrstvy laminátu
i	[-]	Převodový poměr
\mathbf{k}	[-]	Vektor křivosti střední vrstvy laminátu

k_x, k_y	[-]	Křivost ve směru osy x, y
k_{xy}	[-]	Křivost v rovině x, y
M	[Kg]	Hmotnost kompozitu
M_k	[N·mm]	Krouticí moment
M_v	[N·mm]	Výstupní krouticí moment
M_{vs}	[N·mm]	Vstupní krouticí moment
M_a, M_t	[N·mm]	Moment určený z axiální, respektive tečné složky sil
\mathbf{M}	[N]	Matice momentů vztažených na jednotku délky
n	[-]	Počet vrstev laminátu
\mathbf{N}	$\left[\frac{N}{mm} \right]$	Matice výslednic sil na jednotku délky
N_x, N_y	$\left[\frac{N}{mm} \right]$	Výsledná působící síla ve směru x, y
N_{xy}	$\left[\frac{N}{mm} \right]$	Výsledná působící síla v rovině x, y
$O(x, y, z)$	[-]	Souřadný systém s osami x, y, z
\mathbf{Q}	[MPa]	Matice mimoosové tuhosti
Q_{ij}	[-]	i -tý řádek a j -tý sloupec matice \mathbf{Q} , <i>analogicky platí pro $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$</i>
t_k	[mm]	Tloušťka k -té vrstvy laminátu
t_n, t_s, t_t	[MPa]	Okamžité hodnoty složek vektoru nominálního tahového napětí
$t_n^\circ, t_s^\circ, t_t^\circ$	[MPa]	Maximální hodnoty složek vektoru nominálního tahového napětí
u	[mm]	Posuv při tahové zkoušce
u_1	[mm]	Posuv vzorku číslo 1 (obdobně pro vzorky 2-7)
Δu	[mm]	Rozdíl posuvů lineární části grafu
x, y, z	[-]	Osy souřadného systému
z	[mm]	Hodnota posuvu ve směru osy z
z_1, z_2	[-]	Počet zubů pastorku, respektive kola
α	[°]	Úhel záběru ozubeného kola
α_L, α_T	[K ⁻¹]	Podélná, respektive příčná teplotní roztažnost materiálu
β	[°]	Úhel sklonu zubů ozubeného kola
γ_{xy}	[-]	Zkos v rovině x, y
γ_{xy}°	[-]	Zkos střední vrstvy v rovině x, y

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$	[-]	Deformace ve směru osy x, y
$\overset{\circ}{\varepsilon}_{xx}, \overset{\circ}{\varepsilon}_{yy}$	[-]	Deformace střední vrstvy ve směru osy x, y
$\overset{\circ}{\varepsilon}_m$	[-]	Vektor deformace střední roviny laminátu
ε'	[-]	Vektor deformací v natočeném souřadném systému $O(x', y', z')$
η	[-]	Materiálový parametr pro BK kritérium
θ	[°]	Úhel směru vláken
μ_p	[-]	Účinnost převodu
ν	[-]	Poissonovo číslo
ν_{xy}	[-]	Poissonovo číslo v rovině x, y
ν_{LT}, ν_{TL}	[-]	Poissonovo číslo při zatěžování ve směru L a kontrakci ve směru T , respektive naopak
σ	[MPa]	Normálové napětí
σ'	[MPa]	Vektor normálových napětí v natočeném s. s. $O(x', y', z')$
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	[MPa]	Napětí ve směru osy x, y, z
τ	[MPa]	Smykové napětí, Smyková pevnost
τ^I, τ^{II}	[MPa]	První, respektive druhý smykový zatěžovací mód

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Schéma uzavřené pultruzní linky [1].....	16
Obrázek 1.2: Schéma stroje na navíjení předimpregnovaných pásek [2].....	18
Obrázek 1.3: Schéma nanášení pásek na stroji [2].....	19
Obrázek 1.4: Schéma jednoduchého navíjecího stroje [1]	21
Obrázek 1.5: Porovnání metod navíjení vláken [3].....	23
Obrázek 2.1: Přenos sil do laminátu [4]	24
Obrázek 2.2: T-IGEL od firmy Taufelberger [7].....	25
Obrázek 2.3: Skladba vláken okolo pinů [8]	26
Obrázek 2.4: Spoj s omotáním vláken [9]	26
Obrázek 2.5: Zobrazení tvarů pinů [10].....	26
Obrázek 2.6: Porušené vzorky s různým tvarem pinu [10]	27
Obrázek 2.7: Struktura lepeného spoje [5]	28
Obrázek 2.8: Hybridní spoj s piny [13]	29
Obrázek 2.9: Hybridní spoj s podlepením [14].....	29
Obrázek 3.1: Příklad vinuté trubky s vyjmutým elementem [4]	30
Obrázek 3.2: Skladba jednotlivých vrstev laminátu [4].....	31
Obrázek 4.1: Kompozitní skříň převodovky závodního vozu Audi [15].....	33
Obrázek 4.2: Kompozitní skříň převodovky vozu Formule 1 [15]	34
Obrázek 4.3: Schéma technologie VARTM [15]	34
Obrázek 4.4: Schéma technologie RTM [15]	34
Obrázek 4.5: Model horního dílu skříně převodovky [16]	35
Obrázek 4.6: Výstupní hřídel původní převodovky [16].....	35
Obrázek 4.7: Zjednodušená varianta výstupní hřídele pro výpočet MKP	35
Obrázek 4.8: Oblasti působení sil a reakcí na výstupní hřídeli.....	36
Obrázek 4.9: Zobrazení silového zatížení hřídele.....	36
Obrázek 4.10: Zobrazení momentového zatížení hřídele	37
Obrázek 4.11: Zobrazení řezu hřídele vnitřním šestihranem.....	37
Obrázek 4.12: Běžně používané skupiny elementů [18].....	38
Obrázek 4.13: Lineární prvek sítě C3D8 [18].....	38
Obrázek 4.14: Zobrazení vytvořené sítě na hřídeli	39
Obrázek 4.15: Průhyb zatíženého ocelového hřídele v ose x	39
Obrázek 4.16: Natočení zatíženého ocelového hřídele kolem osy y	40
Obrázek 5.1: Rozměr vzorků dle ČSN EN 1465 [19]	41
Obrázek 5.2: Základní typy poruch lepeného spoje [22]	42
Obrázek 5.3: Trhací stroj TIRA 2300	42
Obrázek 5.4: Ploché vzorky upnuté v čelistech stroje.....	43
Obrázek 5.5: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků.....	44
Obrázek 5.6: Porušené uhlíkové vzorky	44
Obrázek 5.7: Průběh zatěžování ocelových vzorků.....	45
Obrázek 5.8: Porušené ocelové vzorky	46
Obrázek 5.9: Průběh zatěžování hliníkových vzorků.....	47
Obrázek 5.10: Porušené hliníkové vzorky	47
Obrázek 5.11: Průběh zatěžování nerezových vzorků	48
Obrázek 5.12: Porušené nerezové vzorky	48
Obrázek 5.13: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků	49
Obrázek 5.14: Porušené ertacetalové vzorky	50

Obrázek 5.15: Průběh zatěžování vzorků z PVC	50
Obrázek 5.16: Porušené vzorky z PVC	51
Obrázek 5.17: Přehled smykových pevností pro Acralock SA 10 – 15.....	52
Obrázek 5.18: Prostorové porovnání vypočtených smykových pevností bez odchylek.....	53
Obrázek 6.1: Rozměry ocelové koncovky pro trubkové lepené spoje [24]	54
Obrázek 6.2: Přehled zkoušených trubkových vzorků.....	54
Obrázek 6.3: Trubkový vzorek upnutý v čelistech	55
Obrázek 6.4: Průběh zatěžování vzorků s drážkou	56
Obrázek 6.5: Porušené vzorky s drážkou.....	56
Obrázek 6.6: Detailní pohled na porušený vzorek.....	57
Obrázek 6.7: Průběh zatěžování hladkých vzorků	57
Obrázek 6.8: Porušené hladké vzorky	58
Obrázek 6.9: Detailní pohled na porušený vzorek.....	58
Obrázek 6.10: Porovnání výsledných smykových pevností zkoušených provedení vzorků	59
Obrázek 7.1: Typická křivka modelu "traction/separation" [18].....	61
Obrázek 7.2: Zobrazení vazby mezi plochami adherendů a lepidlem	62
Obrázek 7.3: Zobrazení zatížení a okrajových podmínek modelovaného lepeného spoje	62
Obrázek 7.4: Zobrazení sítě modelu vzorku	62
Obrázek 7.5: Kontinuální a konvenční varianta prvků skupiny "shell" [18]	63
Obrázek 7.6: Prostorová reprezentace kohezivního elementu [18]	63
Obrázek 7.7: Režimy zatěžování kohezivních prvků [18].....	64
Obrázek 7.8: Porovnání hodnot z tahové zkoušky a MKP	65
Obrázek 8.1: Ocelová koncovka pro výpočet MKP	66
Obrázek 8.2: Kompozitní trubka pro analýzu MKP.....	66
Obrázek 8.3: Zobrazení řezu modelovaným vzorkem	67
Obrázek 8.4: Zobrazení vazeb výpočtového modelu	67
Obrázek 8.5: Zobrazení zatěžování výpočtového modelu.....	68
Obrázek 8.6: Síť na výpočtovém modelu.....	68
Obrázek 8.7: Možnosti orientace kladení elementů na sebe [18]	69
Obrázek 8.8: Porovnání výsledků s tahovou zkouškou	70
Obrázek 8.9: Porovnání výsledků upraveného modelu s tahovou zkouškou.....	71
Obrázek 9.1: Navrhovaná hybridní hřídel	72
Obrázek 9.2: Ocelová koncovka	72
Obrázek 9.3: Ocelový kroužek pod ložisko	72
Obrázek 9.4: Ocelový trn	73
Obrázek 9.5: Ocelový věnec	73
Obrázek 9.6: Kompozitní hřídel	73
Obrázek 9.7: Upravený kompozitní hřídel.....	74
Obrázek 9.8: Oblasti přiřazení jednotlivých vrstev modelu	74
Obrázek 9.9: Detailní pohled na jednotlivé oblasti	75
Obrázek 9.10: Jednotlivé oblasti zatěžovaného hřídele.....	76
Obrázek 9.11: Silové zatížení hřídele.....	76
Obrázek 9.12: Momentové zatížení hřídele	77
Obrázek 9.13: Zobrazení vazeb mezi částmi modelu	77
Obrázek 9.14: Síť na výpočtovém modelu.....	78
Obrázek 9.15: Zobrazení prvku C3D10 [18].....	79
Obrázek 9.16: Hřídel zatížená silou	79
Obrázek 9.17: Hřídel zatížená momentem.....	80

Obrázek 9.18: Schéma ozubeného kola [25].....	80
Obrázek 9.19: Schéma ozubeného soukolí v záběru [25]	81
Obrázek 9.20: Silový rozklad na ozubeném soukolí [27].....	82
Obrázek 9.21: Pohled jednotlivých rovin silového rozkladu [27].....	82
Obrázek 9.22: Průhyb při rozložení na hlavové kružnici	84
Obrázek 9.23: Průhyb při rozložení na patní kružnici	84
Obrázek 9.24: Natočení při rozložení na hlavové kružnici	85
Obrázek 9.25: Natočení při rozložení na patní kružnici	85
Obrázek 9.26: Natočení modelu bez trnu	86
Obrázek 9.27: Průhyb modelu bez trnu	87
Obrázek 9.28: Průhyb optimalizované skladby	89
Obrázek 9.29: Natočení optimalizované skladby	89

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Tabulka výsledků jednotlivých zatížení ocelové hřídele	40
Tabulka 5.1: Počty vzorků, kombinace materiálů a lepidel	41
Tabulka 5.2: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	44
Tabulka 5.3: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	45
Tabulka 5.4: Hodnoty odečtené z grafu včetně rozdílů.....	46
Tabulka 5.5: Hodnoty smykového modulu G dle jednotlivých vzorků	46
Tabulka 5.6: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	47
Tabulka 5.7: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	48
Tabulka 5.8: Hodnoty odečtené z grafu včetně rozdílů.....	49
Tabulka 5.9: Hodnoty smykového modulu G jednotlivých vzorků	49
Tabulka 5.10: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	49
Tabulka 5.11: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků	50
Tabulka 5.12: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Acralock SA 10 – 15	51
Tabulka 5.13: Výsledné hodnoty smykových modulů G.....	52
Tabulka 5.14: Kompletní přehled vypočtených smykových pevností τ [MPa] zkoušených lepidel.....	52
Tabulka 5.15: Číselné označení jednotlivých lepidel v prostorovém grafu	53
Tabulka 6.1: Přehled vybraných lepidel a počtu vzorků.....	54
Tabulka 6.2: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení drážkovaných vzorků	56
Tabulka 6.3: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení hladkých vzorků	57
Tabulka 6.4: Souhrn smykových pevností τ [MPa] zkoušených lepidel	59
Tabulka 7.1: Parametry porušování přiřazené modelu	61
Tabulka 7.2: Smykové a normálové parametry lepidel	61
Tabulka 7.3: Parametry lepidel použité pro výpočet	64
Tabulka 7.4: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot.....	65
Tabulka 8.1: Skladba kompozitní části modelu	67
Tabulka 8.2: Parametry lepidel pro analýzu trubkových vzorků	69
Tabulka 8.3: Výsledky analýzy MKP trubkových vzorků	70
Tabulka 8.4: Upravené parametry lepidel	70
Tabulka 8.5: Výsledky upravené analýzy MKP trubkových vzorků.....	70
Tabulka 9.1: Navrhovaná skladba vrstev kompozitní trubky	73
Tabulka 9.2: Materiálové vlastnosti jednotlivých vláken	74
Tabulka 9.3: Rozdělení dodané skladby pro výpočet MKP.....	75
Tabulka 9.4: Výsledné hodnoty zatížení	80
Tabulka 9.5: Dohledané parametry ozubeného převodu [26].....	81
Tabulka 9.6: Vypočtené parametry ozubeného převodu.....	81
Tabulka 9.7: Hodnoty hlavové a patní kružnice ozubení na výstupní hřídeli [26].....	83
Tabulka 9.8: Vypočtené hodnoty sil	83
Tabulka 9.9: Hodnoty momentů zadaných do modelu	83
Tabulka 9.10: Hodnoty zatížení modelu	83
Tabulka 9.11: Hodnoty průhybu a natočení z analýzy reálného zatížení	85
Tabulka 9.12: Výsledné hodnoty průhybu a natočení bez trnu	87
Tabulka 9.13: Porovnání množství vláken dle orientace	87
Tabulka 9.14: Skladba optimalizovaného návrhu.....	88
Tabulka 9.15: Shrnutí výsledků optimalizované skladby vláken	89
Tabulka 9.16: Porovnání výsledků z analýz MKP výstupní hřídele	90

Úvod

Cílem této práce je analyzovat zatížení současné ocelové výstupní hřídele převodovky elektromobilu a následně navrhnout odlehčenou alternativu, respektive analyzovat její vlastnosti. Jedná se o dílčí část projektu, ve kterém je analyzována celá převodovka elektromobilu, včetně skříně, a následně navržena odlehčená varianta dosahující stejných, nebo ještě lepších parametrů. Vzhledem k rozmachu kompozitních materiálů v posledních letech, se tedy jejich použití jeví vhodnou cestou, jelikož libovolná možnost skladby materiálu umožňuje maximální využití jeho vlastností, přičemž jsme ale stále limitováni technologiemi a možnostmi výroby. Z kompozitních materiálů se jako vhodná aplikace jeví uhlíková vlákna, jelikož dosahují nejlepších vlastností v oblastech hmotnosti, pevnosti a tuhosti. Jejich variabilita v určitých mezích umožňuje tvorbu takového materiálu, který bude ideální pro dané zatížení. V neposlední řadě také kompozitní díly umožňují vkládání tlumících vrstev, což může vést k lepším tlumícím vlastnostem než u jiných materiálů. Výskyt kompozitních částí v automobilovém průmyslu se tak s postupem doby stále zvětšuje, je tedy aktuální i zakomponování tohoto trendu do pohyblivých součástí, jako jsou například hřídele v převodovce. Tato aplikace může potenciálně snížit hlučnost, výrazně zmenšit rozměry či hmotnost, což se následně bude odrážet ve větším komfortu zákazníka, nižší spotřebě, či větší spolehlivosti. Práce je rovněž zaměřena na možnosti výroby a spojování kompozitních součástí s dalšími materiály, zejména ocelí. Dělí se tedy na dva základní směry, kdy prvním je analýza původní a nové hřídele s kompozitními prvky, druhým je pak experimentální část, která zahrnuje tahové zkoušky lepidel s cílem zjištění smykové pevnosti a následná analýza MKP těchto tahových zkoušek. Výsledná odlehčená hřídel bude vyrobena firmou Compo Tech PLUS, spol. s r. o. a testována na zkušebním stání ČVUT. V prvních třech kapitolách je provedena rešerše týkající se kompozitních materiálů, tedy jejich vlastností, výrobních technologií a možností spojování se zaměřením zejména na oceli. Rešerše je zaměřena na problematiku spojenou se zadáním práce. Po rešeršní části následuje kapitola věnovaná analýze stávající výstupní hřídele převodovky, s krátkou rešeršní částí o hybridních a kompozitních převodovkách. V dalších dvou kapitolách je obsažena experimentální část práce, která zahrnuje tahové zkoušky lepených vzorků. Zkoušeny byly dvě varianty, a to ploché a následně trubkové lepené spoje. Následující dvě kapitoly jsou věnovány MKP analýze těchto zkoušek s cílem naladění na výpočet maximální síly a poslední kapitola je věnována analýze samotné odlehčené varianty výstupní hřídele převodovky a porovnání výsledků s původní ocelovou variantou. Všechny výpočty pomocí MKP byly provedeny v programu ABAQUS verze 6.14 – 5.



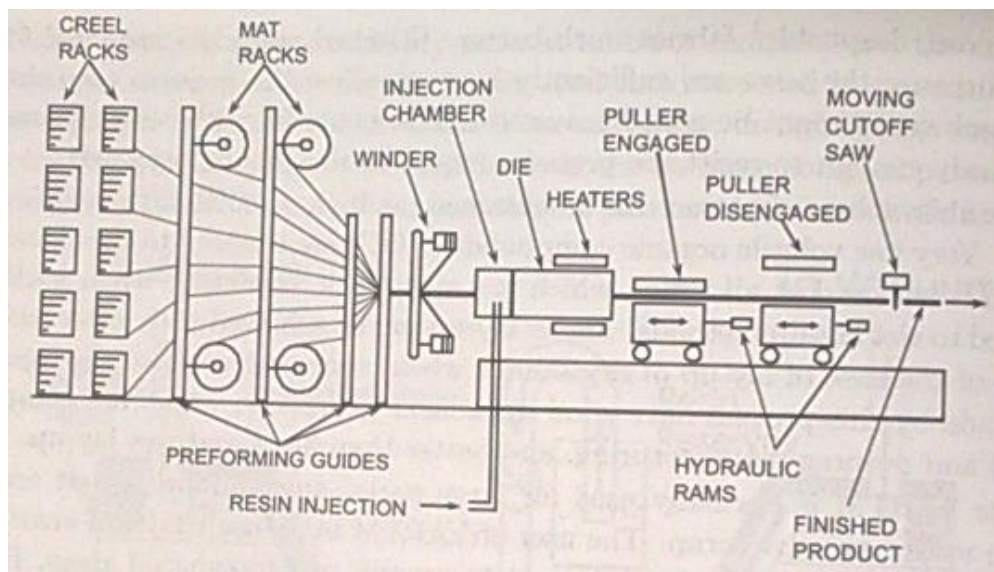
Obrobená kompozitní hřídel vyrobená navíjením vláken

1. Výrobní technologie kompozitních hřidelí

V této části se budeme věnovat technologiím výroby kompozitních hřidelí. Současné výrobní technologie lze rozdělit na procesy do dvou kategorií, na kontinuální a nekontinuální. Mezi kontinuální výrobní procesy bych umístil zejména pultruzi, kde dochází k nepřetržité výrobě jedné skladby. U ostatních metod dochází ke kontinuálnímu ukládání vlákna, ale pouze u jednotlivého vyráběného dílu. Všechny zde uvedené procesy jsou nicméně procesy kontinuálního tváření.

1.1. Pultruze [1], [2]

Pultruze je kontinuální výrobní proces, který je používán k výrobě neměnných průřezů jakékoli délky. Jedná se o nízkonákladový proces, jelikož není nutné využívat žádné další stroje. Lze ji dále dělit na dva základní výrobní způsoby, a to otevřený a uzavřený. Na obrázku 1.1 vidíme schéma jednoduché uzavřené pultruzní linky. Výztuže (Creel racks a Mat racks) jsou taženy skrze vedení (Preforming guides). Toto vedení uspořádává jednotlivé složky výztuže na příslušná místa v průřezu, dle návrhu. Jelikož jsou suché výztuže obvykle křehké a některé, jako například sklo či uhlík, abrasivní, jsou oka vedení keramická. Pultruzer může být také volitelně osazen navíječem (Winder), který přidává výztuž pod úhlem, nejčastěji 0° . Výztuž vstupuje suchá do vstřikovací komory (Injection chamber), kde je následně navlhčena pryskyřicí pod tlakem. Vstřikovací komora často bývá součástí trysky (Die), která dává výrobku finální tvar. V koncové části trysky, která je ohřívána (Heaters), dochází k vytvrzování, přičemž se kompozit smršťuje a odděluje od stěn trysky. Dochází tedy k jeho uvolnění a ven vystupuje hotová součást. Hotový výrobek je tažen ven (Puller engaged), dostatečně daleko aby se ochladil, až k pohyblivé řezací pile (Moving cutoff saw). Ta dělí materiál automaticky na požadovanou délku.



Obrázek 1.1: Schéma uzavřené pultruzní linky [1]

U otevřené varianty pultruze je princip podobný. Výztuže jsou nicméně taženy skrze lázeň pryskyřice před vstupem do trysky. Není zde tedy vstřikovací komora, což použitý stroj o něco zjednodušuje. U uzavřené varianty ale dochází k lepší impregnaci a lze vyrábět vyšší objemy vláken. Zároveň nedochází k tak výraznému odpařování těkavých látek jako z lázně. Uzavřená varianta také umožňuje snížit rychlost spuštění a vypnutí celého procesu, nadále umožňuje hlídat množství pryskyřice a případnou dávku či tlak v průběhu procesu upravovat, aby se zlepšilo provlhčení vrstev.

Před samotnou pultruzí je potřeba proces připravit. To zahrnuje zejména připravení požadovaného počtu cívek výztuže na stojan, sestavení trysky, nastavení vodících válečků, připravení pryskyřičné lázně, vytahovacího mechanismu a řezací pily. Počet vláken se stanoví na základě průřezu součásti, která se vyrábí a objemového podílu vláken ve skladbě. Výztuž je odvíjena, vedena skrze keramická oka a následně prochází pryskyřičnou lázní. Naimpregnovaná vlákna jsou tažena po trnu konstantní rychlostí skrze vyhřívanou trysku. Vytvzovací teplota a rychlost posuvu závisí zejména na vytvzovací charakteristice pryskyřice. Výrobek tak získává vnitřní tvar, daný tvarem trnu a vlastní tvar, daný skladbou výztuže.

Pultruzí lze vyrábět uzavřené profily, jako například trubky či čtvercové profily, ale i otevřené profily, jako například I - profil. Jednodušší výroba je nicméně u uzavřených profilů. U těch je výztuž před vstupem do trysky navíjena na trn. Ten je obvykle na začátku zúžený, aby usnadnil vstup materiálu. Linka může být dále vybavena predehřivači vláken, případně radiofrekvenčními ohřivači v případě silnějších vrstev či použití termoplastické matrice. Termoplasty mohou být přidávány přímo do výztuže ve formě vláken, případně zvlášť navíjeny jako předimpregnovaná výztuž, což ale přidává další operaci a zvyšuje náklady. Operační náklady pultruze jsou nízké. Hlavní náklady jsou v pořízení strojů, pochromovaných tryskách a návrhu a vyladění vodícího systému. Z těchto důvodů je pultruze ideální variantou pro vysokoobjemovou výrobu.

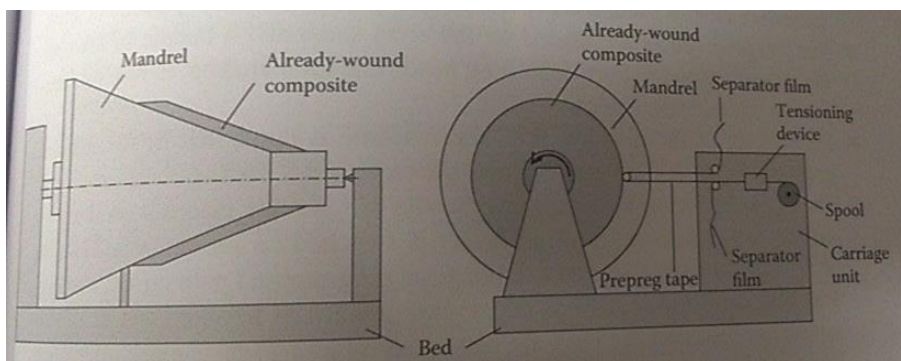
Nejčastěji se jako polotovary pro výrobu pultruzí používají rovingy a kontinuální pramencové rohože, které později zajišťují příčné síly a usnadňují výrobu. Lze ale využít i propracovanějších vláknitých forem, jako například šité obousměrné materiály. Mimo použití termoplastů a speciálních aplikací se nevyužívají žádná impregnovaná vlákna, což také snižuje náklady. Nejtypičtějšími materiály jsou skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. Jako pryskyřice se nejčastěji používá nenasycený polyester, ale v určitých případech se používají například epoxidové, fenolové či vinylesterové pryskyřice.

Pultruze je z hlediska výroby omezena zejména orientací vláken. Aby bylo možné vytahovat výrobek, musí být vždy použity rovingy, nebo podélná vlákna. V případě použití obousměrných rohoží se musí jednat o prošívané, aby se zabránilo deformaci vláken v blízkosti okrajů. Objem vláken málokdy překročí 45 %, což je nejběžnější hodnota. Během výroby se do materiálu přidávají plnidla, čímž se snižují náklady na pryskyřici a usnadňuje udržení konstantní hodnoty obsahu vláken. Plnidla mohou být také přidávána z důvodu zlepšení vlastností finálního výrobku. Minimální obsah tuhých látek, tedy plnidla a vláken je pro úspěšnou pultruzi přibližně 70 – 75 % hmotnosti. V případě nižšího podílu vláken je lze nahradit plnidly, nicméně pouze v určitých mezích. Souvislá tloušťka stěn pultrudovaného materiálu je omezena přibližně na 12 mm, z důvodu omezení vytvzování při použití standardních ohřivačů. Metoda je limitována i opačně, jelikož není možné vyrobit tenkostěnné profily. Došlo by k jejich poškození při protahování.

Metodou přímého vytvzování pomocí trysky mohou být vyrobeny pouze přímé, konstantní průřezy. Pomocí pultruze lze vyrábět i zakřivené tvary, jako například listové pružiny. Při krokovém vytvzování či pulformingu je výztuž tažena skrze impregnační lázeň. Následně je vytažena do formy, která se uzavře a v níž je následně vytvrzena. Jakmile je vytvrzení hotové, je vytažena z formy ven a do formy je vtažena nová výztuž. Tento výrobní proces umožňuje výrobu nerovnoměrných průřezů, nicméně je pomalý a je obtížné vyrábět velké průřezy. Samotná rychlost výroby pomocí pultruze se značně liší, dle použité technologie a typu průřezu. Zatímco průřez standardního nosníku lze pultruzí vyrábět rychlostí okolo 2 metrů za minutu, panelová výrobní linka jej dokáže vyrobit rychlostí okolo 20 m² za minutu.

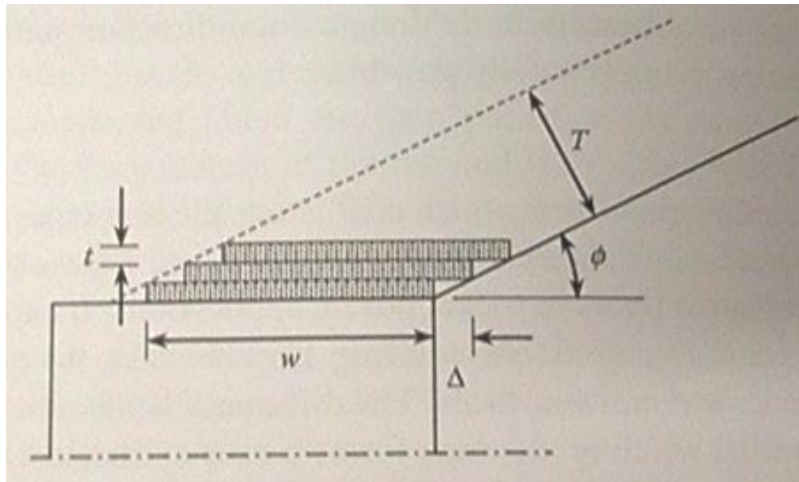
1.2. Navíjení předimpregnovaných pásek [2]

Navíjení předimpregnovaných pásek je proces, při kterém jsou navíjeny kontinuální předimpregnované pásy na rotující osově souměrné jádro – kuželové, tvarované či válcové. Komponenty vyrobené touto technologií se obvykle používají jako ablační vložky v raketových tryskách. Proces může být realizován jako paralelní vinutí, nebo vinutí pod úhlem. V obou případech jsou okraje tkaniny vystaveny vnitřnímu a vnějšímu povrchu. Rozdíl spočívá v orientaci pásek. Při paralelním vinutí tvoří pásy na jednu otáčku téměř válcový tvar, přičemž má středovou čáru podélného průřezu vláken rovnoběžnou s osou součásti. V případě vinutí pod úhlem, tvoří jedna otáčka téměř kuželovitý tvar a středová čára podélného průřezu výztuže je pod úhlem vůči středové ose součásti. Schématické znázornění procesu je uvedeno na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Schéma stroje na navíjení předimpregnovaných pásek [2]

Předimpregnované pásy jsou nejprve nařezány tak, aby dosáhly požadované šířky, a následně navinuty na cívky. Šířka je dána požadovanou tloušťkou dílu, úhlem poloviny meridiánu kuželového jádra a tloušťkou předimpregnovaných pásek, což je schématicky zobrazeno na obrázku 1.3. Následně je jádro nasazeno do stroje a cívka s předimpregnovanými páskami do podávací jednotky. Jádro je navoskováno. Páska je poté vedena skrze systém vodících válečků a napínací mechanismus. Spodní krycí fólie je na pásce odstraněna a páska je upevněna na menším kraji jádra. Stroj je následně spuštěn a pohybuje podávací jednotkou řízeným způsobem při otáčení jádra. Pro zpevnění navinutých pásek se používá válec, který odstraňuje vzduchové mezery. Po skončení navíjení je součást vytvrzena v autoklávu či hydroklávu, následně rozdělena či opracována a pak sejmuta z jádra. Nároky na výrobní stroje nejsou vysoké. Obecně se pro výrobu z předimpregnovaných pásek používají kovová jádra z oceli. Stroj pro navíjení předimpregnovaných pásek je v podstatě soustruh, který má podávací jednotku nesoucí cívku. Tato podávací jednotka má dále napínací mechanismus, systém válečků pro vedení pásek a válec, který usazuje pásy na jádro. Obvykle postačují pro tento proces dvouosé stroje, tedy s osou rotace jádra a osou posuvu podávací jednotky rovnoběžně s osou stroje. Pro navíjení pod úhlem musí být osa válce, který ukládá pásy na jádro také pod úhlem, což znamená, že podávací jednotka musí mít další možnosti orientace. Mezi běžné suroviny, které se používají při výrobě komponentů vinutých páskou, patří fenolové předimpregnované výztuže ze skleněné či uhlíkové tkaniny. Předimpregnované výztuže jsou z obou stran opatřeny podkladovými fóliemi a jsou skladovány v teplotách pod nulou. Tento proces je vhodný způsob pro výrobu osových dílů pro ablační a tepelné aplikace, má však omezenou aplikaci.



Obrázek 1.3: Schéma nanášení pásek na stroji [2]

1.3. Umístování vláken [2]

Jedná se o metodu s vysokým stupněm automatizace, která umožňuje výrobu od jednoduchých až po složité díly s přesným umístěním výztuh. Při výrobě jsou pramence z prepregů, nebo nařezané předimpregnované pásky taženy z cívek a ukládány pod lisovacím tlakem hlavy, která umísťuje vlákna podél předem určené dráhy na rotujícím jádru nebo stacionární formě. Proces ukládání vrstev je neustálý proces, při kterém dochází k položení, nařezání a znovu pokládání výztuh. Jednotlivé výztuhy jsou nařezány na různé délky podél dráhy vlákna. Proces se stále opakuje, dokud není celý povrch pokrytý a všechny vrstvy nejsou uloženy. Jedná se o účinný proces, vhodný pro složité díly a úspěšně se používá při výrobě letadel a jejich částí, jako jsou například trupové části, části motorů a podobně.

Proces umístování vláken je hodně podobný procesu navíjení vláken uvedeném v kapitole 1.4. Jádro je nejprve umístěno do stroje. V případě použití stacionární formy, se tato forma umísťuje na lůžko při nastavování umístování vláken. Cívky s výztuží jsou umístěny na cívečnice a svazek výztuže je tažen až k ukládací hlavě. Výztuž je udržována v požadovaném napětí pomocí napínacího zařízení. Následuje zadání geometrie jádra do stroje. Podávací hlava pak posouvá výztuž a ukládá jí na pracovní plochu jádra. Výztuž prochází skrz lokální ohřivač, který je zapnutý pro kontrolované ohřívání vláken, a ta jsou následně řízeně ukládána podél naprogramované dráhy. Podávací hlava má několik stupňů volnosti a její relativní pohyby zajišťují, že je výztuž uložena přesně a ve správné orientaci. Tlak válečku pomáhá udržet vhodnou tloušťku a šířku tažené výztuže a potřebné zhutnění. Jednotlivé výztuže jsou řezány, či přidávány tak, aby se udržela potřebná šířka podél dráhy. Po dokončení každého cyklu se podávací hlava vrací zpět do blízkosti výchozího bodu a začne další cyklus. Programování se provádí tak, aby bylo zajištěno, že každá další výztuž je umístěna přesně vedle předcházejícího pásma výztuže bez jakéhokoli překrytí či mezery. Proces se opakuje, dokud nedojde k pokrytí celé pracovní plochy a není dosaženo požadované tloušťky. Následně se součást vytvrzuje v peci či autoklávu. Po sundání z jádra, případně opracování, je součást hotová.

V závislosti na konfiguraci dílu se používají při této metodě pozitivní a negativní jádra, která jsou obvykle vyrobena z konstrukční oceli. Pracovní povrch by měl být dostatečně tuhý, aby nedošlo k odklonění pod tlakem zhutňovacího válce. Jádro musí mít prvky pro odkazování. Hlavním rysem zařízení pro ukládání vláken je hlava pro ukládání vláken a související elektronika, která ji ovládá. Zařízení má řadu současně řízených os pohybu, které jsou programovány pro přesné vedení výztuže po jádru. Dále má válec ukládající výztuž pod tlakem řezacího zařízení, které dělí jednotlivé

výztuže, ohřívací zařízení pro lokální ohřívání vláken v místě dodávky (z důvodu správného přilnutí vrstev), vodící válečky a pásový kolimátor. Dalšími typickými částmi jsou stojan pro držení cívek, vřeteník a koník.

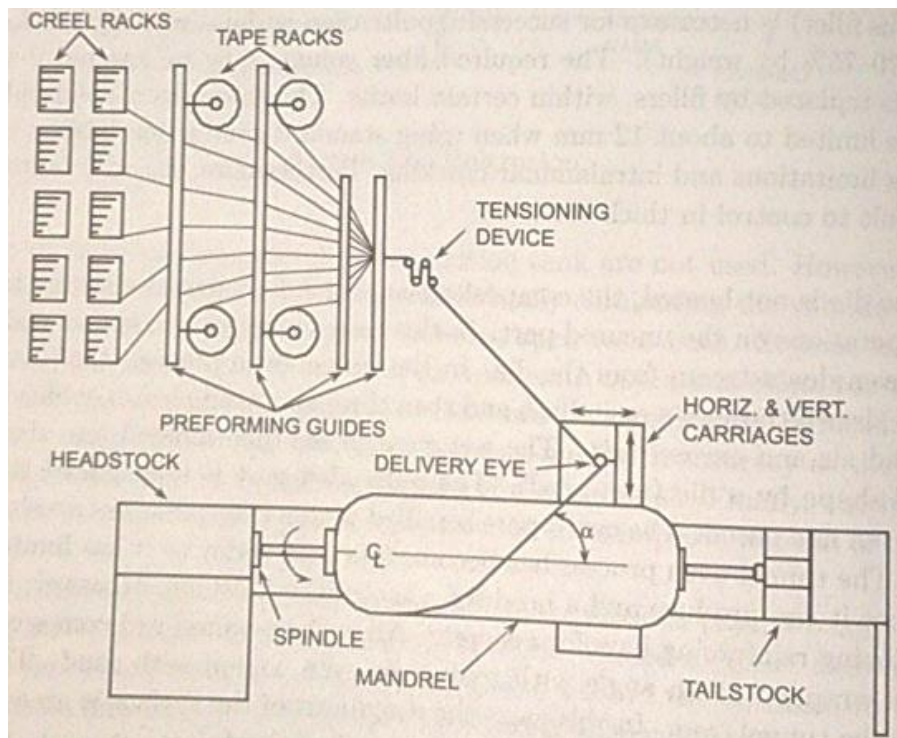
Při výrobě touto metodou lze používat předimpregnované výztuže ze skelných, uhlíkových či aramidových vláken. Typická šířka podávané výztuže je mezi 3 – 6 mm. Nařezané pásy se vyrábějí ze širších pásů prepregů dělením na požadovanou šířku a navinutím na cívku. Během ukládání na cívku se nařezané pásy opatří fólií, která je následně při ukládání na jádro odstraněna. Lepivost vláken je v tomto procesu důležitý parametr. Po odstranění fólií je výztuž podávána k umísťovací hlavě, přičemž nesmí vzájemně přilnout a zároveň přilnout k vodícím a zhutňovacím válcům. Po zhutnění zhutňovacím válcem a ohřátí by měla výztuž přilnout k podkladovému povrchu. Proto je při pokojové teplotě požadovaná téměř nulová lepidivost, zatímco při zvýšených teplotách vysoká.

Mezi hlavní výhody této metody patří zejména možnost výroby složitých komplexních součástí s přesnou orientací vláken. Materiál může být pokládán jak na konvexní, tak konkávní plochy. Celý proces může být vysoce automatizovaný, díky čemuž dosahuje vysoké spolehlivosti vyrobených dílů. Dochází k minimálnímu plýtvání materiálem, jelikož se jedná o efektivní proces. Metoda má i několik nevýhod, protože vyžaduje striktně použití předimpregnovaných výztuží. Klíčovým faktorem tedy může být dostupnost vhodných předimpregnovaných pásů. Celý proces je finančně nákladný, jelikož potřebuje umísťovací stroj a často i autokláv. Také je důležitá kvalifikovaná obsluha.

1.4. Navíjení vláken [1], [2]

Tato metoda je vhodná zejména pro výrobu rotačních dílů, jako například trubek, válců či kulových ploch. Používá se běžně například pro výrobu tlakových nádob, potrubí, či plášťů raketových motorů. Díky pokroku technologií v oblasti simulace a výpočetní techniky je možné touto metodou vyrábět i osově nesymetrické a jiné geometricky složité komponenty, jako například T-spojky, hnací hřídele či pouzdra.

Jednoduchá výrobní linka je zobrazena na obrázku 1.4, kde je také názorně vidět nanášený spirálovitý tvar. Výztuž (Creel racks a Tape racks) je tažena skrze vedení (Preforming guides) a následně skrze napínací zařízení (Tensioning device), které udržuje výztuž napnutou. Ta poté prochází skrze pryskyřičnou lázeň, kde dochází k nanesení matrice. Navlhčená výztuž je kontinuálně pokládána na rotující trn (Mandrel) skrze podávací oko (Delivery eye), které je umístěné na pohyblivém podavači (Horiz. & Vert. Carriages).



Obrázek 1.4: Schéma jednoduchého navíjecího stroje [1]

Před samotným navíjením je potřeba proces připravit. To zahrnuje zejména nanesení voskového leštidla na trn a následné umístění trnu do stroje. Přípravu pryskyřičné lázně, přípravu výztuže do stojanů, nastavení vodících kladek, hřebenu a čepelí. Následuje upevnění začátku výztuže na trn, které je nejčastěji prováděno lepením. Počátek výztuže nemusí být nutně uložen vhodně, což dokáže správný navíjecí program eliminovat a udržet tuto skladbu mimo navrhovanou součást. Dalším krokem je spuštění napínacího zařízení. Následuje nastavení čepelí, aby docházelo k optimálnímu provlhčení vláken. V některých případech může být pryskyřičná lázeň vyhřívána, aby se udržovala matrice v určitém rozmezí viskozity a docházelo k optimálnímu provlhčení vláken. Následuje nahrání navíjecího programu do stroje a jeho spuštění. Před samotným navíjením je nutné podávací oko posunout do počátečního bodu, odkud začíná navíjení. Rotací trnu je navíjena výztuž a v kombinaci s posuvem podavače určuje její dráhu, tedy orientaci vrstvy. Takto je vlákno umístováno podle programu. Po kompletaci jednoho obtočení, případně skupiny obtočení, zajišťuje navíjecí program, že je následná výztuž ukládána těsně u již umístěného vlákna s předem určenými překryvy. Celý proces se opakuje, dokud nedojde k uložení navrženého počtu vrstev a dosažení požadované tloušťky. Během procesu je přebytečná pryskyřice z navíjené součásti odstraňována měkkým ostřím. V závislosti na konstrukčních požadavcích lze prokládat navinuté vrstvy vláken tkaninami, přičemž sloučení zajišťují vodící válečky. Po ukončení navíjení je součást vyjmuta ze stroje a vytvrzena.

Vytvrzování součásti může probíhat mnoha způsoby, v závislosti zejména na použité matrici. Nejjednodušší a nejméně nákladnou variantou je vytvrzování za pokojové teploty, které může být prováděno přímo ve stroji, případně s přenesením trnu na stojan. U provlhčených návinů může být vhodné udržovat trn v rotaci, aby vlivem gravitace nedocházelo k nerovnoměrnému rozložení matrice v součásti. Většina vysokovýkonných epoxidových matric nicméně vyžaduje k vytvrzení vyšší než pokojovou teplotu. Vzhledem k tomu, že je vlákno navíjeno napjaté, dochází ke vzniku napětí ve skladbě součásti při ukládání a není proto nutné provádět vytvrzování pod tlakem, například v autoklávu. Při použití autoklávu naopak u určitých aplikací hrozí vznik vzduchových

duťin a nežádoucího napětí v součásti. Tento pohled je převzat z [2], nicméně v [1] je pohled opačný, kde se naopak uvádí, že může dojít ke vzniku vzduchových duťin v případě, že není vytvrzování provedeno pod tlakem či v autoklávu a je vytvrzováno za nízké teploty. Také může dojít k prohnutí vrstev při vytvrzování pod tlakem. V průběhu navíjecího procesu lze pak jednotlivé vrstvy rovnou vytvrzovat pomocí elektronového paprsku, nebo UV záření. Toto je vhodné zejména pro větší komponenty s velikou tloušťkou.

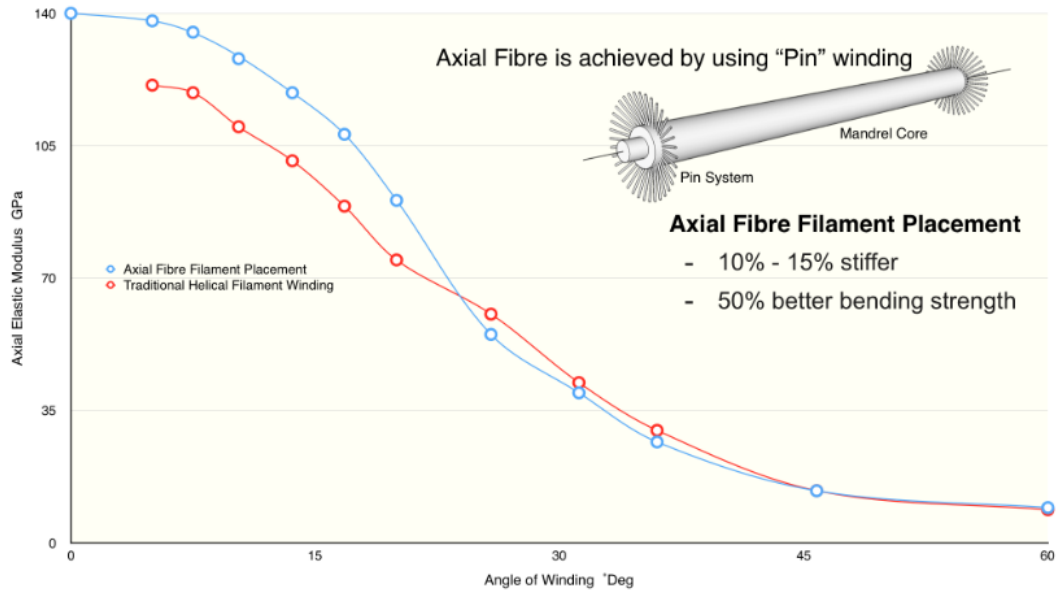
Impregnace výztuže se běžně provádí pomocí tří metod, v závislosti právě na použité výztuži. Rozdíl je tedy při použití suché výztuže, impregnované výztuže a impregnované přebalené výztuže. V případě použití suché výztuže dochází k důkladnému tažení skrze lázeň a následnému umístění na trn. Tento proces je poměrně jednoduchý a nenákladný, nicméně značně špinavý. Dochází při něm ke kompletnímu provlhčení výztuže, což znamená, že výsledný výrobek většinou nemá problém s výskytem prázdných míst. U této metody je však obtížné udržet shodný objemový podíl ve vyráběné součásti. Ve druhém a třetím případě jsou výztuže rovnou navíjeny na trn. Impregnovaná přebalená výztuž je suchá výztuž, která byla kontrolovaně impregnovaná matricí a následně znovu navinuta. Takto připravená výztuž může být použita pro navíjení okamžitě, nebo se uchovává v mrazu pro budoucí použití. Vlhčené předpřipravené výztuže jsou impregnované, přičemž je matrice v B-stavu. U obou dochází následně k přímému navinutí na trn bez použití lázně. Jedná se o nákladnější, ale čistší proces, přičemž může ale u některých aplikací docházet k tvorbě mezer, či nedostatečně provlhčených míst. Při navíjení vláken může v určitých případech docházet k nesouvislosti orientace výztuže, což je potřeba při návrhu součásti a výběru výrobní technologie zohlednit.

Můžeme rozlišit dvě provedení navíjecího stroje, a to spirálový a polární. Spirálové provedení je popsáno výše a prakticky se podobá soustruhu. Umožňuje navíjení skladeb od přibližně 5° až po 90°. Jednoduchý navíjecí stroj na obrázku 1.4 má 3 osy (3 možné pohyby), existují však stroje, které mají až 6 os. Ty pak mohou navíc nastavovat úhel a výkyv podávacího oka a umožňují vertikální podávání. Polární navíjecí stroje se používají k výrobě kulových nádob, nebo válcových nádob s poměrem délky k průměru menším než 2. Polární navíjecí stroj je mechanicky jednodušší než spirálový, díky čemuž je méně nákladný a rychlejší. Skládá se z ramene, které se otáčí okolo trnu a dodává výztuž. Trn se pohybuje pomalu, tak aby rameno pokrylo celý povrch trnu.

Pro usnadnění odstranění hotové součásti z trnu bylo vyvinuto několik typů trnů. Nejjednodušší alternativou pro výrobu tlakových nádob je použití kovové vložky, která je ponechána jako součást hotového výrobku. Toto je někdy nutné i z důvodu předcházení úniku plynů difuzí z nádob skrze kompozitní stěnu. Skládané trny jsou vyrobeny z částí, které lze po vytvrzení demontovat. Jedná se ale o nejdražší trny, jsou proto použity zejména pro větší objemy produkce. Rozpustné pískové trny jsou vyrobeny z písku a polyvinylalkoholu. Směs je odlitá ve dvou či více částech, které po složení poskytnou požadovaný tvar. Jakmile je součást vytvrzena, trn je rozpuštěn vstříkovaním horké vody. Sádrové formy se používají pro prototypy, nebo malé objemy velkých částí, jelikož jsou náročné na práci a při jejich odstranění může dojít k poškození součásti.

Celkově se jedná o poměrně vysoce automatizovaný proces, s nízkou nutností zásahu během výroby, což přispívá ke snížení nákladů na výrobu. Omezený je zejména geometrickými možnostmi a orientací vláken. Produkce navíjení vláken se značně liší dle velikosti součásti a typu trnu, což určuje čas nutný k upnutí a vyjmutí součásti z navíjecího stroje. Pokud nebudeme instalaci uvažovat, tak je výrobní čas daný rychlostí posuvu, při které je výztuž dodávána na trn. Rychlost posuvu se liší dle použitých vláken, běžné hodnoty jsou 0,6 – 1,2 $\frac{m}{s}$ pro výrobu za použití impregnovaných vláken.

Na závěr stojí za zmínku provedení navíjecího stroje vyvinutého společností Compo Tech PLUS spol. s r. o., které oproti ostatním provedením navíjí skladbu od úhlu 0°, což umožňuje navinout větší objem vláken a tím dosáhnout vyšší pevnosti. Jedná se o metodu známou jako axiální kladení vláken, kdy dochází k navíjení vláken okolo pinů [3]. Schéma metody a porovnání oproti tradičnímu provedení navíjení je na obrázku 1.5, kde je zobrazena závislost axiálního elastického modulu na úhlu vinutí výztuže.

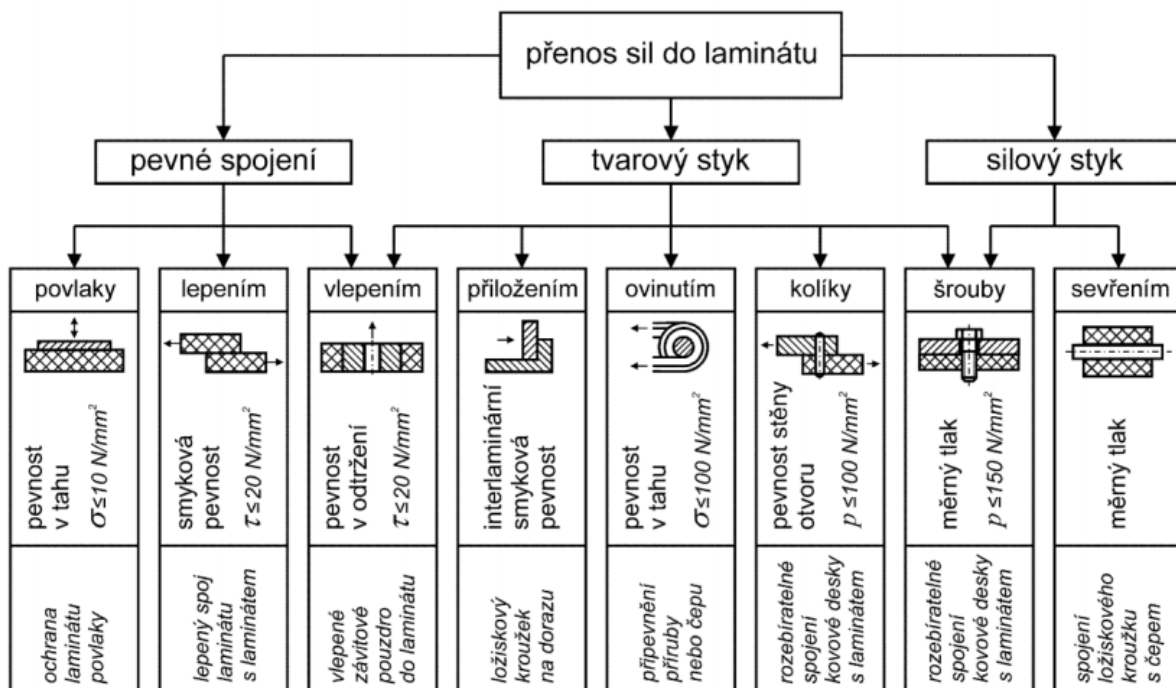


Obrázek 1.5: Porovnání metod navíjení vláken [3]

Informace v této kapitole byly převzaty z [1] a [2].

2. Možnosti spojování kompozitních materiálů

V následující části se budeme zabývat možnostmi spojování kompozitních dílů s kovy, zejména se zaměřením na uplatnění pro řešený problém. Obecně lze rozdělit přenos sil do laminátu dle obrázku 2.1. Spojení můžeme dělit do skupin na mechanické, chemické a tepelné. V případě kombinace jednotlivých variant se pak jedná o spoje hybridní.



Obrázek 2.1: Přenos sil do laminátu [4]

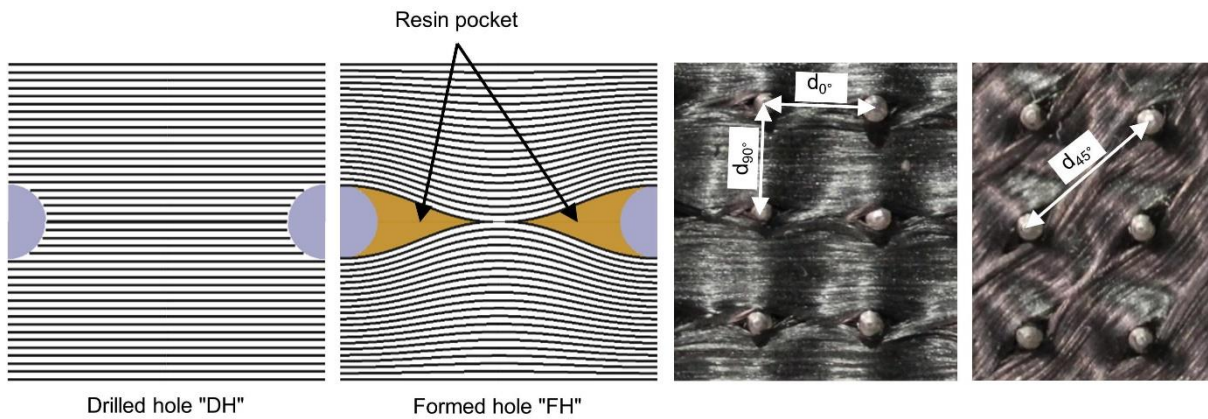
Podrobné komplexní zpracování možností spojení, vhodné k rozhodnutí, jaký typ spoje realizovat v závislosti na aplikaci pro kombinaci materiálů, zejména kovu a kompozitu, v literatuře chybí. Většina zdrojů se zaměřuje spíše na technické než ekonomické aspekty těchto spojů. Téměř vůbec nezvažují ekologické aspekty a analýzu životního cyklu výrobku či recyklaci [6]. Vzhledem k tomu si zde ukážeme spíše základní parametry, hlavní výhody a nevýhody k aplikaci pro naši problematiku.

2.1. Mechanické spoje

Zde se jedná o spojení zejména šroubovým, či nýtovým spojem. Pro obě varianty je nutné do kompozitu vytvořit otvor k uchycení. Tím dojde k narušení struktury kompozitního materiálu. Při výrobě otvoru může dojít k většímu poškození materiálu, například vychýlením vláken, pokud se otvor vrtá ještě před vytvrzováním. Následkem nutnosti otvoru v materiálu vznikají koncentrátoři napětí, což snižuje výslednou celkovou pevnost kompozitu. U nýtových spojů je navíc potřeba dodržet při výrobě několik pravidel, aby nedošlo při výrobě spoje k porušení kompozitního materiálu. Jedná se zejména o použití dostatečně rozměrné hlavy nýtu, absence rázu při výrobě a v obou případech i galvanickou kompatibilitu jednotlivých materiálů. Nevhodně na materiál působí také lokální kontaktní tlaky, což lze částečně eliminovat použitím podložek. Tím dojde k rozložení tlaku na větší plochu.

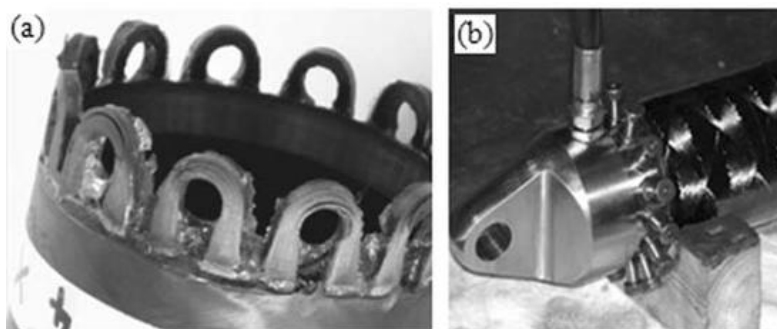
2.2. Lisované spoje

Tyto spoje jsou v kombinaci s kompozitními materiály používány ojediněle. Problematická je montáž i demontáž, vzhledem k tomu že mají oba materiály různé teplotní roztažnosti, přičemž u kompozitu je teplotní roztažnost výrazně nižší než u oceli. Výhodou je absence vrubů a cena spoje.



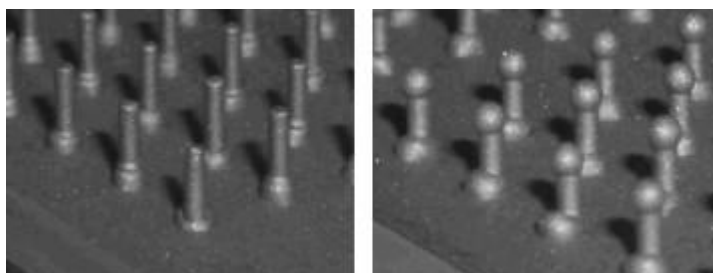
Obrázek 2.3: Skladba vláken okolo pinů [8]

Na obrázku 2.4 je zobrazeno spojení, kde jsou vlákna přímo obtočena okolo následného šroubového spojení. Obdobně lze aplikovat i integrovaný spoj s piny, kdy dochází k přímému obtočení vláken okolo pinů a nevzniká tak okolo nich volný prostor, jako na obrázku 2.3. Nevýhodou je zde zase výrazná změna orientace vlákna, která nemusí být výhodná pro dané zatěžování.



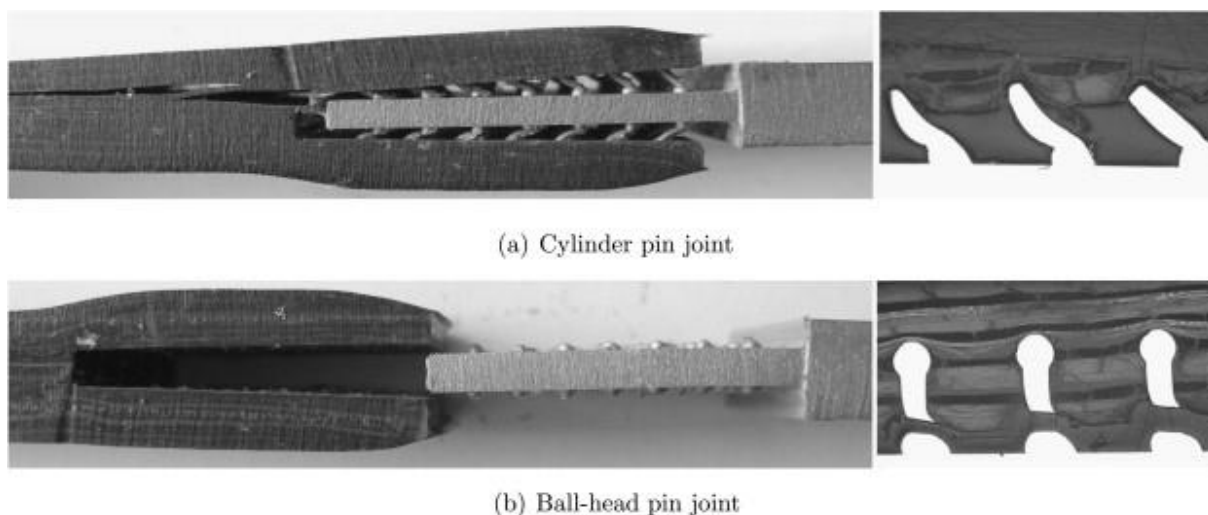
Obrázek 2.4: Spoj s omotáním vláken [9]

Pevnost spoje u integrovaného spoje pak lze ovlivnit také tvarem, či velikostí pinu. Na obrázku 2.5 lze vidět dvě porovnávané provedení pinů, přičemž v levé části obrázku jsou piny válcové. Na pravé části obrázku jsou válcové piny s kulatou hlavou.



Obrázek 2.5: Zobrazení tvarů pinů [10]

Při zatěžování vzorků pak dosahovaly lepších parametrů piny s kulatou hlavou [10]. Na obrázku 2.6 lze vidět, že válcové piny byly při zatěžování vytahovány z původních míst, oproti tomu u pinů s kulatou hlavou k tomuto nedocházelo v takové míře a k porušení spoje došlo až stříhem samotných pinů.



Obrázek 2.6: Porušené vzorky s různým tvarem pinu [10]

2.4. Lepené spoje

Jedná se o nejčastější v praxi používanou variantu spojování, zejména rotačních součástí. Výhodou je opět absence vrubů a malá náročnost na vybavení, které je nutné k realizaci spoje. Nevýhodou je nemožnost rozebrání spoje a vysoké nároky na strukturu a čistotu povrchu obou lepených materiálů – adherendů. Pevnost spoje závisí na vhodné volbě lepidla pro daný materiál, přičemž u kompozitních materiálů se jedná zejména o vlastnosti matrice. Lepený spoj se chová částečně adhezivně a částečně kohezivně. Kohezivní chování je soudržnost samotného lepidla, adhezivní lze dělit na mechanické, fyzikální a chemické, přičemž se jedná o vazby lepidla k povrchu materiálu. Pevnost lepeného spoje může být dále ovlivněna velkým množstvím parametrů, jako je například tloušťka lepené vrstvy, drsnost povrchu, délka lepeného spoje, tuhost adherendů, metodami nanášení lepidla, či okolními podmínkami. Zejména u kompozitních materiálů je třeba dbát zvýšené pozornosti přípravě lepeného spoje, aby nedocházelo k vytrhávání vláken z laminátu a tím snížení pevnosti spoje.

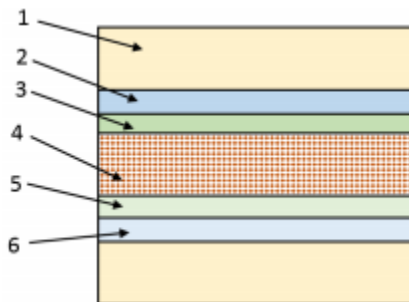
Mezi hlavní výhody lepených spojů patří rovnoměrné rozložení napětí, možnost spojování široké škály materiálů, možnost spojování velmi tenkých materiálů, utěsnění a izolace spoje, zlepšení útlumu chvění a hluku a nízká hmotnost spoje. Lepený spoj lze také podle požadavku realizovat jako elektricky, nebo tepelně vodivý, či nevodivý. Mezi hlavní nevýhody pak patří nízká odolnost vůči vysokým teplotám, špatná odolnost vůči dynamickému a normálovému namáhání v odlupu a nerozebíratelnost.

Jedním z primárních problémů při tvorbě lepeného spoje je zajištění předčasného odlepení spoje. K tomu je potřeba plně pochopit a porozumět módům porušení, aby bylo možné hledat kontrolní metody, které zlepší spolehlivost těchto spojů. Obecně, křehká lepidla s malou pevností vedou k poruše typu „cohesive failure“ (pozn. typy poruch jsou podrobněji rozebrány v kapitole 5), naopak vysokopevnostní houževnatá lepidla, nebo větší tloušťky lepidel vedou k delaminaci kompozitních materiálů, zatímco vysoký modul CFRP materiálů zřejmě vyvolává delaminaci, nebo prasknutí. Zatěžovací mód lepeného spoje závisí na délce lepeného spoje. Zajímavým faktem chování spoje na rozhraní kov – kompozit je efektivní délka spojení, kdy další rozšíření lepeného spoje již nemá významný vliv na celkovou pevnost spojení. Je proto při návrhu důležité správně stanovit efektivní délku lepeného spoje. Pevnost lepeného spoje na rozhraní kov – kompozit, včetně rozložení posuvů a deformací v kompozitu či oceli a napětí na rozhraní spojení jsou podrobněji analyzovány a diskutovány v [11]. Závěrem je zde pak uvedeno, že byly pozorovány 4

různé stavy chování lepeného spoje na rozhraní kov – kompozit, přičemž se jedná o elastické, změkčující, konstantní a odlepující. V elastické části se lepidlo chová téměř lineárně, tedy ve vztahu napětí k posuvu, a to až k dosažení vrcholu. Ve změkčující fázi dochází k lineárnímu změkčení, které končí ve chvíli, kdy se konstantní napětí ve spoji začíná snižovat. Poslední fáze pak koresponduje s kompletním oddělením spojovaných částí. Vliv na pevnost tohoto spojení může mít i samotná skladba kompozitního materiálu, jelikož šíření napětí v lepeném spoji bude mít odlišnou charakteristiku [11].

U lepeného spoje kov – kompozit nejčastěji dochází k poruše ve spoji mezi kovem a kompozitem nikoli jako „adhesive failure“, ale jako „cohesive failure“, nebo dochází k delaminaci. Adhezivním poruchám na rozhraní lze předcházet důkladným očištěním povrchu adherendů, případně lepením čerstvého povrchu kompozitu, u oceli pak broušením. Delaminace spoje je považována v porovnání s kohezivní poruchou za přijatelnou, jelikož se chová tvárně. Také tvar tahové křivky je dán materiálovými vlastnostmi lepidla a nikoli typem poruchy [12].

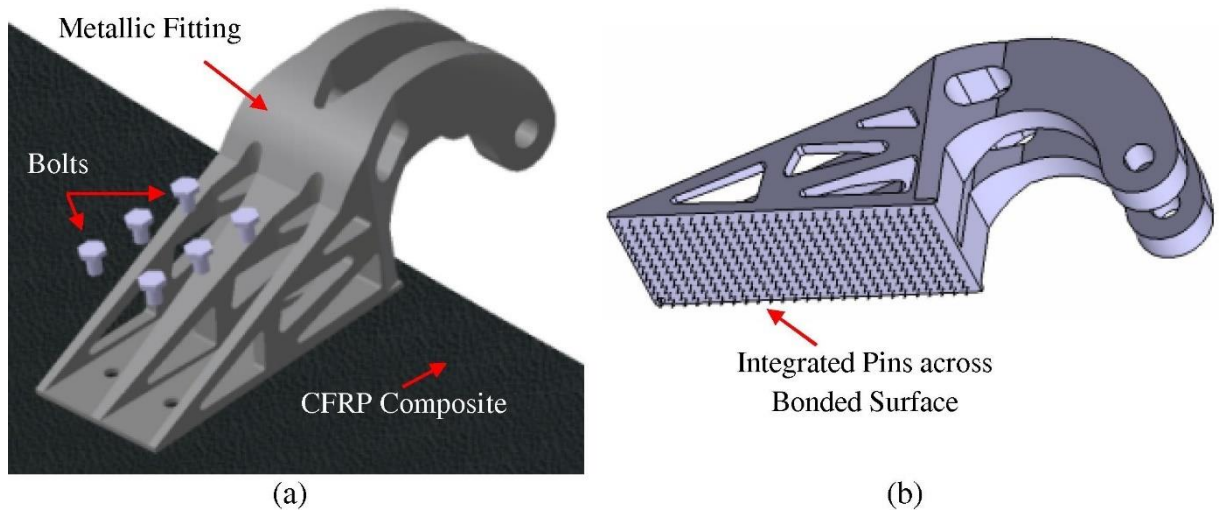
Struktura lepeného spoje je vidět na obrázku 2.7, kde je celkem 6 oblastí vyznačujících spoj. V pořadí od první se jedná o adherend, adhezivní zónu, přechodovou kohezivní vrstvu, kohezivní zónu, opět přechodovou kohezivní vrstvu a opět adhezivní zónu.



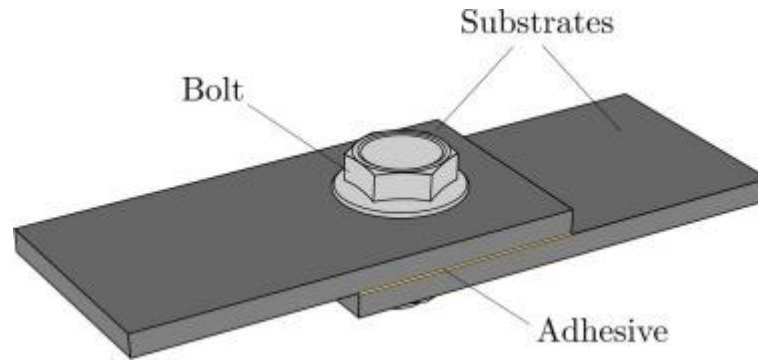
Obrázek 2.7: Struktura lepeného spoje [5]

2.5. Hybridní spoje

Výše uvedené typy spojů lze vzájemně různě kombinovat, čímž lze potenciálně dosáhnout vyšší pevnosti spoje. Například na obrázku 2.8 je uvedeno spojení oceli s kompozitem pomocí šroubů a zároveň integrovaných pinů, což by mělo výrazně zvyšovat pevnost spoje, až o stovky procent [13]. Obdobně lze kombinovat například mechanické spoje s podlepením, nebo třeba nalisováním. Zobrazení mechanického spoje s podlepením je na obrázku 2.9. Výhodou hybridních spojů je zejména zvýšení pevnosti spoje, oproti samostatnému provedení jednoho ze spojů, nicméně se kombinují i nedostatky, kdy například přijdeme o možnost rozebrání.



Obrázek 2.8: Hybridní spoj s piny [13]



Obrázek 2.9: Hybridní spoj s podlepením [14]

Neoznačené odstavce v této kapitole byly čerpány z [5].

3. Konstrukce navíjených trubek [4]

Návrh kompozitních tenkostěnných navíjených trubek se řídí dle obecně známé klasické laminátové teorie, tedy výpočtem skrze submatice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{D} – matice tahové, vazební a ohybové tuhosti, dle vztahu (3.1). Submatice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{D} se určí dle vztahů (3.2), kde \mathbf{Q} je matice mimoosové tuhosti.

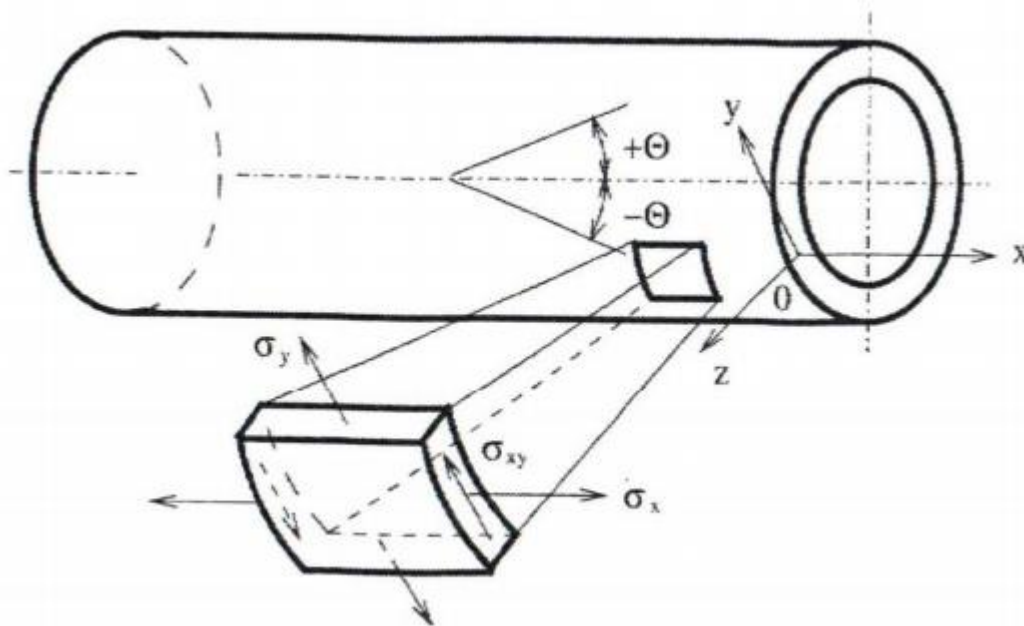
$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \dots \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \vdots & \mathbf{B} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{B} & \vdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m^\circ \\ \dots \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3.2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3).$$

Na obrázku 3.1 máme schematicky znázorněnou trubku vyrobenou navíjením, se zavedeným lokálním souřadným systémem $O(x, y, z)$, kdy x je rovnoběžná s osou vinuté trubky, y je v tečném směru a z ve směru normálovém.



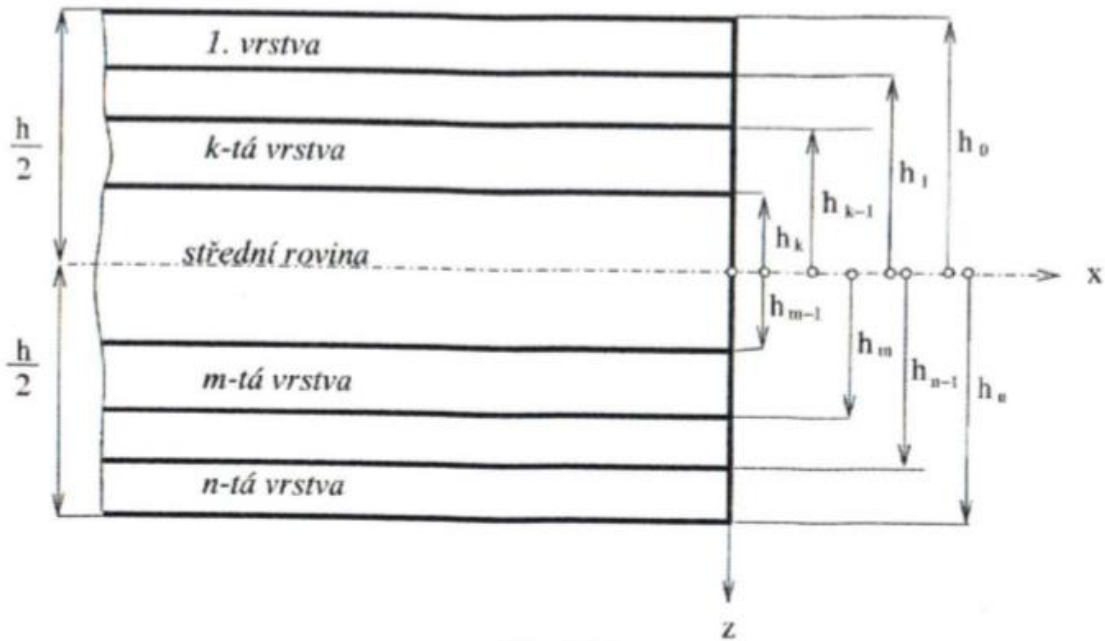
Obrázek 3.1: Příklad vinuté trubky s vyjmutým elementem [4]

Na obrázku 3.2 je znázorněna skladba laminátu z n vrstev, přičemž každá vrstva je orientovaná pod určitým úhlem θ . Jednotlivé vrstvy mohou mít obecně různé tloušťky, přičemž tloušťka například k -té vrstvy je $t_k = h_k - h_{k-1}$. Tloušťka celého laminátu je pak sumou tlouštěk všech n vrstev. Závislost mezi napětím a deformací k -té vrstvy se řídí vztahem (3.3) získaným použitím vztahů (3.4), který představuje pole poměrných deformací vzniklé z derivací posuvů a (3.5), který vyjadřuje napětí v libovolné – k -té vrstvě mimoosově namáhané laminy.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \gamma_{xy}^{\circ} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\sigma' = Q\varepsilon'. \quad (3.5)$$



Obrázek 3.2: Skladba jednotlivých vrstev laminátu [4]

Pokud je lamina namáhána v rovině x, y , lze křivost a zkroucení zanedbat. Díky tomuto lze vyjádřit složky napětí v k -té vrstvě vektorem (3.6).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}_k. \quad (3.6)$$

Pro deformaci laminy pak platí (3.7), kde $\varepsilon_{xx}^{\circ}, \varepsilon_{yy}^{\circ}, \varepsilon_{zz}^{\circ}$ jsou deformace střední vrstvy. Pro výslednice sil potom platí (3.8).

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^{\circ}, \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{yy}^{\circ}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xy}^{\circ} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \varepsilon_{xy}^{\circ} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Speciálním případem je pak trubka, ve které jsou vrstvy kladeny antisymetricky, tedy každé vrstvě pod určitým úhlem $-\theta$ odpovídá vrstva θ , která je materiálově a geometricky totožná a leží ve stejné vzdálenosti od střední roviny. Potom platí, že $A_{16} = A_{26} = 0$. Vzhledem k symetrii matice \mathbf{A} podle hlavní diagonály pak platí, že $A_{12} = A_{21}, A_{16} = A_{61}, A_{26} = A_{62}$ a ze vztahu (3.8) dostáváme vztah (3.9).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \varepsilon_{xy}^{\circ} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Pokud v materiálu uvažujeme působení pouze axiální síly ve směru osy trubky, tedy $N_x \neq 0, N_y = N_{xy} = 0$, tak z výrazu (3.9) získáme vztahy (3.10) a (3.11).

$$N_x = A_{11}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{12}\varepsilon_{yy}^\circ \quad (3.10)$$

$$0 = A_{21}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{22}\varepsilon_{yy}^\circ. \quad (3.11)$$

Řešením těchto vztahů získáme (3.12), přičemž efektivní modul pružnosti ve směru osy x a efektivní Poissonovo číslo s přihlédnutím k (3.2) mají tvar (3.13) a (3.14).

$$\varepsilon_{yy}^\circ = -\frac{A_{21}}{A_{22}}\varepsilon_{xx}^\circ, \quad N_x = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}}\varepsilon_{xx}^\circ \quad (3.12)$$

$$E_x = \frac{N_x}{h\varepsilon_{xx}^\circ} = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}h} = \frac{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2}{Q_{22}} \quad (3.13)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_{xx}^\circ}{\varepsilon_{yy}^\circ} = \frac{A_{12}}{A_{22}} = \frac{Q_{12}}{Q_{22}}. \quad (3.14)$$

Pokud budeme uvažovat, že $N_{xy} \neq 0, N_x = N_y = 0$, tak z výrazu (3.9) získáme (3.15) a efektivní modul pružnosti ve smyku (3.16).

$$N_{xy} = A_{66}\gamma_{xy}^\circ \quad (3.15)$$

$$G_{xy} = \frac{N_{xy}}{h\gamma_{xy}^\circ} = \frac{A_{66}}{h}. \quad (3.16)$$

V případě obecně kladených vrstev, kdy skladba nespĺňuje výše uvedená kritéria pro antisymetrickou skladbu platí, že $A_{16} \neq 0, A_{26} \neq 0$. Pokud tedy budeme opět uvažovat pouze axiální zatížení ve směru osy trubky, tedy $N_x \neq 0, N_y = N_{xy} = 0$, tak platí vztahy (3.17), (3.18) a (3.19).

$$N_x = A_{11}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{12}\varepsilon_{yy}^\circ + A_{16}\gamma_{xy}^\circ \quad (3.17)$$

$$0 = A_{21}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{22}\varepsilon_{yy}^\circ + A_{26}\gamma_{xy}^\circ \quad (3.18)$$

$$0 = A_{61}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{62}\varepsilon_{yy}^\circ + A_{66}\gamma_{xy}^\circ. \quad (3.19)$$

Efektivní modul pružnosti v axiálním směru a Poissonovo číslo pak získáme jako (3.20) a (3.21), přičemž jsme pro zjednodušení zavedli $M = A_{11}A_{22}A_{66} + 2A_{12}A_{16}A_{26} - A_{11}A_{26}^2 - A_{22}A_{16}^2 - A_{66}A_{12}^2$.

$$E_x = \frac{N_x}{h\varepsilon_{xx}^\circ} = \frac{M}{h(A_{66}A_{22} - A_{26}^2)} \quad (3.20)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_{yy}^\circ}{\varepsilon_{xx}^\circ} = \frac{A_{12}A_{66} - A_{16}A_{26}}{A_{22}A_{66} - A_{26}^2}. \quad (3.21)$$

Pokud budeme uvažovat, že $N_{xy} \neq 0, N_x = N_y = 0$, tak získáme (3.22) a modul pružnosti ve smyku jako (3.23).

$$N_{xy} = A_{61}\varepsilon_{xx}^\circ + A_{62}\varepsilon_{yy}^\circ + A_{66}\gamma_{xy}^\circ \quad (3.22)$$

$$G_{xy} = \frac{N_{xy}}{h\gamma_{xy}^\circ} = \frac{M}{h(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)}. \quad (3.23)$$

Informace v této kapitole byly převzaty z [4].

4. Analýza stávajícího řešení

V této kapitole se budeme podrobněji zabývat problematikou převodovek. Uvedeme několik současných možností řešení kompozitních převodovek a dále se budeme zabývat stávajícím řešením převodovky elektromobilu, se zaměřením na zkoumanou hřídel převodovky, pro kterou provedeme analýzu zatížení.

4.1. Základní dělení převodovek

Základní požadavky kladené na automobilové převodovky jsou zejména nízká hmotnost, malé rozměry, nízké hlukové emise a vibrace, minimální požadavky na údržbu, malé ovládací síly, či poloautomatický nebo plně automatický provoz, vysoká mechanická účinnost, dostatečný počet rychlostních stupňů a jejich optimální rozsah, a také vysoká spolehlivost a životnost.

Převodovky se dají obecně rozdělit do několika kategorií, podle druhu převodu, způsobu změny rychlostních stupňů, nebo způsobu řazení. Podle druhu převodu lze převodovky rozdělit na předloňové, což je nejčastěji využívaná varianta u současných automobilů, dále planetové, řemenové, hydrostatické, hydrodynamické měniče a hydrostatické měniče.

V současné době se stále vyrábějí převodovky zejména z kovových materiálů, a to za použití různých technologií. Využívá se zejména ocel, pro ocelové plechy či výlisky, nebo obráběné bloky. Dále se využívají lehké slitiny, pro výlisky, obrobky či odlitky a také litiny pro odlitky.

4.2. Kompozitní převodovky

V současné době již některé společnosti převodovky z kompozitních materiálů vyrábějí. Příkladem může být třeba převodovka závodního vozu Audi, která je na obrázku 4.1, nebo převodovka závodního vozu formule 1, která je na obrázku 4.2. U převodovky závodního vozu Audi je kompozit kombinován s titanovými prvky.

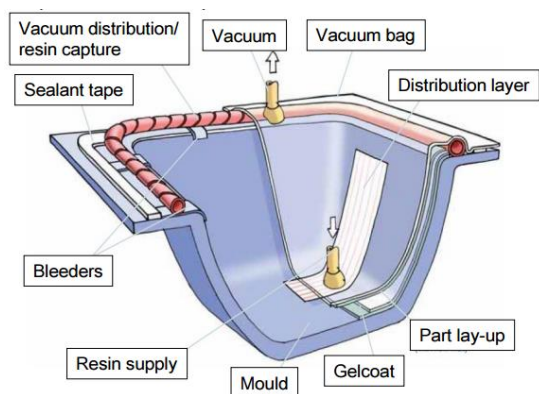


Obrázek 4.1: Kompozitní skříň převodovky závodního vozu Audi [15]

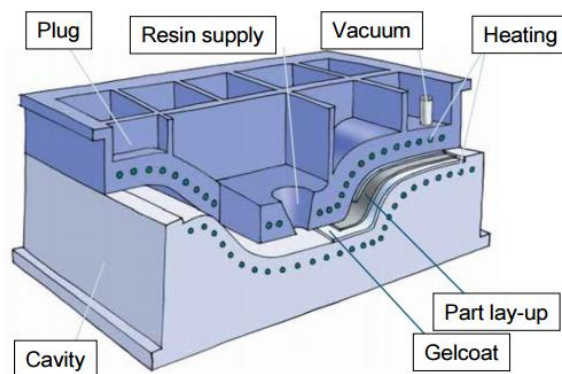


Obrázek 4.2: Kompozitní skříň převodovky vozu Formule 1 [15]

Výhody kompozitních skříní převodovek jsou zejména ve výrazné úspoře hmotnosti, dále až o 25 % vyšší tuhosti. Tyto převodovky mohou být provozovány za vyšších teplot a lze je snadno opravovat, či modifikovat. Obecně se jedná o tenkostěnné skořepiny, s kovovými či kompozitními přepážkami, které nesou pracovní části a dodávají tedy celé převodovce potřebnou tuhost. Tyto převodovky lze vyrábět pomocí několika technologií, kdy například skříň převodovky vozu formule 1 na obrázku 4.2 je vyrobena z předimpregnovaných vláken. Skříň může být dále vyrobena například technologií Resin Transfer Molding (RTM) za použití tkanin, případně Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), nebo i pomocí přesného navíjení. Schéma pro technologie RTM a VARTM jsou uvedeny na obrázcích 4.3 a 4.4.



Obrázek 4.3: Schéma technologie VARTM [15]

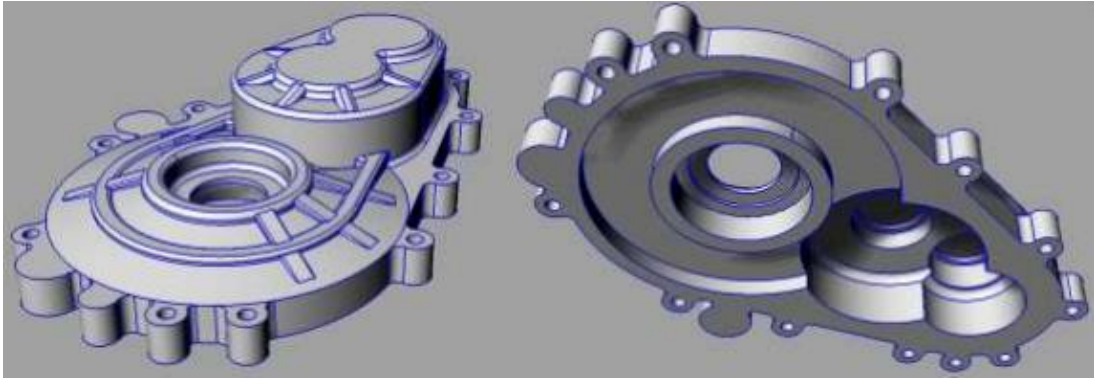


Obrázek 4.4: Schéma technologie RTM [15]

Informace v kapitolách 4.1 a 4.2 byly převzaty z [15].

4.3. Zkoumaná převodovka

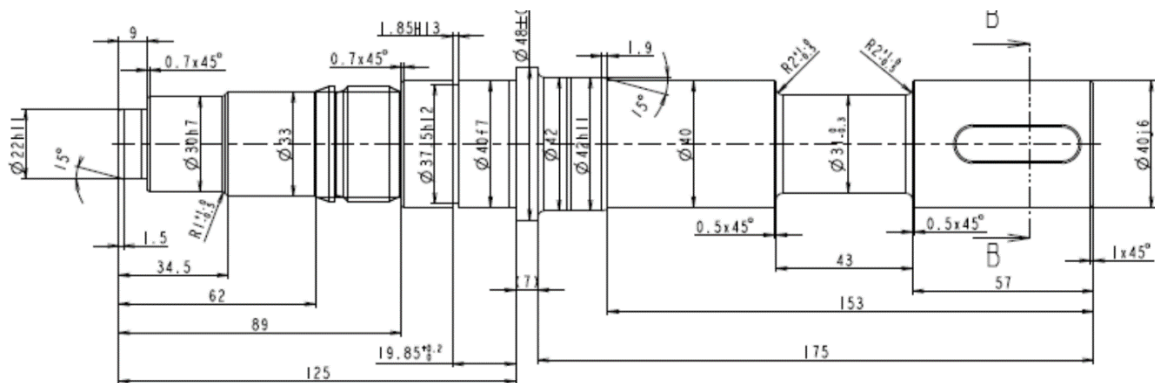
Model skříně původní převodovky, jejíž výstupní hřídel je řešena v této práci je pro představu znázorněn na obrázku 4.5. Jedná se o vysokorychlostní převodovku vyrobenou z duralu, určenou pro elektromobil.



Obrázek 4.5: Model horního dílu skříně převodovky [16]

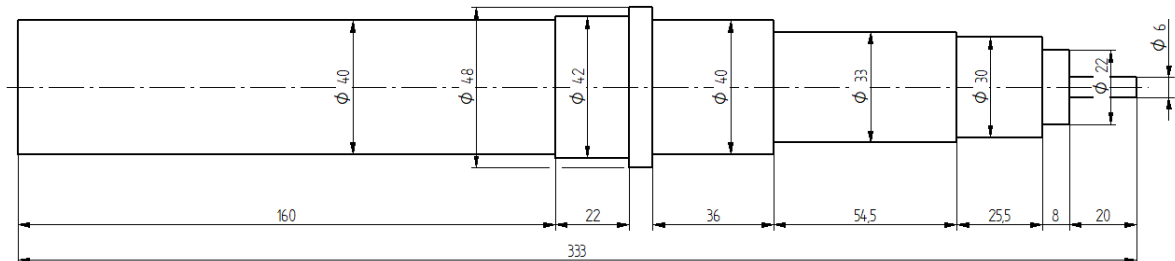
4.4. Výstupní hřídel

V rámci této práce se budeme zabývat návrhem a optimalizací výstupní hřídele výše uvedené převodovky, která je vidět na obrázku 4.6. Hřídel je uložena v převodovce ve dvou ložiskách. Na vzdálenější straně od výstupu z převodovky je ložisko válečkové, blíže výstupu pak ložisko kuličkové. Na hřídeli je pak pro přenos sil ozubené kolo, které je uchyceno pomocí drážkovaného spojení.



Obrázek 4.6: Výstupní hřídel původní převodovky [16]

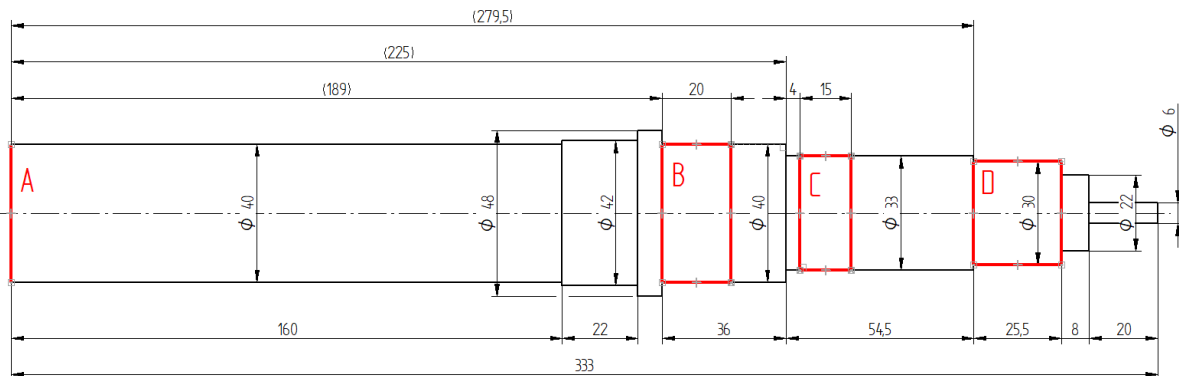
Pro analýzu zatížení hřídele pomocí MKP je vhodné hřídel zjednodušit z důvodu obtížné tvorby kvalitní sítě na složitých tvarových elementech. Pro výpočet byla použita zjednodušená varianta hřídele dle obrázku 4.7. Neuvažujeme tedy prvky problémové na síťování a výpočet pro MKP, které ale nemají zásadní vliv na výsledek. Vynechány tedy byly drážky pro pero, sražení hran, zápichy a drážkování.



Obrázek 4.7: Zjednodušená varianta výstupní hřídele pro výpočet MKP

Původní hřídel je uložena ve dvou ložiskách a přenos síly probíhá skrze drážkování na $\varnothing 33 \text{ mm}$. Na $\varnothing 30 \text{ mm}$ hřídele je umístěno válečkové ložisko a na $\varnothing 40 \text{ mm}$ je umístěno ložisko kuličkové. Pro

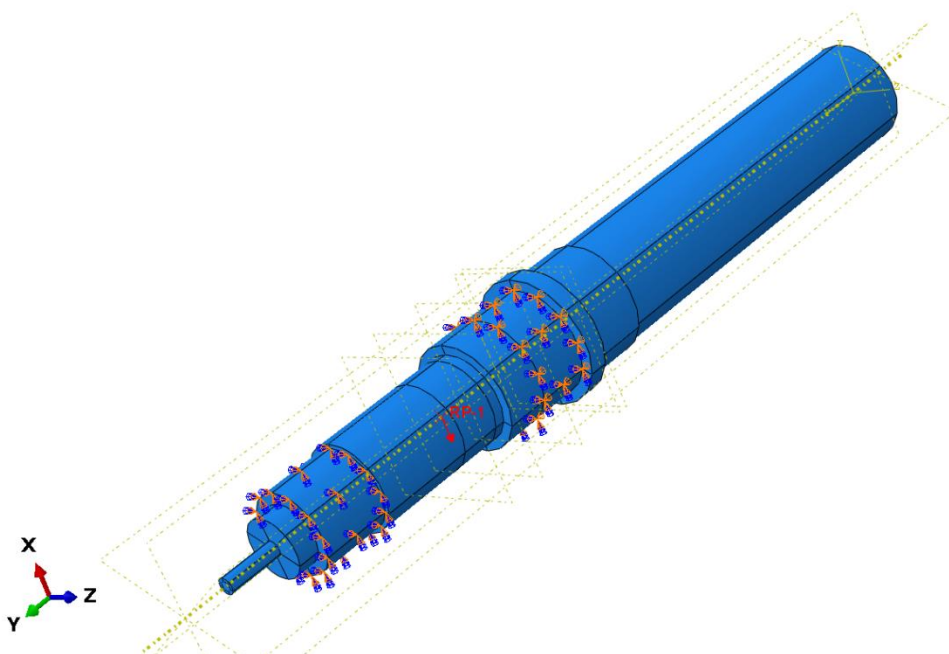
výpočet tedy budeme brát v úvahu působišť jednotlivých sil a reakcí dle rozměrů a umístění původního drážkování a ložisek. Pro válečkové ložisko využijeme celou délku $\varnothing 30 \text{ mm}$ na kterém se nachází, pro druhé ložisko bereme v úvahu jeho šířku 20 mm . Osu rotace hřídele bereme jako osu y souřadného systému výpočtu. Vše je znázorněno na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Oblasti působení sil a reakcí na výstupní hřídeli

4.5. MKP analýza výstupní hřídele

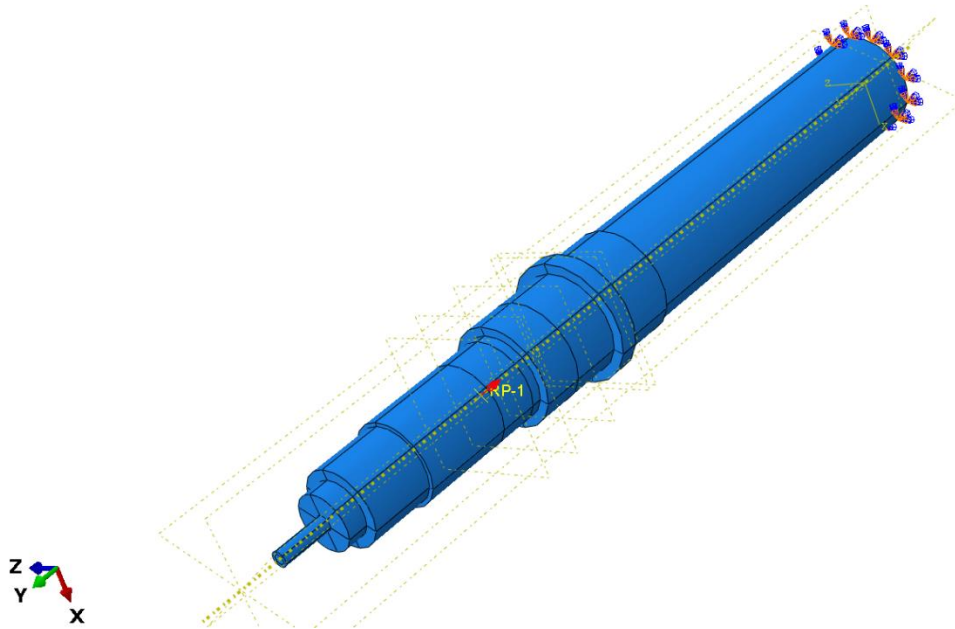
Pro analýzu MKP jsme celkové zatížení hřídele rozdělili do dvou dílčích výpočtů. Důležité oblasti jsou pro obě varianty znázorněny na obrázku 4.8, kdy jako první variantu uvažujeme hřídel uloženou na dvou podporách v místě ložisek B a D zatíženou osamělou silou $F = 1\,000 \text{ N}$ v oblasti původního ozubení C . Zatěžovací síla byla pro výpočet položena do středu původního ozubení, tedy ve vzdálenosti $236,5 \text{ mm}$ od vzdálenějšího konce skrze referenční bod. Referenční bod byl uchycen vazbou „constraint“ k povrchu oblasti drážkování, tedy C . Zatížení je zobrazeno na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Zobrazení silového zatížení hřídele

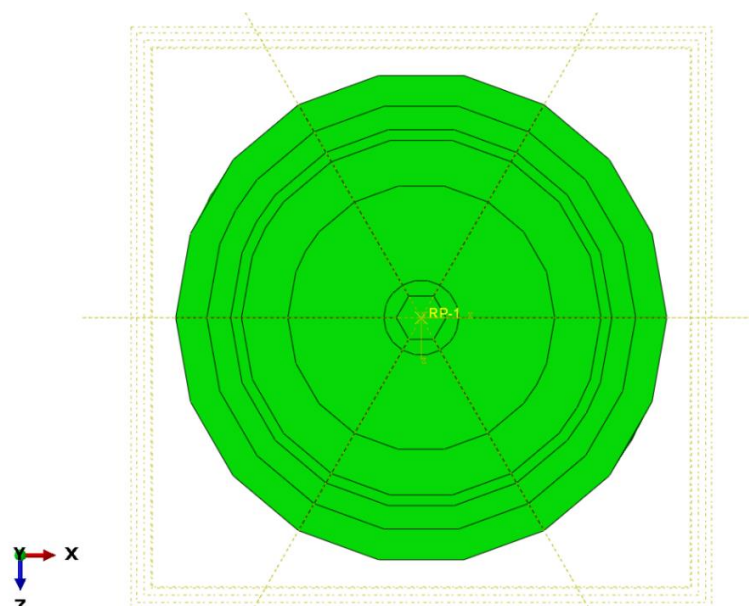
Pro druhou variantu uvažujeme vetknutí na ploše výstupu hřídele A a moment $M_k = 10\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}$ v oblasti původního ozubení, opět na středu této oblasti, skrze referenční bod. Zatížení je zobrazeno na obrázku 4.10. Síla F působí v dané vzdálenosti libovolně kolmo směrem k ose y ,

zadávána byla v záporném směru osy x a moment M je rotací kolem osy y . Orientace momentu ani síly nemá na hodnoty výpočtu vliv, jedná se o statickou úlohu. Všechny tři okrajové podmínky byly zadávány do modelu jako „Displacement/Rotation“, kdy pro vetknutí byly všechny hodnoty pevně nulové, pro kuličkové ložisko byla povolena rotace kolem osy z a pro válečkové ložisko byla povolena rotace okolo osy z a posuv v ose z .



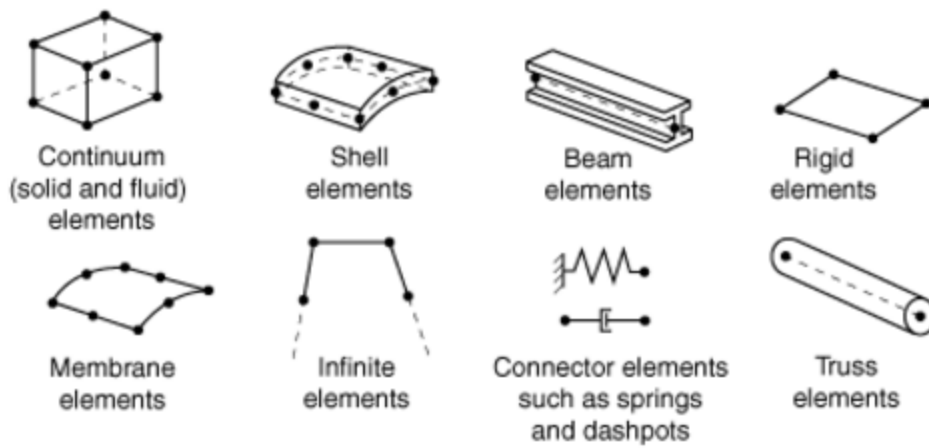
Obrázek 4.10: Zobrazení momentového zatížení hřídele

Pro ocel 14 220.4, ze které je hřídel vyrobena, byly přiřazeny hodnoty modulu pružnosti v tahu $E = 206\,000\text{ MPa}$ a Poissonova čísla $\nu = 0,27$. Pro výpočet tedy byly použity hodnoty $E = 206\,000\text{ MPa}$ a $\nu = 0,27$. Pro tvorbu sítě byla hřídel rozřezána na jednotlivé válce dle průměrů, oblastí působení sil a reakcí a dále vnitřním šestihranem a řezem jeho vrcholy od hran směrem ven, za účelem tvorby optimálních elementů sítě. Řez vnitřním šestihranem byl proveden na nejmenším průměru hřídele, což je zobrazeno na obrázku 4.11.

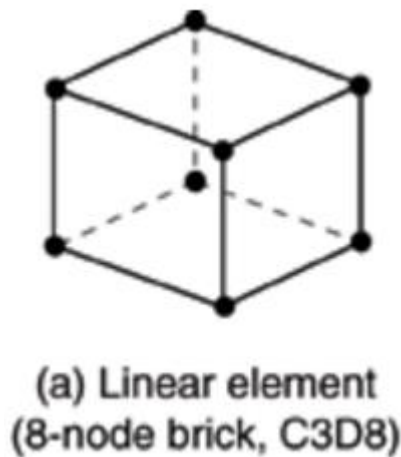


Obrázek 4.11: Zobrazení řezu hřídele vnitřním šestihranem

Pro výpočet byly použity lineární hexagonové prvky C3D8R, které jsou zobrazeny na obrázku 4.13. Jedná se o osmihranný šestistěn, kde R na posledním místě v názvu prvku značí použití redukované integrace. Redukovaná integrace využívá nižší řád integrace pro tuhost elementu, snižuje tedy počet integračních bodů na elementu a tím snižuje náročnost výpočtu. První písmeno elementu značí skupinu, do které patří. C je skupina „continuum elements“, základní skupiny jsou znázorněny na obrázku 4.12. Následuje skupina dvou znaků, kde je 3D, což označuje typ, respektive rozměr prvku. Označení 3D znamená prostorový prvek, tedy element ve třech rozměrech. Číslice 8 na čtvrtém místě označení elementu pak značí počet uzlů, které se na elementu nachází. Volba elementu je propojena s matematickou teorií, definující chování elementu. V tomto případě se při výpočtu ve všech směrech mezi uzly využívá lineární interpolace a jedná se o prvky tzv. prvního řádu [17]. Síť vytvořená z těchto elementů byla volena o globální velikosti elementu 5 a byla po obvodech zhuštěna na 60 uzlů, výsledná síť je zobrazena na obrázku 4.14.



Obrázek 4.12: Běžně používané skupiny elementů [17]

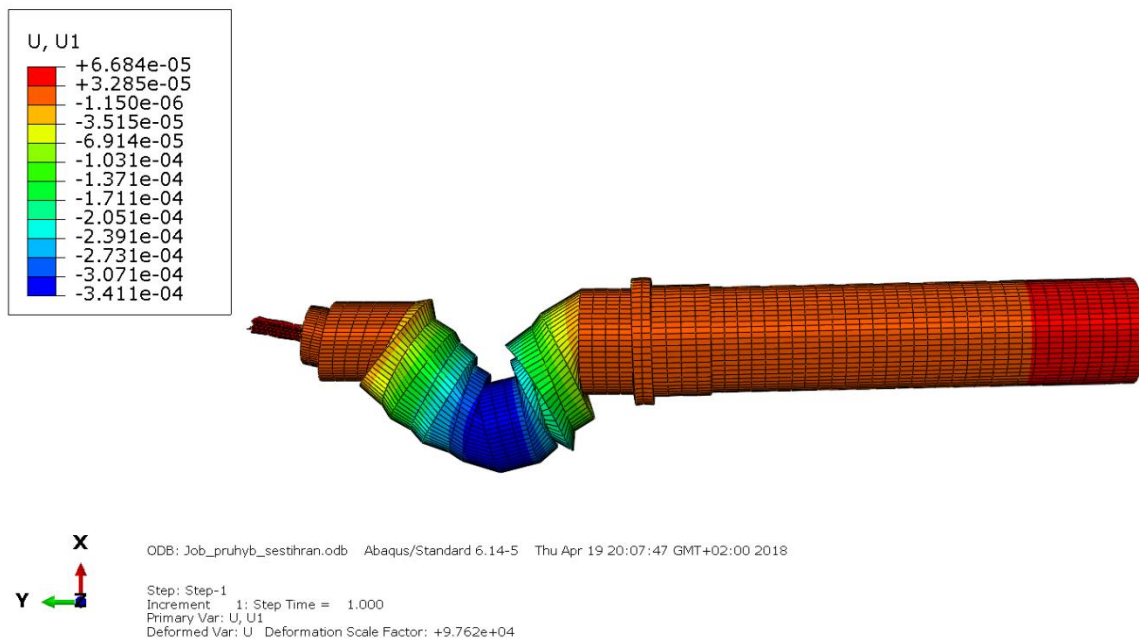


Obrázek 4.13: Lineární prvek sítě C3D8 [17]

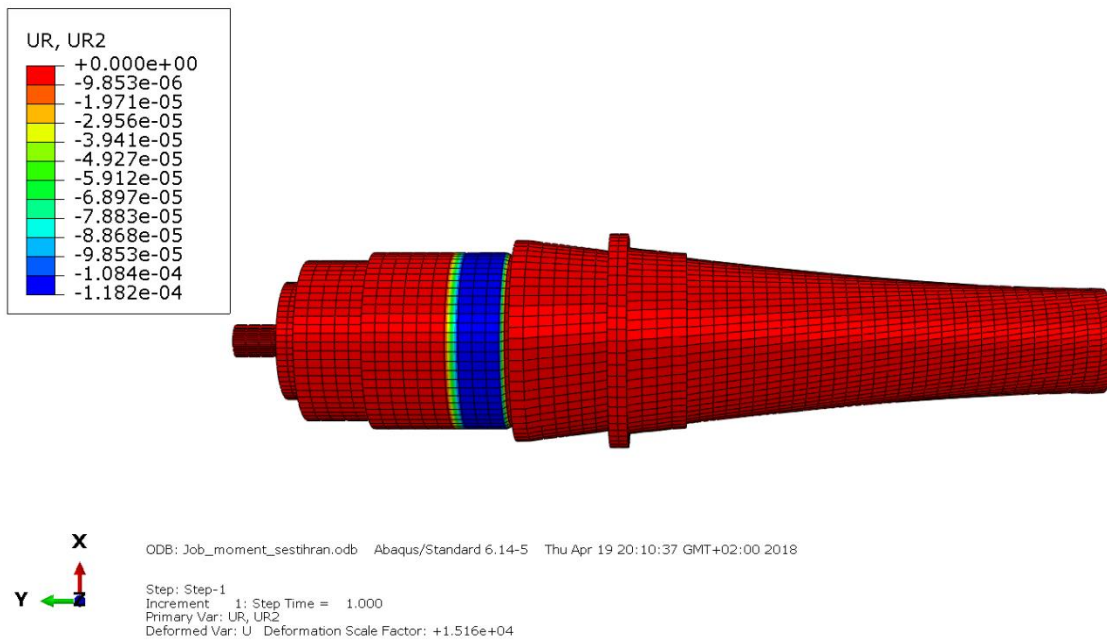


Obrázek 4.14: Zobrazení vytvořené sítě na hřídeli

Provedením výpočtu jsme tedy zjistili hodnoty průhybu a natočení pro obě varianty. Zajímají nás zejména hodnoty průhybu v ose x rovnoběžné s působící silou a hodnoty natočení okolo osy y . Výsledky jsou znázorněny na obrázku 4.15, pro variantu uloženou v podporách zatíženou silou a na obrázku 4.16, pro variantu vetknutí se zatížením momentem. Maximální hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.1.



Obrázek 4.15: Průhyb zatíženého ocelového hřídele v ose x



Obrázek 4.16: Natočení zatíženého ocelového hřídele kolem osy y

Režim zatížení	Průhyb [mm]	Natočení [rad]
Zatěžování silou $F = 1\,000\text{ N}$	-3,411e-04	x
Zatěžování momentem $M_k = 10\,000\text{ N}\cdot\text{mm}$	x	-1,182e-04

Tabulka 4.1: Tabulka výsledků jednotlivých zatížení ocelové hřídele

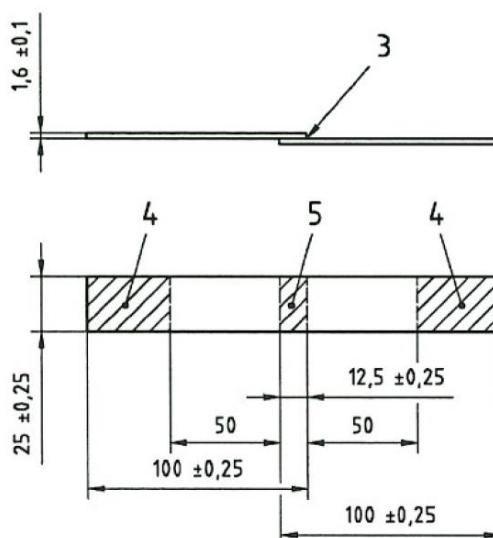
5. Tahová zkouška plochých lepených vzorků

Cílem této kapitoly je určení smykové pevnosti a smykového modulu lepidel, při slepení materiálových kombinací, uvedených v tabulce 5.1. Pro zkoušku byly použity vždy oba adherendy ze stejného materiálu, proškrtnuté kombinace nebyly zkoušeny.

	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Spabond SP 345 – slow	5	5	5	5	5	5
Loctite EA 9466	5	5	5	5	5	5
Loctite EA 9514	5	5	5	5	5	-
Crestabond M1 – 30	5	5	5	5	-	5
Acralock SA 10 – 15	5	5	5	5	5	5
Bostik SAF 150 – 45	5	5	5	5	5	5
Acralock FA 10 – 10	5	5	5	5	5	5
Pryskyřice 285/286	5	5	-	5	5	5

Tabulka 5.1: Počty vzorků, kombinace materiálů a lepidel

Zkouška vychází z ČSN EN 1465 [18]. Rozměry vzorku jsou definovány na obrázku 5.1. V našem případě nebyla dodržena tloušťka adherendů $1,6 \pm 0,1 \text{ mm}$, jelikož by v některých případech adherend dosahoval nižší pevnosti než lepidlo. Adherendy vzorků byly tedy vyrobeny o tloušťkách 3, 6 a 9 mm. Dále nebyla dodržena plocha lepeného spoje, kde norma udává rozměr $12,5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, ale skutečných bylo $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, tedy plocha 625 mm^2 . Tloušťka lepeného spoje byla $0,2 \text{ mm}$, vždy po pěti kusech dané kombinace materiálu a lepidla. Podrobnější popis bude vždy u dané zkoušené kombinace. U některých kombinací je uvedeno více než pět porušených vzorků, což je dáno způsobem výroby vzorků. Ty byly nejprve lepeny jako deska a následně řezány na požadovaný rozměr, přičemž krajní vzorky (označení 1 a 7) se standardně nezkušejí. Pokud ovšem dosahovaly obdobné pevnosti jako vzorky 2 – 6, tak byly do zkoušky zahrnuty.



Obrázek 5.1: Rozměr vzorků dle ČSN EN 1465 [18]

Rychlost zatěžování je předepsána konstantní, taková, aby k poruše průměrného slepu došlo za $60 \pm 20 \text{ s}$. Detailnější popis bude opět u jednotlivých zkoušených kombinací. Výsledky zkoušky se uvádějí jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení ze všech platných těles v N , nebo jako napětí při přetržení v MPa . Smyková pevnost je definována jako:

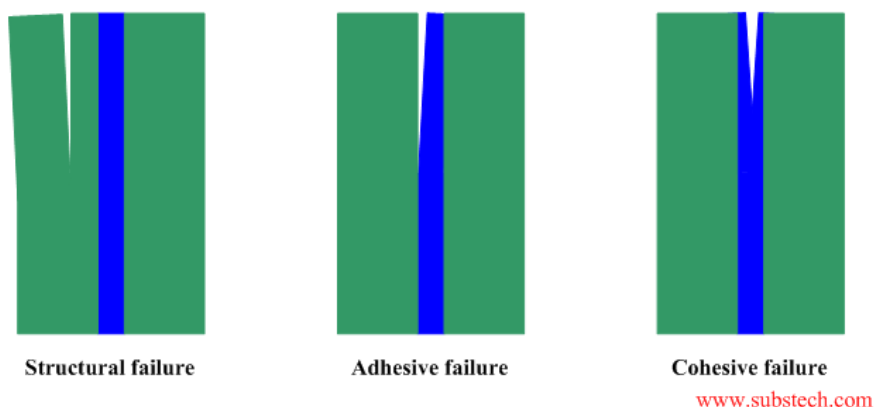
$$\tau = \frac{F_{max}}{A}, \quad (5.1)$$

kde F_{max} je síla při přetržení a A je plocha lepeného spoje. Ze zkoušky je dále možné určit smykový modul lepidla G jako:

$$G = \frac{\Delta Ft}{A\Delta u'} \quad (5.2)$$

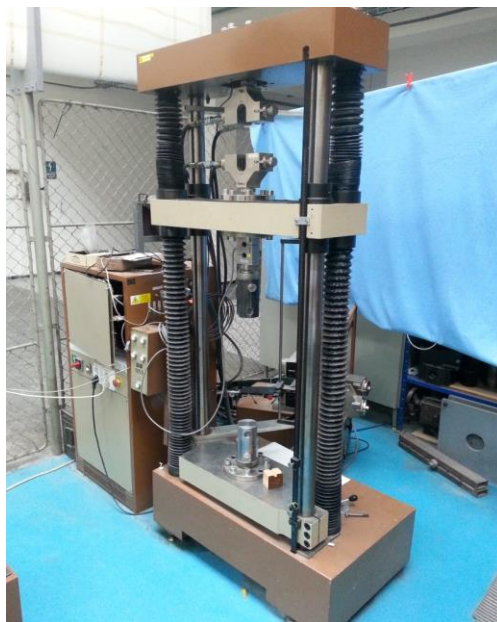
kde ΔF je rozdíl sil pro lineární oblast grafu, t je tloušťka lepeného spoje, Δu je rozdíl posuvů pro lineární oblast grafu (odpovídající rozdílu sil) a A je plocha lepeného spoje. Smykový modul lepidla lze určit pouze v případě, že došlo ke kohezivní poruše (CF) lepeného spoje. Jednotlivé typy základních poruch jsou zobrazeny na obrázku 5.2.

Failure mechanisms of adhesive bonding



Obrázek 5.2: Základní typy poruch lepeného spoje [21]

Zkoušky byly provedeny na univerzálním trhacím stroji TIRA 2300, zobrazeném na obrázku 5.3. Informace o provedení a vyhodnocení zkoušky byly čerpány z [18], [19] a [20].

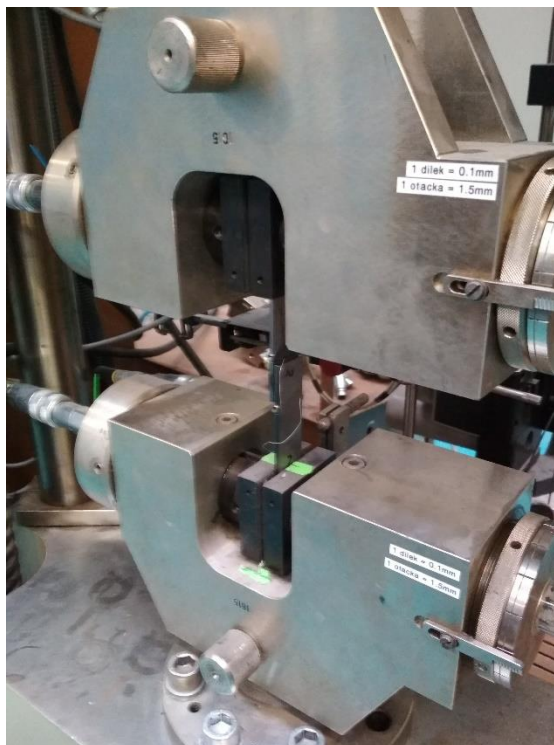


Obrázek 5.3: Trhací stroj TIRA 2300

5.1. Detailní popis zkoušek jednotlivých materiálových kombinací

V této části bude popsáno detailní provedení zkoušky a vyhodnocení pevnosti lepeného spoje a smykového modulu lepidla. Jelikož bude provedení a vyhodnocení zkoušky stejné u všech

následujících kombinací, omezíme se v dalších kapitolách jen na výsledky sumarizované do tabulek, grafy se záznamy zkoušek a fotografie porušených vzorků. Dále bude uvedena rychlost zatěžování a typ poruchy zkoušeného vzorku. Upnutí vzorku v trhacím stroji je vidět na obrázku 5.4. Níže je uvedeno kompletní vyhodnocení ve všech materiálových kombinacích pouze pro lepidlo Acralock SA 10 – 15, ostatní lepidla ve všech zkoušených materiálových kombinacích jsou uvedeny v Příloze A.



Obrázek 5.4: Plochý vzorek upnutý v čelistech stroje

Smyková pevnost byla počítána pro všechny uvedené zkoušené vzorky podle vzorce (5.1) a to jako aritmetický průměr naměřených maximálních sil. Byl tedy proveden součet všech maximálních hodnot jednotlivých vzorků daného provedení, podělený jejich počtem a výsledná průměrná maximální síla dělena plochou lepeného spoje dle (5.1). Pro všechny takto vyhodnocované vzorky pak byla určena ještě směrodatná odchylka hodnoty maximální síly a následně podělena plochou lepeného spoje.

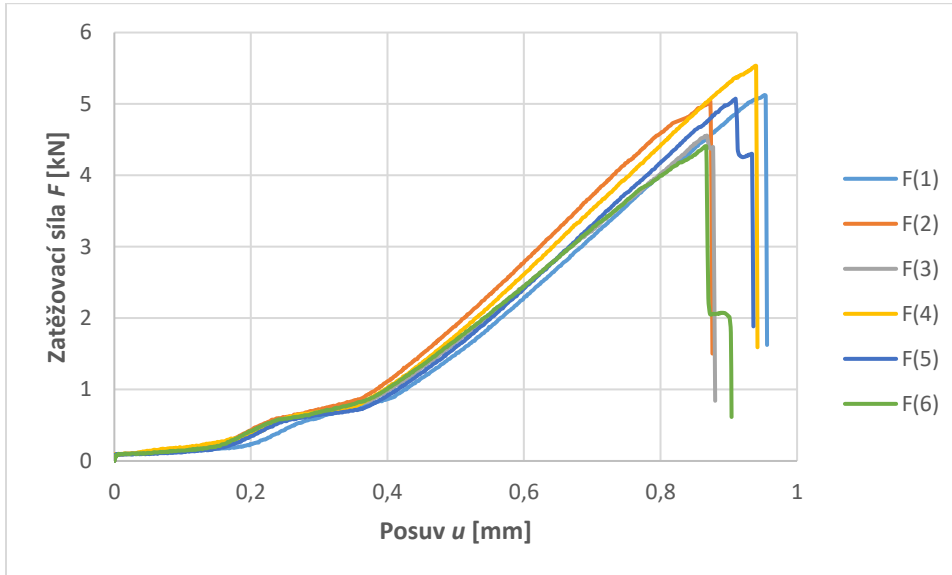
Při výpočtu smykového modulu bylo postupováno podle vzorce (5.2), kdy byly z lineární části grafu odečteny počáteční a koncové hodnoty síly a posuvu. Z nich pak bylo určeno ΔF a Δu . Tloušťka lepeného spoje je pro všechny případy $0,2 \text{ mm}$ a plocha lepeného spoje je také neměnná, tedy 625 mm^2 . Hodnoty ΔF a Δu byly odečítány pro každý zkoušený vzorek a následně z nich byla vypočtena hodnota smykového modulu. Ze všech vypočítaných hodnot smykového modulu pro dané lepidlo a materiálovou kombinaci pak byl počítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, obdobně jako u smykové pevnosti.

5.1.1. Acralock SA 10 – 15

Jedná se o dvousložkové metakrylátové lepidlo s vysokou pevností ve smyku ze série SA 10 LV, vhodné zejména pro lepení kovů bez primeru. Lepidlo umožňuje vyplnění spáry od menších až po střední rozměry, při tloušťce lepící spáry $0,5 - 12 \text{ mm}$. Lepidlo velice dobře odolává únavě a rázovým zatížením. Udávaná pevnost v tahu je $21 - 24 \text{ MPa}$, přičemž může být lepidlo trvale vystaveno teplotám $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ [22].

5.1.1.1. Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zatěžování je znázorněn na obrázku 5.5 a maximální hodnoty v tabulce 5.2. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.6. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost. Smyková pevnost byla určena z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulce 5.2, pomocí vzorce (5.1). Smyková pevnost této kombinace je $7,93 \pm 0,6 MPa$, a dále je znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14.



Obrázek 5.5: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	5125	5041	4556	5532	5074	4406

Tabulka 5.2: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

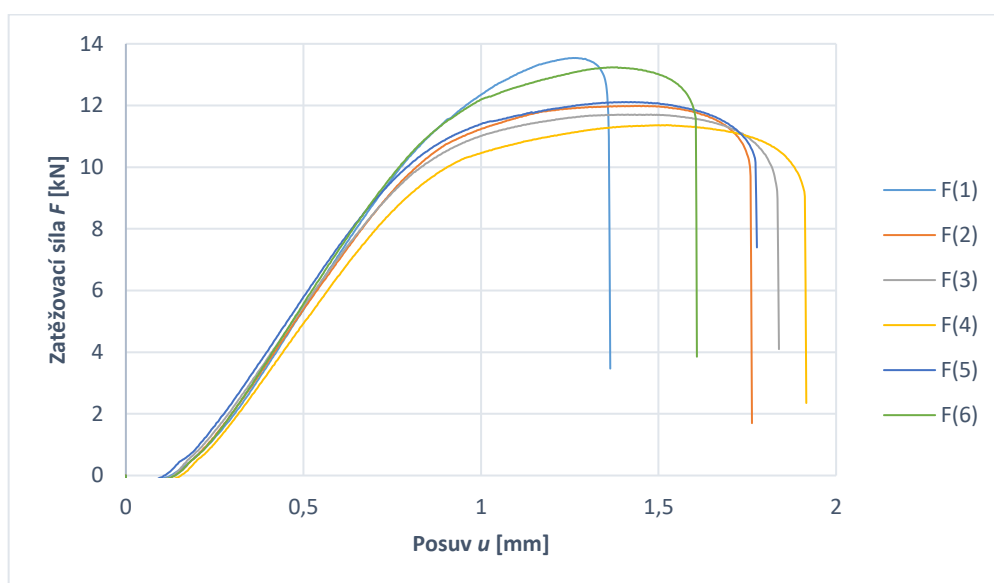


Obrázek 5.6: Porušené uhlíkové vzorky

5.1.1.2. Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku 5.7 a maximální hodnoty v tabulce 5.3. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $19,72 \pm 1,27 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.8. U všech vzorků došlo k poruše typu cohesive failure (CF), byla tedy vyhodnocena smyková pevnost i smykový modul.

Pro určení smykového modulu byly z lineární části grafu odečteny hodnoty uvedené v levé části tabulky 5.4. Z nich pak bylo vypočteno ΔF a Δu jako rozdíl naměřených hodnot. Z rozdílu hodnot pak bylo pomocí vzorce (5.2) určeno 6 hodnot smykového modulu, z nichž byl udělán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou. Takto byla získána hodnota $5,213 \pm 0,224 MPa$. Hodnoty smykového modulu jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.5. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.13 celkového vyhodnocení.



Obrázek 5.7: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	13541	11989	11707	11366	12114	13240

Tabulka 5.3: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek 5.8: Porušené ocelové vzorky

Odečítaný parametr	Počáteční hodnota	Koncová hodnota	Rozdíl hodnot
Síla F_1 [N]	2340	10001	7661
Posuv u_1 [mm]	0,328	0,773	0,445
Síla F_2 [N]	1324	9384	8060
Posuv u_2 [mm]	0,258	0,763	0,505
Síla F_3 [N]	1830	8361	6531
Posuv u_3 [mm]	0,278	0,688	0,41
Síla F_4 [N]	1581	8368	6787
Posuv u_4 [mm]	0,289	0,733	0,444
Síla F_5 [N]	1614	9139	7525
Posuv u_5 [mm]	0,251	0,717	0,466
Síla F_6 [N]	1614	9370	7756
Posuv u_6 [mm]	0,275	0,726	0,451

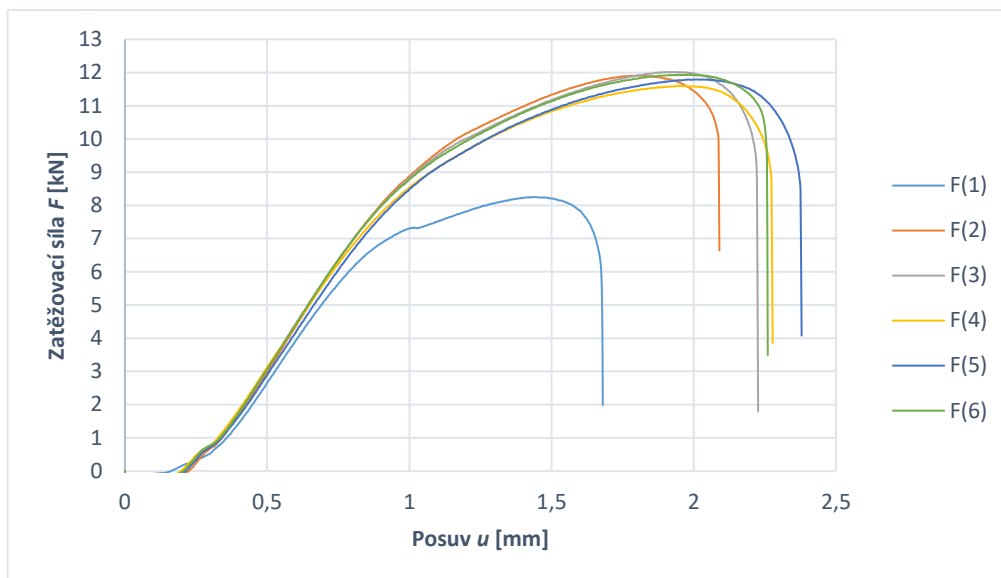
Tabulka 5.4: Hodnoty odečtené z grafu včetně rozdílů

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6
Smykový modul G [MPa]	5,509	5,107	5,097	4,892	5,167	5,503

Tabulka 5.5: Hodnoty smykového modulu G dle jednotlivých vzorků

5.1.1.3. Hliníkové vzorky

Tloušťka adherentů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku 5.9 a maximální hodnoty v tabulce 5.6. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $18 \pm 2,16$ MPa, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.10. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena jen smyková pevnost.



Obrázek 5.9: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8251	11909	12019	11600	11791	11934

Tabulka 5.6: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



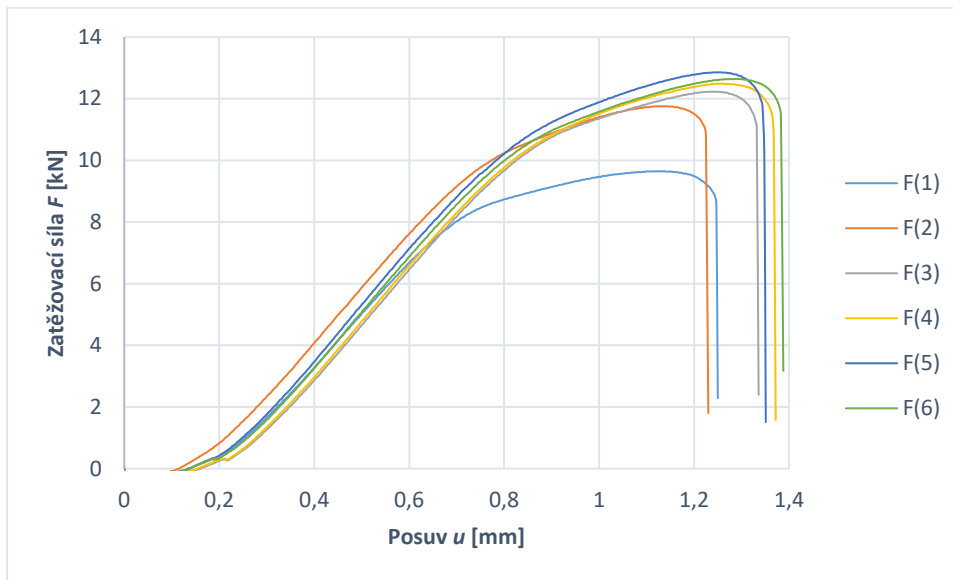
Obrázek 5.10: Porušené hliníkové vzorky

5.1.1.4. Nerezové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku 5.11 a maximální hodnoty v tabulce 5.7. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $19,1 \pm 1,73 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.12. U všech vzorků došlo k poruše typu cohesive failure (CF), byla tedy vyhodnocena smyková pevnost i smykový modul.

Pro určení smykového modulu byly z lineární části grafu odečteny hodnoty uvedené v levé části tabulky 5.8. Z nich pak bylo vypočteno ΔF a Δu jako rozdíl naměřených hodnot. Z rozdílu hodnot pak bylo pomocí vzorce (5.2) určeno 6 hodnot smykového modulu, z nichž byl udělán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou. Takto byla získána hodnota

5,494 ± 0,09 MPa. Hodnoty smykového modulu jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.9. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.13 celkového vyhodnocení.



Obrázek 5.11: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	9649	11758	12228	12492	12855	12642

Tabulka 5.7: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek 5.12: Porušené nerezové vzorky

Odečítaný parametr	Počáteční hodnota	Koncová hodnota	Rozdíl hodnot
Síla F_1 [N]	1511	6416	4905
Posuv u_1 [mm]	0,29	0,584	0,294
Síla F_2 [N]	1636	9164	7528
Posuv u_2 [mm]	0,256	0,701	0,445
Síla F_3 [N]	1786	8629	6843
Posuv u_3 [mm]	0,33	0,728	0,398
Síla F_4 [N]	1577	9106	7529
Posuv u_4 [mm]	0,315	0,752	0,437
Síla F_5 [N]	1680	9014	7334
Posuv u_5 [mm]	0,295	0,712	0,417
Síla F_6 [N]	1680	8933	7253
Posuv u_6 [mm]	0,307	0,724	0,417

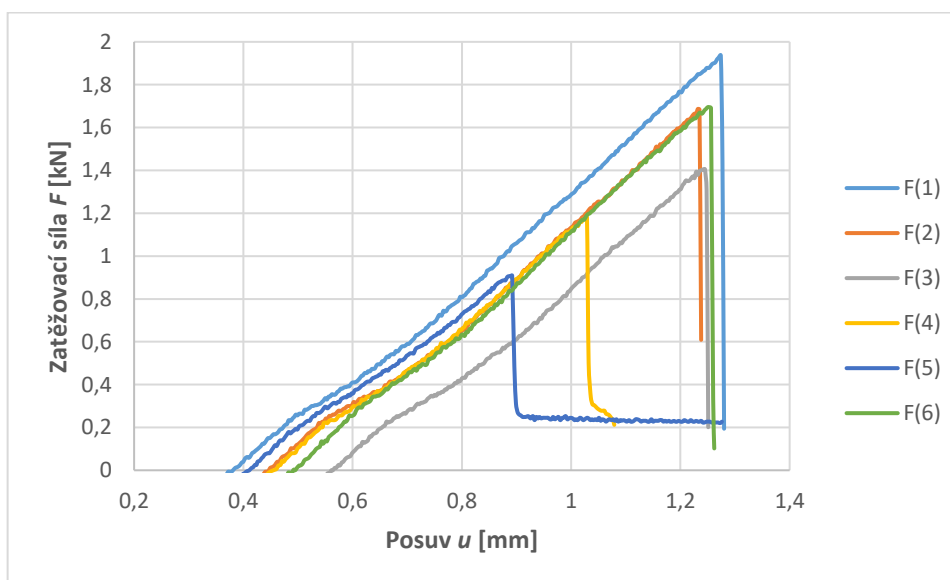
Tabulka 5.8: Hodnoty odečtené z grafu včetně rozdílů

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6
Smykový modul G [MPa]	5,339	5,413	5,502	5,513	5,628	5,566

Tabulka 5.9: Hodnoty smykového modulu G jednotlivých vzorků

5.1.1.5. Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku 5.13 a maximální hodnoty v tabulce 5.10. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,35 \pm 0,55 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.14. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek 5.13: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1937	1687	1405	1181	909	1695

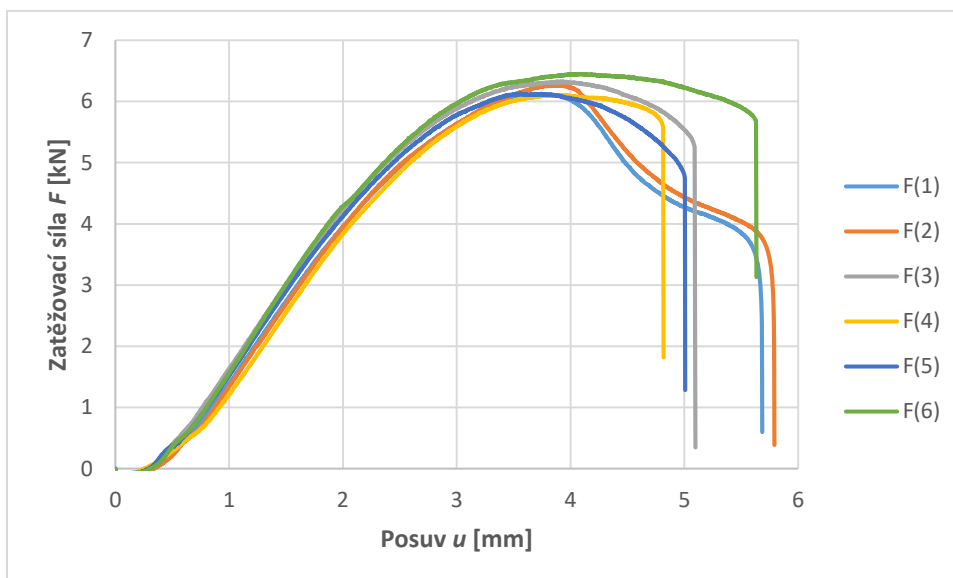
Tabulka 5.10: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek 5.14: Porušené ertacetalové vzorky

5.1.1.6. Vzorky z PVC

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na 5.15 a maximální hodnoty v tabulce 5.11. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $9,98 \pm 0,2 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách 5.12 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku 5.16. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek 5.15: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	6127	6270	6328	6105	6134	6449

Tabulka 5.11: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



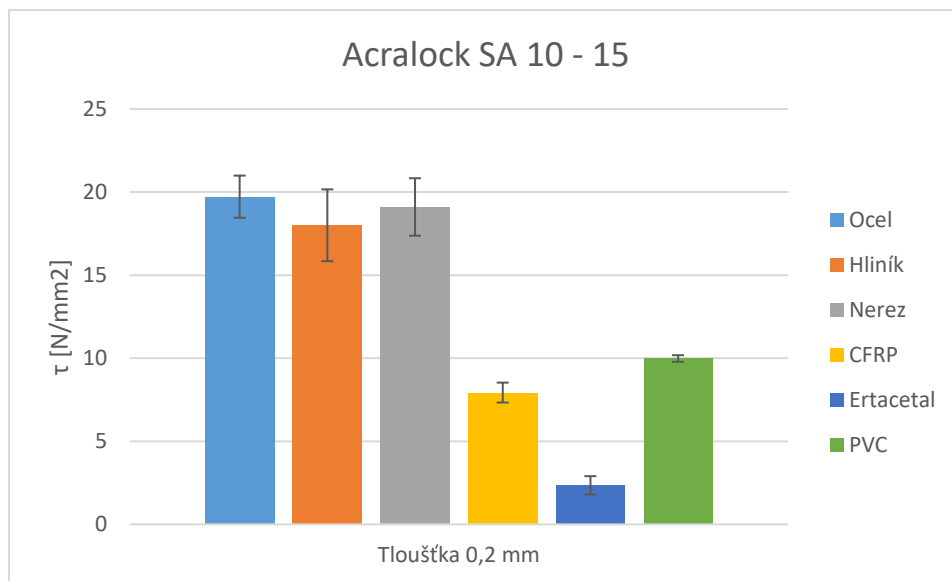
Obrázek 5.16: Porušené vzorky z PVC

5.1.1.7. Souhrnné výsledky pro Acralock SA 10 – 15

Přehled vypočtených hodnot smykové pevnosti je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce 5.12. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku 5.17, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s ocelí. Smykový modul bylo možné určit pouze pro ocelové a nerezové adherendy. Hodnoty jsou uvedené v tabulce 5.13.

Acralock SA 10 - 15	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	7,93 ± 0,6	19,72 ± 1,27	18 ± 2,16	19,1 ± 1,73	2,35 ± 0,55	9,98 ± 0,2

Tabulka 5.12: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Acralock SA 10 – 15



Obrázek 5.17: Přehled smykových pevností pro Acralock SA 10 – 15

Acralock SA 10 - 15	Ocelové vzorky	Nerezové vzorky
G [MPa]	$5,213 \pm 0,224$	$5,494 \pm 0,095$

Tabulka 5.13: Výsledné hodnoty smykových modulů G

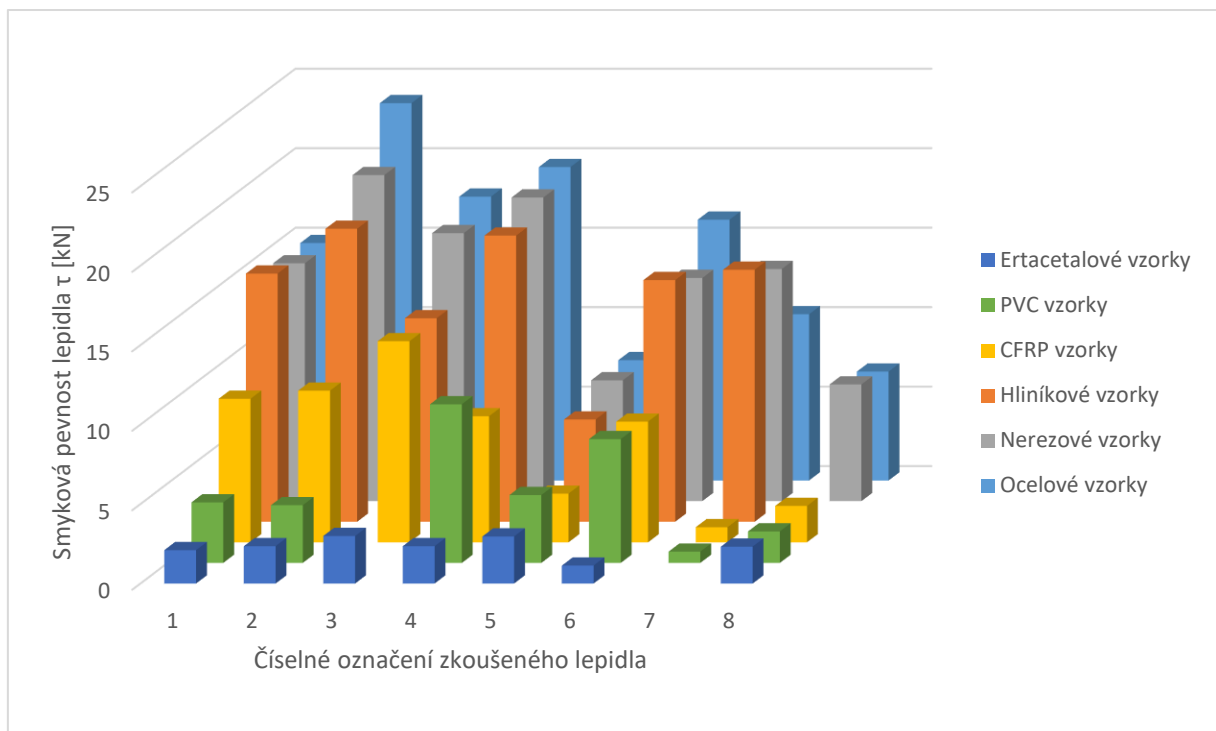
5.2. Srovnání výsledků všech lepidel

V následující části jsou v tabulce 5.14 zobrazeny výsledné hodnoty smykového napětí τ [MPa] pro všechna zkoušená lepidla a všechny zkoušené materiálové kombinace. Proškrtnuté buňky nebyly vyhodnoceny, jelikož dané materiálové kombinace nebyly zkoušeny.

	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Spabond SP 345 – slow	$9,03 \pm 0,86$	$14,94 \pm 4,8$	$15,61 \pm 0,89$	$14,96 \pm 0,79$	$2,1 \pm 0,26$	$3,81 \pm 0,69$
Loctite EA 9466	$9,54 \pm 1,43$	$23,74 \pm 0,51$	$18,43 \pm 1,62$	$20,51 \pm 2,1$	$2,35 \pm 0,24$	$3,63 \pm 0,44$
Loctite EA 9514	$12,65 \pm 1,33$	$17,86 \pm 2,27$	$12,8 \pm 0,52$	$16,86 \pm 1,05$	$2,99 \pm 0,35$	-
Crestabond M1 – 30	$0,95 \pm 0,32$	$10,46 \pm 0,57$	$15,85 \pm 1,23$	$14,60 \pm 1,01$	-	$0,71 \pm 0,45$
Acralock SA 10 – 15	$7,93 \pm 0,6$	$19,72 \pm 1,27$	$18 \pm 2,16$	$19,1 \pm 1,73$	$2,35 \pm 0,55$	$9,98 \pm 0,2$
Bostik SAF 150 – 45	$7,59 \pm 1,44$	$16,41 \pm 0,79$	$15,2 \pm 1,26$	$14,04 \pm 0,38$	$1,13 \pm 0,21$	$7,79 \pm 1,03$
Acralock FA 10 – 10	$3,06 \pm 0,23$	$7,57 \pm 0,42$	$6,43 \pm 0,37$	$7,6 \pm 0,68$	$2,96 \pm 0,41$	$4,27 \pm 1,1$
Pryskyřice 285/286	$2,29 \pm 0,53$	$6,85 \pm 0,91$	-	$7,34 \pm 2,74$	$2,32 \pm 0,2$	$1,98 \pm 0,41$

Tabulka 5.14: Kompletní přehled vypočtených smykových pevností τ [MPa] zkoušených lepidel

Pro lepší představu jsou tyto hodnoty zobrazeny bez odchylek v prostorovém grafu na obrázku 5.18. Pevnosti pro jednotlivé materiály lepidel jsou řazeny v prostorovém grafu ve sloupcích za sebou, dle legendy grafu. Jednotlivá lepidla jsou pak v grafu označena číselně, přičemž jejich přiřazení je patrné v tabulce 5.15. Smykový modul bylo možné určit pouze pro lepidlo Acralock SA 10 – 15, a to pouze pro ocelové a nerezové vzorky, hodnoty jsou tedy v tabulce 5.13.



Obrázek 5.18: Prostorové porovnání vypočtených smykových pevností bez odchylek

1	2	3	4	5	6	7	8
Spabond SP 345 - slow	Loctite EA 9466	Loctite EA 9514	Acralock SA 10 - 15	Acralock FA 10 - 10	Boctik SAF 150 - 45	Crestabond M1 - 30	Pryskyřice 285/286

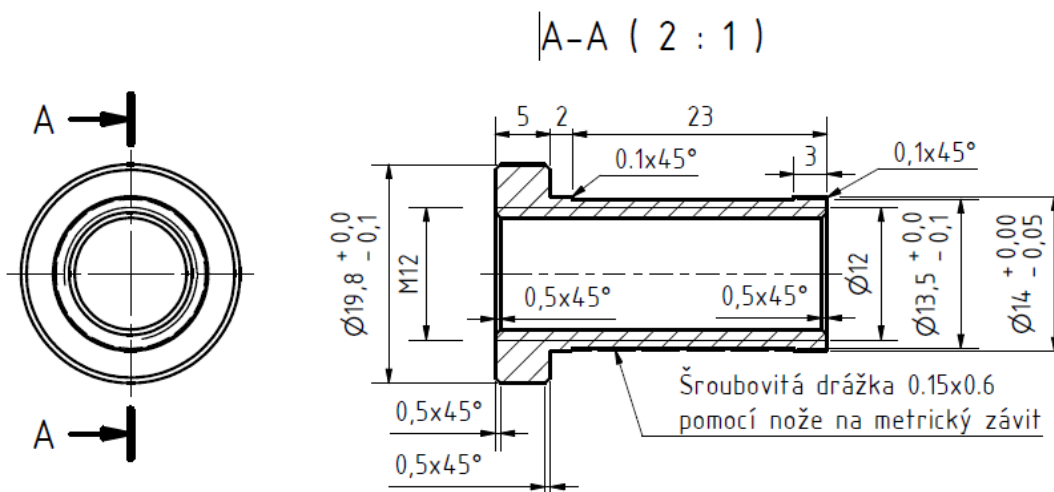
Tabulka 5.15: Číselné označení jednotlivých lepidel v prostorovém grafu

6. Tahová zkouška trubkových lepených vzorků

Dle výsledků z tahové zkoušky plochých lepených vzorků v kapitole 5 byly vybrány 4 lepidla, na kterých byla provedena další tahová zkouška, tentokrát na trubkových vzorcích. Jednotlivá lepidla jsou uvedena v tabulce 6.1 i s počtem jednotlivých vzorků a jejich provedení. Cílem bylo opět zjištění smykové pevnosti jednotlivých lepidel. Všechny vzorky byly pro tuto zkoušku vyrobeny z kompozitu s ocelovými lepenými koncovkami. Koncovky byly ve dvou variantách, a to s drážkou, nebo s hladkým povrchem. Rozměry jsou uvedeny na obrázku 6.1, zkoušené vzorky pak na obrázku 6.2. Lepení koncovek do kompozitních trubek bylo provedeno pomocí injektáže.

	Hladké vzorky	Vzorky s drážkou
Spabond SP 345 slow	-	5
Loctite EA 9514	-	5
Loctite EA 9466	5	10
Acralock SA 10 - 35	5	5

Tabulka 6.1: Přehled vybraných lepidel a počtu vzorků



Obrázek 6.1: Rozměry ocelové koncovky pro trubkové lepené spoje [23]



Obrázek 6.2: Přehled zkoušených trubkových vzorků

Délka lepeného spoje byla 20 mm, vnitřní průměr trubky 14 mm, plocha lepeného spoje je tedy 880 mm². Injektáž lepidla byla provedena otvorem o průměru 7 mm, plocha otvoru je tedy 38,48 mm². Jelikož se nejedná o normovanou zkoušku, byla pro všechny vzorky volena rychlost zatěžování 1 $\frac{mm}{min}$. Zkouška byla realizována na stejném stroji jako předchozí tahová zkouška plochých vzorků, tedy univerzálním trhacím stroji TIRA 2300. Upnutí vzorku v čelistech bylo provedeno skrze ocelovou koncovku. Do té je přes mezikus, který se opře o čelist, našroubován šroub, přes který se přenáší tahové zatížení. Upnutí je zobrazeno na obrázku 6.3. Podrobnosti zkoušky a vyhodnocení jsou uvedeny zvlášť dle jednotlivých lepidel, u lepidla Acralock SA 10 – 35 v této kapitole a pro ostatní lepidla v Příloze B. Jelikož je postup vyhodnocení obdobný jako u předchozí zkoušky, jsou výsledky sumarizovány do tabulek, grafů se záznamy zkoušek a fotografií porušených vzorků.



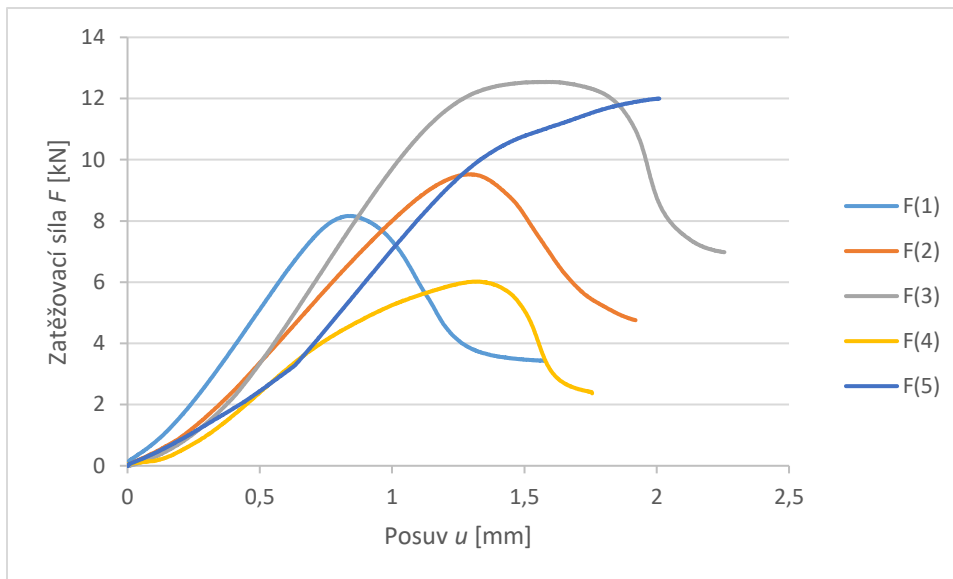
Obrázek 6.3: Trubkový vzorek upnutý v čelistech

6.1. Acralock SA 10 - 35

Toto lepidlo bylo zkoušeno ve dvou variantách, s drážkou a bez ní. Výsledky zkoušky jsou tedy rozděleny do následujících dvou částí.

6.1.1. Varianta s drážkou

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku 6.4, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce 6.2. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou pak zobrazeny porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $10,97 \pm 2,75 \text{ MPa}$, pomocí vzorce (5.1). Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm². Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení.



Obrázek 6.4: Průběh zatěžování vzorků s drážkou

Vzorek	1	2	3	4	5
F_{max} [N]	8166	9524	12547	6020	12000

Tabulka 6.2: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení drážkovaných vzorků



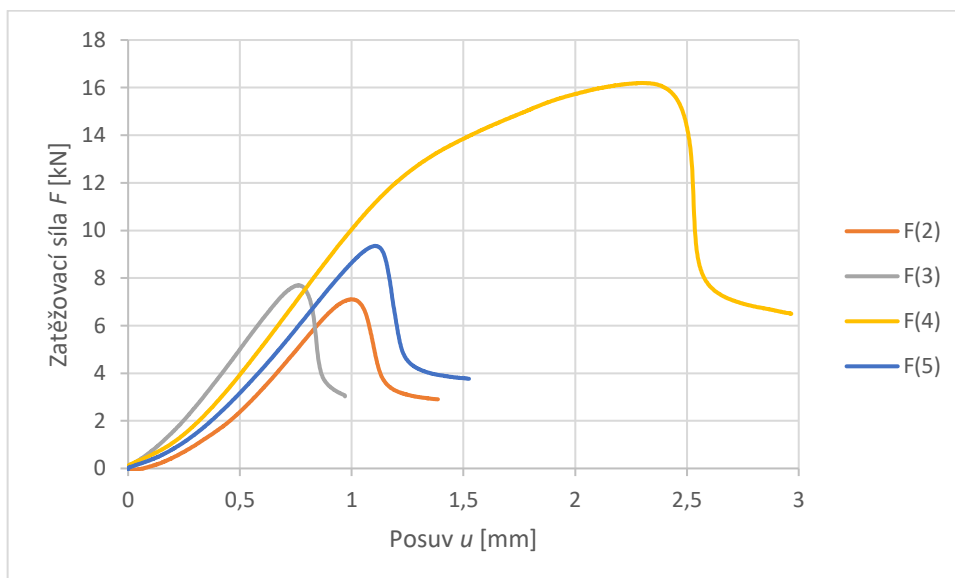
Obrázek 6.5: Porušené vzorky s drážkou



Obrázek 6.6: Detailní pohled na porušený vzorek

6.1.2. Varianta bez drážky

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku 6.7, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce 6.3. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázcích 6.8 a 6.9 jsou pak zobrazeny porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $11,46 \pm 4,11 \text{ MPa}$, pomocí vzorce (5.1). Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm^2 . Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení. Z vyhodnocení byl vyjmut vzorek 1, u kterého došlo k porušení při výrazně nižším zatížení.



Obrázek 6.7: Průběh zatěžování hladkých vzorků

Vzorek	2	3	4	5
$F_{max} [N]$	7106	7697	16201	9351

Tabulka 6.3: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení hladkých vzorků



Obrázek 6.8: Porušené hladké vzorky



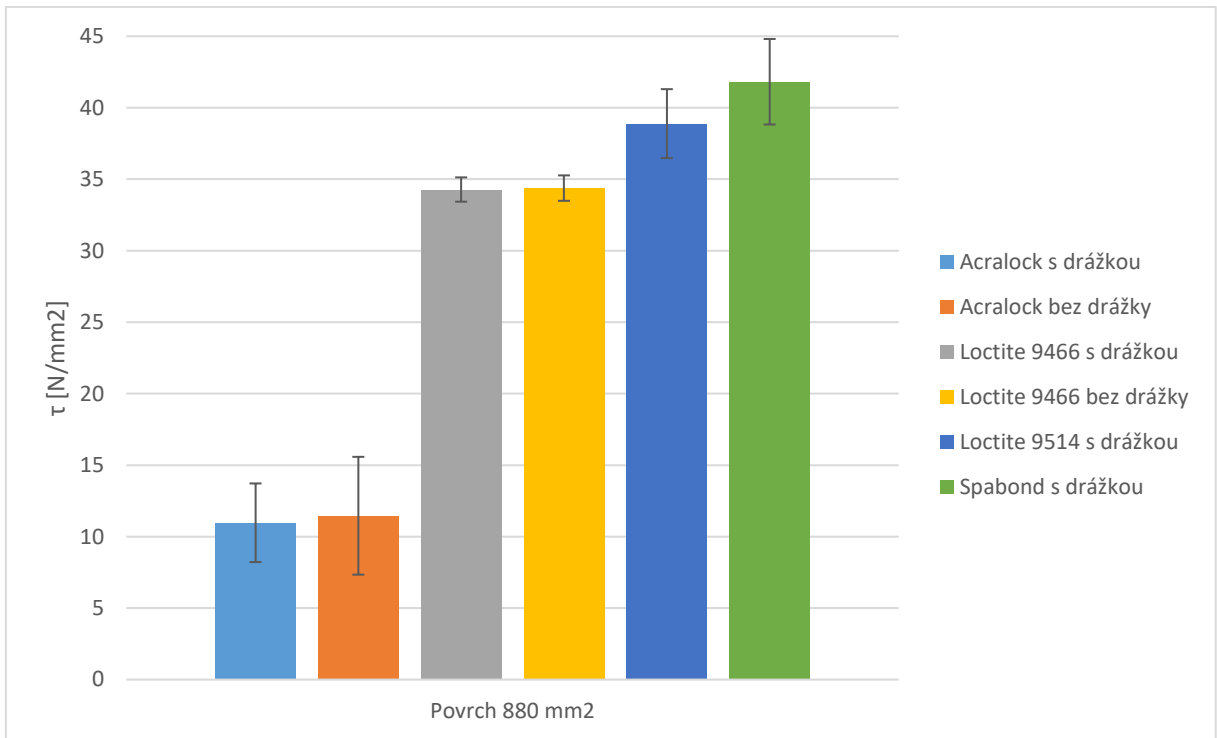
Obrázek 6.9: Detailní pohled na porušený vzorek

6.2. Celkové vyhodnocení

V tabulce 6.4 jsou uvedeny všechny vypočtené smykové pevnosti lepidel z této zkoušky. Hodnoty jsou dále pro lepší přehlednost znázorněny v grafu na obrázku 6.10. Překvapivě nejlepšího výsledku dosáhlo lepidlo Spabond SP 345 – slow, které při tahové zkoušce plochých lepených vzorků dosahovalo nižší smykové pevnosti než lepidla Loctite. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben lidským faktorem, jelikož výroba trubkových vzorků byla automatizovaná. Naopak u lepidla Acralock SA 10 – 35 pravděpodobně došlo k nedostatečnému rozprostření lepidla ve spoji. Pro výpočet zde uváděných hodnot byla použita plocha vzorku bez odečtení plochy, kterou se injektovalo lepidlo. Tímto zjednodušením dostáváme hodnoty smykových pevností a směrodatných odchylek s rozdílem přibližně 4,5 % oproti hodnotě s odečtením této plochy, což je menší rozdíl než směrodatná odchylka většiny zkoušených lepidel a lze tedy toto zjednodušení použít. Ze zkoušky je zároveň patrné, že použití drážky pro lepený spoj nemá zásadní vliv.

Lepidlo	Loctite EA 9466 s drážkou	Loctite EA 9466 bez drážky	Loctite EA 9514 s drážkou	Spabond SP 345 slow s drážkou	Acralock SA 10 – 35 s drážkou	Acralock SA 10 – 35 bez drážky
Smyková pevnost τ [MPa]	34,28 ± 0,85	34,38 ± 0,89	38,89 ± 2,41	41,82 ± 2,99	10,97 ± 2,75	11,46 ± 4,12

Tabulka 6.4: Souhrn smykových pevností τ [MPa] zkoušených lepidel



Obrázek 6.10: Porovnání výsledných smykových pevností zkoušených provedení vzorků

7. MKP simulace tahové zkoušky plochých vzorků

Pro tahovou zkoušku uvedenou v kapitole 5 byla provedena analýza kohezivních prvků pomocí MKP. Cílem bylo naladění pro výpočet maximální síly, kterou lepený spoj přenese. Výpočet byl proveden pouze pro čtyři vybraná lepidla, která byla následně dále zkoušena na trubkových lepených vzorcích, a to pouze pro ocelové adherendy.

7.1. Teorie výpočtu

Ocelové adherendy byly modelovány jako „3D shell“ o tloušťce 3 mm. Mechanické vlastnosti oceli byly zadány $E = 210\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,3$. Lepená vrstva byla modelována jako „cohesive“ s odezvou „Traction separation“, tloušťka byla modelována stejná jako u provedené zkoušky, tedy 0,2 mm. Materiálový model lepidla byl volen jako „Elastic – Traction“, kde se zadávají hodnoty odpovídající E a G modulu lepidla. Hodnoty E byly zjištěny z materiálových listů lepidel. Jelikož hodnoty G výrobci neuvádějí, byly pro potřeby analýzy určeny vynásobením konstanty ve smyslu Poissonova čísla. Hodnoty byly voleny 0,3 a 0,4, přičemž byl následně porovnán vliv velikosti této konstanty. Pro použití hodnot E a G je nutné v programu nastavit v části „Section“ u tloušťky volbu „use nodal coordinates“. Pokud by byla pro výpočet ponechána defaultní volba „use analysis default“, bylo by nutné vydělit moduly skutečnou tloušťkou kohezivní vrstvy, jelikož Abaqus pracuje defaultně s jednotkovou tloušťkou.

Dále bylo voleno iniciační kritérium porušování „damage for traction/separation laws – quads damage“, kterou lze definovat jako:

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^c}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^c}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^c}\right\}^2 = 1 \quad (7.1)$$

přičemž t_n , respektive t_s a t_t jsou normálová, respektive dvě smykové složky vektoru nominálního tahového napětí popisujícího elastické chování kohezivních elementů v režimu „traction separation“. Předpokládá se tedy, že poškození nastane v momentě, kdy kvadratická interakce poměrů maximálního nominálního napětí (tahového nebo smykového) a odpovídajícího skutečného napětí bude rovno jedné, případně větší. Samotné celkové poškození pak reprezentuje skalární proměnná „D“, která v rozmezí od 0 do 1 reprezentuje všechny kombinované efekty aktivních mechanismů. Toto kritérium nicméně určuje pouze počátek porušení materiálu, nikoli však popis vývoje deformace. Pro simulování procesu degradace materiálu je potřeba zadat modelu „damage evolution“, tedy parametry vývoje poškození. Zde bylo voleno lineární změkčení v závislosti na disipované energii. Pro tuto variantu bylo dále použito kritérium porušení „Benzeggagh-Kenane“, kde platí vztah:

$$G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{\frac{G_s}{G_T}\right\}^\eta = G^C \quad (7.2)$$

v němž:

$$G_s = G_s + G_t, G_T = G_n + G_s \quad (7.3)$$

přičemž se u (7.3) společně s η jedná o materiálové parametry, kde uživatel specifikuje G_n^C , G_s^C a η . Toto nastavení je vhodné zejména při stejné disipované energii během deformace pro první a druhý smykový mód, tedy $G_s^C = G_t^C$. Dále byl definován stabilizační koeficient, tedy „damage stabilization cohesive“. Do modelu byly zadány hodnoty uvedené v tabulce 7.1. Klasická odezva modelu „traction separation“ je pak zobrazena na obrázku 7.1. Informace ohledně chování výpočetního programu byly čerpány z [17].

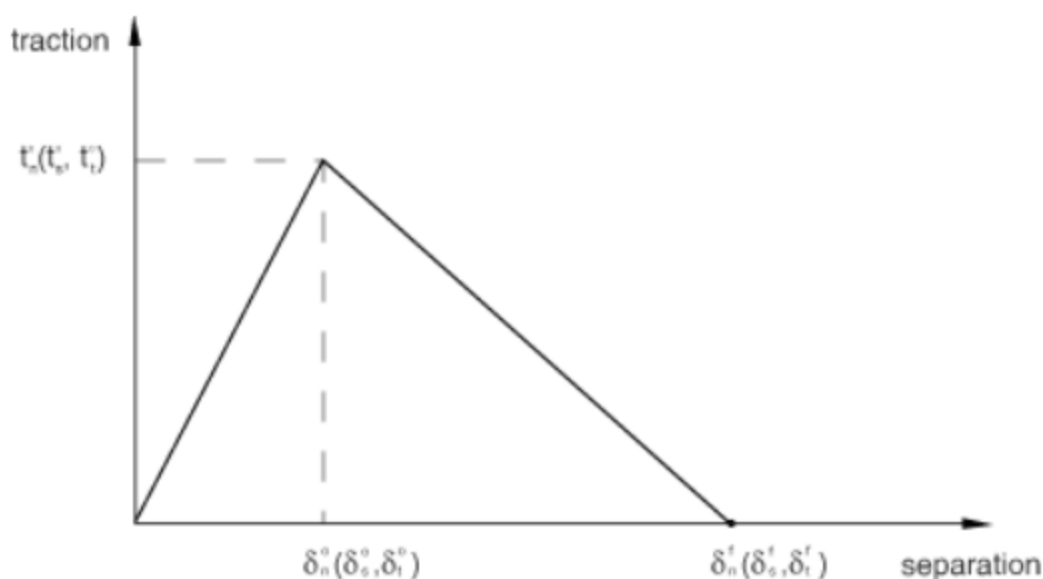
$G_n^C \left[\frac{N}{mm} \right]$	$G_s^C \left[\frac{N}{mm} \right]$	$\eta [-]$	Damage stabilization
2	4	2	1E-7

Tabulka 7.1: Parametry porušování přiřazené modelu

Dále je nutné definovat normálové a smykové pevnosti pro dané lepidlo. Jelikož se jedná o simulaci smykové zkoušky, je podstatná hodnota právě smykové pevnosti. Ta byla pro daná lepidla zjištěna experimentálně. Do modelu pak byla zadána pro oba zatěžovací módy i pro normálovou pevnost. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.2.

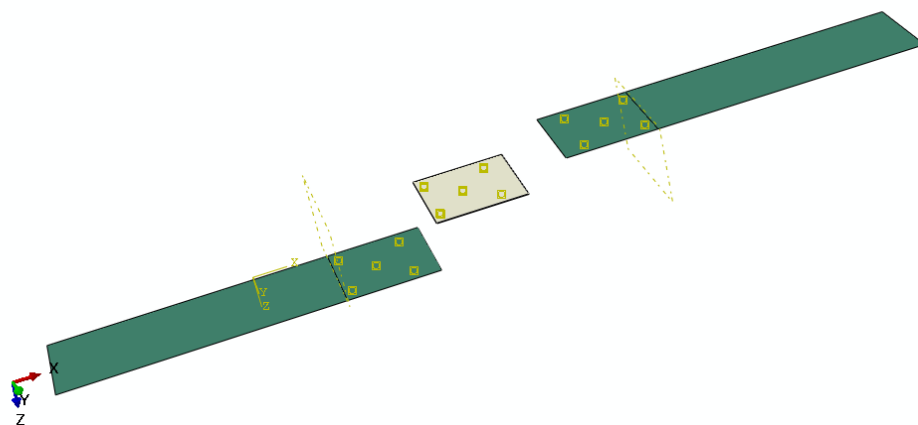
Označení lepidla	σ [MPa]	τ^I [MPa]	τ^{II} [MPa]
Loctite EA 9466	23,74	23,74	23,74
Loctite EA 9514	17,86	17,86	17,86
Spabond SP 345 – slow	14,94	14,94	14,94
Acralock SA 10 – 15	19,72	19,72	19,72

Tabulka 7.2: Smykové a normálové parametry lepidel

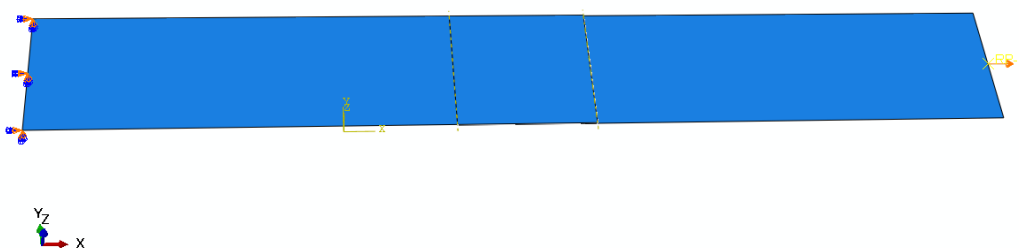


Obrázek 7.1: Typická křivka modelu "traction/separation" [17]

Mezi vrstvou lepidla a adherendem byla použita vazba „tie“, která je znázorněna na obrázku 7.2. Jeden konec adherendu byl pro účel výpočtu vetknut, zatímco druhý konec byl zatěžován posuvem 1 mm přes referenční bod. Příslušný referenční bod byl s adherendem svázán pomocí vazby „coupling“. Znázornění je vidět na obrázku 7.3.

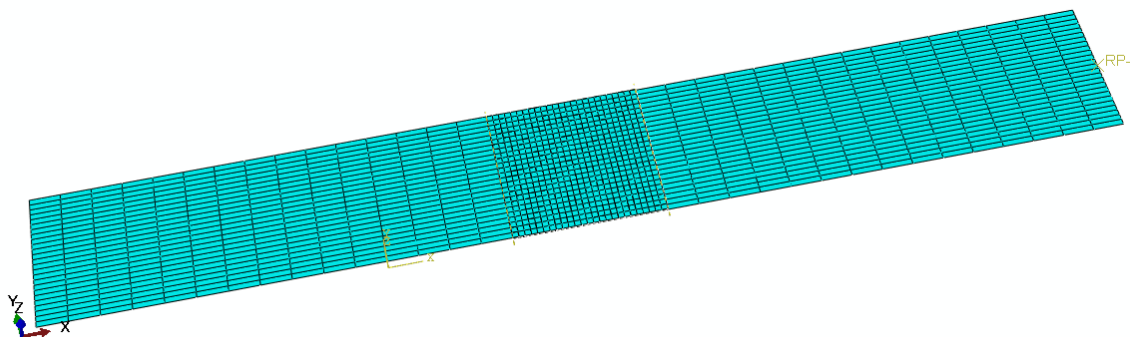


Obrázek 7.2: Zobrazení vazby mezi plochami adherendů a lepidlem



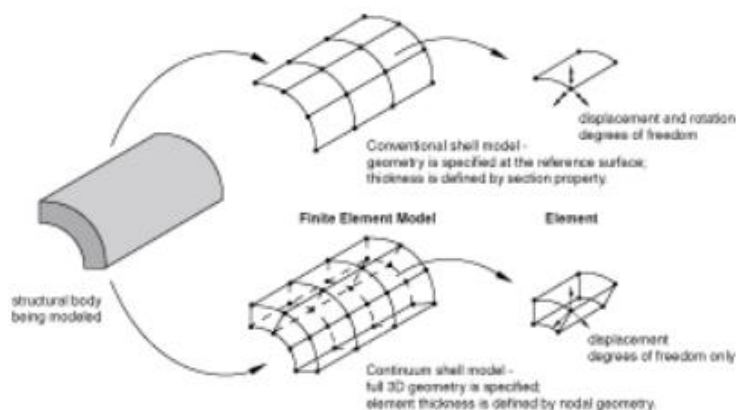
Obrázek 7.3: Zobrazení zatížení a okrajových podmínek modelovaného lepeného spoje

Na modelovaném lepeném spoji byla následně vytvořena síť. Byla volena rozdílná hustota sítě pro části adherendu mimo lepidlo a pro lepidlo a adherend v oblasti lepidla. Jelikož nás zajímá zejména hodnoty v lepeném spoji, byla pro adherendy mimo tuto oblast volena přibližná velikost elementu 7,5, pro lepidlo a adherendy v této oblasti pak byla síť zhuštěna na přibližnou velikost elementu 1. Síť je znázorněna na obrázku 7.4.

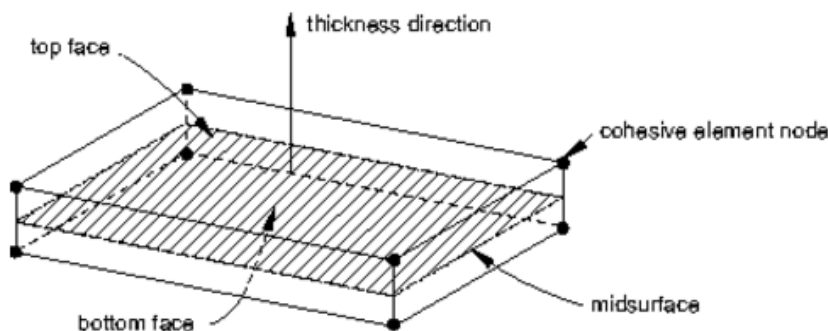


Obrázek 7.4: Zobrazení sítě modelu vzorku

Pro tvorbu sítě byly použity prvky S4R pro ocelové adhérendy a prvky COH3D8 pro kohezivní vrstvu. Prvky S4R jsou čtyřúhelníky, jedná se o základní prvky skupiny „shell“ (viz. obrázek 4.12), které mají 4 uzly. R zde opět značí redukovanou integraci. Prvky z této skupiny se používají pro modelování struktur, které mají jeden rozměr, obvykle tloušťku výrazně menší než ostatní. U prvků ze skupiny „shell“ lze volit mezi variantou kontinuální a konvenční. Rozdíl je patrný na obrázku 7.5. Prvky S4R patří mezi konvenční prvky, tedy diskretizují těleso na referenčním povrchu, přičemž je tloušťka zadávána jako parametr v „property definition“. Prvky COH3D8 jsou znázorněny na obrázku 7.6. [17]

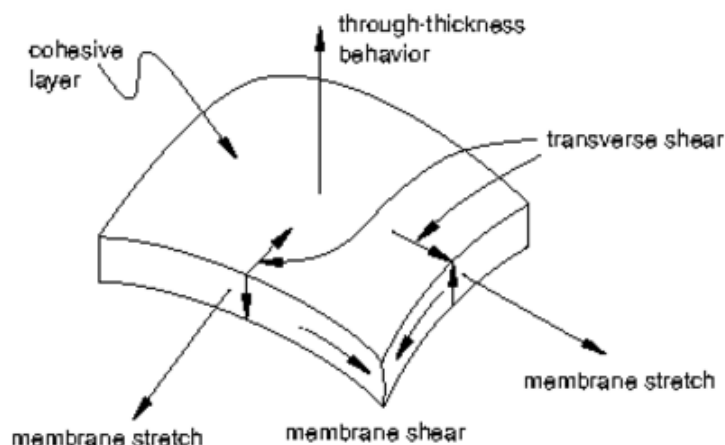


Obrázek 7.5: Kontinuální a konvenční varianta prvků skupiny "shell" [17]



Obrázek 7.6: Prostorová reprezentace kohezivního elementu [17]

Jedná se o elementy speciální skupiny – kohezivních prvků, což označují první tři znaky názvu. Element je prostorový, což značí následující dva znaky 3D a má 8 uzlů. Kohezivní prvky se podobají základním prvkům „continuum elements“, nicméně je vhodné uvažovat o nich jako o dvou plochách oddělených tloušťkou. Relativní pohyb spodní a horní plochy podél tloušťky představuje otevření či uzavření rozhraní. Relativní změna polohy dolní a horní plochy v kolmé rovině na směr tloušťky určuje hodnoty příčného smykového chování kohezivního prvku. Protahování a stříhání střední plochy prvku (uprostřed mezi horní a dolní plochou) je spojeno s membránovým namáháním v kohezivním prvku. Předpokládá se ale, že kohezivní prvky nevytvářejí žádné namáhání v čistě membránové odezvě. Režimy namáhání kohezivního prvku jsou znázorněny na obrázku 7.7 [17].



Obrázek 7.7: Režimy zatěžování kohezivních prvků [17]

7.2. Parametry lepidel

Hodnoty pro výpočet byly brány z katalogových listů příslušných lepidel, hodnoty smykových pevností z provedené tahové zkoušky plochých lepených vzorků. Použité hodnoty jsou znázorněny v tabulce 7.3.

Lepidlo	E	G	ν	τ
Acralock SA 10 – 15	620 [22]	238	0,3	19,72
Acralock SA 10 – 15	620 [22]	221	0,4	19,72
Loctite EA 9466	1718 [27]	660	0,3	23,74
Loctite EA 9466	1718 [27]	613	0,4	23,74
Loctite EA 9514	1460 [28]	561	0,3	17,86
Loctite EA 9514	1460 [28]	521	0,4	17,86
Spabond SP 345 – slow	2700 [23]	1038	0,3	14,94
Spabond SP 345 – slow	2700 [23]	964	0,4	14,94

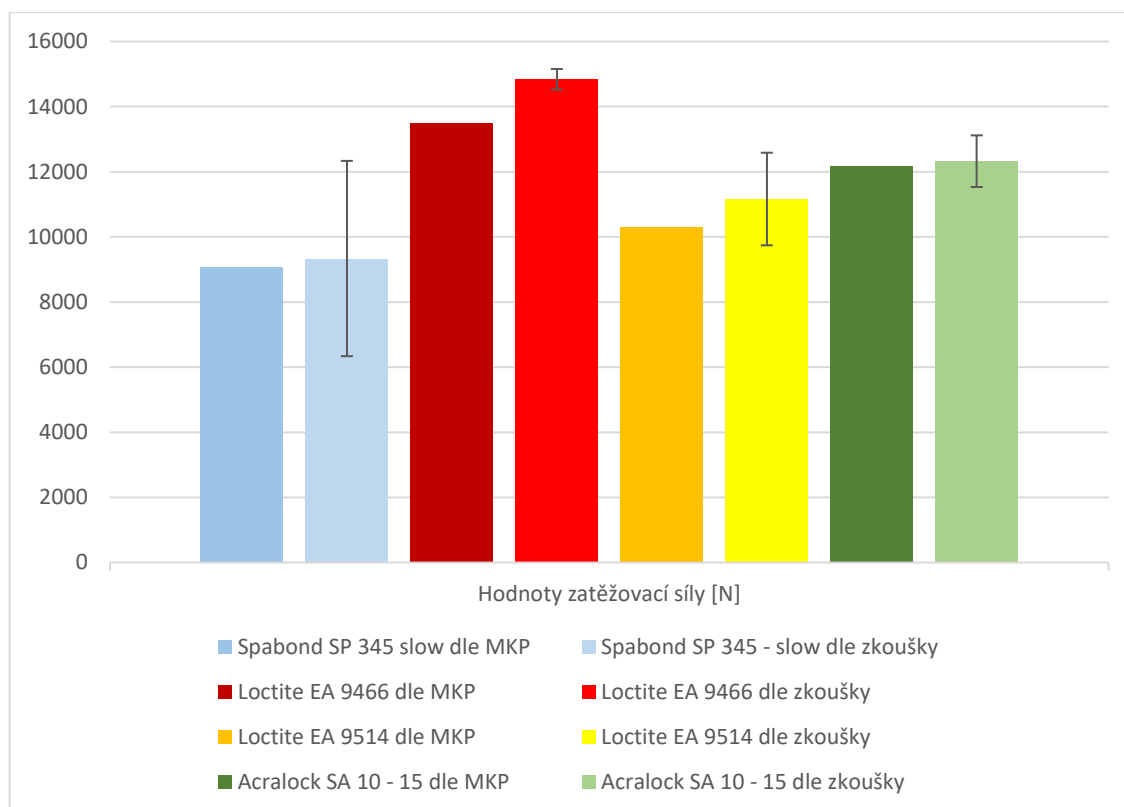
Tabulka 7.3: Parametry lepidel použité pro výpočet

7.3. Výsledky výpočtu

Z výsledku simulace je možné získat závislost síla/posuv, tedy stejnou jako v případě provedené tahové zkoušky. Sílu v modelu sledujeme jako reakční sílu v referenčním bodě, přes který byl vzorek zatěžován. Jelikož byl při tahové zkoušce měřen posuv pouze z posuvu příčnicku stroje, nikoli pomocí extenzometru, neodpovídá výsledný graf ze simulace grafu z tahové zkoušky. Simulace je v tomto ohledu mnohem tužší, jelikož zahrnuje pouze posuv lepeného spoje. Posuv při tahové zkoušce byl dán posuvem lepidla v lepeném spoji a dále případně ovlivněn posuvy dalších částí, vůlemi ve stroji či upnutí, prokluzu, atd. Porovnávat tedy budeme pouze maximální sílu zjištěnou simulací s průměrnou maximální silou zjištěnou z experimentu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.4. Pro lepší představu je toto vyobrazeno v grafu na obrázku 7.8, včetně směrodatných odchylek u zkoušených hodnot. Jednotlivé závislosti síla/posuv jsou pak zobrazeny v příloze C.

Lepidlo	MKP pro $\nu = 0,3$	MKP pro $\nu = 0,4$	F	Rozdíl ν	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F	Rozdíl ν [%]	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F [%]
Spabond SP 345 – slow	9083,39	9066,39	9336,67	17	-253,28	0,19	2,71
Loctite EA 9466	13490	13449,9	14839,67	40,1	-1349,67	0,30	9,10
Loctite EA 9514	10283,5	10298,9	11164,5	-15,4	-881	0,15	7,89
Acralock SA 10 – 15	12171,9	12230,1	12326,17	-58,2	-154,27	0,48	1,25

Tabulka 7.4: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot



Obrázek 7.8: Porovnání hodnot z tahové zkoušky a MKP

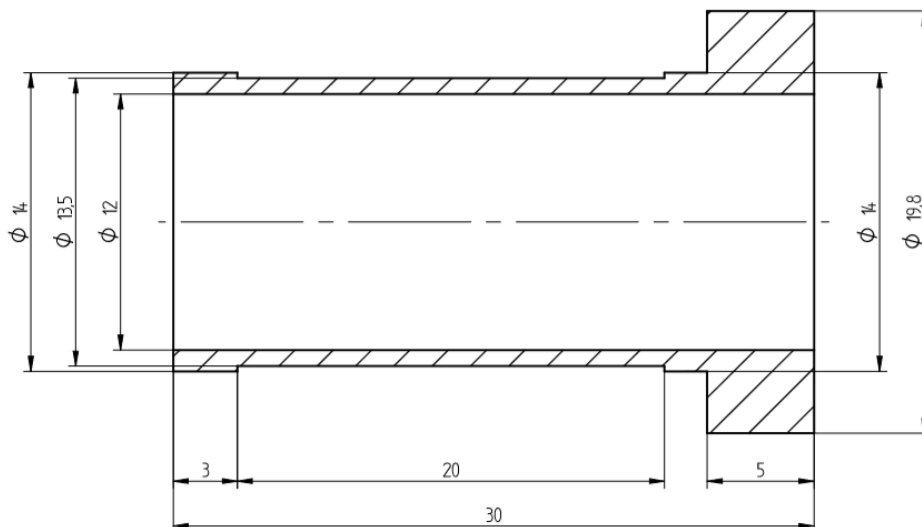
Z hodnot výpočtu je zjevné, že výsledná síla závisí na velikosti voleného koeficientu ve smyslu Poissonova čísla minimálně, největší rozdíl v hodnotách je do 0,5 %, což je zanedbatelná hodnota. Při porovnání s hodnotou naměřenou jsou již rozdíly větší. Nicméně se po započtení směrodatných odchylek z provedených zkoušek s výpočtem hodnoty maximální síly velice dobře přiblížíme experimentu.

8. MKP simulace tahové zkoušky trubkových vzorků

Pro tahovou zkoušku uvedenou v kapitole 6 byla provedena analýza kohezivních prvků pomocí MKP s cílem naladění pro výpočet maximální síly, kterou lepený spoj přenese.

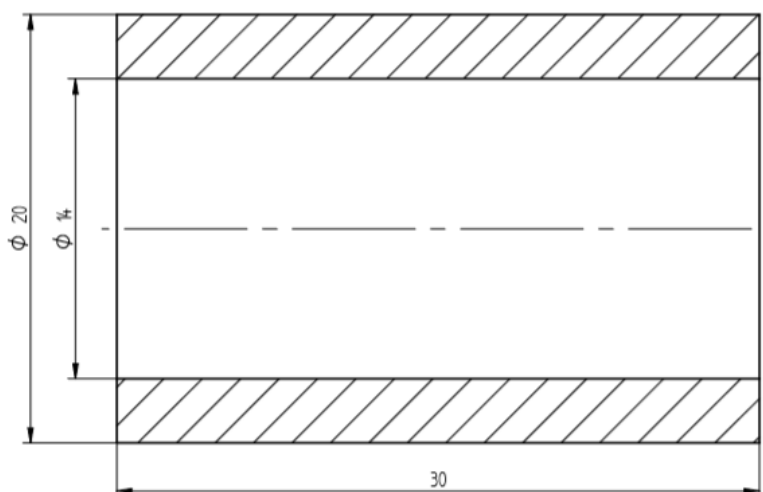
8.1. Teorie výpočtu

Simulace probíhá za stejných podmínek a nastavení jako MKP simulace tahové zkoušky plochých vzorků. Zde se tedy omezíme pouze na rozdíly. Pro určení pevnosti spoje byla modelována pouze polovina vzorku, tedy jedna lepená strana. Ocelová koncovka byla modelována dle rozměrů na obrázku 6.1 ve zjednodušené variantě, která je zobrazena na obrázku 8.1. Pro všechny lepidla byl výpočet proveden na tomto plochém vzorku koncovky.



Obrázek 8.1: Ocelová koncovka pro výpočet MKP

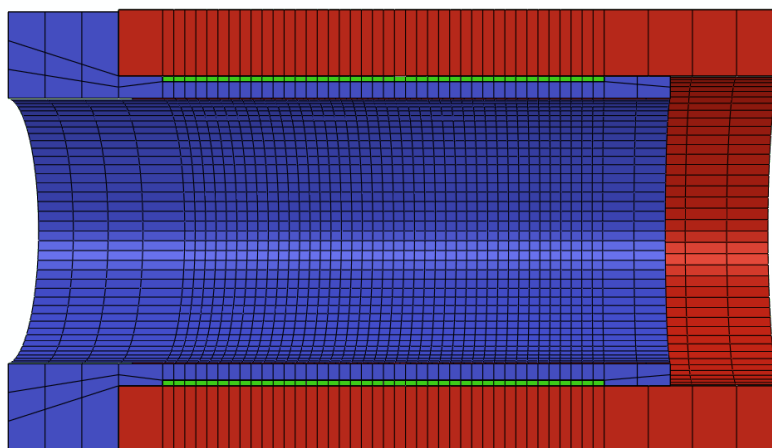
Kompozitní trubka byla modelována v rozměrech dle obrázku 8.2 a byla pro ni zadána skladba dle tabulky 8.1. Materiál byl volen jako UHM dle tabulky 9.2. Tato skladba byla vybrána, jelikož se nepodařilo zjistit skutečnou skladbu dodaných vzorků. Skladba materiálu nicméně nemá na výsledek simulace vliv, protože nejslabším článkem spoje stále zůstává kohezivní vrstva. V modelu nebyl uvažován otvor pro injektáž lepidla, což má na pevnost spoje minimální vliv. Lepidlem pak byl vyplněn prostor mezi koncovkou a trubkou, což je patrné na obrázku 8.3.



Obrázek 8.2: Kompozitní trubka pro analýzu MKP

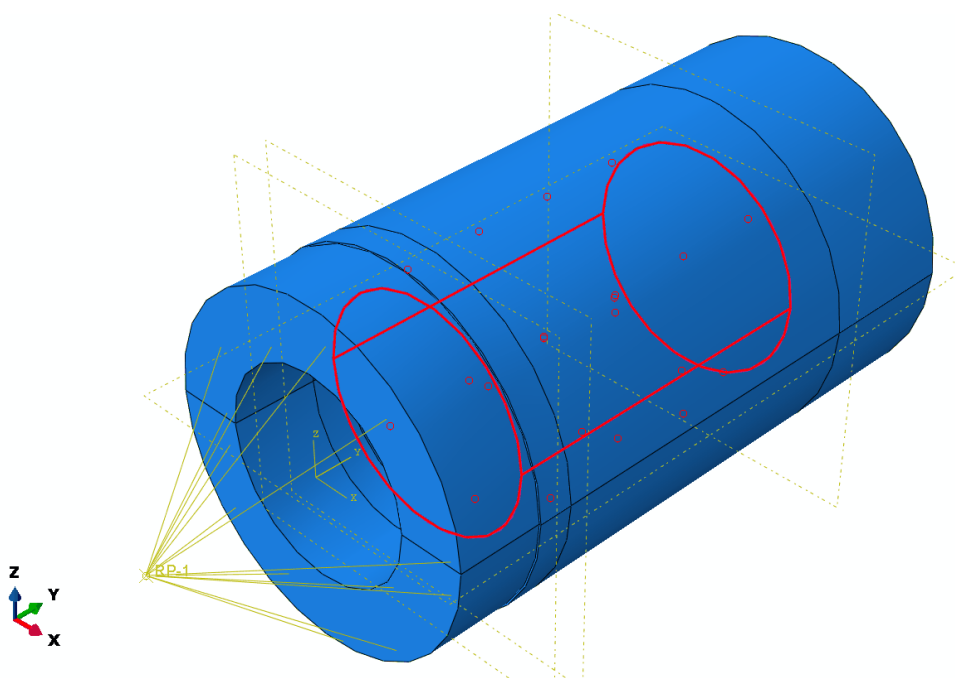
Pořadí vrstvy od středu	Tloušťka vrstvy	Orientace vláken
1	0,2	45
2	0,4	-45
3	0,2	45
4	1,2	0
5	0,2	87
6	0,2	45
7	0,4	-45
8	0,2	45

Tabulka 8.1: Skladba kompozitní části modelu



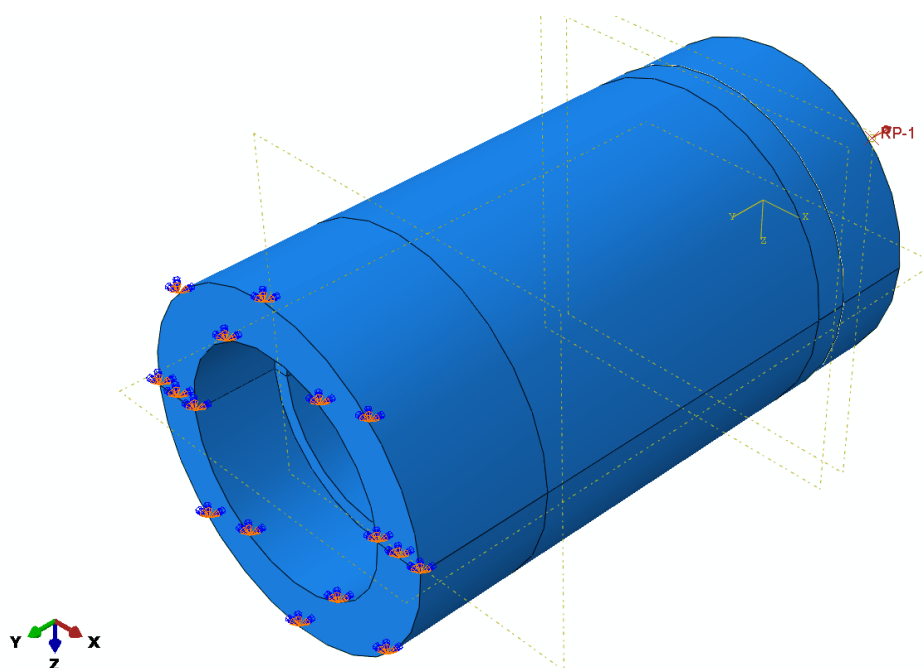
Obrázek 8.3: Zobrazení řezu modelovaným vzorkem

Mezi lepidlem a ocelovou koncovkou, stejně jako lepidlem a kompozitní trubicí, byla použita vazba „tie“. Vazba byla přiřazena pouze na válcovou plochu obou adherendů. Referenční bod byl opět spojen vazbou „coupling“, v tomto případě k vnější čelní ploše ocelové koncovky. Referenční bod byl posunut v ose y 15 mm před vzorek. Vazby jsou znázorněny na obrázku 8.4.



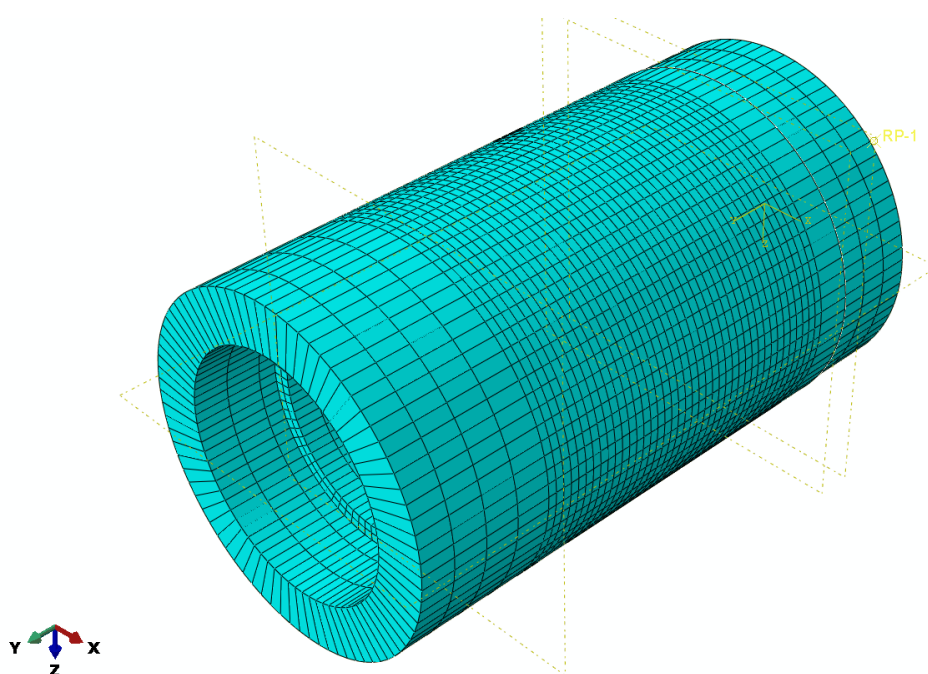
Obrázek 8.4: Zobrazení vazeb výpočtového modelu

Vzorek byl na vnější čelní ploše kompozitní trubky vetknut. Skrze referenční bod byl pak zatěžován posuvem 2 mm. Zatěžování je zobrazeno na obrázku 8.5.



Obrázek 8.5: Zobrazení zatěžování výpočtového modelu

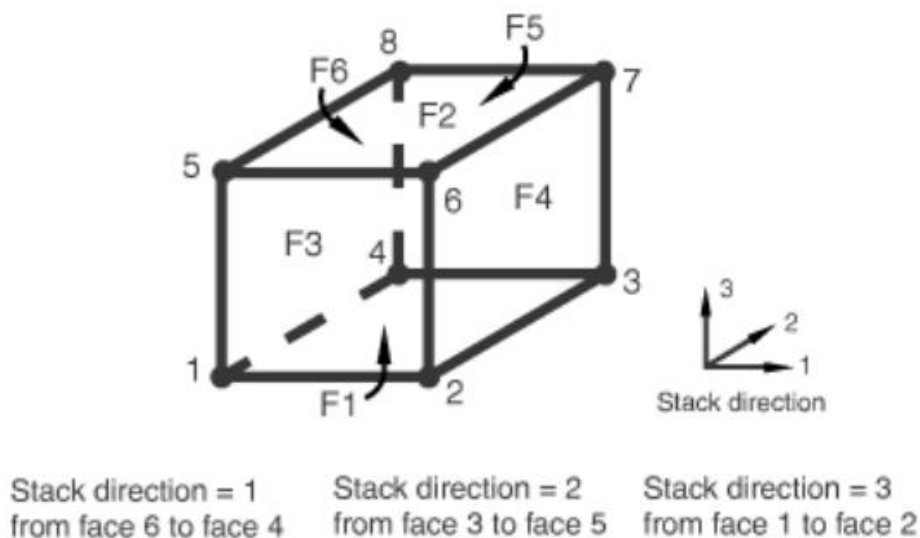
Síť byla opět volena hustší v oblasti lepidla. Pro celý model byla volena globální velikost elementu 2, v oblasti lepidla pak byla zhuštěna na 80 prvků po obvodu a délce. Síť je zobrazena na obrázku 8.6. Pro ocelovou koncovku byly použity prvky C3D8R a pro kohezivní vrstvu COH3D8. Pro kompozitní trubku byly použity prvky SC8R.



Obrázek 8.6: Síť na výpočtovém modelu

Prvky SC8R jsou ze skupiny „Continuum shell“, tvarově jsou podobné prvkům C3D8. jedná se tedy opět o krychle, které mají 8 uzlů a využívají redukované integrace. U těchto prvků je důležité

správně nastavit orientaci, jelikož se chovají jinak ve směru tloušťky a ve směru roviny. Elementy se při tvorbě orientují automaticky podle umístění uzlů, přičemž automaticky směřují od spodní plochy (uzly 1-2-3-4) k horní ploše (uzly 5-6-7-8). Tato orientace je stejná pro směr tloušťky i kladení elementů na sebe. Pro prvek SC8R jsou 3 možné nastavení orientace, viz. obrázek 8.7. Jeden prvek pak po tloušťce obsahuje několik integračních bodů, přičemž výstup dává pouze pro horní a dolní bod. Každý prvek obsahuje celou skladbu dané sekce materiálu [17].



Obrázek 8.7: Možnosti orientace kladení elementů na sebe [17]

8.2. Parametry lepidel

Hodnoty tahového modulu E pro výpočet byly brány z katalogových listů příslušných lepidel, hodnoty smykových pevností z provedené tahové zkoušky trubkových spojů. Jelikož nebyla pro všechna lepidla provedena zkouška na hladkých vzorcích, byla pro tato lepidla do výpočtu použita smyková pevnost ze vzorků s drážkou. Došlo k výměně lepidla Acralock SA 10 – 15 za provedení Acralock SA 10 – 35. Jedná se nicméně o stejné lepidlo, které by mělo mít stejné parametry a liší se pouze dobou tuhnutí. Hodnoty G smykového modulu výrobce neuvádí, a proto byly stejně jako v kapitole 7 určeny vynásobením tahového modulu E konstantou symbolizující Poissonovo číslo s hodnotou 0,3. Zadání hodnot do modelu bylo analogické, jako v kapitole 7. Přehled použitých hodnot je znázorněn v tabulce 8.2.

Lepidlo	E	G	ν	τ
Acralock SA 10 – 35	620 [22]	238	0,3	11,46
Loctite EA 9466	1718 [27]	660	0,3	34,38
Loctite EA 9514	1460 [28]	561	0,3	38,89
Spabond SP 345 – slow	2700 [23]	1038	0,3	41,82

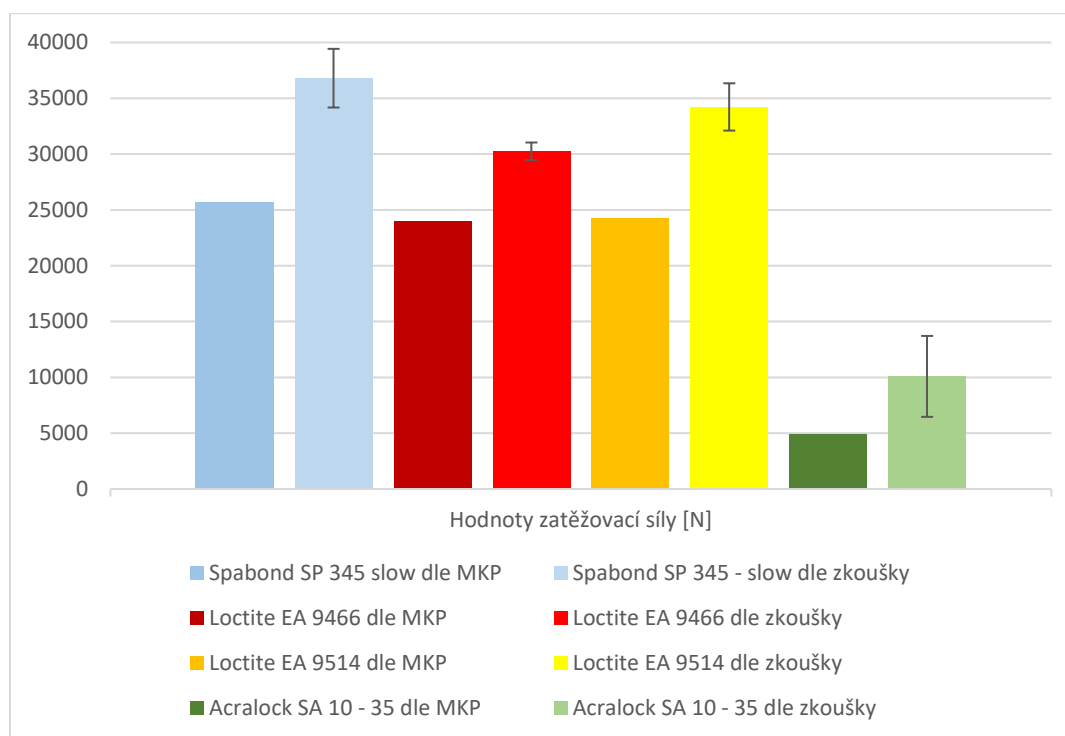
Tabulka 8.2: Parametry lepidel pro analýzu trubkových vzorků

8.3. Výsledky výpočtu

Ze stejných důvodů jako u simulace plochých vzorků zde sledujeme pouze velikost maximální síly a tu porovnáváme s průměrnou maximální silou určenou experimentem. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 8.3 a dále znázorněny v grafu na obrázku 8.8, včetně směrodatných odchylek naměřených hodnot. Z výsledků je vidět, že se hodnota vypočtené síly oproti experimentu liší až o 51,37 %.

Lepidlo	MKP pro $\nu = 0,3$	F	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F [%]
Spabond SP 345 – slow	25659,2	36797,8	-11138,6	30,27
Loctite EA 9466	23913,4	30254	-6340,6	20,96
Loctite EA 9514	24209,7	34222	-10012,3	29,26
Acralock SA 10 – 35	4906,1	10088,75	-5182,65	51,37

Tabulka 8.3: Výsledky analýzy MKP trubkových vzorků



Obrázek 8.8: Porovnání výsledků s tahovou zkouškou

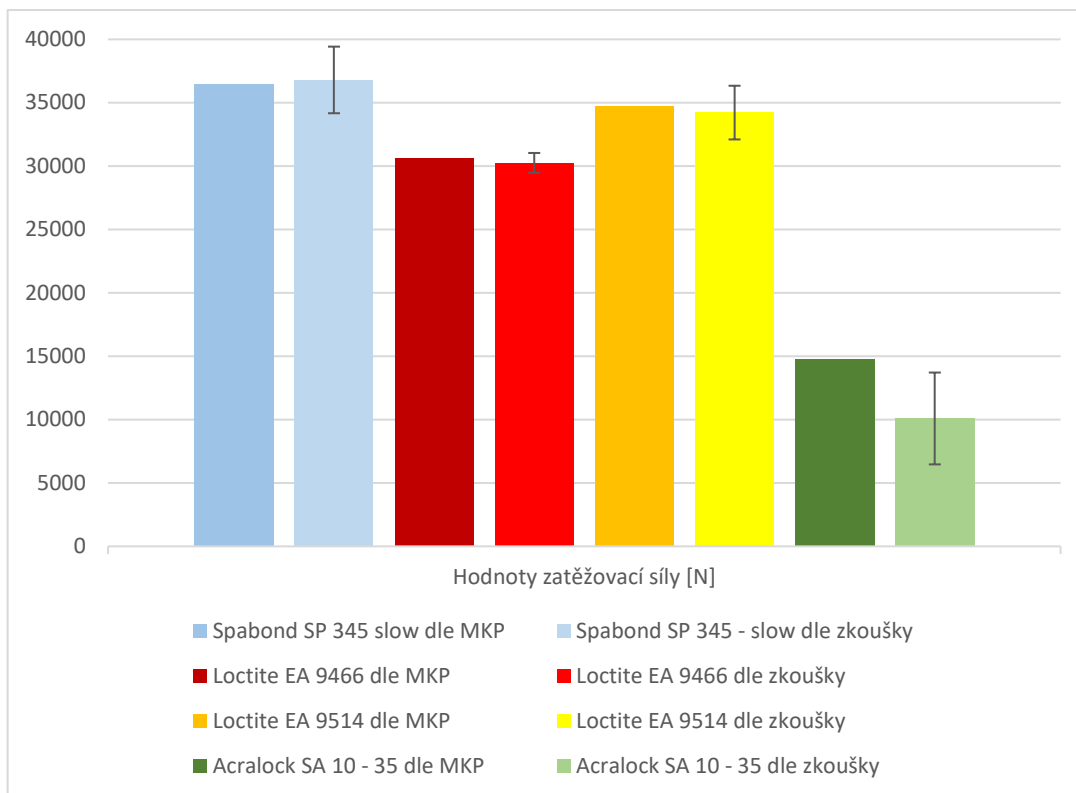
Vzhledem k velkému rozdílu simulace oproti tahové zkoušce bylo přistoupeno k dalšímu ladění modelu, aby se dosáhlo lepší shody. Výsledek může být ovlivněn vyšším rozptylem naměřených hodnot, či neznalostí normálové pevnosti a pevnosti druhého smykového módu. Vliv má zřejmě i složitější geometrie vzorku, kdy zřejmě nedochází k čistě smykovému zatížení lepidla pouze v prvním módu. Hodnoty byly zadávány pro všechny zatěžovací módy stejné, a to zjištěné pro první smykový mód. Byly tedy upraveny hodnoty pro druhý smykový mód zatěžování. Hodnoty nového nastavení druhého smykového módu pro jednotlivá lepidla jsou v tabulce 8.4. S touto změnou byl zopakován výpočet a výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.5 a znázorněny v grafu na obrázku 8.9.

Lepidlo	σ [MPa]	τ^I [MPa]	τ^{II} [MPa]
Spabond SP 345 – slow	41,82	41,82	50
Loctite EA 9466	34,38	34,38	48
Loctite EA 9514	38,89	38,89	48
Acralock SA 10 – 35	11,46	11,46	20

Tabulka 8.4: Upravené parametry lepidel

Lepidlo	MKP pro $\nu = 0,3$	F	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F	Rozdíl $\nu = 0,3$ a F [%]
Spabond SP 345 – slow	36479,3	36797,8	-318,5	0,87
Loctite EA 9466	30648,3	30254	394,3	1,30
Loctite EA 9514	34732,8	34222	510,8	1,49
Acralock SA 10 – 35	14787,5	10088,75	4698,75	46,57

Tabulka 8.5: Výsledky upravené analýzy MKP trubkových vzorků



Obrázek 8.9: Porovnání výsledků upraveného modelu s tahovou zkouškou

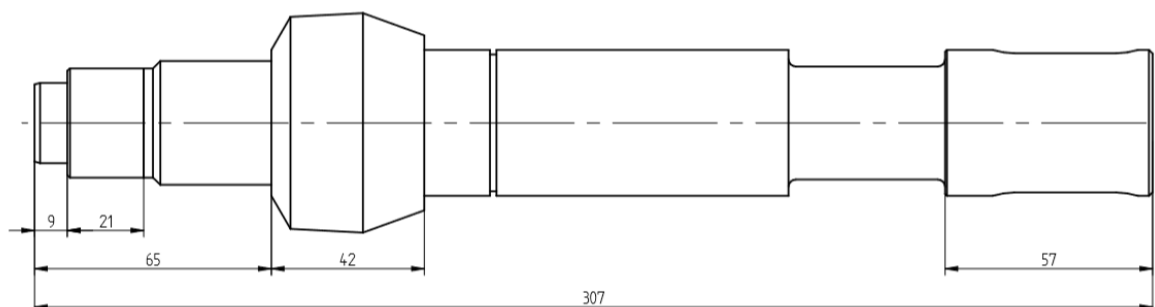
Po úpravě parametrů modelů se podařilo přiblížit k hodnotám z tahové zkoušky. U třech lepidel došlo k výraznému zpřesnění výsledku. U lepidla Acralock SA 10 – 35 se model nepodařilo naladit a odchylka zůstává téměř stejná. Jednotlivé závislosti síla/posuv jsou zobrazeny v příloze D.

9. Návrh a optimalizace kompozitní varianty

Po analýze zatížení původní ocelové výstupní hřídele, byla firmou Compo Tech PLUS, spol. s r. o. dodána navrhovaná varianta hřídele, včetně základní skladby materiálu, k vyhodnocení a případné optimalizaci. Popis navrhované varianty, včetně skladby vláken, její analýzy a výsledků je uveden níže v této kapitole.

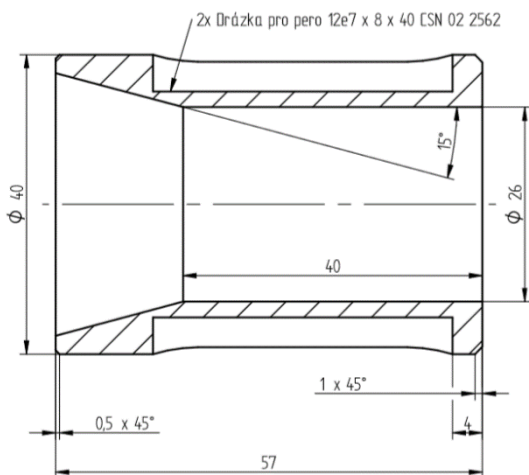
9.1. Navrhované geometrie a skladba

Navrhovanou variantou je hybridní hřídel, skládající se z ocelových a kompozitních součástí. Její znázornění je na obrázku 9.1, včetně umístění jednotlivých částí. Hřídel je složena celkem z 5 částí, jež jsou podrobněji znázorněny níže na obrázcích 9.2 až 9.6.

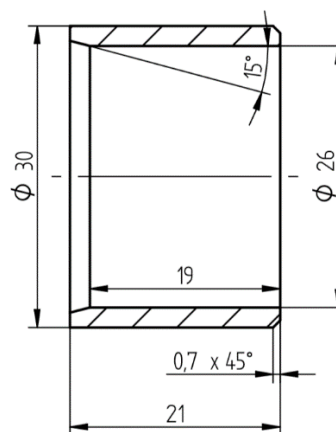


Obrázek 9.1: Navrhovaná hybridní hřídel

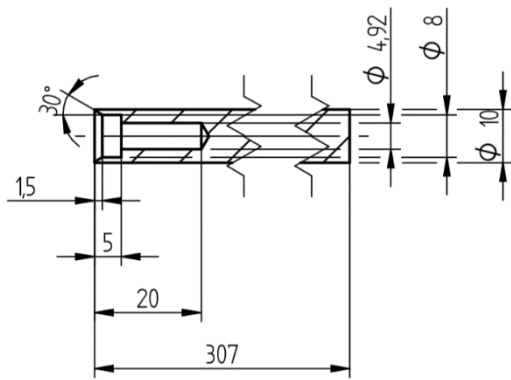
Na obrázku 9.2 je znázorněna ocelová koncovka hřídele, která je určena pro přenos kroutícího momentu z výstupní hřídele pomocí pera. Na obrázku 9.3 je pak zobrazen ocelový kroužek, který je na hřídeli umístěný pod válečkovým ložiskem. Na obrázku 9.4 je pak ocelová výztuha, která prochází skrze celou kompozitní část hřídele. Tato ocelová výztuha slouží zároveň jako trn při navíjení kompozitní trubky. Na obrázku 9.5 je znázorněn navrhovaný ocelový věnec, na kterém je pak umístěno ozubení a přenáší se zatížení.



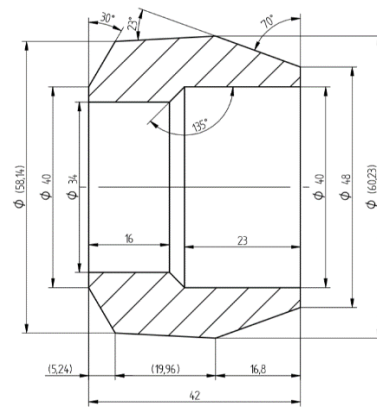
Obrázek 9.2: Ocelová koncovka



Obrázek 9.3: Ocelový kroužek pod ložisko

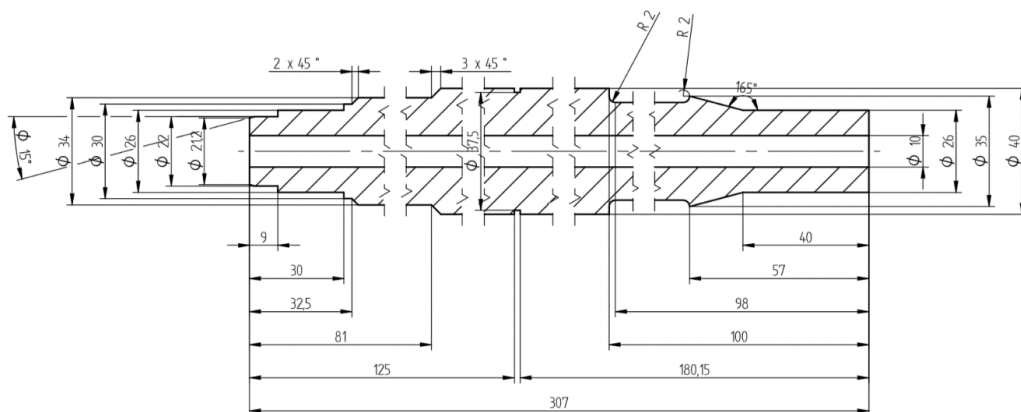


Obrázek 9.4: Ocelový trn



Obrázek 9.5: Ocelový věnec

Na obrázku 9.6 je zobrazena samotná navrhovaná kompozitní trubka. Dodaná základní skladba vláken je uvedena v tabulce 9.1, přičemž bylo navrženo použití celkem 3 materiálů, rozdělených do 14 vrstev o celkové tloušťce 15,47 mm. Jedná se o vlákna vysokopevnostní (HS) a ultra-vysokomodulová (UHM). Výztuha, kroužek a koncovka jsou z oceli. Ocelový věnec je navrhovaný jako kompozitní, ale jelikož pro něj nebyla dodána žádná skladba materiálu, byl v analýze zahrnut také jako ocelový. Jednotlivé materiály a jejich vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 9.2. Jednotlivé části hřídele jsou pak zobrazeny podrobněji v příloze E.



Obrázek 9.6: Kompozitní hřídel

Pořadí vrstvy od středu hřídele	Tloušťka vrstvy [mm]	Orientace vrstvy [°]	Materiál
1	2,51	±45	UHM
2	0,22	85	HS
3	2,60	±45	UHM
4	0,22	87	HS
5	2,64	±37	UHM
6	0,22	87	HS
7	1,75	0	UHM
8	0,36	±60	HS
9	1,04	0	UHM
10	0,34	±60	HS
11	1,51	±44	UHM2
12	1,02	0	UHM2
13	0,53	±48	HS
14	0,52	±48	HS

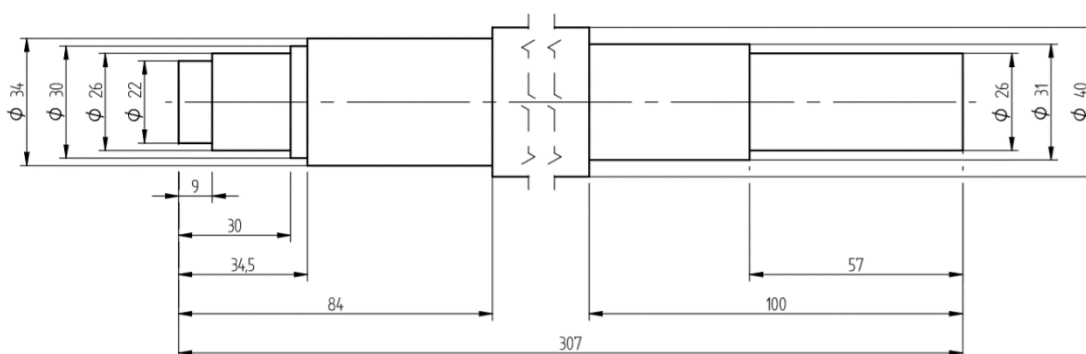
Tabulka 9.1: Navrhovaná skladba vrstev kompozitní trubky

	E_L [MPa]	E_T [MPa]	G_{LT} [MPa]	ν_{LT} [-]	ν_{TL} [-]	α_L [K^{-1}]	α_T [K^{-1}]
HS	128188	4993	3352	0,339	0,013	7,3E-07	7,0E-05
UHM	481888	3673	3180	0,371	0,003	-1,2E-06	7,0E-05
UHM2	421948	3673	3180	0,371	0,003	-1,2E-06	7,0E-05

Tabulka 9.2: Materiálové vlastnosti jednotlivých vláken

9.2. Analýza navrhované hřídele pomocí MKP

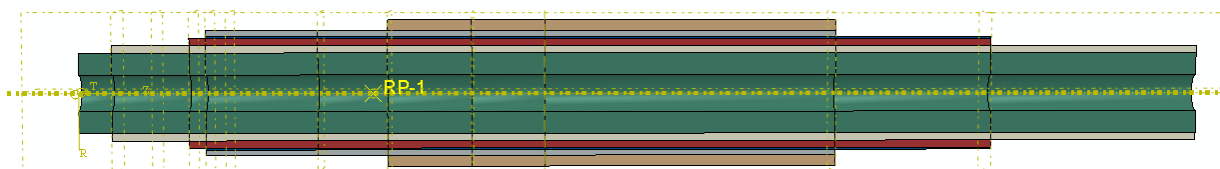
Analýza MKP probíhala obdobně, jako u původní ocelové hřídele. Pro analýzu pomocí MKP byl tedy navrhovaný hřídel zjednodušen. Došlo k upravení prvků, které nemají na výpočet a celkovou pevnost hřídele zásadní vliv, tedy odstranění sražení hran, zaoblení, zápichu a kuželové části. Rozměry a tvar upraveného modelu lze vidět na obrázku 9.7. Geometrie modelu byla upravována pouze pro kompozitní trubku.



Obrázek 9.7: Upravený kompozitní hřídel

Základní skladba vrstev materiálu kompozitní součásti byla pro výpočet rozdělena na třicet vrstev tak, aby byla vhodně aplikovatelná ke geometrii modelu. Došlo k rozdělení tloušťek jednotlivých dodaných vrstev na menší části, kdy pro vrstvy orientované pod úhly symetricky \pm bylo provedeno rozdělení vždy na tři vrstvy. Ty byly tvořeny vždy jako $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, tloušťky původní vrstvy a pořadí orientace +, -, + původního úhlu. Skladba materiálu použitá pro výpočet je tedy vidět v tabulce 9.3, včetně přiřazených průměrů modelu. V tabulce je uveden vždy vnější poloměr příslušné oblasti, přičemž vnitřní strana hřídele začíná na poloměru 5 mm.

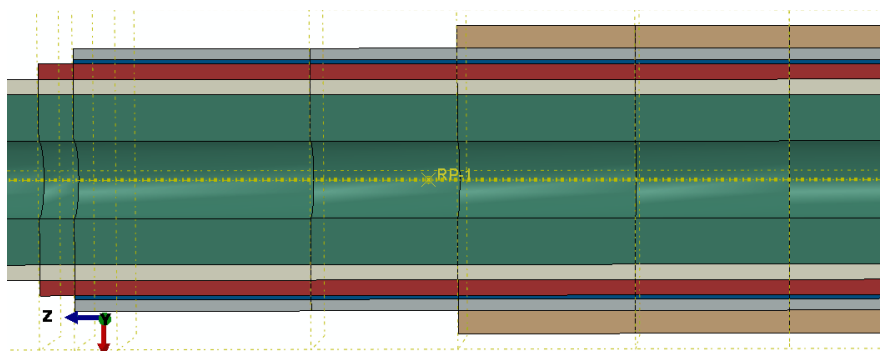
Na obrázku 9.8 je vidět průřez hřídele, včetně lokálního cylindrického souřadného systému, a barevné rozdělení oblastí přiřazení vrstev k modelu. Hřídel byla podélně nařezána na šest válců o vnějších poloměrech 11 mm, 13 mm, 15 mm, 15,3 mm, 17 mm a 20 mm. Detailnější pohled je na obrázku 9.9. Jednotlivým vrstvám pak byla přiřazena skladba vláken dle tabulky 9.3. Tloušťka navrhované kompozitní skladby jednotlivých vrstev přesně neodpovídá tloušťkám jednotlivých válců, na které byl model pro přiřazení vrstev rozdělen, což zanedbatelně ovlivňuje výpočet.



Obrázek 9.8: Oblasti přiřazení jednotlivých vrstev modelu

Původní číslo vrstvy	Nové číslo vrstvy	Tloušťka	Součet tloušťek pro sekci	Orientace	Materiál	Vnější poloměr válce
1	1	0,627847	6,214351	45	UHM	11
	2	1,255694		-45	UHM	
	3	0,627847		45	UHM	
2	4	0,22		85	HS	
3	5	0,65031		45	UHM	
	6	1,300619		-45	UHM	
	7	0,65031		45	UHM	
4	8	0,22		87	HS	
5	9	0,659136		1,977408	37	
	10	1,318272	-37		UHM	
	11	0,659136	37		UHM	
6	12	0,22	2,061873	87	HS	15
7	13	1,75		0	UHM	
8	14	0,090287		0,270862	60	
	15	0,180575	-60		HS	
	16	0,090287	60		HS	
10	17	1,038827	1,754188	0	UHM	17
	18	0,084296		60	HS	
	19	0,168592		-60	HS	
	20	0,084296		60	HS	
11	21	0,378177	3,195138	44	UHM2	20
	22	0,756355		-44	UHM2	
	23	0,378177		44	UHM2	
12	24	1,02		0	UHM2	
13	25	0,13136		48	HS	
	26	0,26272		-48	HS	
	27	0,13136		48	HS	
14	28	0,129886		48	HS	
	29	0,259772		-48	HS	
	30	0,129886	48	HS		

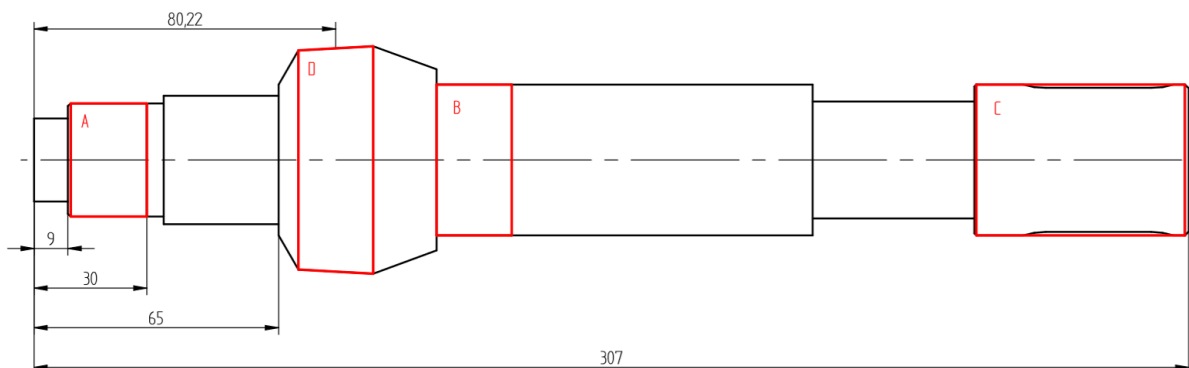
Tabulka 9.3: Rozdělení dodané skladby pro výpočet MKP



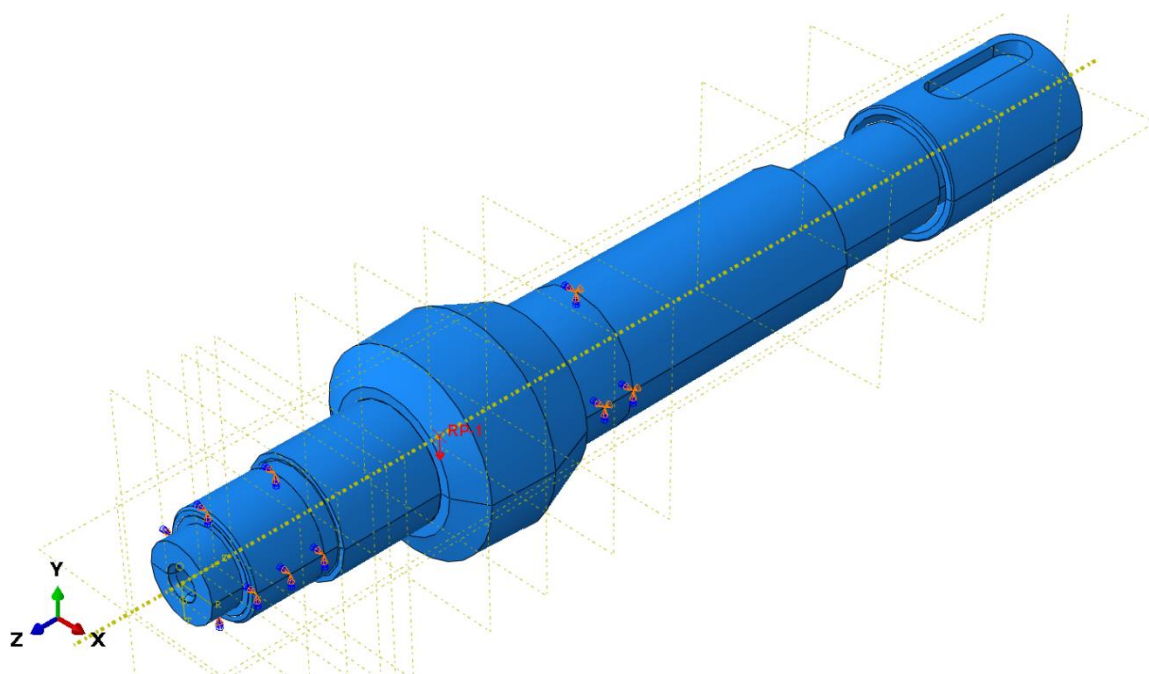
Obrázek 9.9: Detailní pohled na jednotlivé oblasti

Zatěžování hřídele bylo provedeno stejně jako pro ocelovou součást. Na obrázku 9.10 jsou znázorněny oblasti, kde byly zadány okrajové podmínky, tedy oblast A na ocelovém kroužku pro válečkové ložisko, oblast B za kompozitním věncem v šířce kuličkového ložiska a oblast C daná ocelovou koncovkou pro vetknutí. Referenční bod pro zatížení byl položen přibližně do středu oblasti D kompozitního věnce, tedy do vzdálenosti 80,2 mm od kraje hřídele v jeho ose a na něm

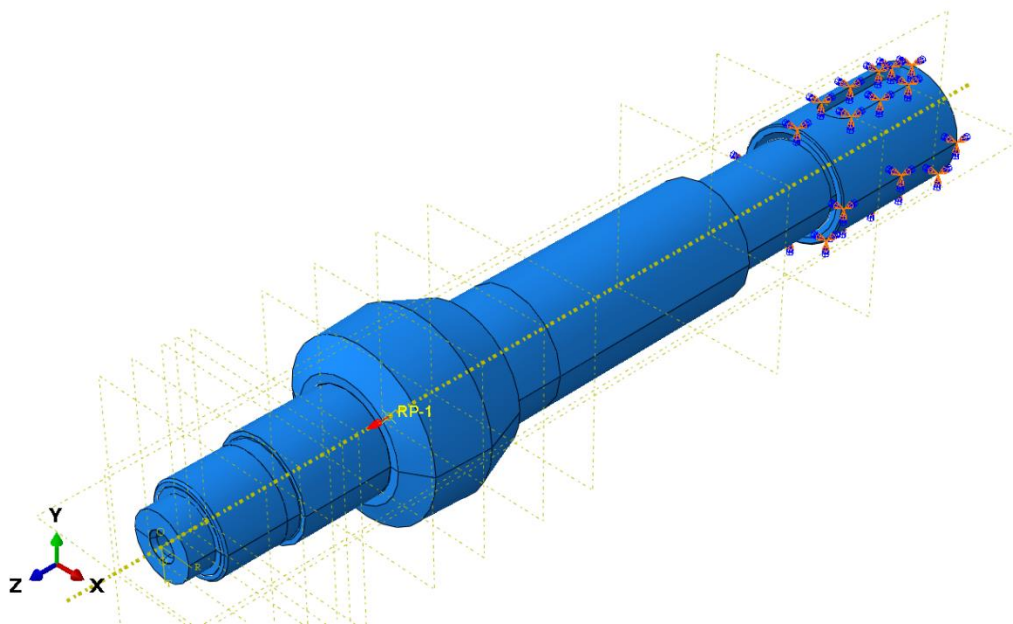
bylo následně aplikováno zatížení. Hodnoty zatížení jsou pro tuto hřídel opět stejné jako u ocelové, tedy $F = 1\,000\text{ N}$ v záporném směru osy y a $M_k = 10\,000\text{ N} \cdot \text{mm}$ okolo osy z . Okrajové podmínky byly opět definovány pomocí „Displacement/Rotation“. Jednotlivé režimy zatížení jsou pak zobrazeny na obrázcích 9.11 a 9.12.



Obrázek 9.10: Jednotlivé oblasti zatěžovaného hřídele

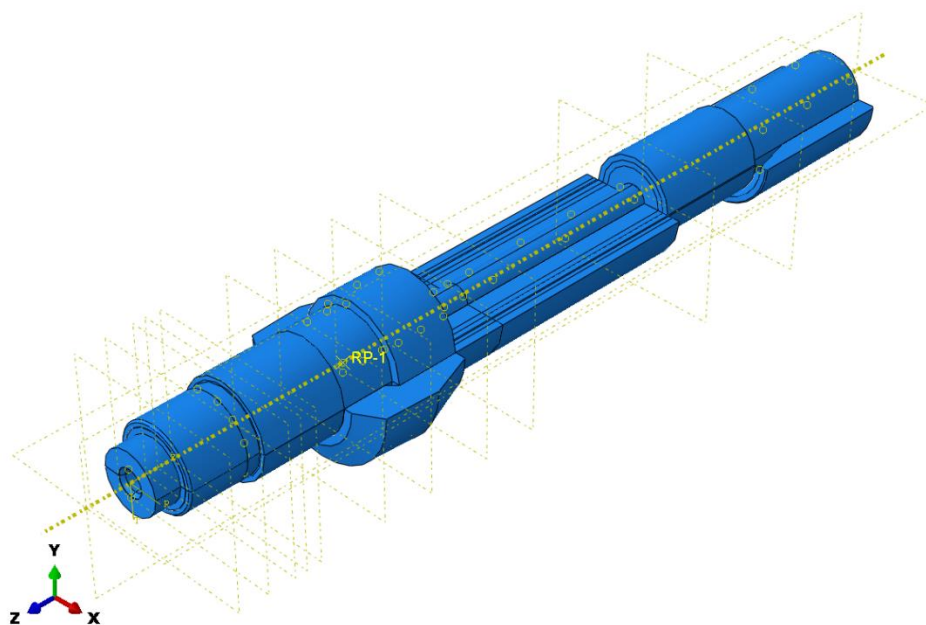


Obrázek 9.11: Silové zatížení hřídele



Obrázek 9.12: Momentové zatížení hřídele

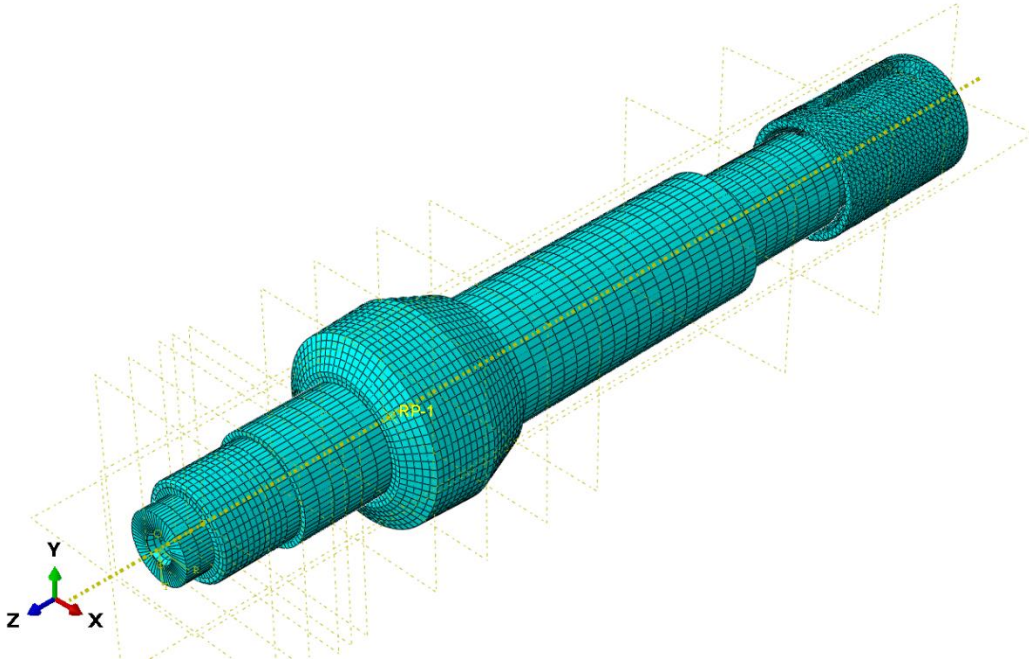
Jednotlivé součásti byly na sebe vázány pomocí vazeb „tie“, pouze referenční bod byl vázán vazbou „coupling“. Všechny součásti mimo ocelového věnce byly ke kompozitní hřídeli vázány dvěma vazbami, vždy jednou k hraně a druhou k povrchu příslušného válce. Věncem byl vázán svou vnitřní hranou na vnější hranu hřídele a na obou vnitřních průměrech k povrchům příslušných válců. Referenční bod byl vázán k povrchu věnce, tedy k povrchu oblasti *D* na obrázku 9.10. Zobrazení vazeb je na obrázku 9.13.



Obrázek 9.13: Zobrazení vazeb mezi částmi modelu

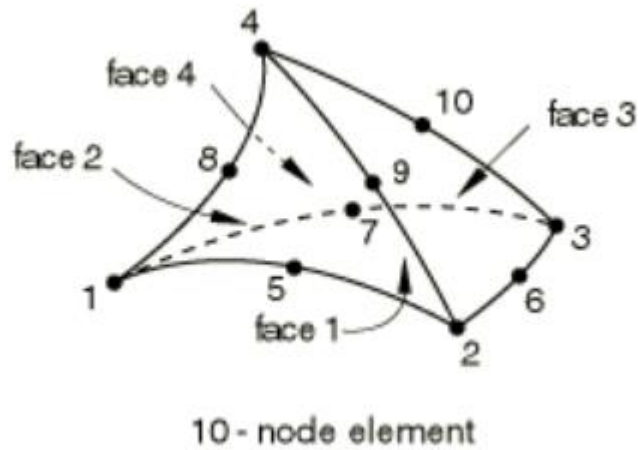
Hřídel byl pro potřeby výpočtu dále nařezán na jednotlivé válce po průměrech a pak celý model jednou rovinou v ose rotace na dvě poloviny. Ocelový kroužek pod ložisko byl rozdělen v ose rotace dvěma kolmými rovinami, stejně jako ocelová výtzuha. Ocelová výtzuha byla dále nařezána z

důvodu tvorby sítě u strany, kde je díra, a to rovinou kolmou na osu rotace ve vzdálenosti hloubky díry (vzdálenost 20 mm na obrázku 9.4) a pak 20 mm za ní. Následně byla tvořena síť. Pro ocelové součásti byla volena globální velikost elementu 2, pro kompozitní trubku nejprve s globální velikostí elementu 5 a následně zhuštěním po obvodech válců na 60 elementů. Tvořená síť je zobrazena na obrázku 9.14.



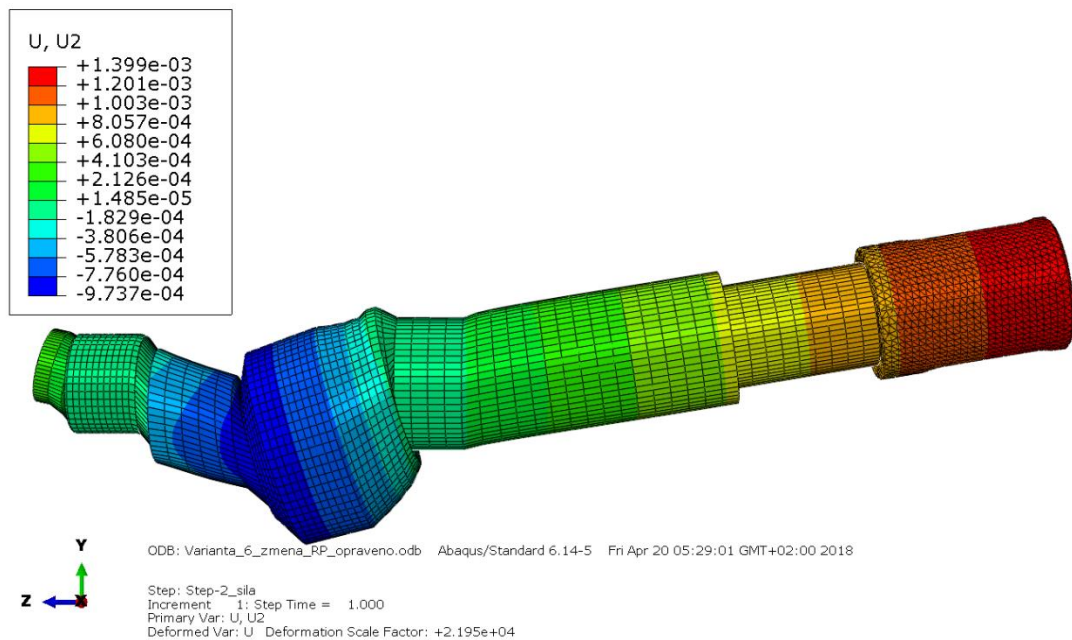
Obrázek 9.14: Síť na výpočtovém modelu

Pro síťování byly použity lineární hexagonální prvky SC8R, C3D8R a kvadratické tetragonální prvky C3D10. Hexagonální prvky SC8R byly použity pro kompozitní trubku, prvky C3D8R pro ocelové prvky. Tetragonální prvky byly použity u ocelové koncovky, kde nebyla zjednodušována geometrie a detailní zatížení pro nás není důležité. Tyto prvky patří do skupiny „continuum elements“, jsou prostorové a mají 10 uzlů. Tvarově se jedná o tetraedr, který má uzly v každém vrcholu a středu každé hrany, což je patrné na obrázku 9.15. Jedná se o běžně použitelné prvky pro tvorbu sítě, které se vlastnostmi podobají prvkům C3D8. Nicméně dobrá síť z prvků C3D8 dosahuje stejné přesnosti za nižší výpočetní cenu, tyto prvky lépe konvergují. Výhodné je použití tetraedrů zejména u složitých geometrií, jelikož jsou méně citlivé na počáteční tvar prvku, zatímco C3D8 počítají nejlépe, pokud se generují ve tvaru přesného obdélníku. Pokud je jejich tvar zdeformovaný, počítají mnohem nepřesněji, než prvky tvaru tetraedru [17].

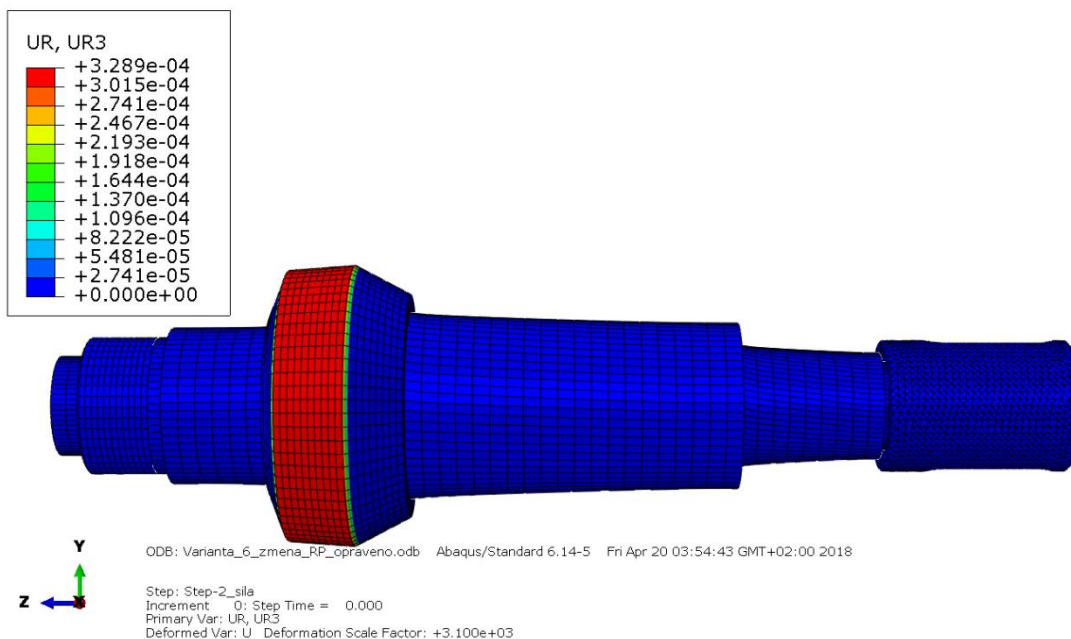


Obrázek 9.15: Zobrazení prvku C3D10 [17]

Tvorba sítě může mít poměrně značný vliv na výpočet, zejména u kompozitní součásti. Skladba vrstev zadaná materiálu je obsažena celá v každém elementu sítě, pokud bylo tedy na průměru více elementů v jedné sekci, výsledná tuhost hřídele byla menší. Výsledky výpočtu včetně deformace jsou znázorněny na obrázku 9.16 pro zatížení pomocí síly a hřídel uloženou v ložiskách a na obrázku 9.17 pro zatížení modelu momentem s vetknutím na ocelové koncovce. Průhyb a natočení pro jednotlivé výpočty je pak v tabulce 9.4. U průhybu došlo k největší změně na volném konci, což ale pro porovnání k ocelové variantě nehraje roli. Ve výsledcích je tedy uvedeno maximum oblasti mezi ložisky.



Obrázek 9.16: Hřídel zatížená silou



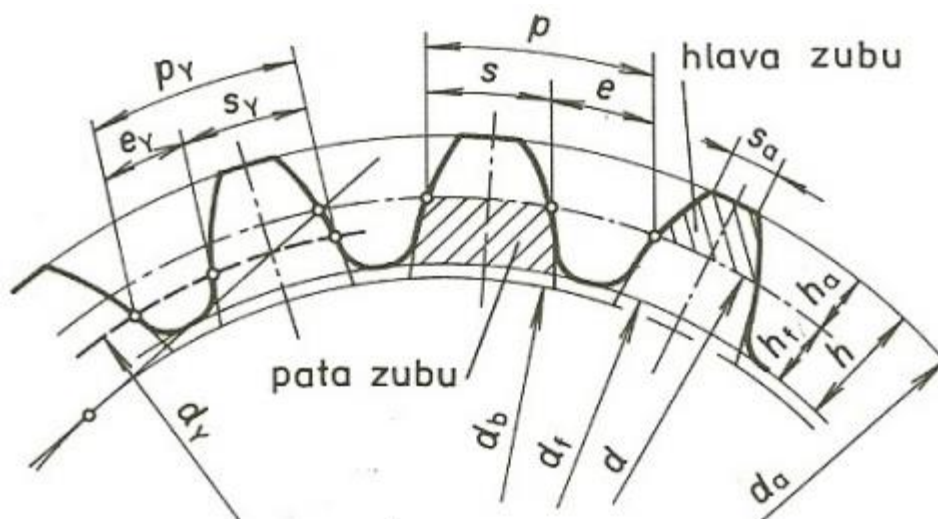
Obrázek 9.17: Hřídel zatížená momentem

Režim zatížení	Průhyb [mm]	Natočení [rad]
Zatěžování silou $F = 1\,000\text{ N}$	-9,738E-04	x
Zatěžování momentem $M_k = 10\,000\text{ N}\cdot\text{mm}$	x	3,289E-04

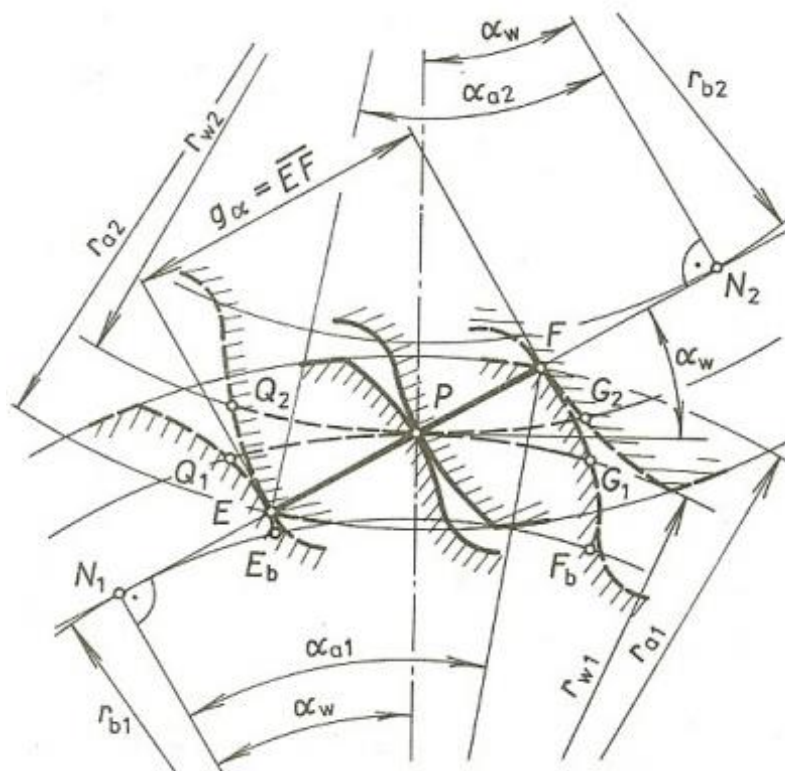
Tabulka 9.4: Výsledné hodnoty zatížení

9.3. Reálné zatížení zkušebního stání

Vzhledem k tomu, že bude hřídel zkoušena na zkušebním stání, byla provedena analýza i pro parametry tohoto testu. Na obrázku 9.18 je znázorněno schéma ozubeného kola, kde je vidět hlavová (d_a), patní (d_f), roztečná (d) a základní (d_b) kružnice. Pro úplnost je na obrázku 9.19 zobrazeno soukolí v záběru, kde je vidět poloha valivé (d_w) kružnice – v obrázku jako poloměr r_w .



Obrázek 9.18: Schéma ozubeného kola [24]



Obrázek 9.19: Schéma ozubeného soukolí v záběru [24]

Ve stání je zkoušen jeden převod s původním ozubením převodovky. Maximální moment, který lze na zkušebním stání vyvinout je $M_{vs} = 300\,000\text{ N}\cdot\text{mm}$ [25]. K určení zatížení byly dohledány parametry ozubení, které jsou uvedeny v tabulce 9.5. Jedná se o čelní ozubení se šikmými zuby.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Počet zubů na kole (z_2)	41	[-]
Počet zubů na pastorku (z_1)	32	[-]
Alfa (α)	15	[°]
Beta (β)	32	[°]

Tabulka 9.5: Dohledané parametry ozubeného převodu [25]

Z těchto hodnot byly následně vypočten převod ozubení a pomocí převodu pak moment přenášený naší výstupní hřídelí. Převodový poměr i se dle [26] vypočte jako:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \tag{9.1}$$

Moment na výstupní hřídeli M_v se dle [26] pak vypočte jako:

$$M_v = M_{vs} \cdot i \cdot \mu_p \tag{9.2}$$

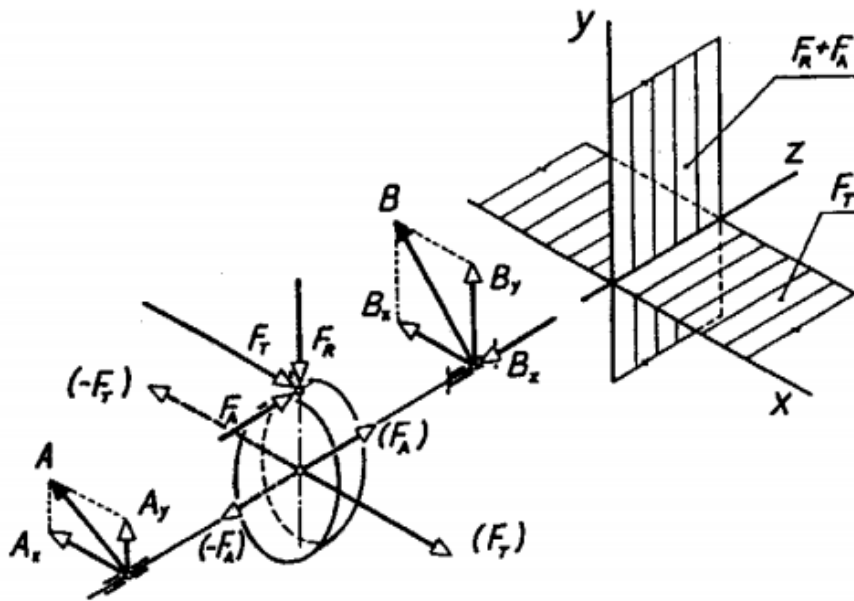
Koeficient μ_p použitý při určení momentu zahrnuje ztráty převodu, respektive účinnost převodu a byl pro výpočet použit s hodnotou 0,98. Jelikož neznáme přesné parametry převodu, byla volena běžná hodnota jednoho čelního ozubeného převodu. Dle výše uvedených vzorců byl tedy vypočten moment na výstupní hřídeli a převodový poměr, což je znázorněno v tabulce 9.6.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Převodový poměr (i)	1,28125	[-]
Moment na výstupní hřídeli (M_v)	376687,5	[N·mm]

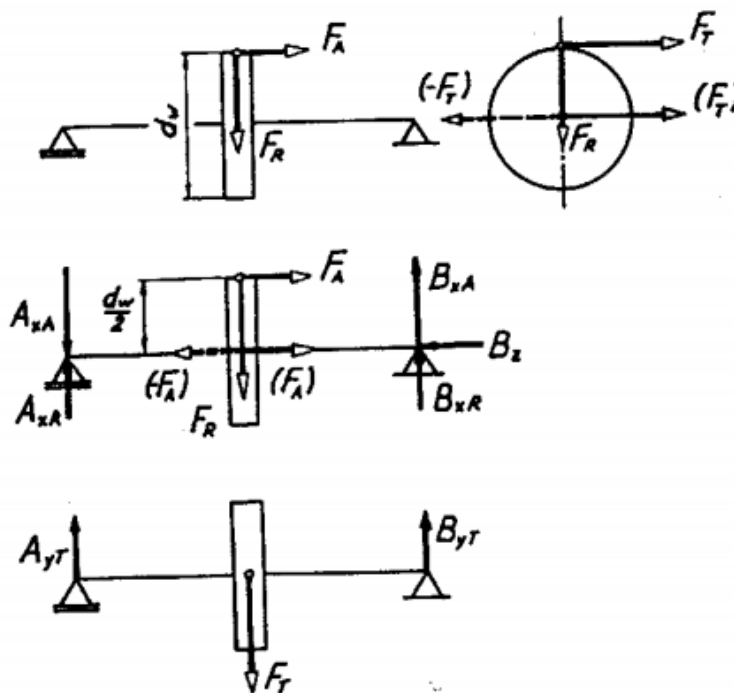
Tabulka 9.6: Vypočtené parametry ozubeného převodu

Pro zjištění zatížení do výpočtu je nutné provést rozklad sil. Rozklad sil na zubech ozubeného kola se provádí na valivé kružnici. Jelikož se ale v našem případě nejedná o standardní normalizované ozubení, je přesné určení valivé (d_w) kružnice problematické. Bylo tedy přistoupeno k určení hodnot pro nejmenší a největší možný průměr, tedy hlavovou (d_a) a patní (d_f) kružnici ozubení. Valivá kružnice je jistě někde v oblasti mezi nimi, a tak se s určitou bezpečností přiblížíme hodnotám sil pro rozklad valivé kružnice.

Samotný rozklad sil je patrný na obrázku 9.20 a jednotlivé pohledy na obrázku 9.21.



Obrázek 9.20: Silový rozklad na ozubeném soukolí [26]



Obrázek 9.21: Pohled jednotlivých rovin silového rozkladu [26]

Určuje se tedy radiální, axiální a tečná složka sil. Vzorce pro jejich určení jsou dle [26]:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_v}{d_w} \quad (9.3)$$

$$F_r = F_t \cdot \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \quad (9.4)$$

$$F_a = F_t \cdot \tan \beta. \quad (9.5)$$

Ve vzorcích (9.3) se objevuje výše zmiňovaná valivá kružnice. Zde tedy použijeme místo valivé kružnice hodnoty pro hlavovou a patní. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.7, jedná se o nejvyšší hlavový průměr a nejnižší patní průměr z výkresové dokumentace.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Hlavový průměr (d_a)	77,20	[mm]
Patní průměr (d_p)	66,80	[mm]

Tabulka 9.7: Hodnoty hlavové a patní kružnice ozubení na výstupní hřídeli [25]

Z těchto hodnot pak byly pomocí vzorců (9.3) až (9.5) určeny velikosti sil, které jsou uvedeny v tabulce 9.8.

Parametr	Hodnota pro d_a	Hodnota pro d_f	Jednotky
F_t	9758,74	11278,07	[N]
F_r	3083,37	3563,42	[N]
F_a	6097,94	7047,32	[N]

Tabulka 9.8: Vypočtené hodnoty sil

Pro výpočet reálného zatížení byl použit stejný model jako pro analýzu v kapitole 9.2, kde je podrobně popsán. Jelikož je v tomto modelu referenční bod, na který aplikujeme zatížení, na ose z hřídele, je nutné zadávat axiální a tečnou složku sil do modelu s příslušným ramenem, tedy jako moment. Pouze radiální složka sil působí směrem k referenčnímu bodu a můžeme ji tedy použít jako sílu. Tečné a axiální složky sil jsou tedy vynásobeny poloměrem příslušné kružnice. Jejich hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce 9.9.

Parametr	Hodnota pro d_a	Hodnota pro d_f	Jednotky
M_t	376687,5	376687,5	[N·mm]
M_a	235380,5	235380,5	[N·mm]

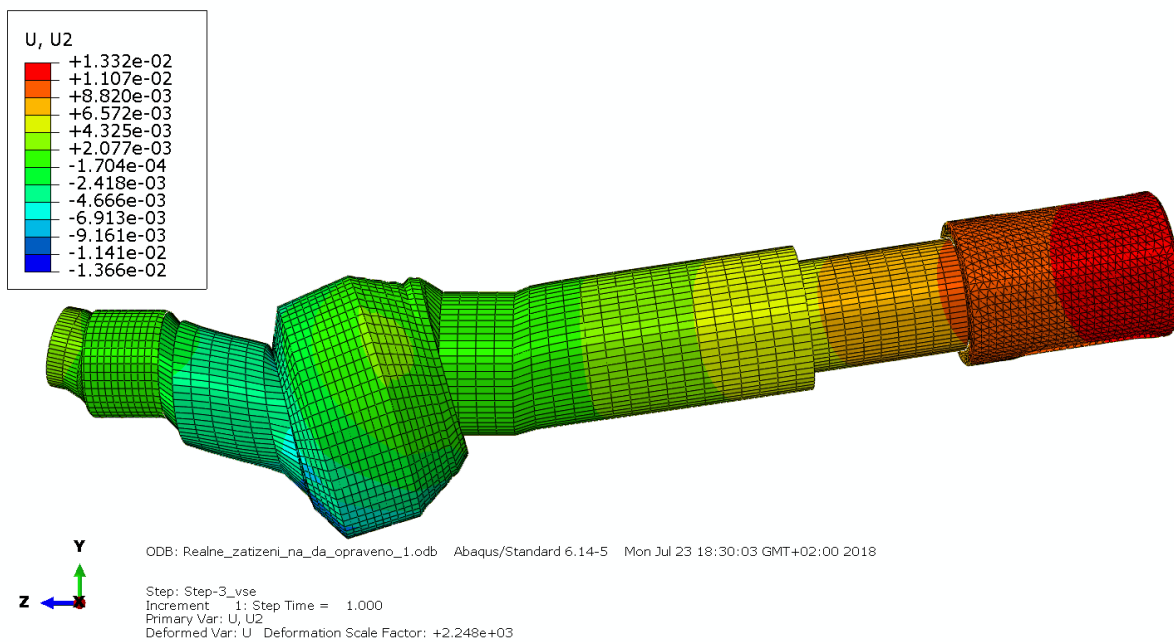
Tabulka 9.9: Hodnoty momentů zadáných do modelu

Výpočet byl v modelu proveden v jednom kroku, tedy byly aplikovány všechny zatížení a okrajové podmínky najednou. Model byl tedy vetknut a zároveň byly použity vazby ložisek. V referenčním bodě bylo aplikováno zatížení vypočtených sil a momentů. Přehled je v tabulce 9.10.

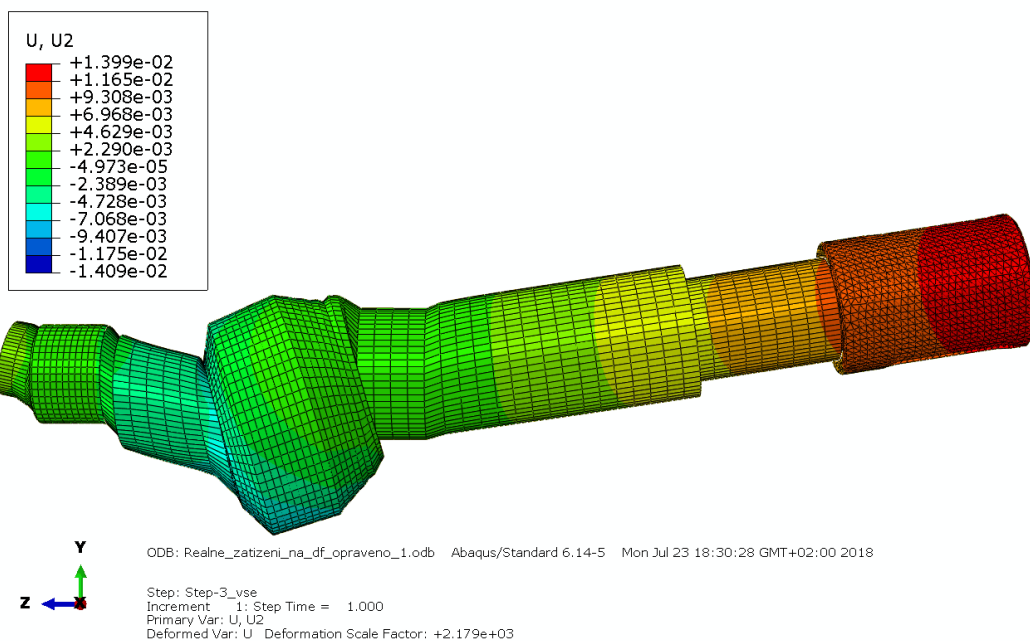
Parametr	Použití
F_r	Zadáno jako síla pro průhyb v záporném směru osy y
M_t	Zadáno jako moment okolo osy z
M_a	Zadáno jako moment okolo osy x

Tabulka 9.10: Hodnoty zatížení modelu

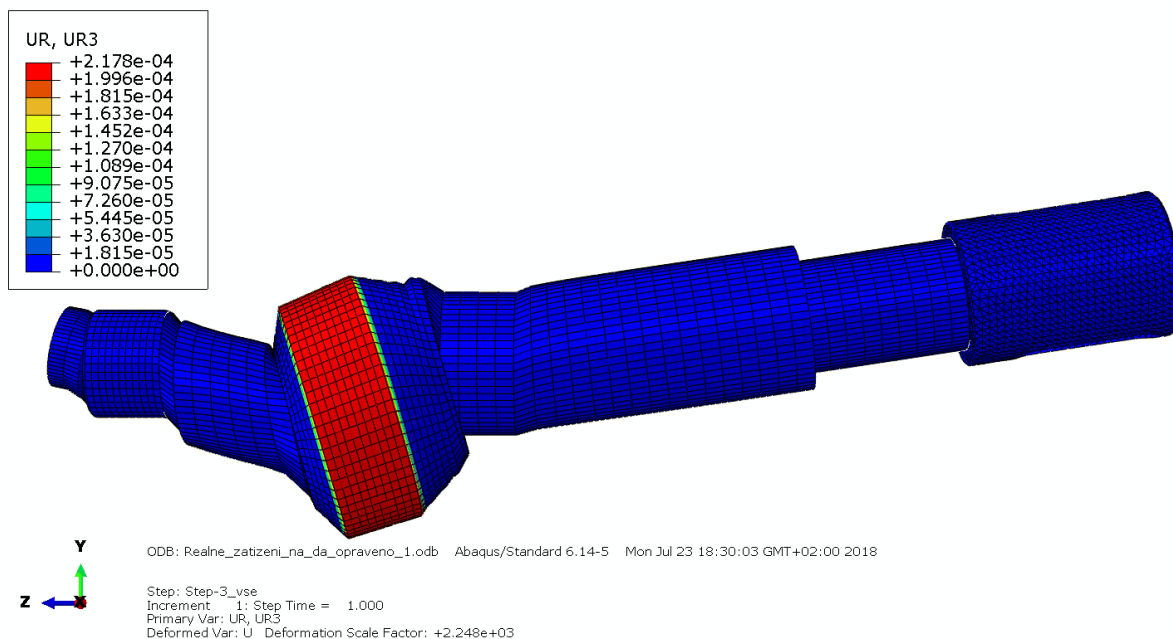
Výsledek výpočtu je zobrazen na obrázcích 9.22 až 9.25 a shrnut v tabulce 9.11.



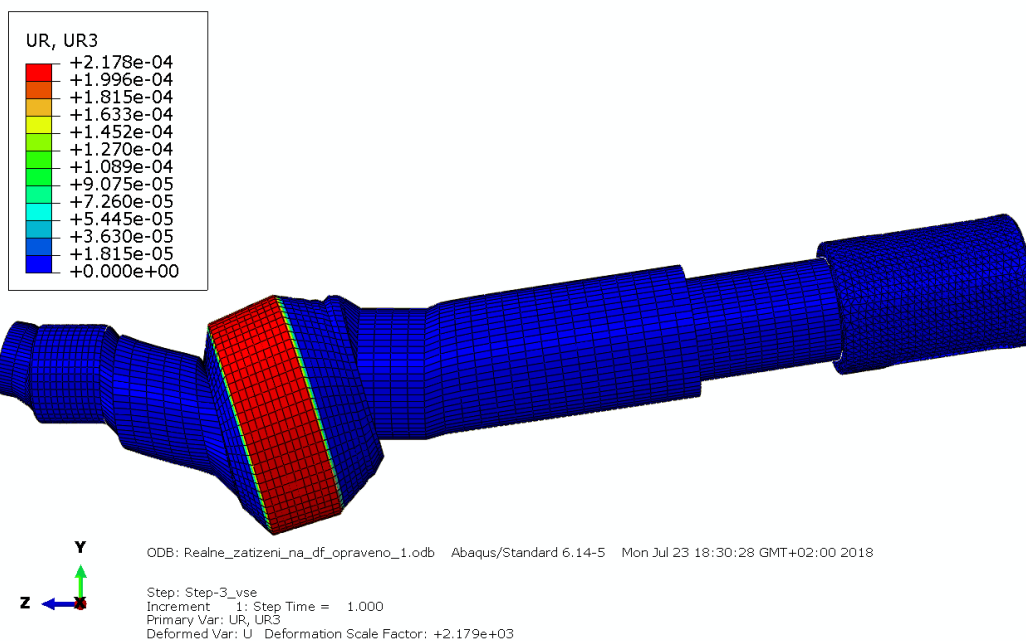
Obrázek 9.22: Průhyb při rozložení na hlavové kružnici



Obrázek 9.23: Průhyb při rozložení na patní kružnici



Obrázek 9.24: Natočení při rozložení na hlavové kružnici



Obrázek 9.25: Natočení při rozložení na patní kružnici

Režim zatížení	Průhyb [mm]	Natočení [rad]
Zatěžování pro rozložení sil na d_a	-1,366E-02	2,178E-04
Zatěžování pro rozložení sil na d_f	-1,409E-02	2,178E-04

Tabulka 9.11: Hodnoty průhybu a natočení z analýzy reálného zatížení

Z analýzy jsme získali hodnoty pro průhyb a natočení navrhované hřídele na hlavové a patní kružnici. Reálná hodnota pro valivou kružnici je tedy někde mezi těmito hodnotami. Jelikož jsou výsledné hodnoty velice podobné, lze ji odhadnout celkem přesně. K dispozici nicméně nejsou hodnoty pevnosti hřídele, a proto nelze posoudit, zda hřídel vydrží zatížení ve stání, případně s jakou bezpečností. Nutno také dodat, že nejsou známy všechny parametry ozubení, přičemž se

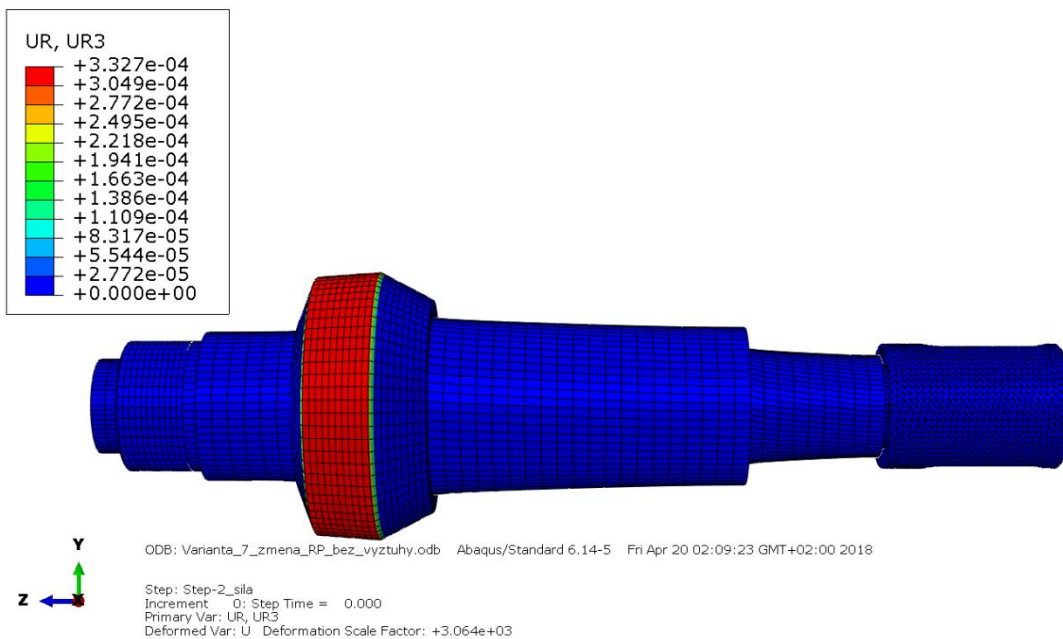
v automobilovém průmyslu běžně používají speciální převody, které mají i dva, nebo tři zuby v záběru najednou. Reálné hodnoty tedy mohou být výrazně nižší, než jaké jsou zde zjištěné, ale neměly by být vyšší.

9.4. Optimalizace hřídele

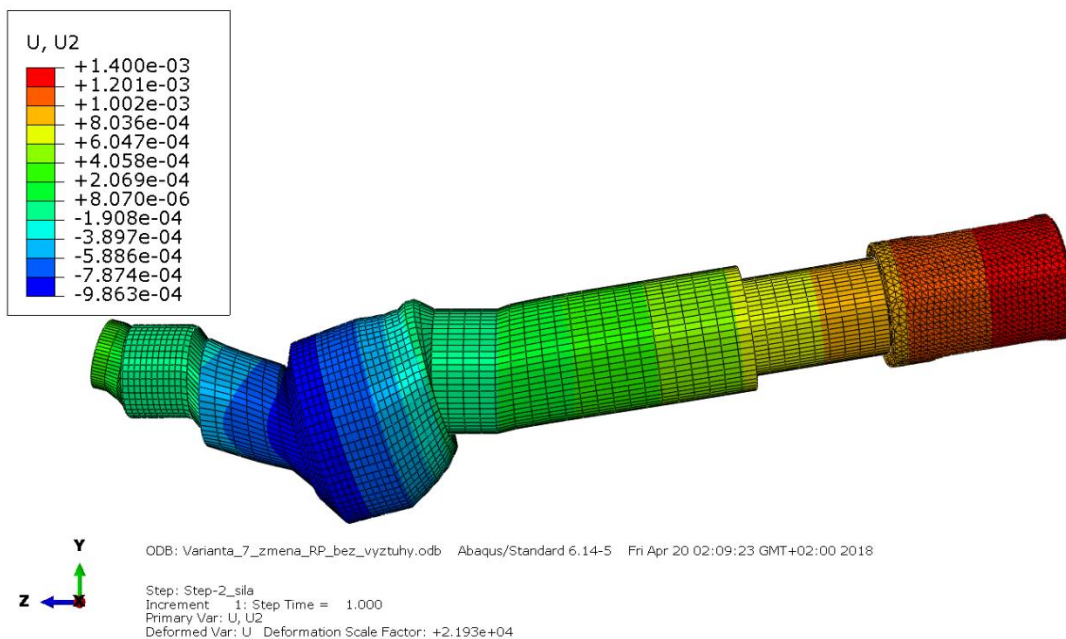
Vzhledem k tomu, že je původně navrhovaná hřídel hybridní, je zde ještě prostor pro další úpravu a optimalizaci hřídele, tak aby se dosáhlo vyšší tuhosti, pevnosti a nižší hmotnosti. Vzhledem k tomu, že zadaná hřídel musí odpovídat uvedeným rozměrům a použitým ložiskům, nabízí se zejména zjištění tuhosti bez ocelového trnu. Vyšší pevnosti a tuhosti pak lze dosáhnout optimalizací skladby vláken. Obdobně použití kompozitní skladby pro věnec přinese snížení hmotnosti a zvýšení pevnosti.

9.4.1. Výpočet bez ocelového trnu

Jelikož je v kapitole 9.2 podrobně rozepsáno nastavení modelu a postup analýzy, zde se omezím pouze na rozdíl v modelu. Jedinou odlišností bylo uvedení ocelového trnu v modelu do stavu „suppress“, nebylo tedy ve výpočtu uvažováno. Následně byl spuštěn výpočet pro oba modely zatížení. Výsledky jsou vidět na obrázku 9.26 pro moment a obrázku 9.27 pro silové zatížení a shrnuty v tabulce 9.12.



Obrázek 9.26: Natočení modelu bez trnu



Obrázek 9.27: Průhyb modelu bez trnu

Režim zatížení	Průhyb [mm]	Natočení [rad]
Zatěžování silou $F = 1\,000\,N$	-9,863E-04	x
Zatěžování momentem $M_k = 10\,000\,N\cdot mm$	x	3,327E-04

Tabulka 9.12: Výsledné hodnoty průhybu a natočení bez trnu

9.4.2. Optimalizace skladby vláken

S ohledem na výsledky reálného zatížení stání a rozdílu původního, navrhovaného a optimalizovaného hřídele (bez výztuhy), lze již uvažovat o optimalizaci skladby. Při výpočtu bez ocelového trnu se ukázalo, že skladba reaguje méně na krut. Při výpočtu reálného zatížení na krut reagovala výrazně méně než na ohyb, respektive se kombinovaným namáháním natočení hřídele ještě snížilo. Proto bude pravděpodobně vhodné skladbu optimalizovat právě s větším důrazem na ohybovou tuhost, což by měla přinést zejména vlákna pod orientací 0° , která půjdou přímo v ose součásti. Naopak skladeb pod orientací \pm , zejména $\pm 45^\circ$ zřejmě nebude potřeba tolik, jelikož téměř nedochází ke změně natočení.

Pro demonstraci byl proveden jeden výpočet. Byly eliminovány skladby pod úhly $+37^\circ$ a $+60^\circ$, nahrazeny skladbou pod úhlem 0° , která by měla lépe reagovat na průhyb. Bylo změněno rozložení v jednotlivých sekcích, celkově ale zůstalo přibližně stejné množství skladeb pod úhly $\pm 45^\circ$ i 87° , ale skladby pod úhlem 0° je nyní $7,5\,mm$, místo původních $3,8\,mm$. Výsledkem by měla být vyšší pevnost při průhybu za cenu zhoršení vlastností v krutu, což je ale vzhledem k výše popisovanému chování přijatelné. Pro přesné určení optimální skladby by bylo nutné znát hodnoty pevnosti hřídele v krutu a ohybu. Poměr vláken dané orientace je zobrazen v tabulce 9.13.

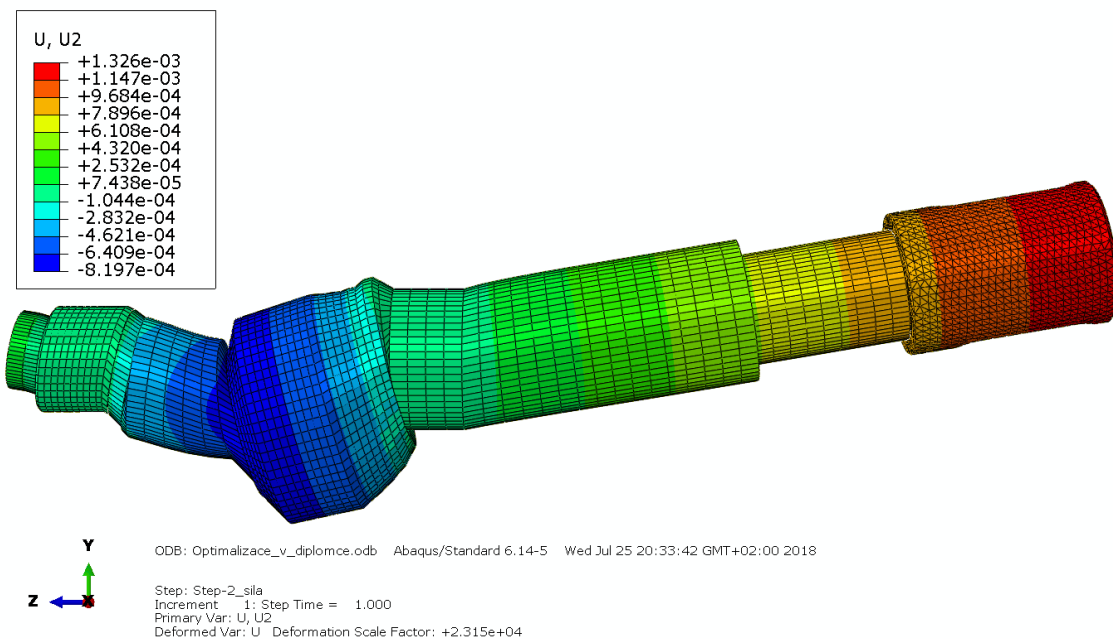
	0°	37°	44°	45°	48°	60°	85°	87°	Celkem [mm]
Původní množství [mm]	3,80	2,6365	1,5127	5,1126	1,0450	0,6983	0,220	0,44	15,4738
Nové množství [mm]	7,5101	0	1,5128	4,6952	1,0449	0	0	0,7109	15,4739

Tabulka 9.13: Porovnání množství vláken dle orientace

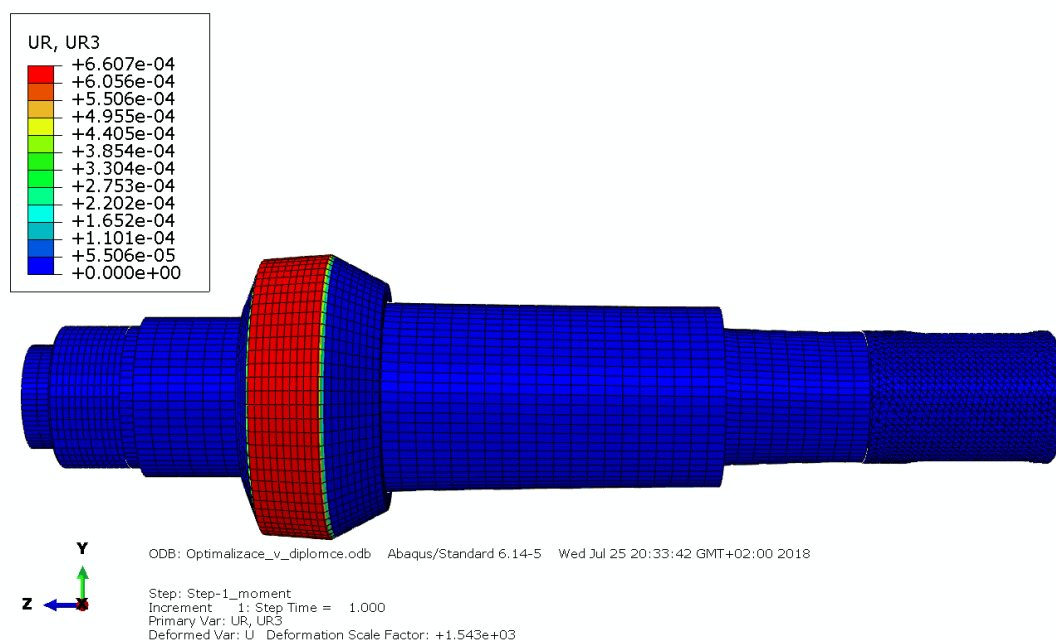
Výpočet byl proveden na stejném modelu, jaký je popsáný v kapitole 9.2, kde došlo pouze k zadání jiné skladby materiálu. Ta je znázorněna v tabulce 9.14. Výsledný průhyb a natočení jsou zobrazeny na obrázcích 9.28 a 9.29 a maximální hodnoty jsou pak v tabulce 9.15.

Pořadí vrstvy	Tloušťka	Součet dle sekce	Orientace	Materiál	Vnější poloměr válce
1	0,156962	6,214356	45	UHM	11
2	0,313924		-45	UHM	
3	0,156962		45	UHM	
4	1,45		0	UHM	
5	0,22		87	HS	
6	1,61866		0	UHM	
7	0,156962		45	UHM	
8	0,313924		-45	UHM	
9	0,156962		45	UHM	
10	0,22		87	HS	
11	1,45		0	UHM	
12	1,97741	1,97741	0	UHM	13
13	0,515468	2,061876	45	UHM	15
14	1,03094		-45	UHM	
15	0,515468		45	UHM	
16	0,270862	0,270862	87	HS	15,3
17	0,344403	1,754189	45	UHM	17
18	0,688806		-45	UHM	
19	0,344403		45	UHM	
20	0,376577		0	UHM	
21	0,3782	3,195184	44	UHM2	20
22	0,7564		-44	UHM2	
23	0,3782		44	UHM2	
24	0,63744		0	UHM	
25	0,13135		48	HS	
26	0,2627		-48	HS	
27	0,13135		48	HS	
28	0,129886		48	HS	
29	0,259772		-48	HS	
30	0,129886		48	HS	

Tabulka 9.14: Skladba optimalizovaného návrhu



Obrázek 9.28: Průhyb optimalizované skladby



Obrázek 9.29: Natočení optimalizované skladby

Režim zatížení	Průhyb [mm]	Natočení [rad]
Zatěžování silou $F = 1\ 000\ N$	-8,197E-04	x
Zatěžování momentem $M_k = 10\ 000\ N\cdot mm$	x	6,607E-04

Tabulka 9.15: Shrnutí výsledků optimalizované skladby vláken

9.5. Shrnutí výsledků

V kapitole 9 bylo provedeno několik výpočtů, které jsou pro větší přehled a srovnání uvedeny v tabulce 9.16. Lze tedy porovnat zatížení původní ocelové varianty oproti navrhované hybridní hřídeli. Zároveň lze porovnat vliv ocelového trnu hybridní hřídele a také průhyb a natočení pro reálné zatížení zkušebního stání. Podstatné je porovnání velikostí samotných hodnot. Změna

orientace je způsobena použitím jiného souřadného systému pro ocelovou variantu oproti ostatním výpočtům.

Provedení	Průhyb [<i>mm</i>]	Natočení [<i>rad</i>]
Původní ocelová hřídel	-3,411e-04	-1,182e-04
Navrhovaná hybridní hřídel	-9,738E-04	3,289E-04
Optimalizovaná skladba	-8,197E-04	6,607E-04
Hybridní hřídel bez trnu	-9,863E-04	3,327E-04
Reálné zatížení na kružnici d_a	-136,6E-04	2,178E-04
Reálné zatížení na kružnici d_f	-140,9E-04	2,178E-04

Tabulka 9.16: Porovnání výsledků z analýz MKP výstupní hřídele

Z hodnot v tabulce je patrné, že navrhovaná hřídel s uvažováním ocelového věnce nedosahuje tuhosti původní varianty ani při průhybu, ani při natočení. Nutně to ale nemusí znamenat, že by šlo o nevyhovující provedení, které by v dané aplikaci nešlo použít. V tuto chvíli nelze posoudit, zda hřídel zatěžování vydrží či nevydrží, protože neznáme skutečné hodnoty pevnosti hřídele. Hodnoty průhybu a natočení by se mohly zlepšit použitím kompozitního věnce. Dále pak odstranění trnu z kompozitní části hřídele přinese další úsporu hmotnosti. Při znalosti pevností a vlivu reálného zatížení na hřídel je pak možné dále optimalizovat skladbu kompozitní části hřídele, aby se dosáhlo optimálních vlastností pro dané zatěžování.

Závěr

Byla provedena napěťově/deformační analýza stávajícího kovového řešení výstupní hřídele převodovky, přičemž bylo zjištěno natočení a průhyb při stanovených režimech a hodnotách zatížení. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Byla provedena rešerše možných výrobních technologií kompozitních hřídelí a možných spojení náboj/hřídel pro daný typ konstrukce. Z výrobních technologií obsažených v kapitole 1 je výhodná zejména pultruze, pokud se bude jednat o vysokoobjemovou výrobu jedné skladby, což je v případě hřídelí převodovek v automobilovém průmyslu velice pravděpodobné. V současné chvíli se nicméně nejedná o výrobu ve veliké sérii, a proto je vhodnější variantou výroba pomocí metody navíjení vláken. Z možností spojování se jako nejlepší volby jeví lepené a integrované spoje. Integrované spoje by našly své uplatnění zejména pro vysokoobjemovou výrobu, z důvodu snadnější opakovatelnosti při zachování pevnosti spoje. Pro nižší objem výroby jsou vhodnější lepené spoje, zejména pro jejich menší náklady na vybavení a tvorbu spoje.

Byla provedena smyková zkouška plochých lepených spojů pro dané materiálové kombinace a byly vyhodnoceny smykové pevnosti jednotlivých lepidel a smykové moduly pro Acralock SA 10 – 15. U ostatních lepidel, a v případě Acralocku SA 10 – 15 u 4 materiálů, došlo k jiné poruše než „CF“ a nebyl tak smykový modul vyhodnocen. Smykové pevnosti jednotlivých lepidel jsou uvedeny v tabulce 5.14 a smykové moduly lepidla Acralock SA 10 – 15 jsou v tabulce 5.13.

Dále byla provedena smyková zkouška trubkových lepených spojů pro 4 vybraná lepidla a kombinaci spoje kov – kompozit. Z této zkoušky byly vyhodnoceny pouze smykové pevnosti jednotlivých lepidel, jelikož se nejedná o normovanou zkoušku. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.4. Na základě výsledku obou zkoušek je možné vybrat vhodné lepidlo pro použití k lepení ocelových částí ke kompozitní části hybridní hřídele.

Byla provedena simulace smykové zkoušky pomocí MKP pro dané materiálové kombinace. Simulace byla omezena u plochých vzorků pouze na kovové adhérendy a v případě trubkových vzorků na ploché ocelové koncovky. S dobrou přesností se podařilo naladit modely pro zjištění maximální síly. Pro ploché vzorky jsou výsledky názorně vidět na obrázku 7.8 a pro trubkové na obrázku 8.9.

Byla provedena napěťově/deformační analýza navrhované kompozitní varianty hřídele dodané společností Compo Tech PLUS, spol. s r. o. Navrhovaná hřídel byla zatěžována ve stejných režimech a se stejnými hodnotami jako původní ocelová, a tak lze jednotlivé průhyby a natočení porovnat. Navrhovaná varianta vyšla z analýzy jako měkčí, přičemž může výslednou tuhost ovlivnit použití kompozitního věnce, pro který nebyla dodána skladba a byl tedy uvažován jako ocelový. Porovnávané hodnoty jsou nicméně stejného řádu, rozdíl tedy není výrazný. Jelikož bude hřídel po výrobě zkoušena ve zkušebním stání ČVUT, byla dále provedena analýza zatížení v tomto reálném provozu. Vzhledem k neznalosti pevnosti hřídele ale nelze posoudit, zda maximální zatížení ve zkušebním stání vydrží či nikoli. Nejsou přesně známy ani parametry převodu, výsledné síly tak mohou být při zatěžování výrazně nižší, než zde uvedené. Dále byl proveden výpočet bez ocelového trnu a optimalizace skladby vláken pro zlepšení celkových vlastností hřídele. Přehled vypočtených hodnot je v tabulce 9.16. Z výsledků je patrné, že optimální by v tuto chvíli bylo odstranění ocelového trnu z důvodu snížení hmotnosti a následná úprava skladby vláken navrhované kompozitní součásti pro zlepšení zejména ohybových vlastností, které mají v reálném provozu zřejmě větší vliv.

Bibliografie

- [1] BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN 978-1-4200-7915-9.
- [2] BURAGOHAJIN, Manoj Kumar. *Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing*. Boca Raton: Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa, [2018]. ISBN 978-1-138-03540-9.
- [3] Výrobní proces firmy Compotech. *CompoTech - výroba kompozitů* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <http://www.compotech.com/cs/technologie/proces-firmy-copotech/>
- [4] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [5] BERNARDIN, Petr. *Spojování kompozitních materiálů s kovem* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/24958>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Václava Lašová.
- [6] JAHN, Josefine, Max WEEBER, Johannes BOEHNER a Rolf STEINHILPER. Assessment Strategies for Composite-metal Joining Technologies – A Review. *Procedia CIRP* [online]. 2016, 2016, **2016**(50), 689-694 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.034>
- [7] JEC Europe composites show & conferences Paris, květen 10,11,12 2015 stánek Teufelberger
- [8] EBERL, L., L. AVILA GRAY, S. ZAREMBA a K. DRECHSLER. The effect of fiber undulation on the strain field for pinned composite/titanium joints under tension. *Composites Part A* [online]. 2017, 20 September 2017, **2017**(103), 148-160 [cit. 2018-07-20]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.09.015>
- [9] KRYSTEK, Jan, Radek KOTTNER, Lukáš BEK a Vladislav LAŠ. Validation of the adjusted strength criterion LaRC04 for uni-directional composite under combination of tension and pressure. *Applied and Computational Mechanics* [online]. 2010, November 2010, **2010**(4), 171-178 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/1412/1/52.pdf>
- [10] UCSNIK, S., M. SCHEERER, S. ZAREMBA a D. H. PAHR. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. *Composites Part A* [online]. 2010, **2010**(41), 369-374 [cit. 2018-07-20]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.11.003>
- [11] YANG, Yongming, Hugo BISCAIA, Carlos CHASTRE a Manuel A. G. SILVA. Bond characteristics of CFRP-to-steel joints. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2017, 5 October 2017, **2017**(138), 401-419 [cit. 2018-07-20]. ISSN 0143-974X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.001>

- [12] HE, Jun a Guijun XIAN. Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination. *Composite structures* [online]. 2016, 1 June 2016, **2016**(153), 12-20 [cit. 2018-07-20]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.100>
- [13] NGUYEN, Alex T. T., Milan BRANDT, Stefanie FEIH a Adrian C. ORIFICI. Pin pull-out behaviour for hybrid metal-composite joints with integrated reinforcements. *Composite structures* [online]. 2016, 21 July 2016, **2016**(155), 160-172 [cit. 2018-07-20]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.047>
- [14] BODJONA, Kobyé a Larry LESSARD. Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method. *Composite Structures* [online]. 2015, 12 September 2015, **2015**(134), 1024-1035 [cit. 2018-07-20]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.136>
- [15] RŮŽIČKA, Milan a Zdeněk PADOVEC. *Zpráva o řešení projektu Vysokorychlostní lehká převodovka pro zástavbu do elektrovozidel za použití kompozitních materiálů v roce 2016*. Praha, 2016.
- [16] PADOVEC, Zdeněk, Robin POUL, Milan RŮŽIČKA, Ondřej UHER, Viktor KULÍŠEK, Tereza ZAVŘELOVÁ, Ondřej ŠEDIVÝ, Gabriela ACHTENOVÁ a Matej SULITKA. *Zpráva o řešení projektu Vysokorychlostní lehká převodovka pro zástavbu do elektrovozidel za použití kompozitních materiálů v roce 2017*. Praha, 2017.
- [17] *Abaqus 6.14 Documentation* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>
- [18] ČSN EN 1465. *Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. 2009.
- [19] RENTON, J. W. a J. R. VINSON. On the Behavior of Bonded Joints in Composite Material Structures. *Engineering Fracture Mechanics*. Great Britain: Pergamon Press, **1975**(7), 41-60.
- [20] ČSN EN ISO 10365. *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 1992.
- [21] KOPELIOVICH, Dmitri. Fundamentals of adhesive bonding. In: *SubsTech* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fundamentals_of_adhesive_bonding&s=failure%20mechanism%20adhesive%20bonding.
- [22] Acralock SA10 LV-SERIES: Preliminary technical data sheet. *MMA strukturální lepicí systémy Acralock* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: https://acralock.cz/datasheets_docs/TL/European%20TDS_SA10%20LV%20series%20Czech%20rev0%2022.04.2012.pdf
- [23] Interní dokumentace firmy Compo Tech PLUS spol. s r. o.

- [24] Části a mechanismy strojů: Ozubené převody. In: *SEPS - elektronická podpora studia* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12113/ČMS1/10P_Ozubené%20převody.pdf
- [25] Interní dokumentace ČVUT v Praze
- [26] KUGL, Otmar, Jiří HOUKAL, Pavel TOMEK a Jiří ZÝMA. *Projekt - 3. ročník*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1638-2.
- [27] Loctite EA 9466: Technický list. In: *Loctite - průmyslová lepidla a tmely - Loctite* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-CS?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=CS&plant=WERCS>
- [28] Loctite EA 9514: Technical Data Sheet. In: *Loctite - průmyslová lepidla a tmely - Loctite* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://tds.loctite.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209514-CS?pid=EA%209514&format=MTR&subformat=HYS&language=CS&plant=WERCS>
- [29] Crestabond M1 - 30: Technical Data Sheet. In: *Scott Bader | Composites | Gelcoats | Resins | Bonding Solutions* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: https://www.scottbader.com/wp-content/uploads/Crestabond-M1-30_ENG_TDS_Feb18.pdf
- [30] Strukturální methakrylátová lepidla: Technický list výrobků série FA 10. In: *MMA strukturální lepicí systémy Acralock* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: https://acralock.cz/datasheets_docs/TL/TL%20%20Acralock%20FA10.pdf
- [31] Gurit Spabond 345: Full General Datasheet. In: *Gurit* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/spabond-345.pdf>
- [32] Bostik smart adhesives: SAF 150-45. In: *Adhesive Technologies | Industrial Adhesives | Construction Adhesives | Bostik* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.bostik.com/globalassets/aec/tds/saf-150-45.pdf>
- [33] Laminační pryskyřice L285, Tužidla 285, 286, 287: Návod k použití, technické listy. In: *Havel Composites* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20L%20285%20MGS%20a%20tuz%20CZ.pdf>

Příloha A – Vyhodnocení tahové zkoušky plochých lepených spojů

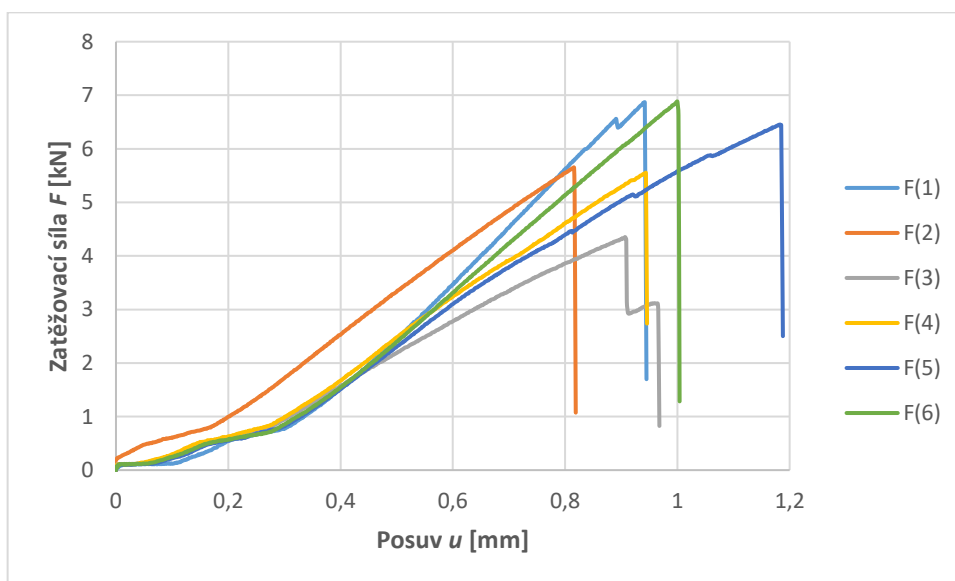
Zde jsou uvedeny veškeré zbylé zkoušené kombinace plochých vzorků smykové zkoušky, jejich zpracování a výsledky. Příloha je dělena dle zkoušených lepidel.

A.1 Loctite EA 9466

Jedná se o průmyslové houževnaté epoxidové lepidlo s prodlouženou dobou zpracovatelnosti. Po smíchání se dvousložková epoxidová pryskyřice vytvrdí při pokojové teplotě a vytvoří tuhou vazbu, která zajišťuje vysokou odolnost proti loupání a vysokou pevnost ve smyku. Plně vytvrzený epoxid je odolný vůči širokému spektru chemikálií a rozpouštědel a působí jako elektrický izolátor. Lepidlo vykazuje vynikající pevnost vazby na širokou škálu plastů a kovů. Typické aplikace zahrnují průmyslové aplikace pro všeobecné účely, které vyžadují delší dobu zpracovatelnosti pro úpravu součástí při montáži. Lepidlo dosahuje pevnosti ve smyku až 37 MPa pro ocel, 26 MPa pro hliník a 23 MPa pro nerez [27].

A.1.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.1 a maximální hodnoty v tabulce A.1. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $9,54 \pm 1,43 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.2. U všech vzorků došlo k poruše adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.1: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	6871	5650	4351	5554	6453	6882

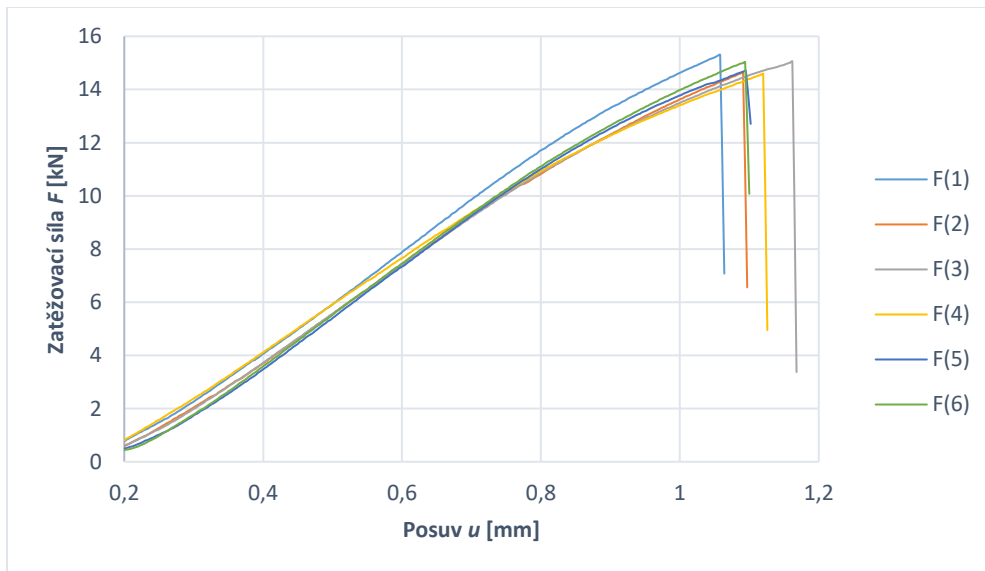
Tabulka A.1: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.2: Porušené uhlíkové vzorky

A.1.2 Ocelové vzorky

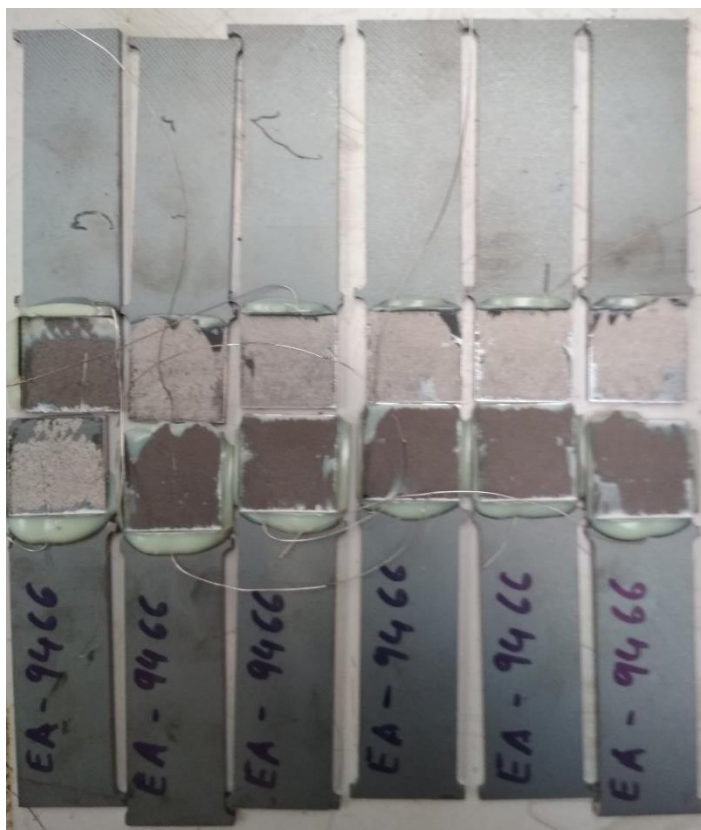
Tloušťka adhezendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.3 a maximální hodnoty v tabulce A.2. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $23,74 \pm 0,51 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.4. U všech vzorků došlo k poruše adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.3: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	15302	14365	15053	14587	14704	15027

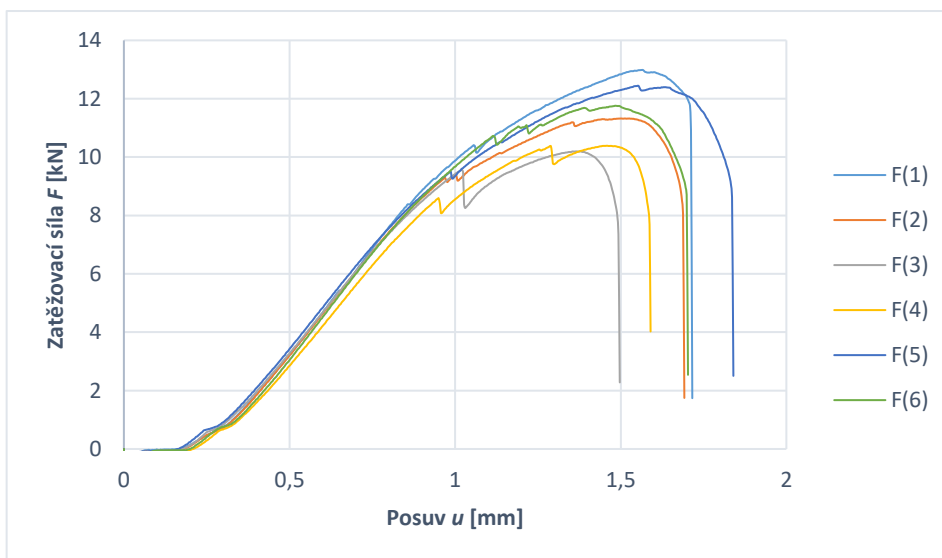
Tabulka A.2: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.4: Porušené ocelové vzorky

A.1.3 Hliníkové vzorky

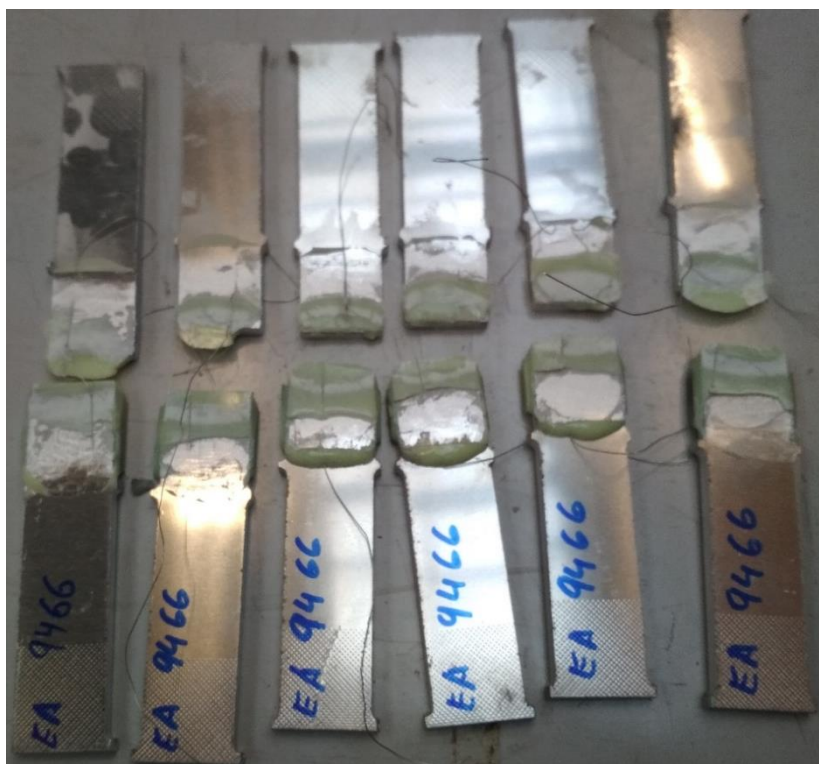
Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.5 a maximální hodnoty v tabulce A.3. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $18,43 \pm 1,62 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.6. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.5: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	12985	11323	10197	10388	12446	11760

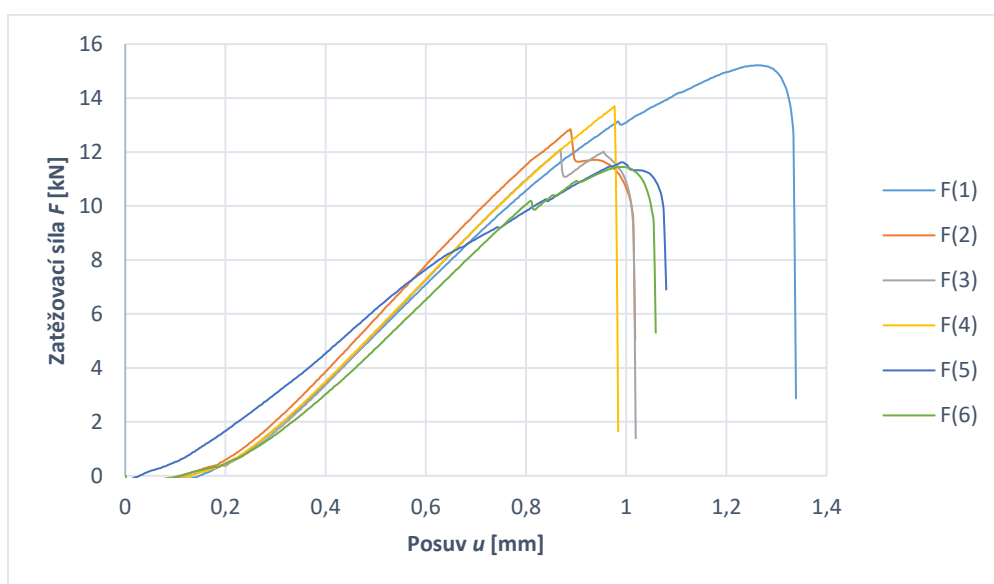
Tabulka A.3: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.6: Porušené hliníkové vzorky

A.1.4 Nerezové vzorky

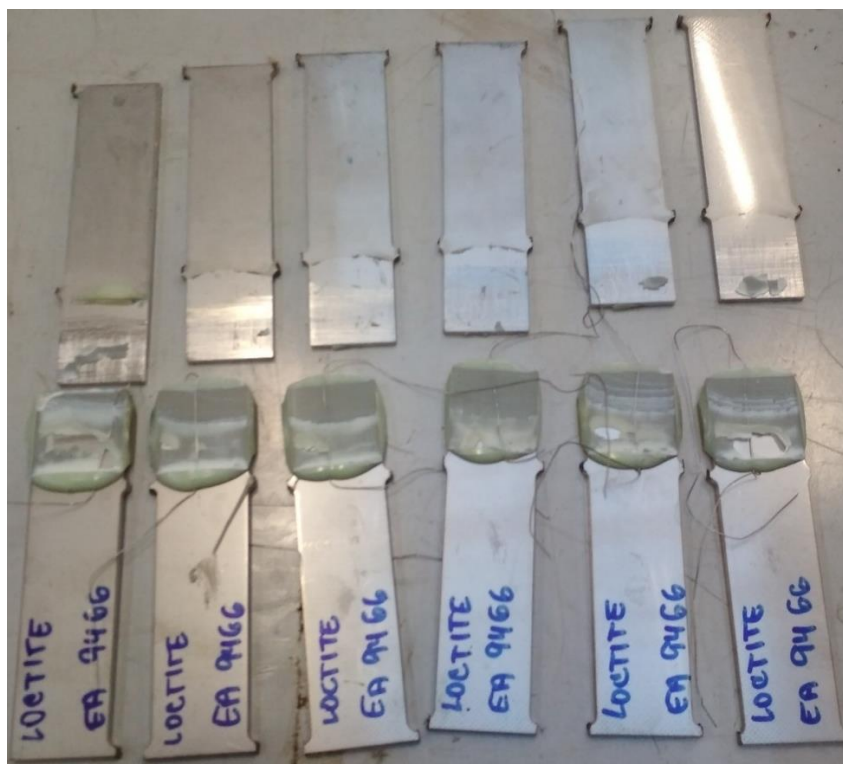
Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.7 a maximální hodnoty v tabulce A.4. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $20,51 \pm 2,1 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.8. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.7: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	15214	12481	12088	13668	11619	11446

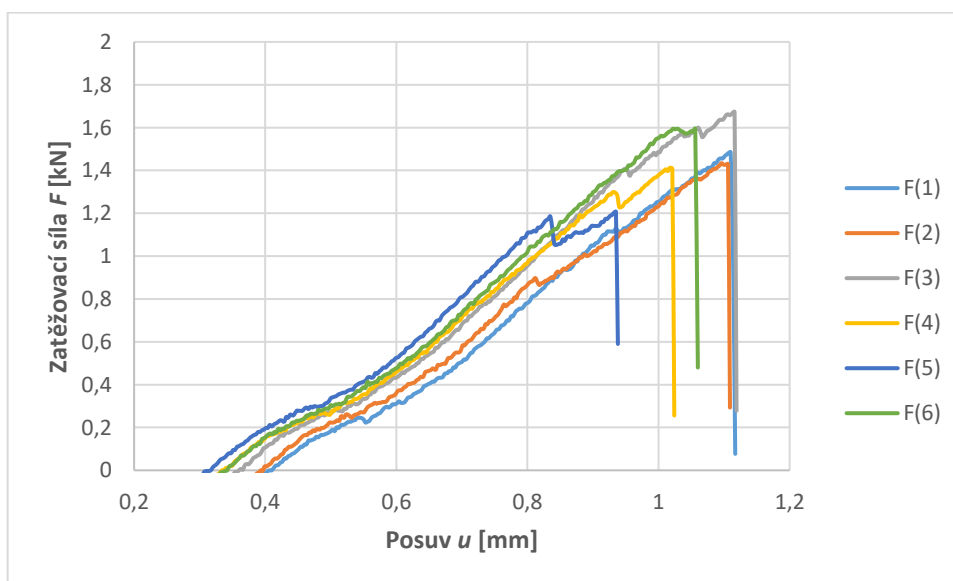
Tabulka A.4: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.8: Porušené nerezové vzorky

A.1.5 Ertacetalové vzorky

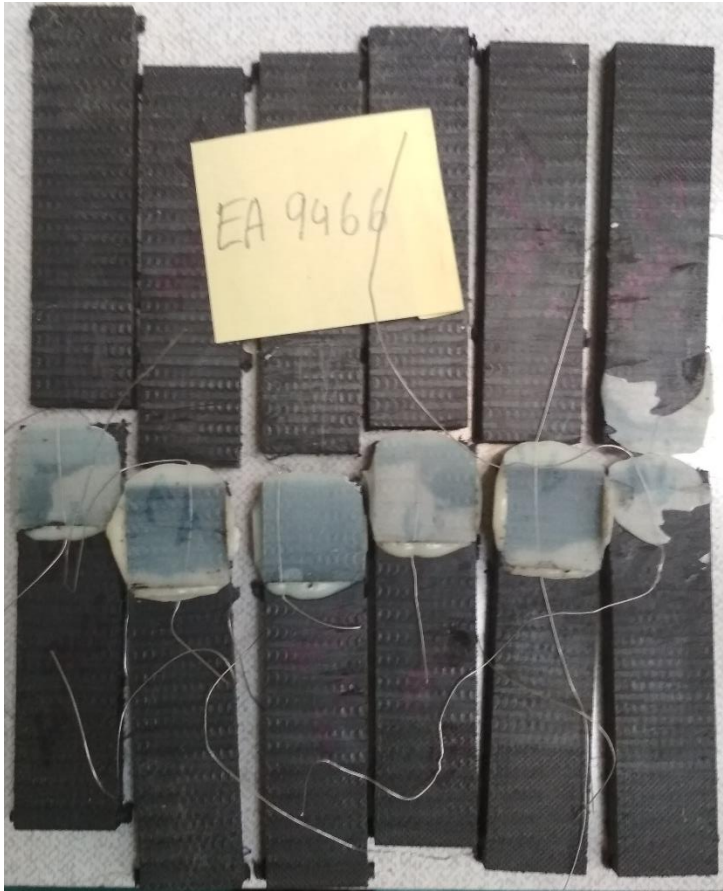
Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.9 a maximální hodnoty v tabulce A.5. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,35 \pm 0,24 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.10. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.9: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1485	1434	1673	1412	1207	1595

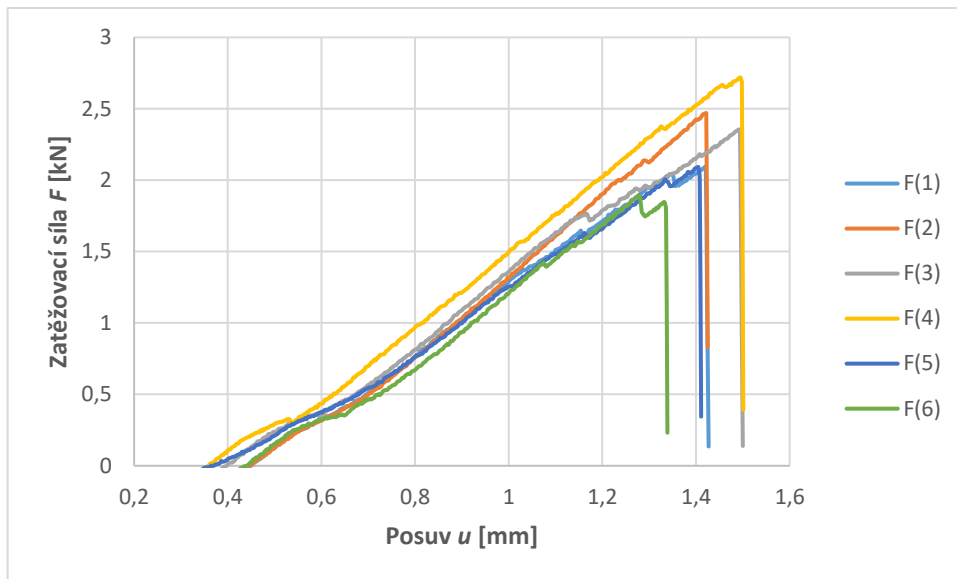
Tabulka A.5: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.10: Porušené ertacetalové vzorky

A.1.6 Vzorky z PVC

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.11 a maximální hodnoty v tabulce A.6. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $3,63 \pm 0,44 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.7 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.12. U vzorků 2 a 6 došlo k poruše adherendu, u vzorků 1, 3, 4 a 5 došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.11: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	2094	2469	2355	2718	2091	1893

Tabulka A.6: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



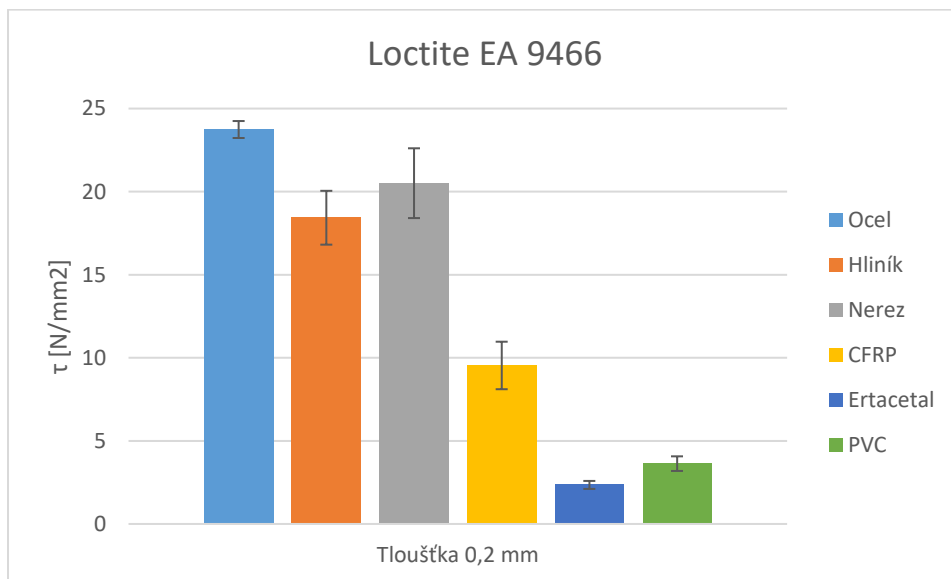
Obrázek A.12: Porušené vzorky z PVC

A.1.7 Souhrnné výsledky pro Loctite EA 9466

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.7. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.13, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s ocelí. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Loctite EA 9466	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	9,54 ± 1,43	23,74 ± 0,51	18,43 ± 1,62	20,51 ± 2,1	2,35 ± 0,24	3,63 ± 0,44

Tabulka A.7: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Loctite EA 9466



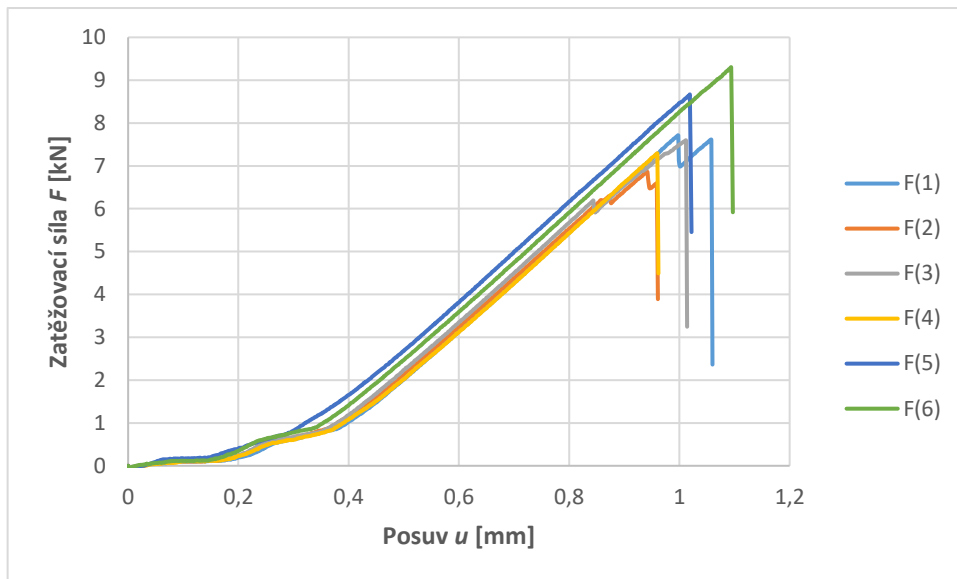
Obrázek A.13: Přehled smykových pevností pro Loctite EA 9466

A.2 Loctite EA 9514

Jedná se o jednosložkové, houževnaté, teplem vytvrzující epoxidové lepidlo. Dosahuje vysoké pevnosti ve smyku i výborné odolnosti proti loupání a rázům. Je vysoce spolehlivé v prostředí s vysokou pracovní teplotou. Svými vlastnostmi, jako je viskozita a odolnost vůči roztékání, umožňuje vyplňování velkých spár. Lepidlo je vhodné pro použití na mnoha rozmanitých materiálech a lze jej vytvrzovat indukci i konvenčními metodami. Lepidlo dosahuje pevnosti ve smyku až 45 MPa pro ocel, 40 MPa pro hliník a 32 MPa pro nerez [28].

A.2.1 Vzorky z CFRP

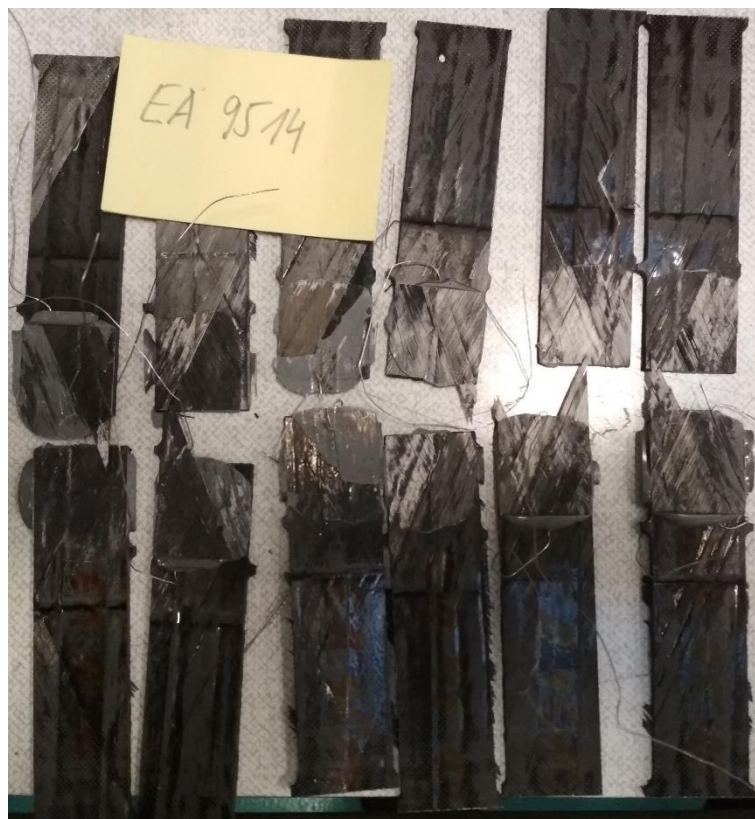
Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.14 a maximální hodnoty v tabulce A.8. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $12,65 \pm 1,33 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.13 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.15. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.14: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	7711	6860	7594	7290	8669	9300

Tabulka A.8: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

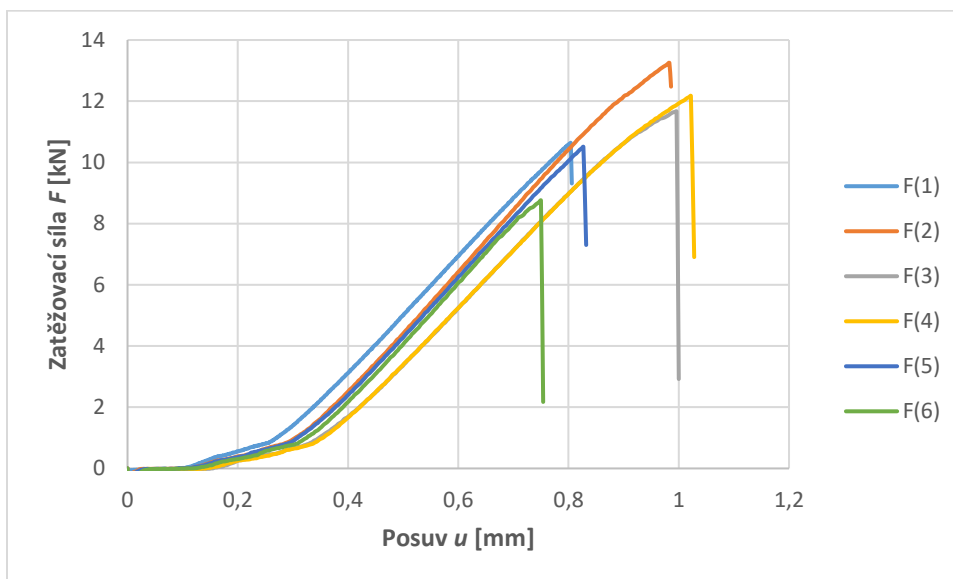


Obrázek A.15: Porušené uhlíkové vzorky

A.2.2 Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.16 a maximální hodnoty v tabulce A.9. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $17,86 \pm 2,27 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.13 a 5.14.

Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.17. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.16: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	10641	13250	11665	12171	10505	8755

Tabulka A.9: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

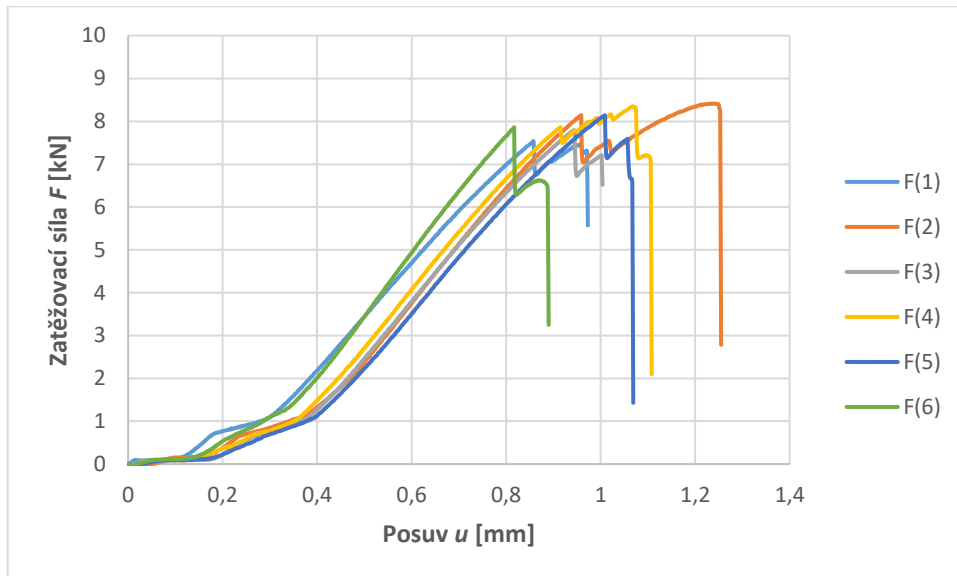


Obrázek A.17: Porušené ocelové vzorky

A.2.3 Hliníkové vzorky

Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.18 a maximální hodnoty v tabulce A.10. Z nich byla vypočtena

smyková pevnost $12,8 \pm 0,52 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.13 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.19. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.18: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	7535	8416	7719	8350	8137	7858

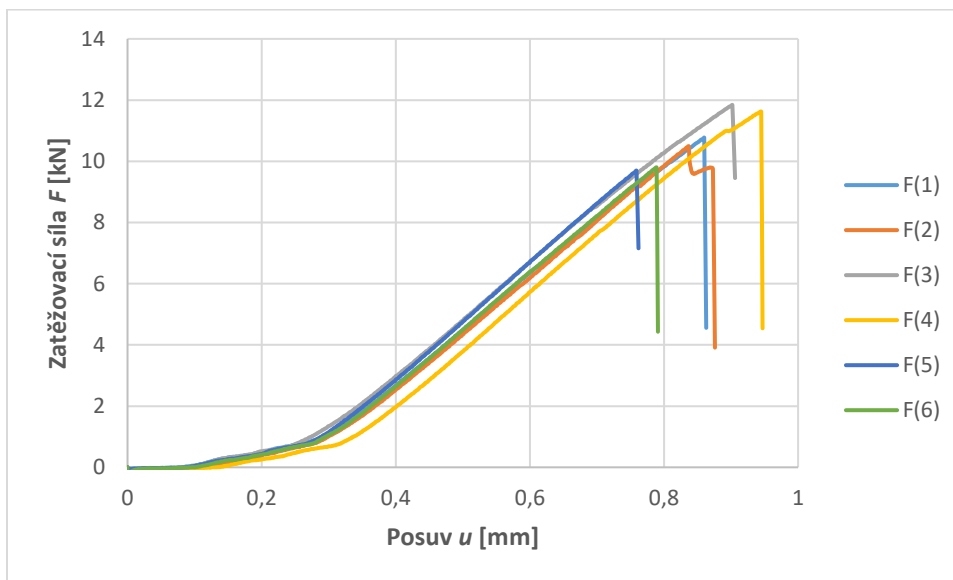
Tabulka A.10: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.19: Porušené hliníkové vzorky

A.2.4 Nerezové vzorky

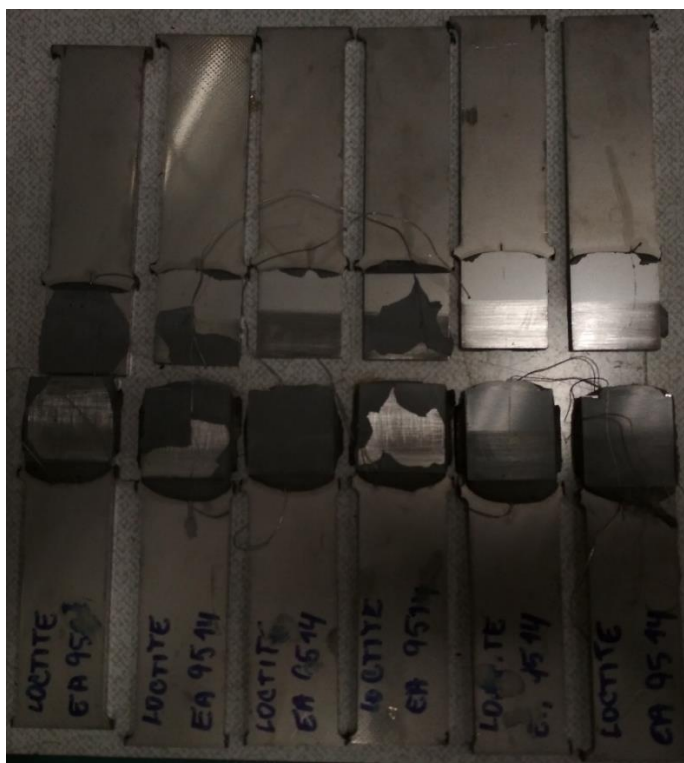
Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.20 a maximální hodnoty v tabulce A.11. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $16,86 \pm 1,05 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.13 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.21. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.20: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	10777	10491	10844	11621	9691	9797

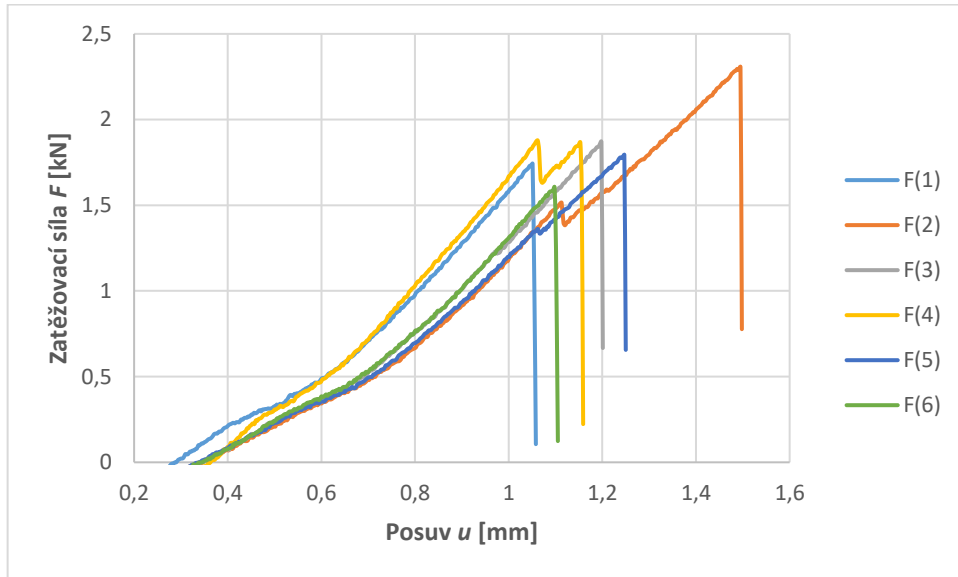
Tabulka A.11: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.21: Porušené nerezové vzorky

A.2.5 Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.22 a maximální hodnoty v tabulce A.12. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,99 \pm 0,35 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.13 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.23. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.22: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1742	2307	1871	1878	1794	1606

Tabulka A.12: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



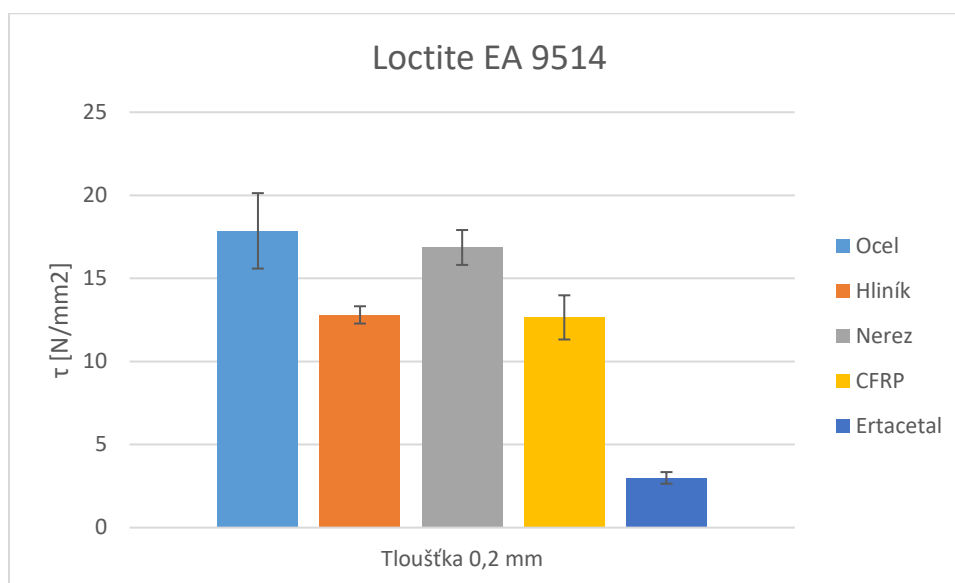
Obrázek A.23: Porušené ertacetalové vzorky

A.2.6 Souhrnné výsledky pro Loctite EA 9514

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.13. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.24, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s ocelí. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Loctite EA 9466	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	12,65 ± 1,33	17,86 ± 2,27	12,8 ± 0,52	16,86 ± 1,05	2,99 ± 0,35	-

Tabulka A.13: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Loctite EA 9514



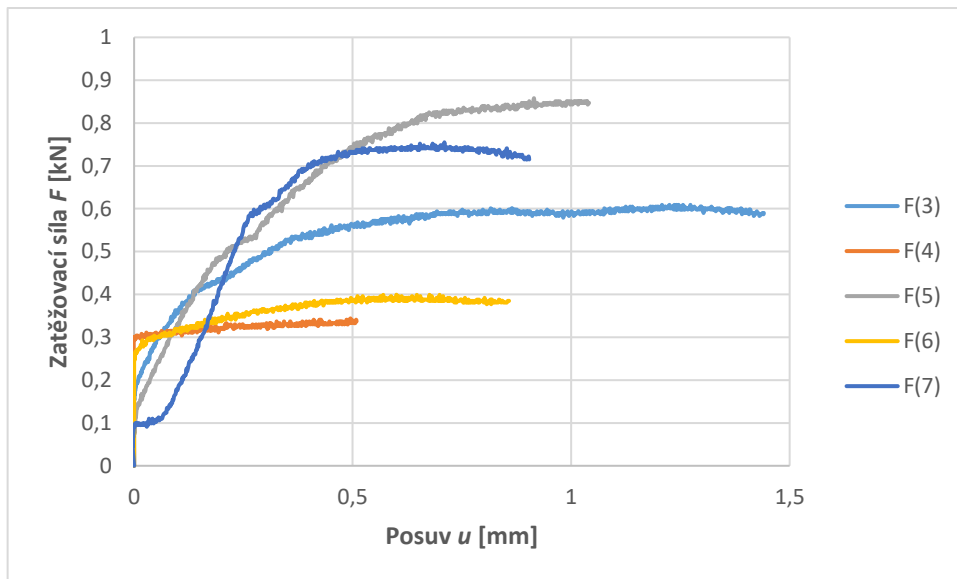
Obrázek A.24: Přehled smykových pevností pro Loctite EA 9514

A.3 Crestabond M1 – 30

Jedná se o tvrzené dvousložkové metakrylátové lepidlo určené k lepení kompozitů, termoplastů a kovů. Splňuje požadavky pro většinu montážních operací, což dokazuje vynikajícími vlastnostmi při rázech, odlupování, stříhu, pevnosti v tlaku a odolnosti proti únavě. Jedná se o bezzákladové lepidlo, které má minimální požadavky na očištění lepených ploch a vykazuje vysokou houževnatost. Umožňuje vyplnit mezery až do tloušťky 50 mm. Lepidlo dosahuje smykové pevnosti až 21 MPa pro hliník, 17 MPa pro nerez a 18 MPa pro PVC [29].

A.3.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí 1 $\frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.25 a maximální hodnoty v tabulce A.14. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $0,95 \pm 0,32$ MPa, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.19 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.26. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost. Vzorky 1 a 2 byly z hodnocení vyřazeny, protože došlo k poškození při upnutí do stroje.



Obrázek A.25: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	3	4	5	6	7
F_{max} [N]	609	344	858	399	755

Tabulka A.14: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

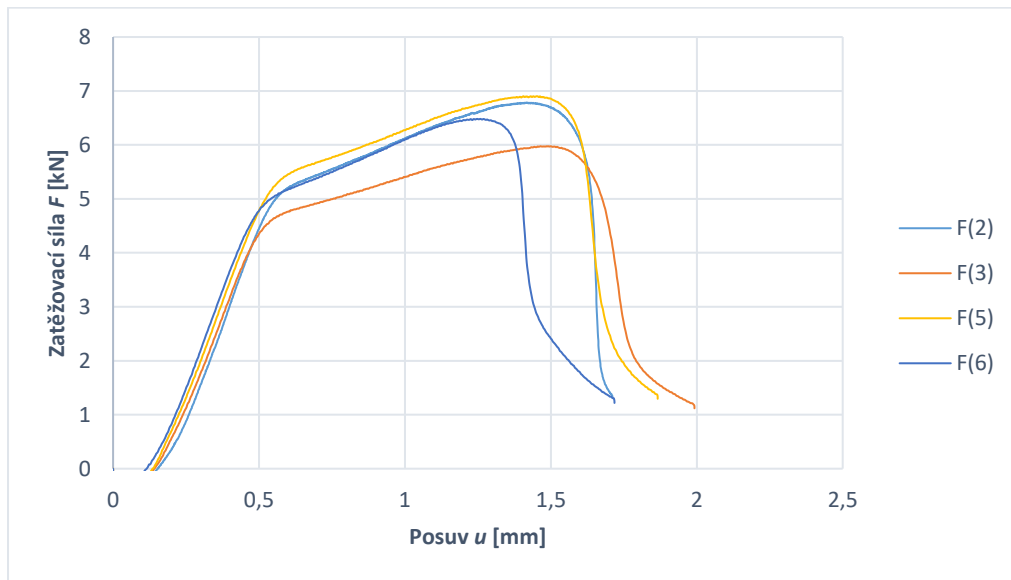


Obrázek A.26: Porušené uhlíkové vzorky

A.3.2 Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Vzorek č. 2 byl zatěžován rychlostí $0,5 \frac{mm}{min}$, ale k poruše došlo později, než předepisuje norma [18]. Proto byly ostatní vzorky zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.27 a maximální hodnoty v tabulce A.15. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $10,46 \pm 0,57 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.19 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.28. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure

(AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost. Vzorek č. 4 byl z vyhodnocení vyřazen z důvodu nízké pevnosti.



Obrázek A.27: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	2	3	5	6
F_{max} [N]	6783	5976	6901	6482

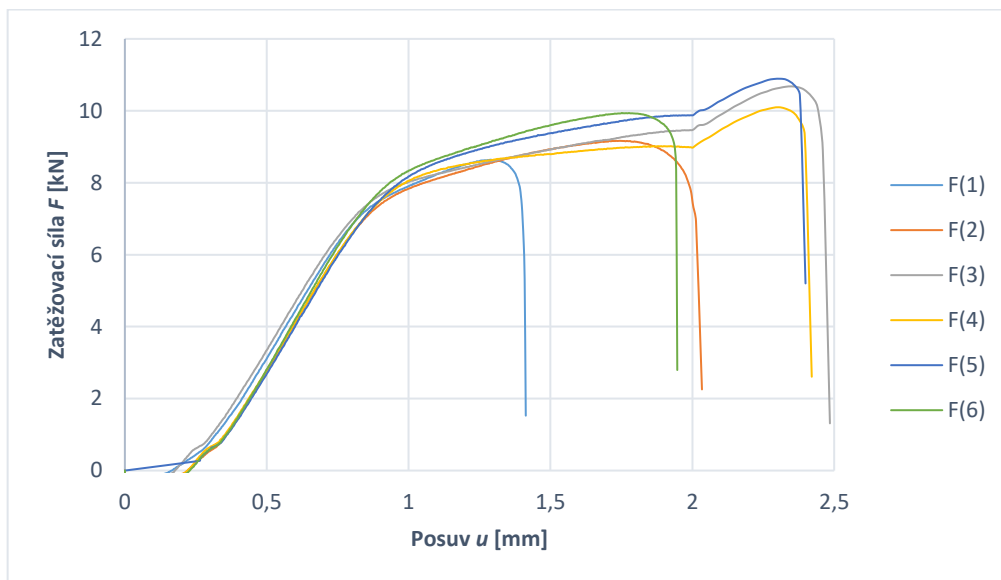
Tabulka A.15: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.28: Porušené ocelové vzorky

A.3.3 Hliníkové vzorky

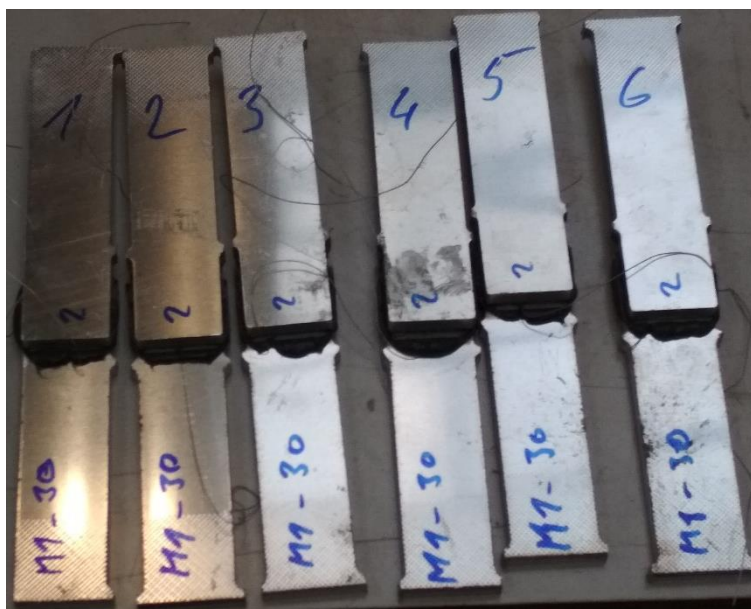
Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.29 a maximální hodnoty v tabulce A.16. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $15,85 \pm 1,23 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.19 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.30. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.29: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8640	9168	10680	10100	10892	9942

Tabulka A.16: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

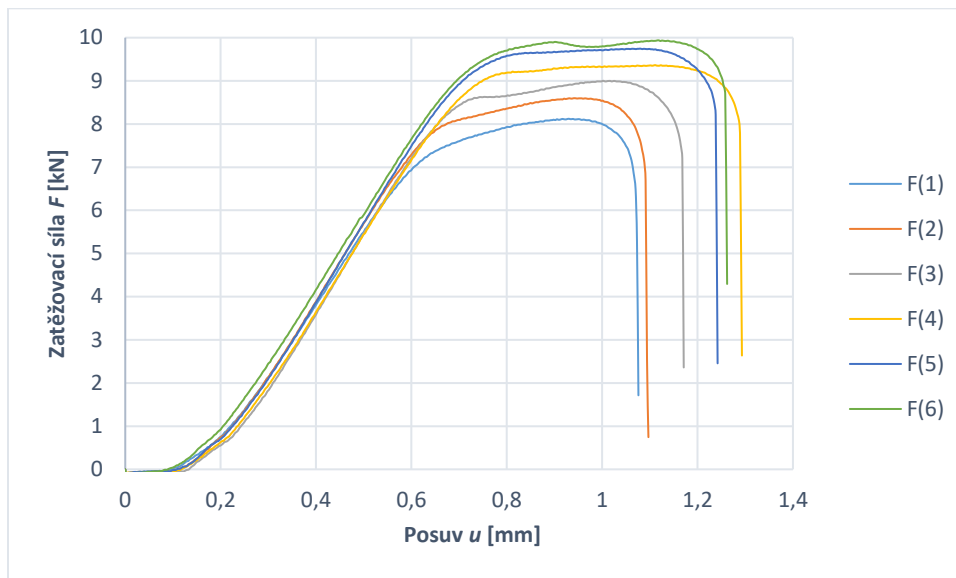


Obrázek A.30: Porušené hliníkové vzorky

A.3.4 Nerezové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.31 a maximální hodnoty v tabulce A.17. Z nich byla vypočtena

smyková pevnost $14,60 \pm 1,01 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.19 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.32. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.31: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8121	8598	9001	9364	9746	9937

Tabulka A.17: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

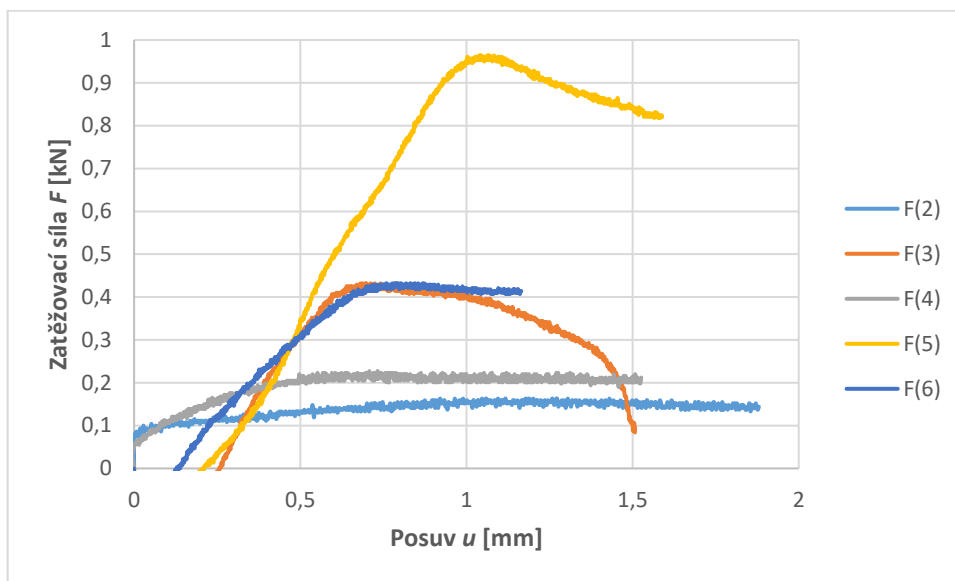


Obrázek A.32: Porušené nerezové vzorky

A.3.5 Vzorky z PVC

Tloušťka adhezendů byla 9 mm . Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.33 a maximální hodnoty v tabulce A.18. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $0,71 \pm 0,45 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.19 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.34. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost. Vzorek 2 byl porušen pravděpodobně již při

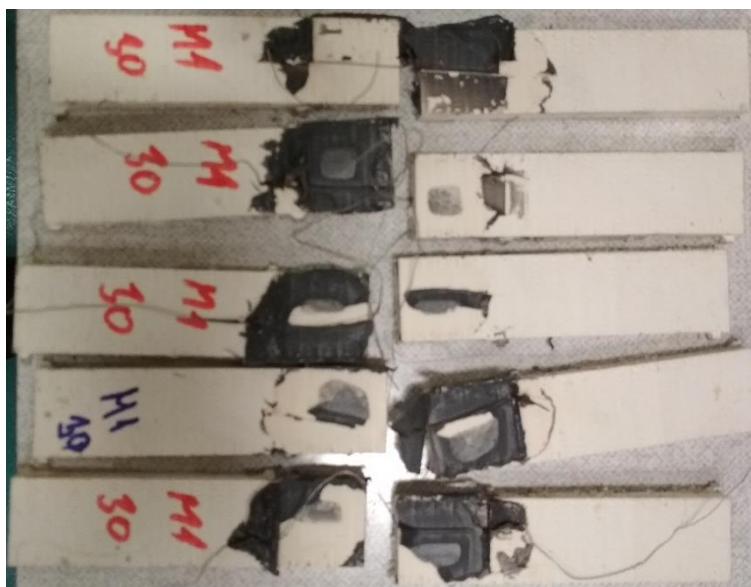
secvaknutí čelistí trhačického stroje. Lepidlo obecně nedrželo a správně byly naměřeny pravděpodobně pouze dva vzorky.



Obrázek A.33: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	163	432	227	964	432

Tabulka A.18: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



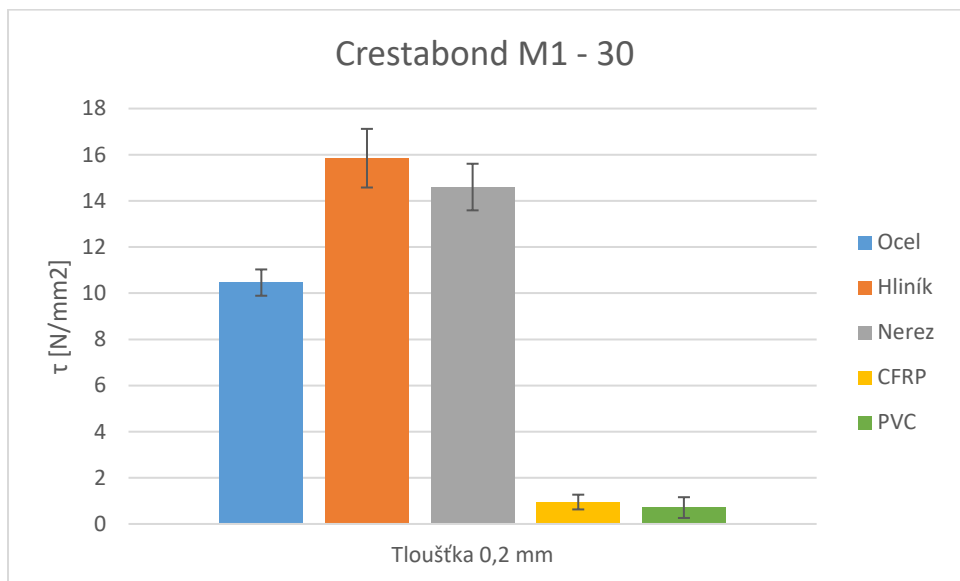
Obrázek A.34: Porušené vzorky z PVC

A.3.6 Souhrnné výsledky pro Crestabond M1 – 30

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.19. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.35, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s hliníkem. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Crestabond M1 - 30	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	0,95 ± 0,32	10,46 ± 0,57	15,85 ± 1,23	14,60 ± 1,01	-	0,71 ± 0,45

Tabulka A.19: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Crestabond M1 – 30



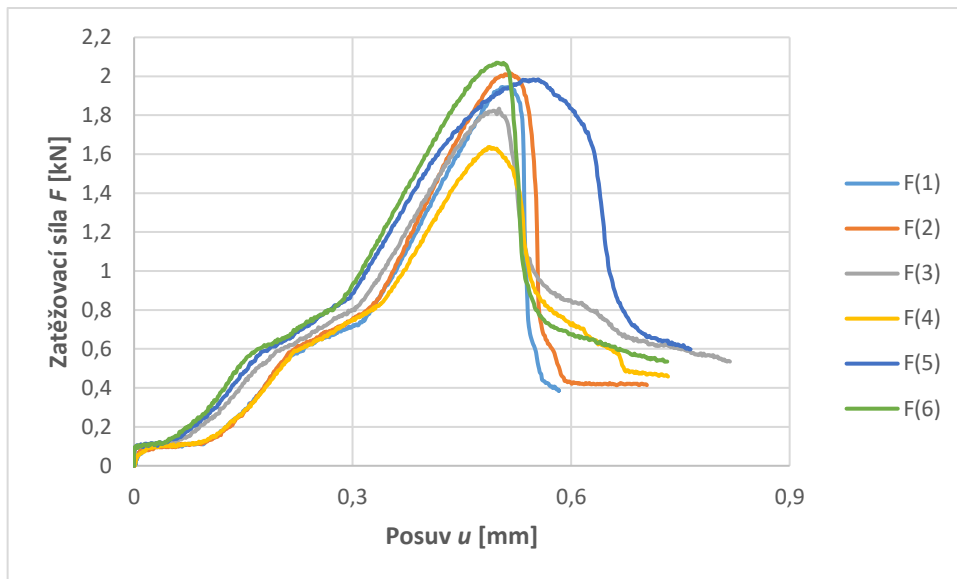
Obrázek A.35: Přehled smykových pevností pro Crestabond M1 - 30

A.4 Acralock FA 10 – 10

Jedná se o univerzální metakrylátové dvousložkové lepidlo, s nízkou pevností ve smyku a vysokou tuhostí a tažností, ve variantě dávající 10 minut na zpracování lepidla. Je speciálně navrženo tak, aby spojovalo zejména hliník, ale i další materiály bez primeru a dalších povrchových úprav. Je vhodné pro lepení natřených ploch bez trhlin v povrchu a dalším aplikacím, kde podklad neodolá vysokomodulárním lepidlům, díky svému vysokému prodloužení až 400 %. Výrobce udává typickou pevnost shodně pro uhlíkovou ocel, hliník a CFRP 7 MPa s typem poruchy CF [30].

A.4.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.36 a maximální hodnoty v tabulce A.20. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $3,06 \pm 0,23 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.37. U vzorků 1, 2, 3, a 4 došlo k poruše typu adhesive failure (AF), u vzorků 5 a 6 nebylo možné určit typ poruchy. Byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.36: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1944	2014	1834	1636	1984	2069

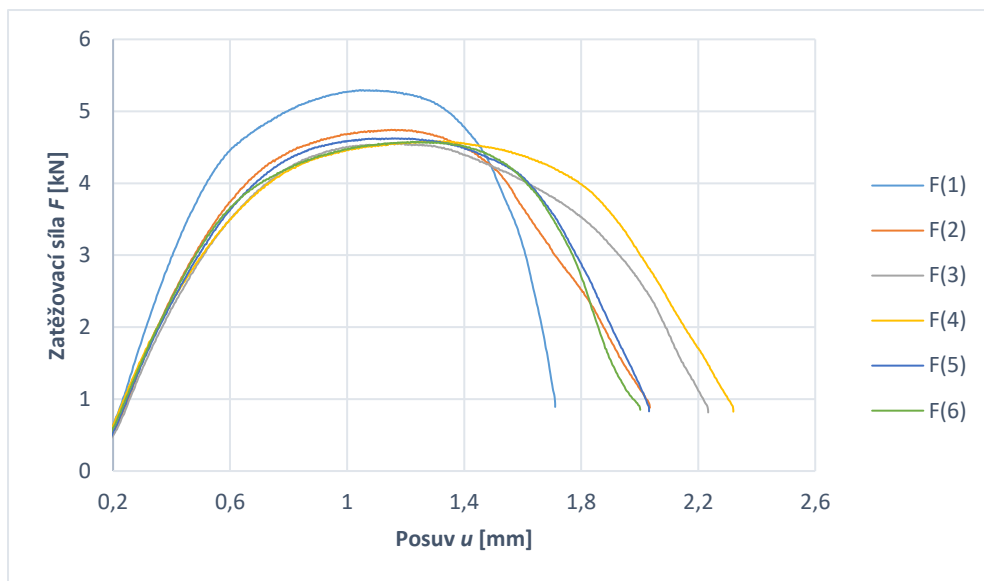
Tabulka A.20: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.37: Porušené uhlíkové vzorky

A.4.2 Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.38 a maximální hodnoty v tabulce A.21. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $7,57 \pm 0,42 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.39. U všech vzorků došlo k poruše adhesive failure (AF), byla tedy z těchto vzorků vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.38: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	5297	4743	4533	4586	4626	4578

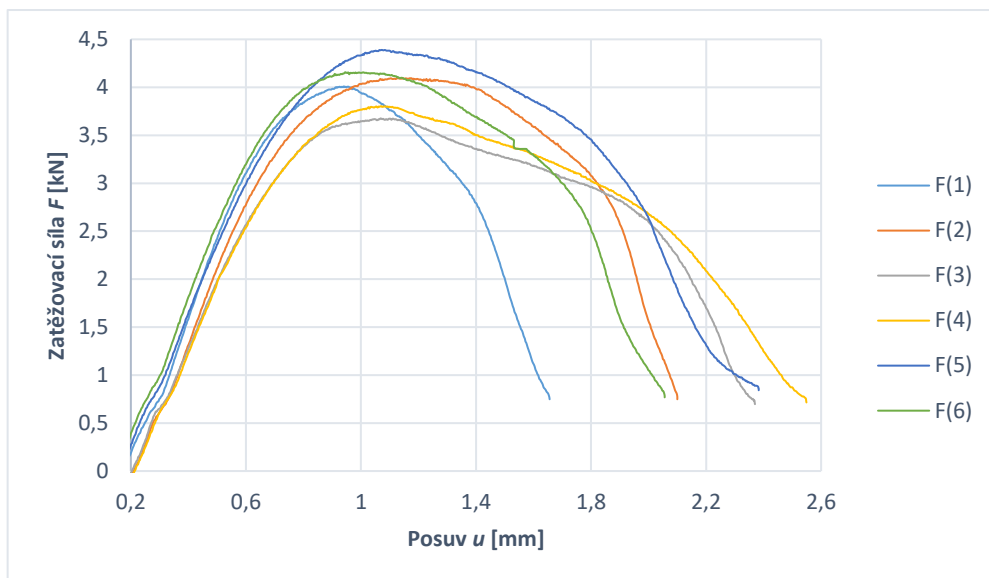
Tabulka A.21: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.39: Porušené ocelové vzorky

A.4.3 Hliníkové vzorky

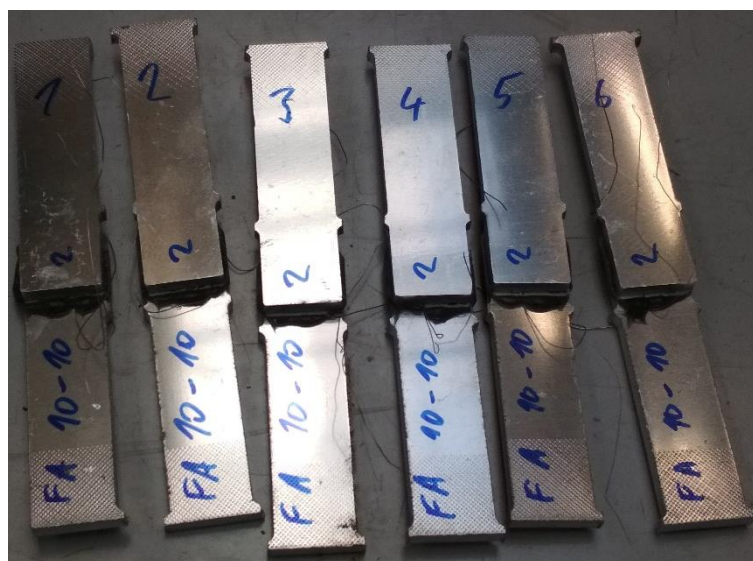
Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.40 a maximální hodnoty v tabulce A.22. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $6,43 \pm 0,37 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.41. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.40: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	4010	4094	3676	3804	4389	4158

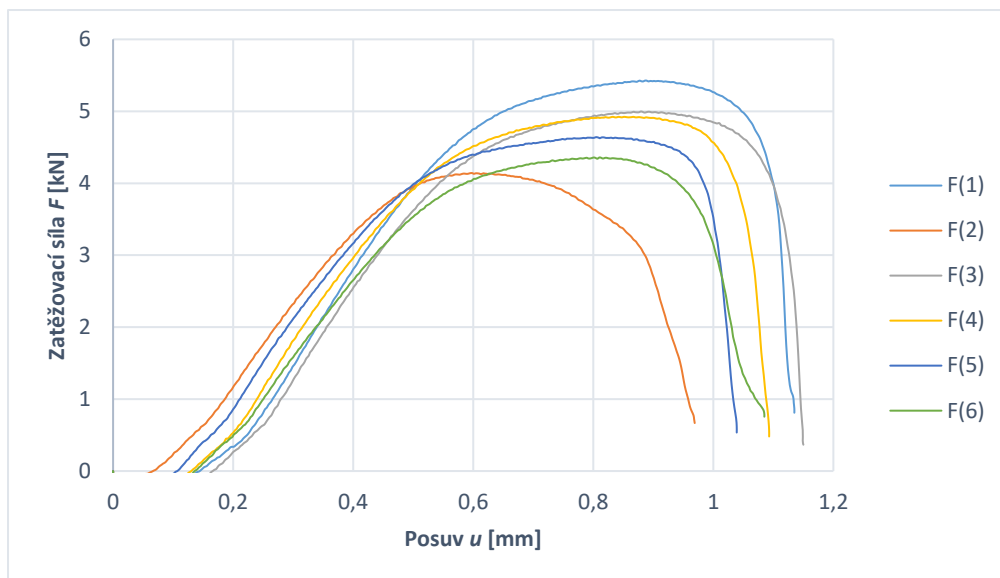
Tabulka A.22: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.41: Porušené hliníkové vzorky

A.4.4 Nerezové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.42 a maximální hodnoty v tabulce A.23. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $7,6 \pm 0,68 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.43. U všech vzorků nebylo možné určit typ poruchy, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.42: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	5426	4142	4997	4923	4641	4358

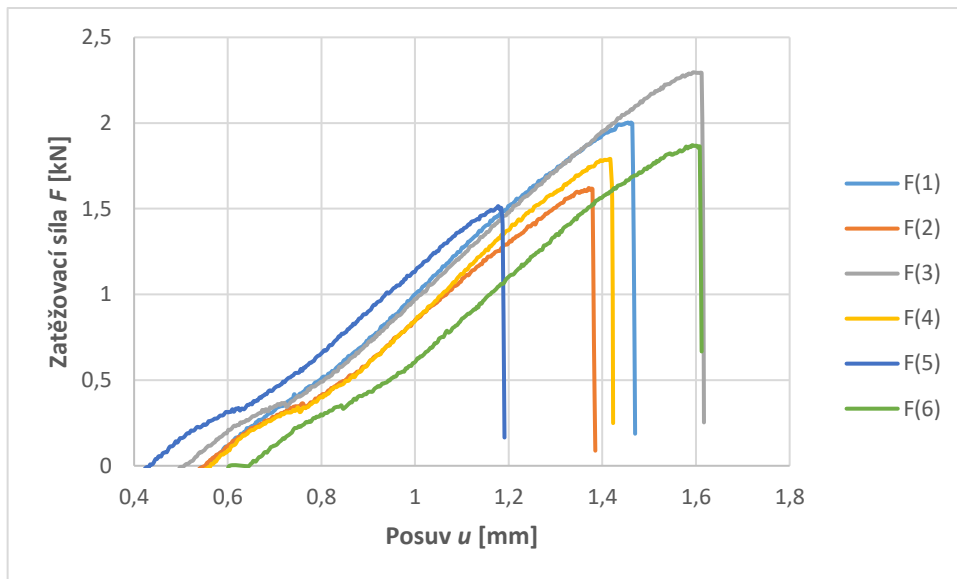
Tabulka A.23: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.43: Porušené nerezové vzorky

A.4.5 Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.44 a maximální hodnoty v tabulce A.24. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,96 \pm 0,41 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.45. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.44: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	2003	1621	2296	1790	1515	1871

Tabulka A.24: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

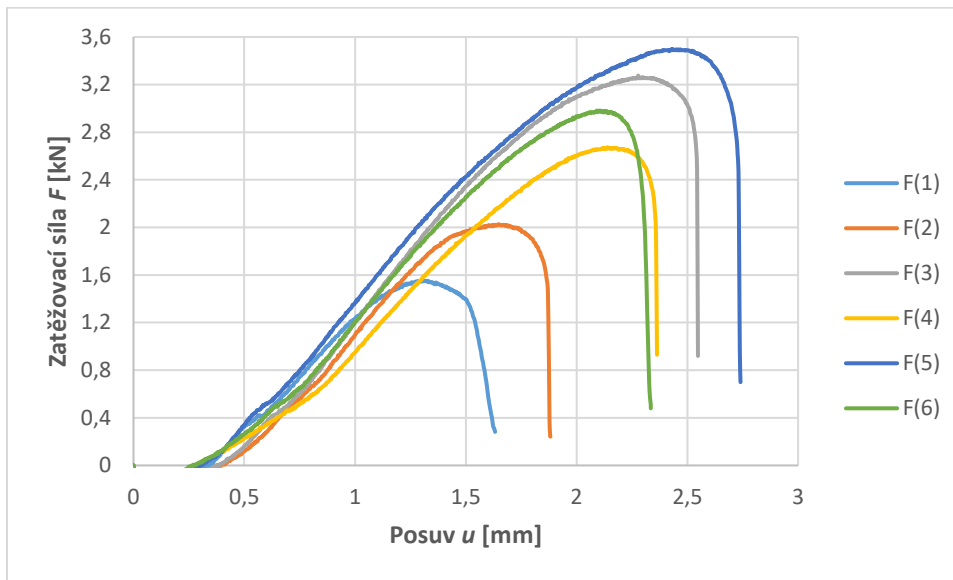


Obrázek A.45: Porušené ertacetalové vzorky

A.4.6 Vzorky z PVC

Tloušťka adhezendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.46 a maximální hodnoty v tabulce A.25. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $4,27 \pm 1,1 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.26 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.47. U vzorků 1, 2, a 4 došlo k poruše typu adhesive failure

(AF), u vzorků 5 a 6 nebylo možné určit typ poruchy a u vzorku 3 došlo k poruše adherendu. Byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.46: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1551	2025	3276	2674	3500	2982

Tabulka A.25: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



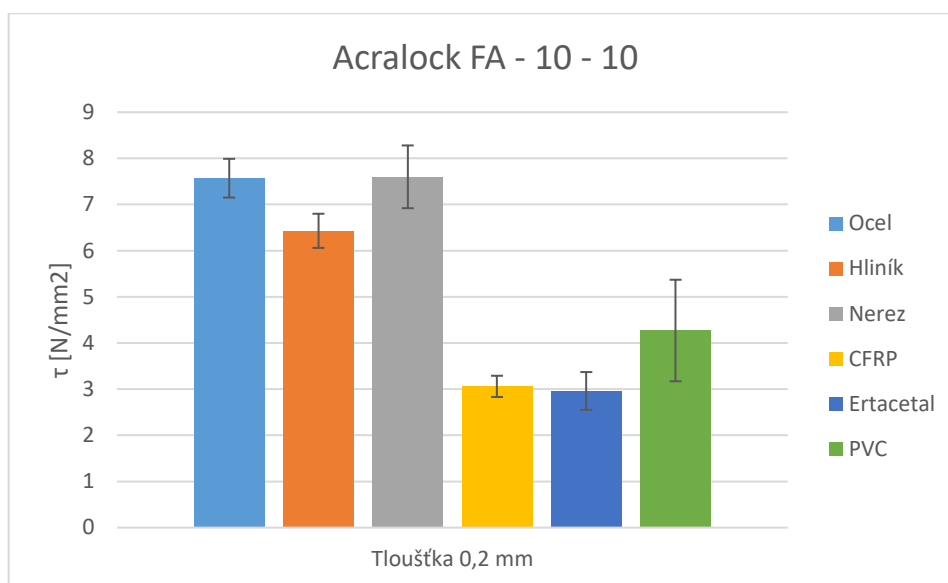
Obrázek A.47: Porušené vzorky z PVC

A.4.7 Souhrnné výsledky pro Acralock FA 10 – 10

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.26. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.48, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s nerezem a ocelí. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Acralock FA 10 - 10	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	3,06 ± 0,23	7,57 ± 0,42	6,43 ± 0,37	7,6 ± 0,68	2,96 ± 0,41	4,27 ± 1,1

Tabulka A.26: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Acralock FA 10 – 10



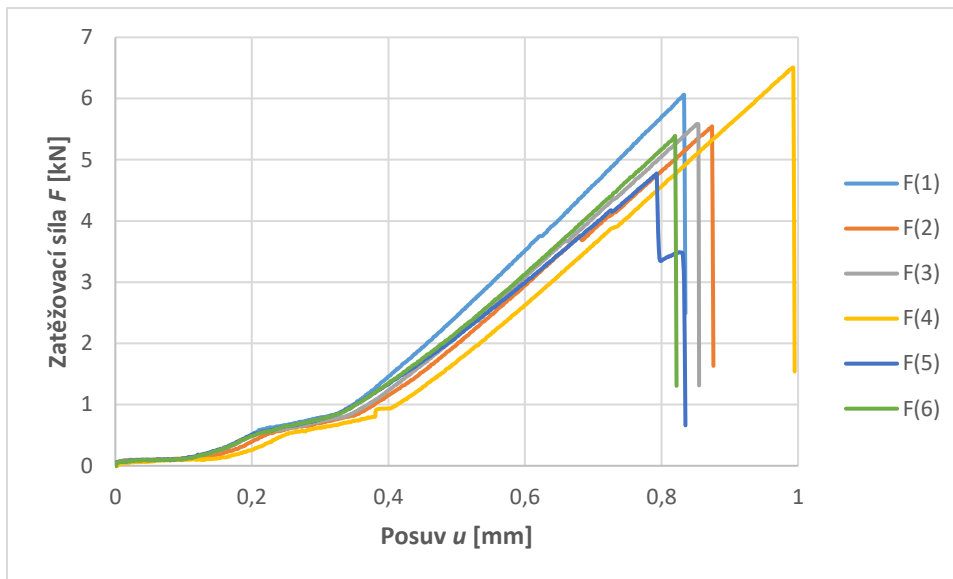
Obrázek A.48: Přehled smykových pevností pro Acralock FA 10 – 10

A.5 Spabond SP 345 – slow

Lepidlo Spabond je vysoce výkonné tvrzené epoxidové lepidlo pro lepení velkých konstrukcí, kde mají povrchy adherendů nerovnou geometrii. Lepidlo má silnou pastovitou konzistenci a lze ho aplikovat bez průhybu v tloušťkách přesahujících 30 mm při teplotách okolo 15 °C. Výrobce udává smykovou pevnost dle způsobu vytvrzení až 40 MPa [31].

A.5.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí 1 $\frac{mm}{min}$. Průběh zatěžování je znázorněn na obrázku A.49 a maximální hodnoty v tabulce A.27. Z nich byla vypočtena smyková pevnost 9,03 ± 0,86 MPa, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.50. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.49: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	6060	5547	5584	6504	4776	5385

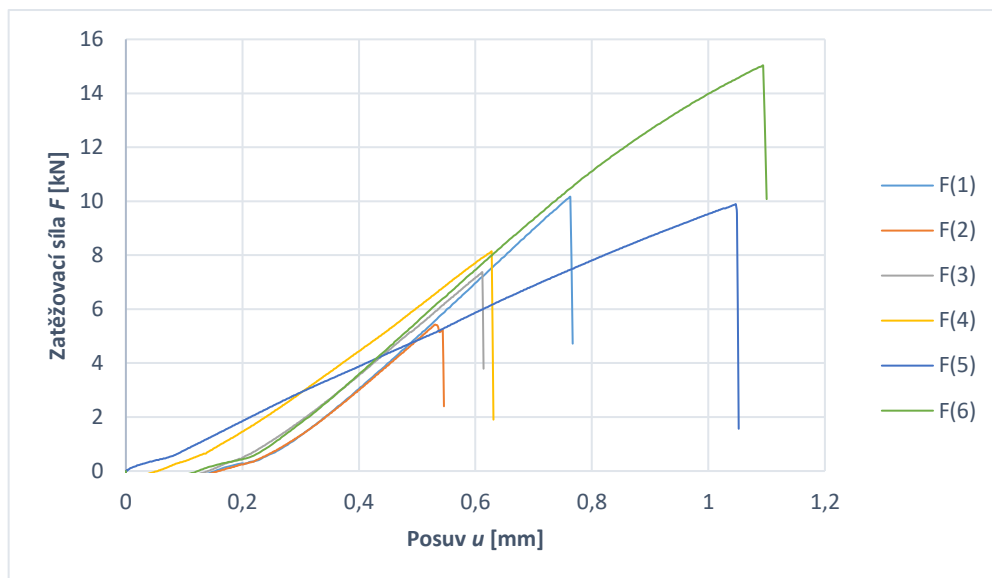
Tabulka A.27: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.50: Porušené uhlíkové vzorky

A.5.2 Ocelové vzorky

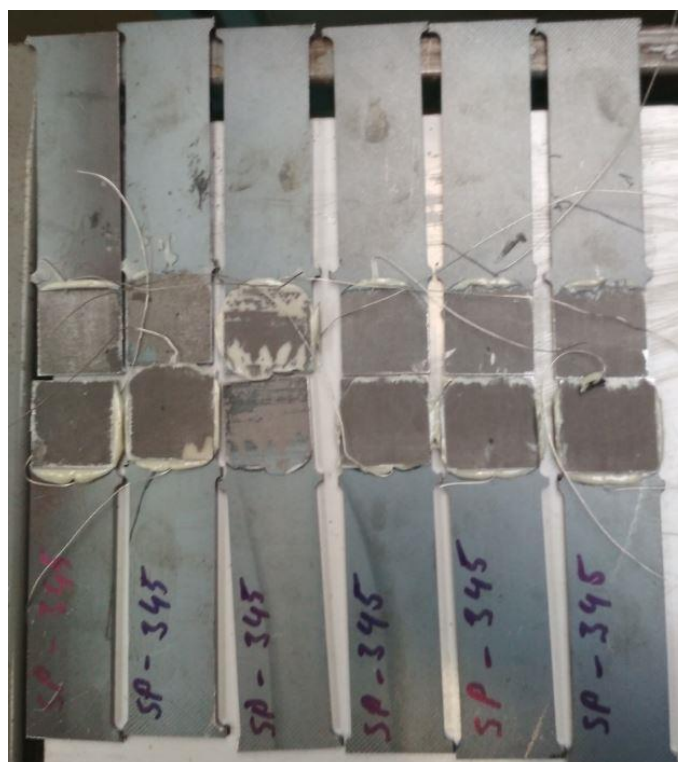
Tloušťka adherendů byla 3 mm. Vzorek č. 1 byl zatěžován rychlostí $2 \frac{mm}{min}$, ale k poruše došlo dříve, než předepisuje norma [18]. Proto byly ostatní vzorky zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zatěžování je znázorněn na obrázku A.51 a maximální hodnoty v tabulce A.28. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $14,94 \pm 4,8 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.52. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.51: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	10159	5429	7367	8144	9894	15027

Tabulka A.28: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

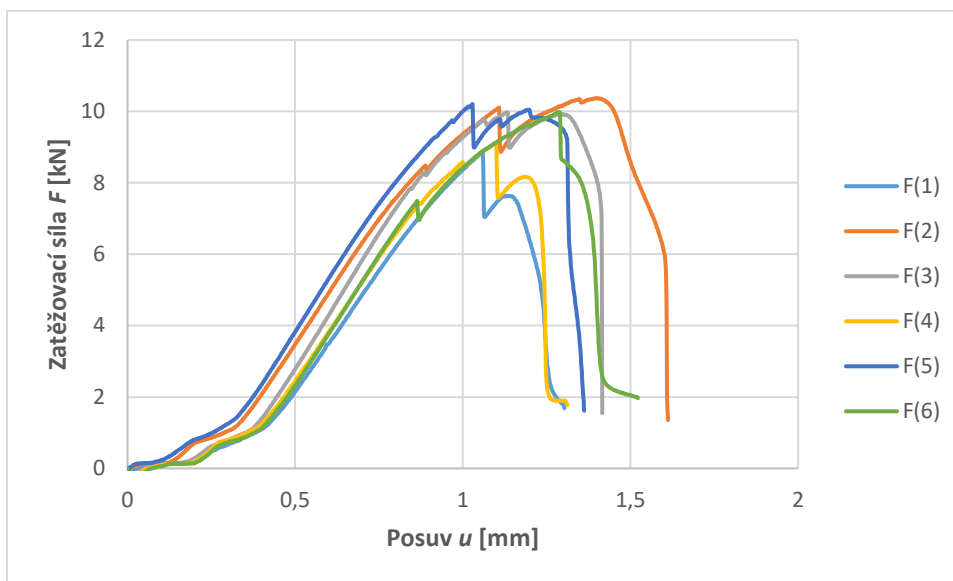


Obrázek A.52: Porušené ocelové vzorky

A.5.3 Hliníkové vzorky

Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.53 a maximální hodnoty v tabulce A.29. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $15,61 \pm 0,89 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14.

Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.54. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.53: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8875	10371	9972	9120	10206	9990

Tabulka A.29: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

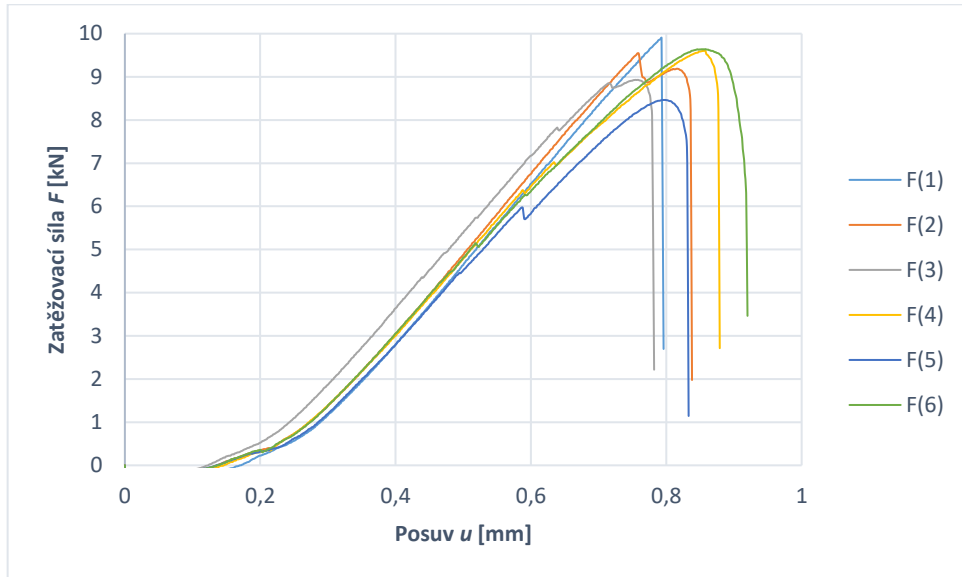


Obrázek A.54: Porušené hliníkové vzorky

A.5.4 Nerezové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.55 a maximální hodnoty v tabulce A.30. Z nich byla vypočtena

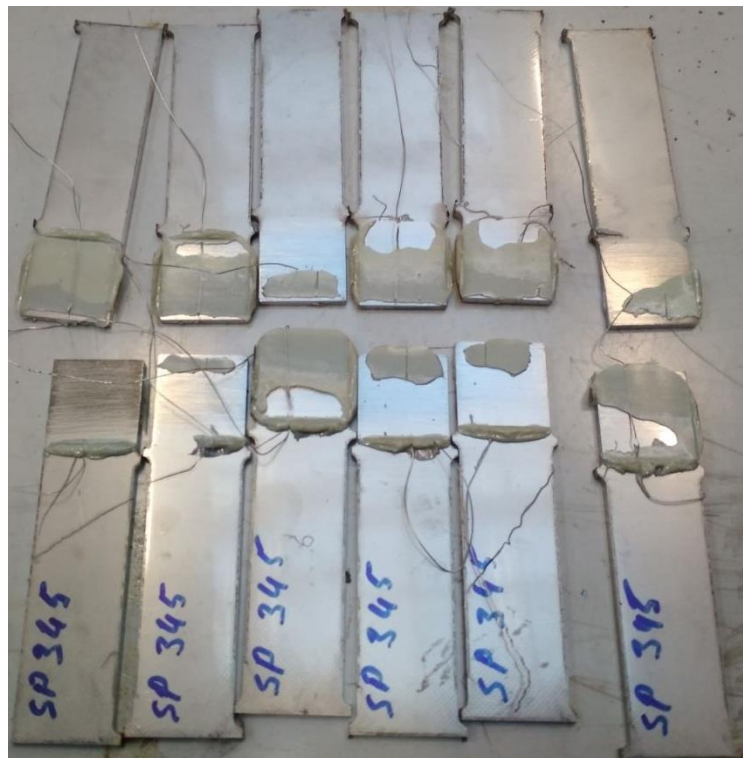
smyková pevnost $14,96 \pm 0,79 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.56. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.55: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	9909	9546	8930	9605	8464	9641

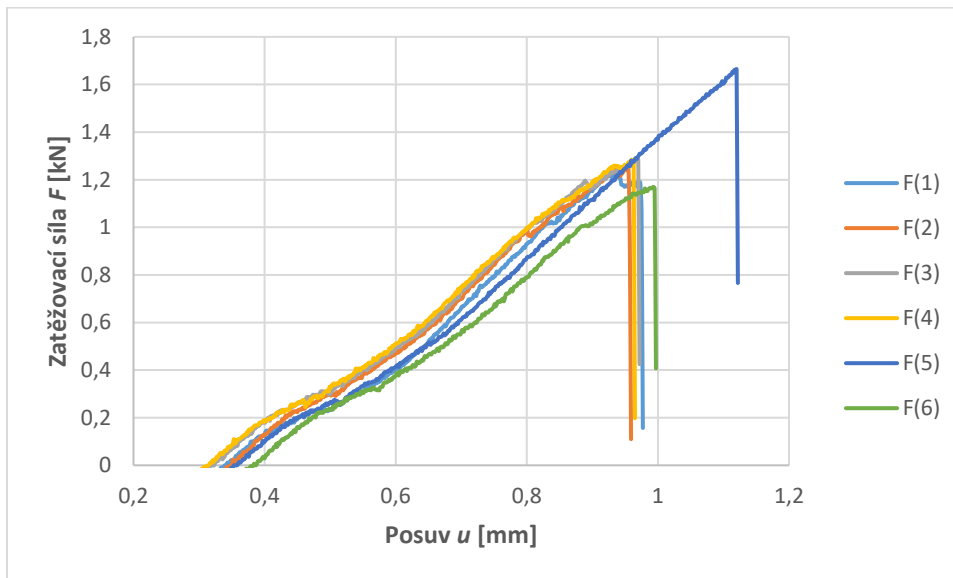
Tabulka A.30: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.56: Porušené nerezové vzorky

A.5.5 Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.57 a maximální hodnoty v tabulce A.31. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,1 \pm 0,26 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.58. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.57: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1221	1251	1287	1284	1665	1170

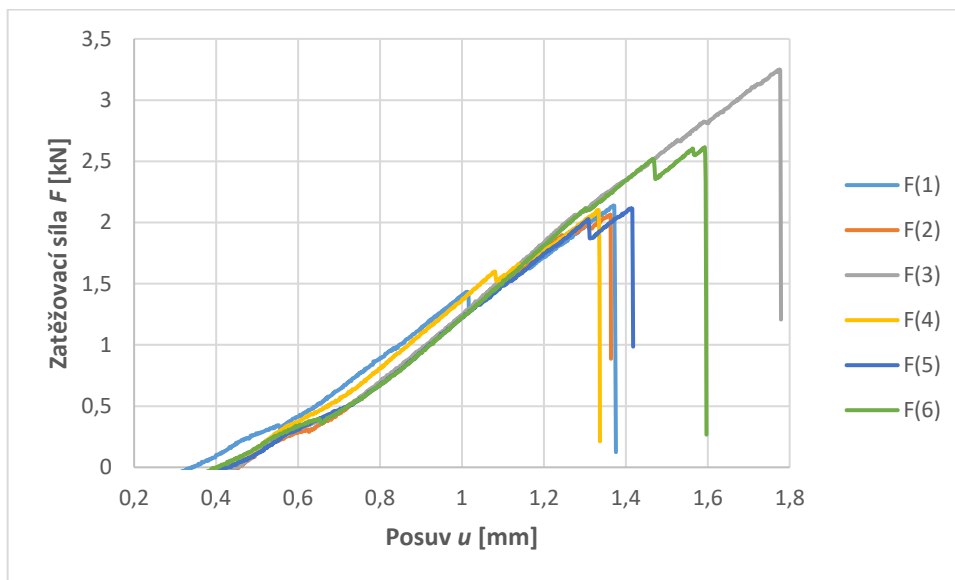
Tabulka A.31: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.58: Porušené ertacetalové vzorky

A.5.6 Vzorky z PVC

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.59 a maximální hodnoty v tabulce A.32. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $3,81 \pm 0,69 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.33 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.60. U vzorků 2, 3 a 5 došlo k poruše adherendu, u vzorků 1, 4 a 6 k poruše typu adhesive failure (AF). Byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.59: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	2138	2065	3250	2102	2116	2615

Tabulka A.32: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



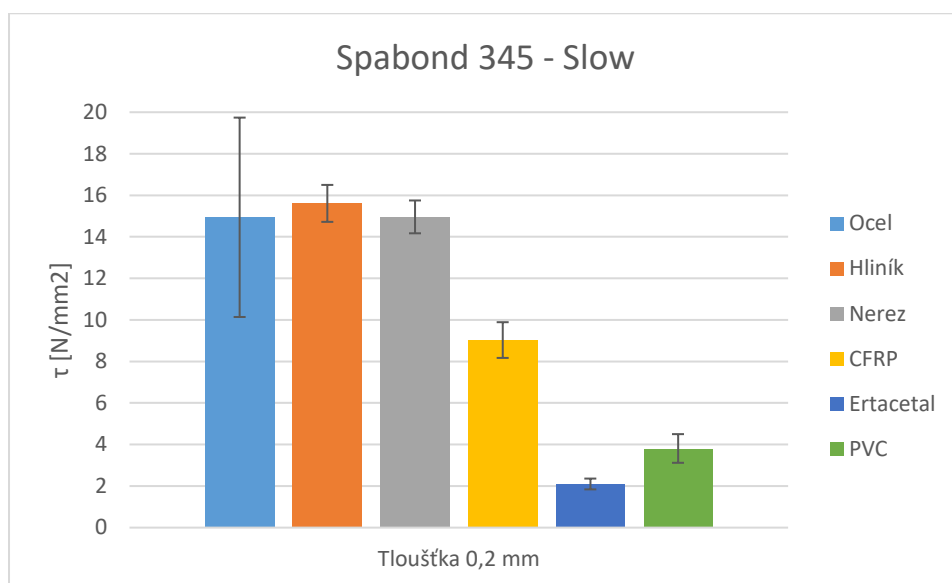
Obrázek A.60: Porušené vzorky z PVC

A.5.7 Souhrnné výsledky pro Spabond SP 345 – slow

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.33. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.61, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s hliníkem. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Spabond 345 slow	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	9,03 ± 0,86	14,94 ± 4,8	15,61 ± 0,89	14,96 ± 0,79	2,1 ± 0,26	3,81 ± 0,69

Tabulka A.33: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Spabond SP 345 - slow



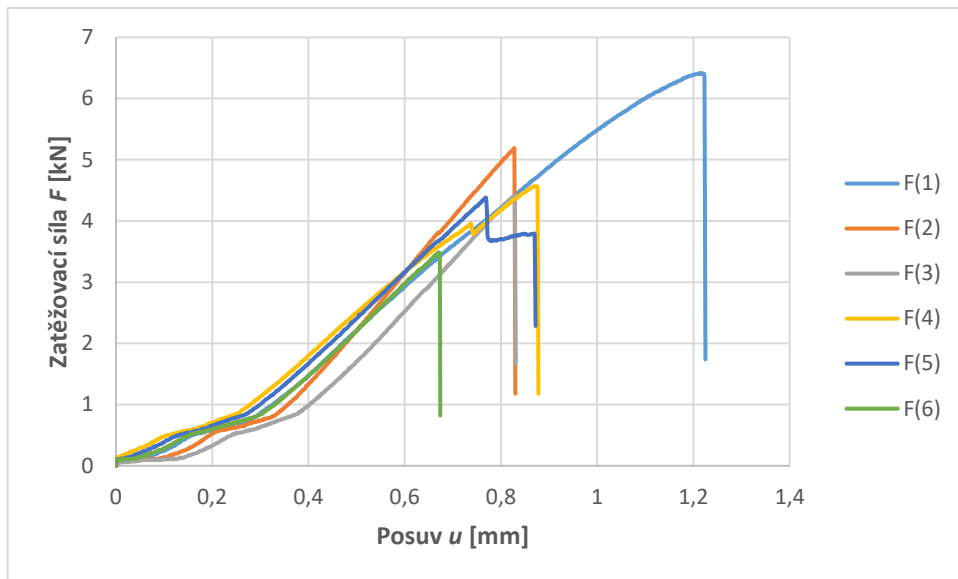
Obrázek A.61: Přehled smykových pevností pro Spabond SP 345 - slow

A.6 Bostik SAF 150 – 45

Jedná se o dvousložkové metakrylátové lepidlo, které vykazuje nesrovnatelný výkon z hlediska odolnosti a pružnosti. Je určeno pro lepení široké škály materiálů, včetně kovů, plastů i kompozitních materiálů. Lepidlo umožňuje konstrukční lepení při zachování flexibility a odolnosti proti únavě. Také odolává agresivnímu prostředí a vysokým teplotám, přičemž vykazuje nebývalé výsledky při vystavení povětrnostním vlivům a stárnutí. Lepidlo dosahuje smykové pevnosti až 18 MPa v případě oceli a až 17 MPa v případě hliníku při poruše typu CF [32].

A.6.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.62 a maximální hodnoty v tabulce A.34. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $7,59 \pm 1,44 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.63. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.62: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	6416	5159	4413	4571	4380	3489

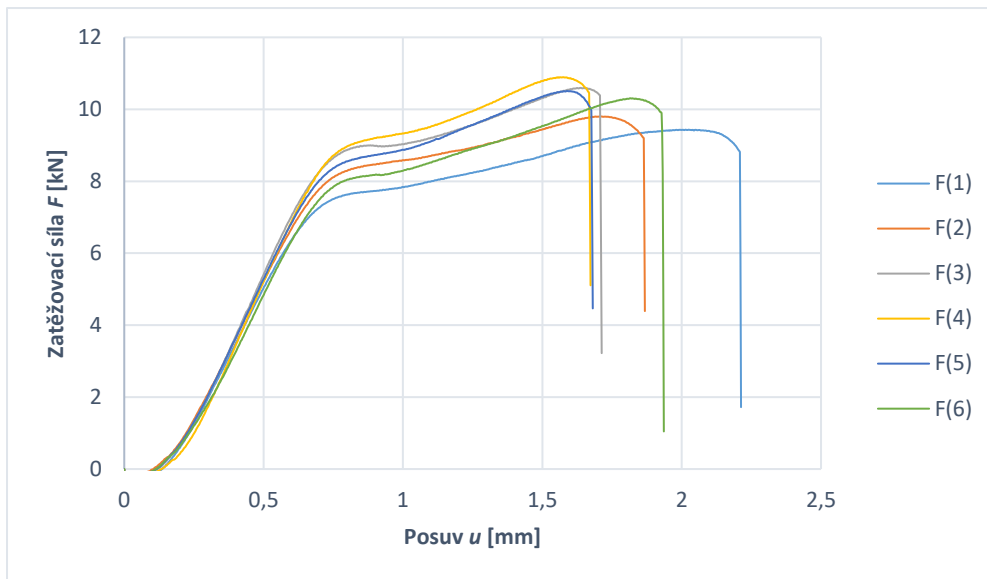
Tabulka A.34: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.63: Porušené uhlíkové vzorky

A.6.2 Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.64 a maximální hodnoty v tabulce A.35. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $16,41 \pm 0,79 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.65. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.64: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	9432	9799	10595	10892	10507	10305

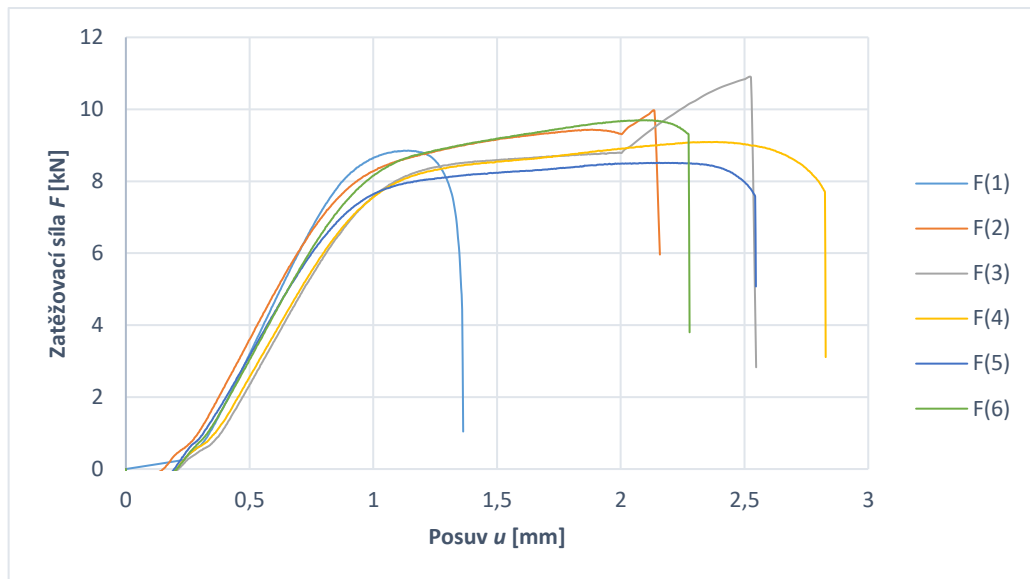
Tabulka A.35: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.65: Porušené ocelové vzorky

A.6.3 Hliníkové vzorky

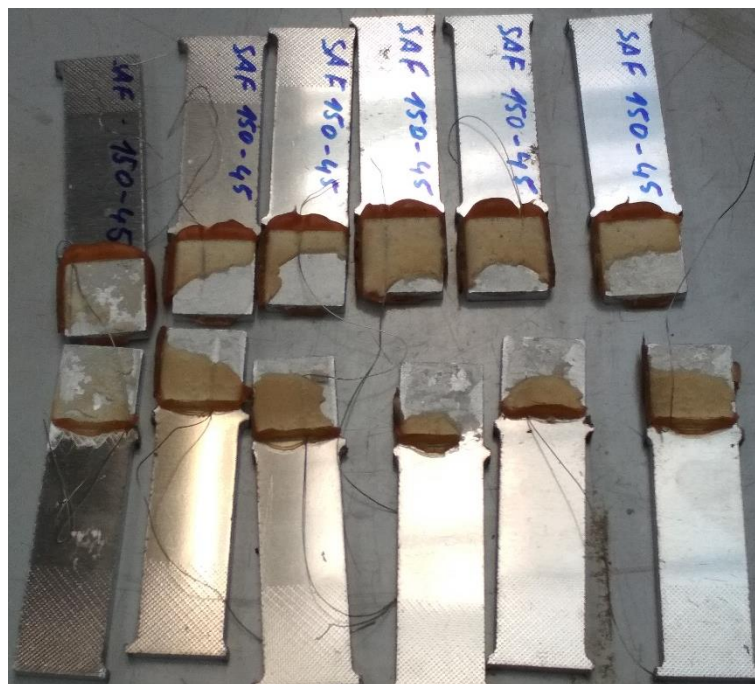
Tloušťka adherendů byla 6 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.66 a maximální hodnoty v tabulce A.36. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $15,2 \pm 1,26 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.67. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.66: Průběh zatěžování hliníkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8853	9953	10881	9095	8511	9696

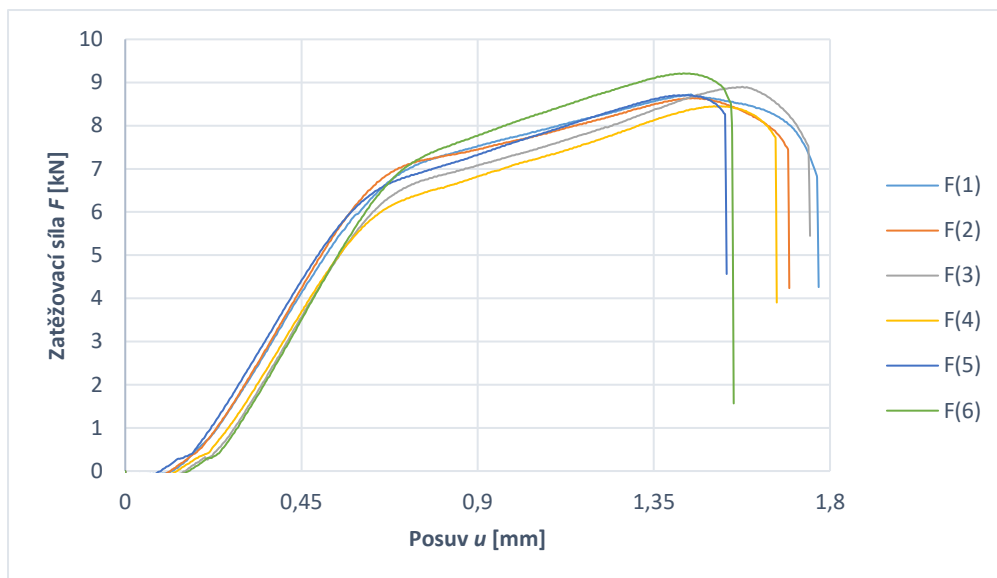
Tabulka A.36: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.67: Porušené hliníkové vzorky

A.6.4 Nerezové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.68 a maximální hodnoty v tabulce A.37. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $14,04 \pm 0,38 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.69. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.68: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	8726	8640	8900	8453	8706	9212

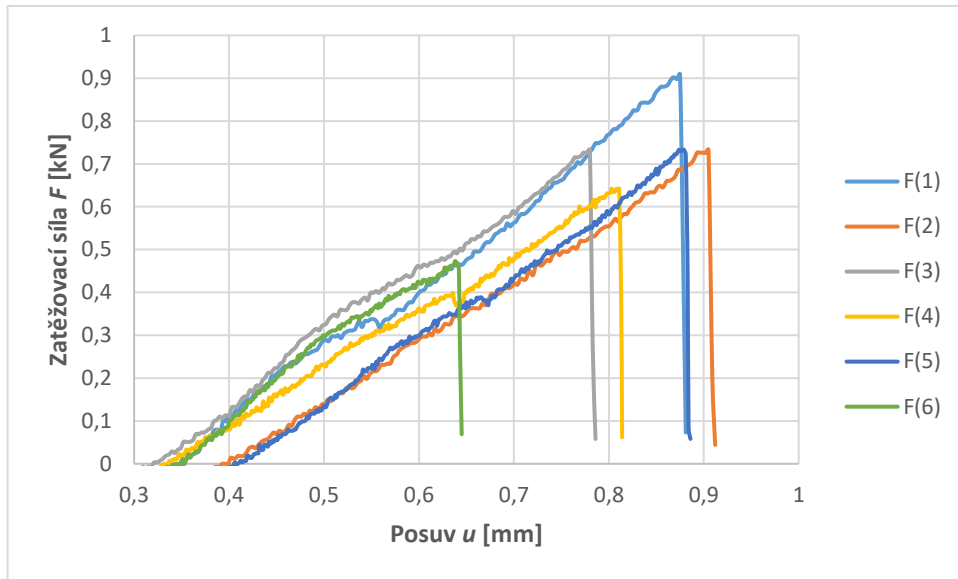
Tabulka A.37: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.69: Porušené nerezové vzorky

A.6.5 Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Vzorky 1, 2 a 3 byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Jelikož k poruše docházelo za kratší čas, než udává norma [18], byly vzorky 4, 5 a 6 zatěžovány rychlostí $1 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.70 a maximální hodnoty v tabulce A.38. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $1,13 \pm 0,21 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.71. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.70: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	909	733	733	642	733	473

Tabulka A.38: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

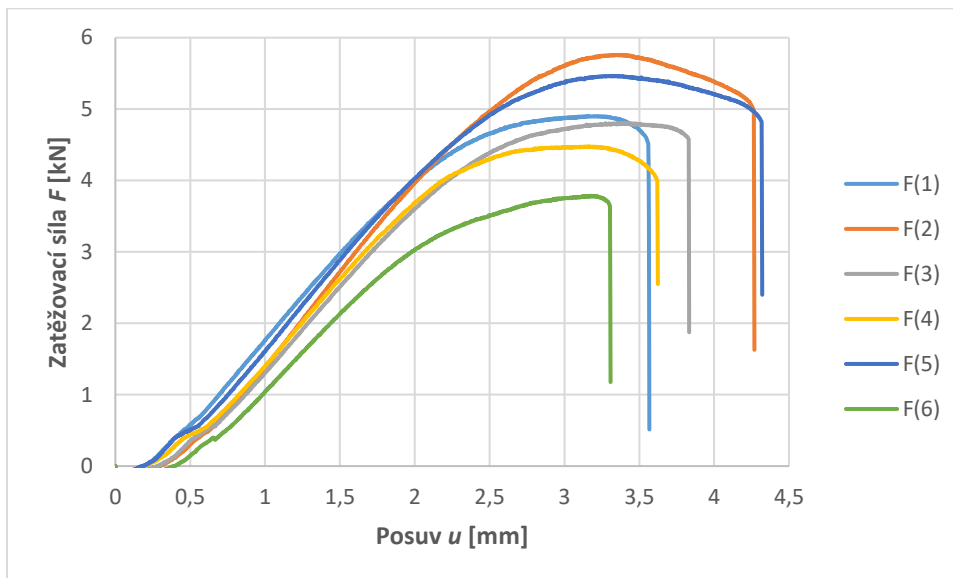


Obrázek A.71: Porušené ertacetalové vzorky

A.6.6 Vzorky z PVC

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $2 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.72 a maximální hodnoty v tabulce A.39. Z nich byla vypočtena

smyková pevnost $7,79 \pm 1,03 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.40 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.73. U všech vzorků došlo k poruše adherendu, byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.72: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	4905	5760	4802	4476	5466	3786

Tabulka A.39: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



Obrázek A.73: Porušené vzorky z PVC

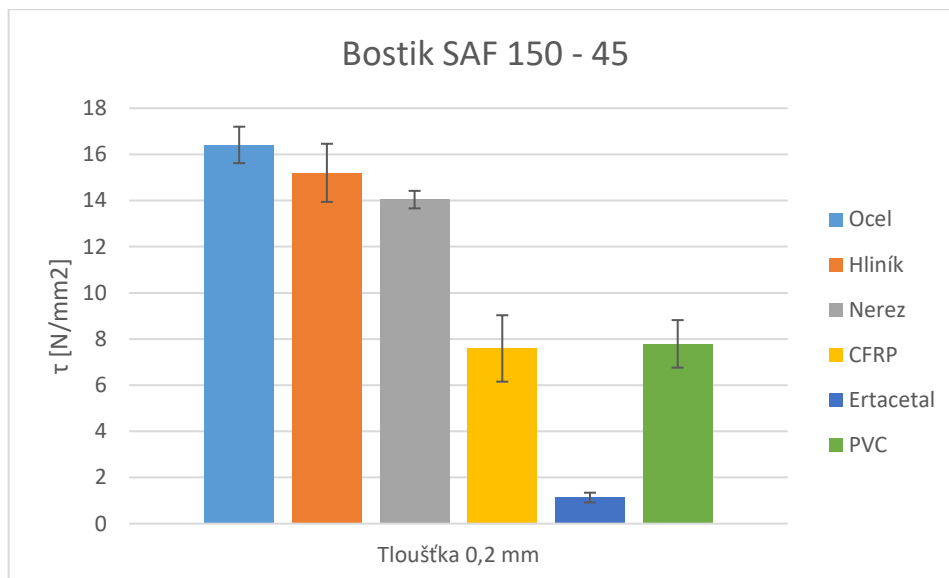
A.6.7 Souhrnné výsledky pro Bostik SAF 150 – 45

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.40. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.74, včetně

směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s ocelí. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Bostik SAF 150 - 45	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	7,59 ± 1,44	16,41 ± 0,79	15,2 ± 1,26	14,04 ± 0,38	1,13 ± 0,21	7,79 ± 1,03

Tabulka A.40: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro Bostik SAF 150 – 45



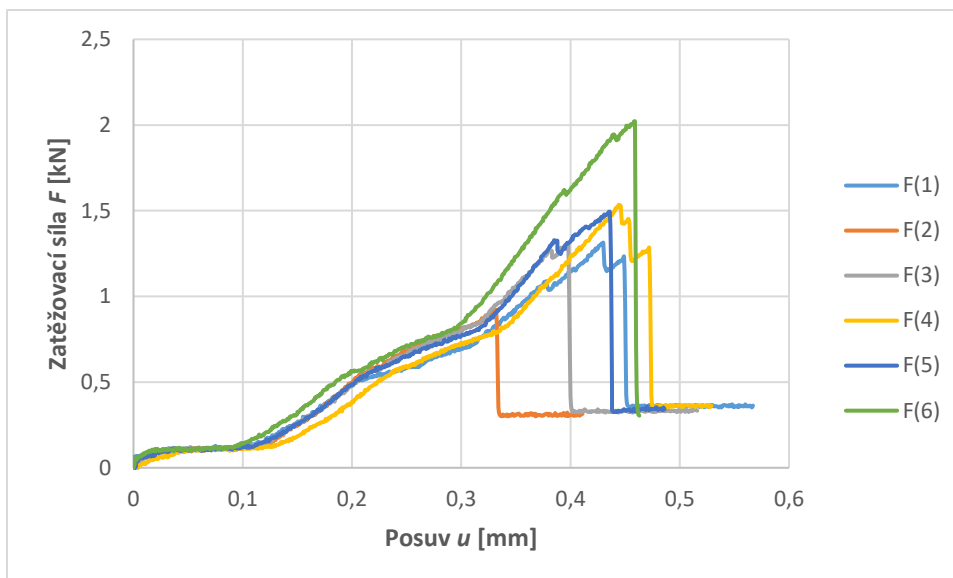
Obrázek A.74: Přehled smykových pevností pro Bostik SAF 150 - 45

A.7 Pryskyřice 285/286

Jedná se o epoxidovou laminační pryskyřici L285 v kombinaci s tužidlem 286. Tato pryskyřice je používána pro výrobu v letectví, stavbu lodí, výrobu sportovního náradí či forem a nástrojů. Výběrem tužidla se ovlivňuje doba vytvrzení v rozmezí zhruba 45 minut až 5 hodin [33].

A.7.1 Vzorky z CFRP

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $0,5 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.75 a maximální hodnoty v tabulce A.41. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,29 \pm 0,53 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.46 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.76. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.75: Průběh zatěžování uhlíkových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1313	924	1302	1533	1493	2021

Tabulka A.41: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

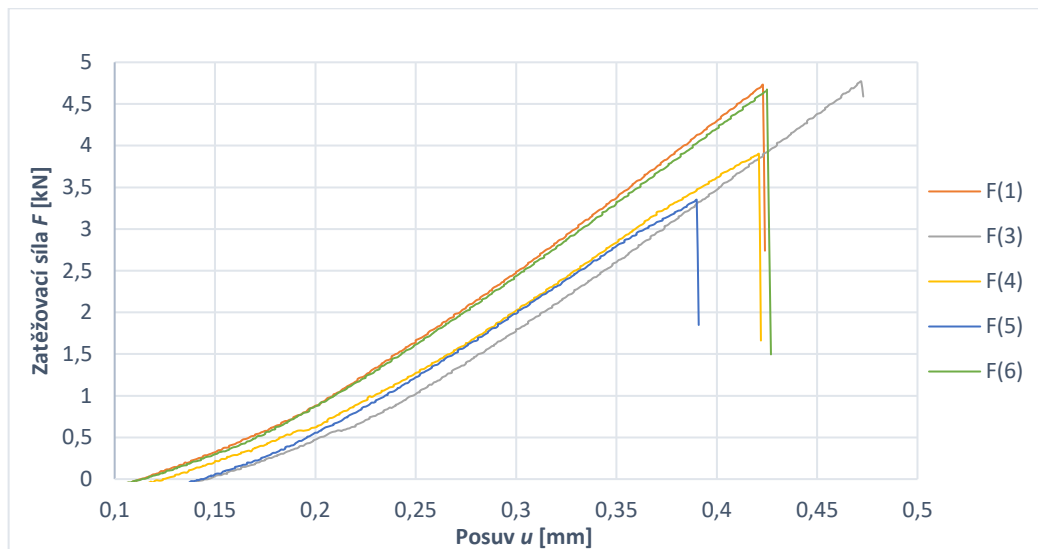


Obrázek A.76: Porušené uhlíkové vzorky

A.7.2 Ocelové vzorky

Tloušťka adherendů byla 3 mm. Vzorek číslo 7 byl zatěžován rychlostí $2 \frac{mm}{min}$, ale k poruše došlo dříve, než předepisuje norma [18]. Proto byly ostatní vzorky zatěžovány rychlostí $0,5 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.77 a maximální hodnoty v tabulce A.42. Z nich byla vypočtena

smyková pevnost $6,85 \pm 0,91 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.46 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.78. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost. Pro vzorek 2 chybí záznam.



Obrázek A.77: Průběh zatěžování ocelových vzorků

Vzorek	1	3	4	5	6
$F_{max} [N]$	4729	4769	3900	3349	4674

Tabulka A.42: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

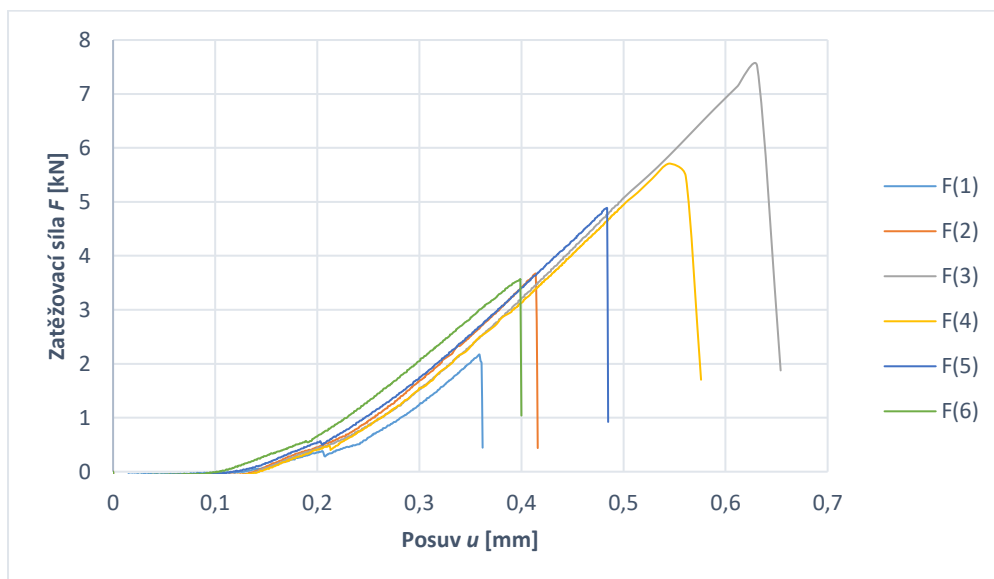


Obrázek A.78: Porušené ocelové vzorky

A.7.3 Nerezové vzorky

Tloušťka adferendů byla 3 mm . Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $0,5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.79 a maximální hodnoty v tabulce A.43. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $7,34 \pm 2,74 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.46 a 5.14.

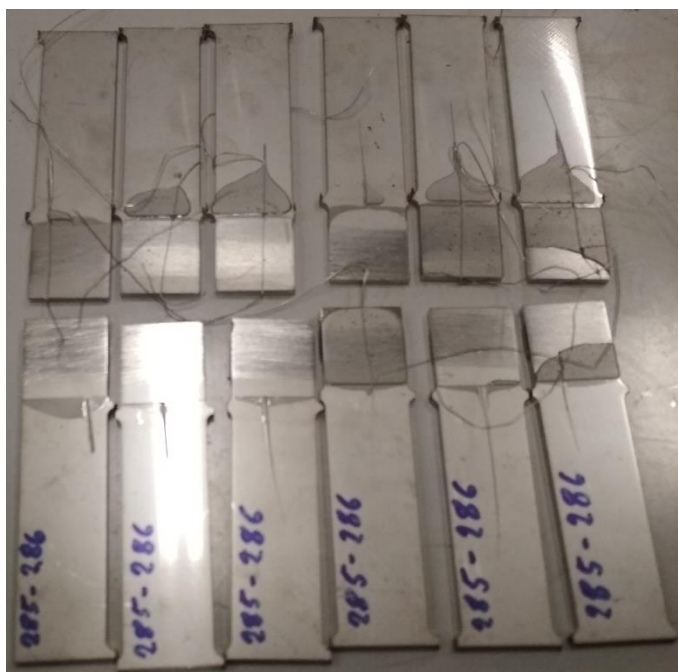
Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.80. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.79: Průběh zatěžování nerezových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	2170	3670	7512	5710	4885	3571

Tabulka A.43: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

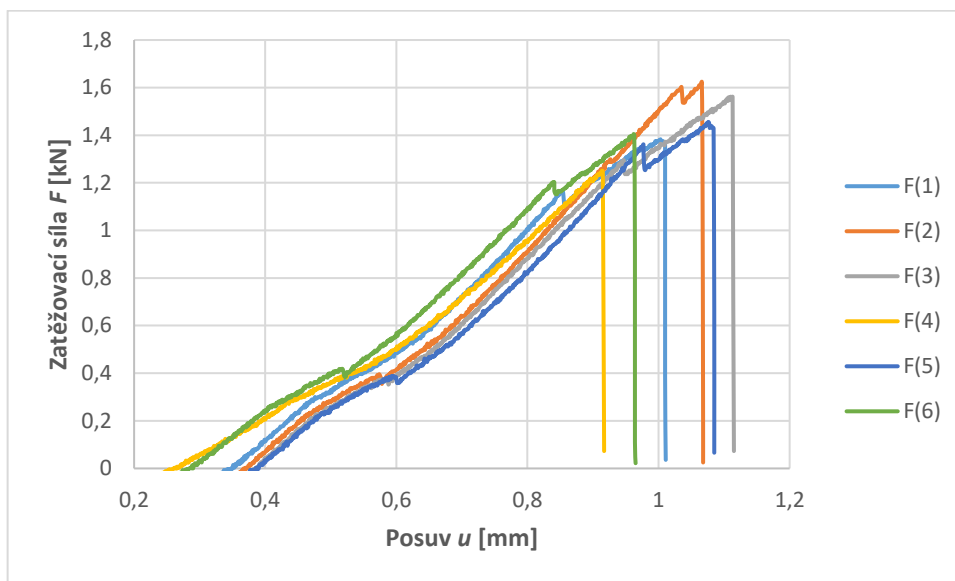


Obrázek A.80: Porušené nerezové vzorky

A.7.4 Ertacetalové vzorky

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $0,5 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.81 a maximální hodnoty v tabulce A.44. Z nich byla vypočtena smyková pevnost $2,32 \pm 0,2 MPa$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.46 a 5.14.

Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.82. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.81: Průběh zatěžování ertacetalových vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1383	1625	1562	1251	1456	1405

Tabulka A.44: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků

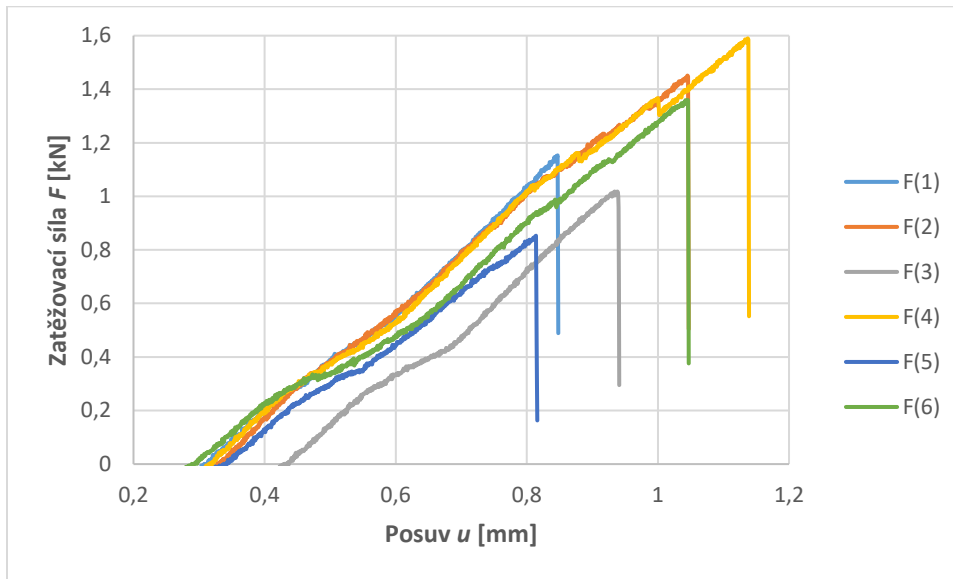


Obrázek A.82: Porušené ertacetalové vzorky

A.7.5 Vzorky z PVC

Tloušťka adherendů byla 9 mm. Všechny vzorky byly zatěžovány rychlostí $0,5 \frac{mm}{min}$. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku A.83 a maximální hodnoty v tabulce A.45. Z nich byla vypočtena

smyková pevnost $1,98 \pm 0,41 \text{ MPa}$, která je dále znázorněna v souhrnných tabulkách A.46 a 5.14. Porušené vzorky lze vidět na obrázku A.84. U všech vzorků došlo k poruše typu adhesive failure (AF), byla tedy vyhodnocena pouze smyková pevnost.



Obrázek A.83: Průběh zatěžování vzorků z PVC

Vzorek	1	2	3	4	5	6
F_{max} [N]	1153	1451	1018	1590	853	1359

Tabulka A.45: Maximální hodnoty zatížení dle jednotlivých vzorků



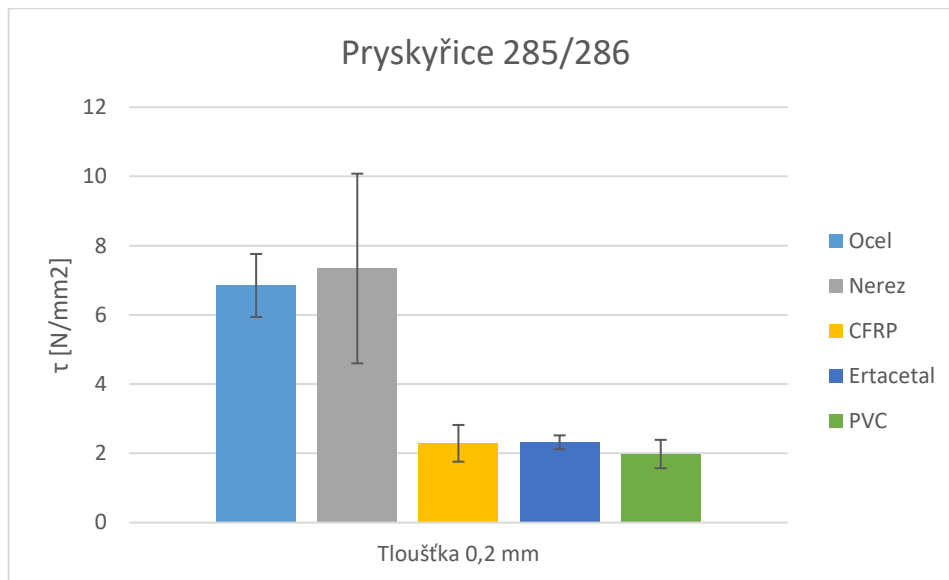
Obrázek A.84: Porušené vzorky z PVC

A.7.6 Souhrnné výsledky pro pryskyřici 285/286

Přehled vypočtených hodnot je pro všechny materiálové kombinace tohoto lepidla znázorněn v tabulce A.46. Hodnoty jsou pro lepší orientaci znázorněny v grafu na obrázku A.85, včetně směrodatných odchylek. Největší pevnosti dosáhlo lepidlo ve vrstvě 0,2 mm v kombinaci s nerezem. U žádného vzorku nedošlo k poruše typu CF a tak nebyl určován smykový modul.

Acralock FA 10 - 10	CFRP	Ocel	Hliník	Nerez	Ertacetal	PVC
Vrstva 0,2 mm	2,29 ± 0,53	6,85 ± 0,91	-	7,34 ± 2,74	2,32 ± 0,2	1,98 ± 0,41

Tabulka A.46: Výsledné hodnoty smykové pevnosti τ [MPa] pro pryskyřici 285/286



Obrázek A.85: Přehled smykových pevností pro pryskyřici 285/286

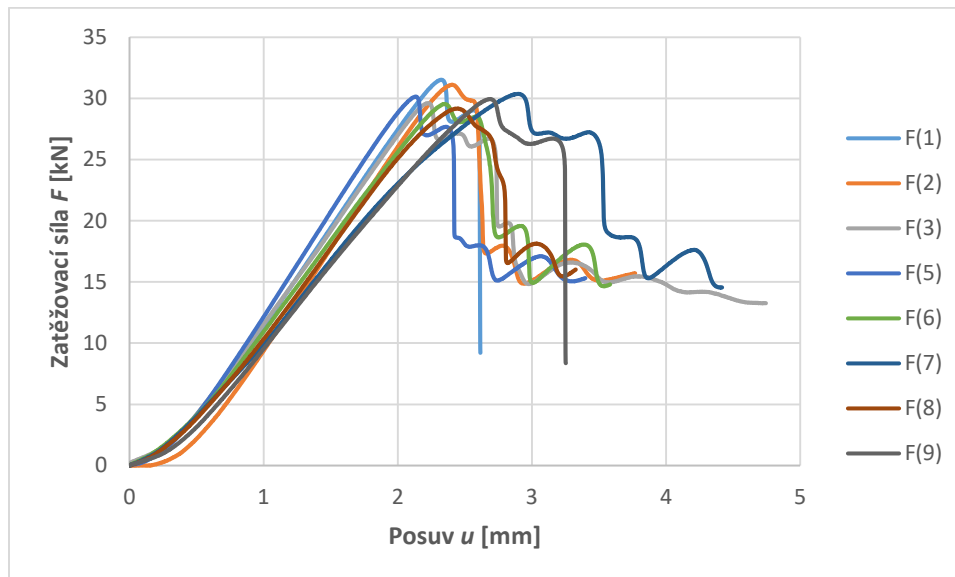
Příloha B – Vyhodnocení tahové zkoušky trubkových lepených spojů

B.1 Loctite EA 9466

Toto lepidlo bylo zkoušeno ve dvou variantách, s drážkou a bez ní. Výsledky zkoušky jsou tedy rozděleny do následujících dvou částí.

B.1.1 Varianta s drážkou

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku B.1, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce B.1. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázku B.2 jsou pak zobrazeny porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $34,28 \pm 0,85 \text{ MPa}$. Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm^2 . Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení. Z vyhodnocení byly vyjmuty vzorky číslo 4 a 10, které byly porušeny při velmi nízkých zatíženích.



Obrázek B.1: Průběh zatěžování vzorků s drážkou

Vzorek	1	2	3	5	6	7	8	9
$F_{max} [N]$	31515	31104	29611	30139	29530	30363	29163	29941

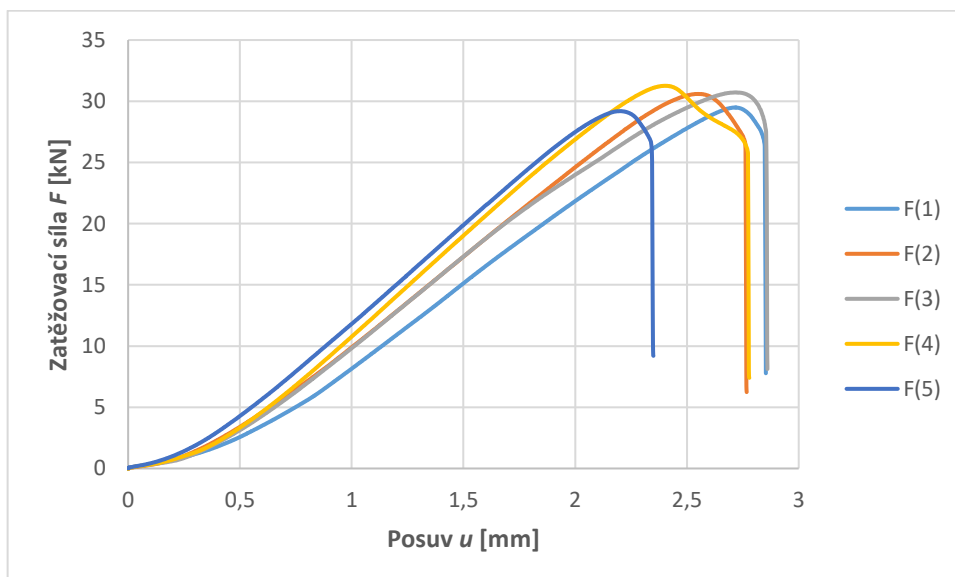
Tabulka B.1: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení drážkovaných vzorků



Obrázek B.2: Porušené vzorky s drážkou

B.1.2 Varianta bez drážky

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku B.3, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce B.2. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázku B.4 jsou pak zobrazeny porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $34,38 \pm 0,89 \text{ MPa}$. Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm^2 . Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení.



Obrázek B.3: Průběh zatěžování hladkých vzorků

Vzorek	1	2	3	4	5
F_{max} [N]	29490	30602	30723	31262	29193

Tabulka B.2: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení hladkých vzorků



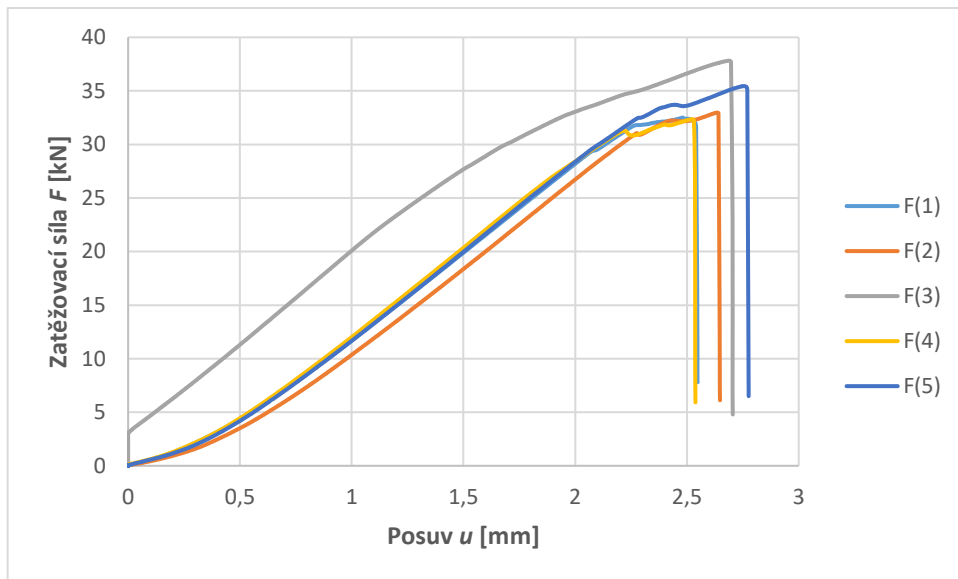
Obrázek B.4: Porušené hladké vzorky

B.2 Loctite EA 9514

Toto lepidlo bylo zkoušeno pouze ve variantě s drážkou, vyhodnocení je uvedeno níže.

B.2.1 Varianta s drážkou

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku B.5, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce B.3. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázku B.6 jsou pak zobrazeny porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $38,89 \pm 2,41 \text{ MPa}$. Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm^2 . Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení.



Obrázek B.5: Průběh zatěžování vzorků s drážkou

Vzorek	1	2	3	4	5
F_{max} [N]	32506	32975	37822	32359	35448

Tabulka B.3: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení vzorků s drážkou



Obrázek B.6: Porušené vzorky s drážkou

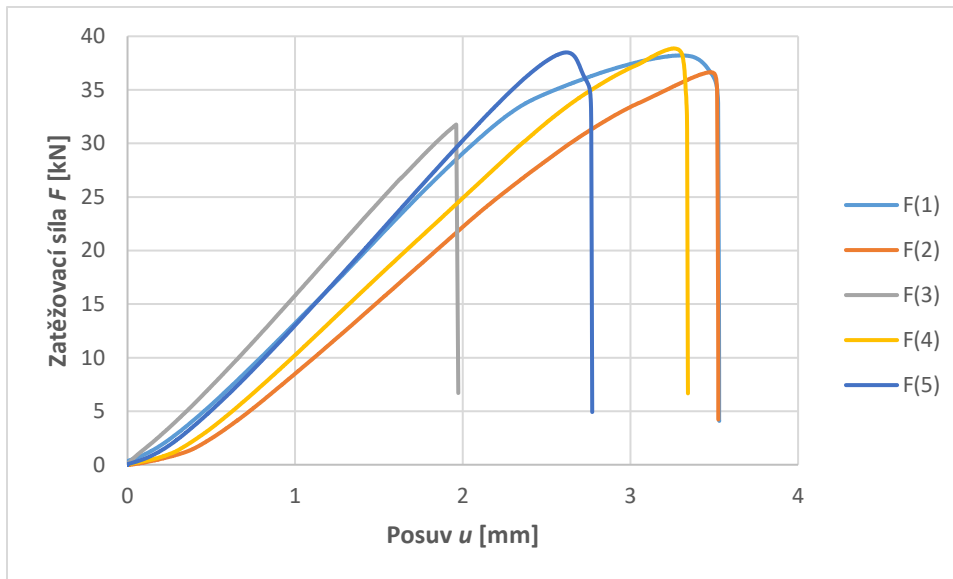
B.3 Spabond SP 345 – slow

Toto lepidlo bylo zkoušeno pouze ve variantě s drážkou, vyhodnocení je uvedeno níže.

B.3.1 Varianta s drážkou

Průběh zatěžování vzorků je zobrazen na obrázku B.7, maximální hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce B.4. U této zkoušky nebyl typ poruchy vyhodnocován, protože ho vlivem složitější geometrie vzorku nelze jednoznačně posoudit. Jelikož provádíme pouze vyhodnocení smykové pevnosti, nemá na to typ poruchy vliv. Na obrázcích B.8 a B.9 jsou pak zobrazeny

porušené vzorky. Z průměru naměřených hodnot maximální síly a její směrodatné odchylky byla vyhodnocena smyková pevnost lepidla $41,82 \pm 2,99 \text{ MPa}$. Pro výpočet byl použit rozměr lepené plochy 880 mm^2 . Smyková pevnost tohoto lepidla je dále znázorněna v souhrnné tabulce 6.4 celkového vyhodnocení.



Obrázek B.7: Průběh zatěžování vzorků s drážkou

Vzorek	1	2	3	4	5
$F_{max} [N]$	38215	36648	31765	38864	38497

Tabulka B.4: Jednotlivé hodnoty maximálního zatížení vzorků s drážkou



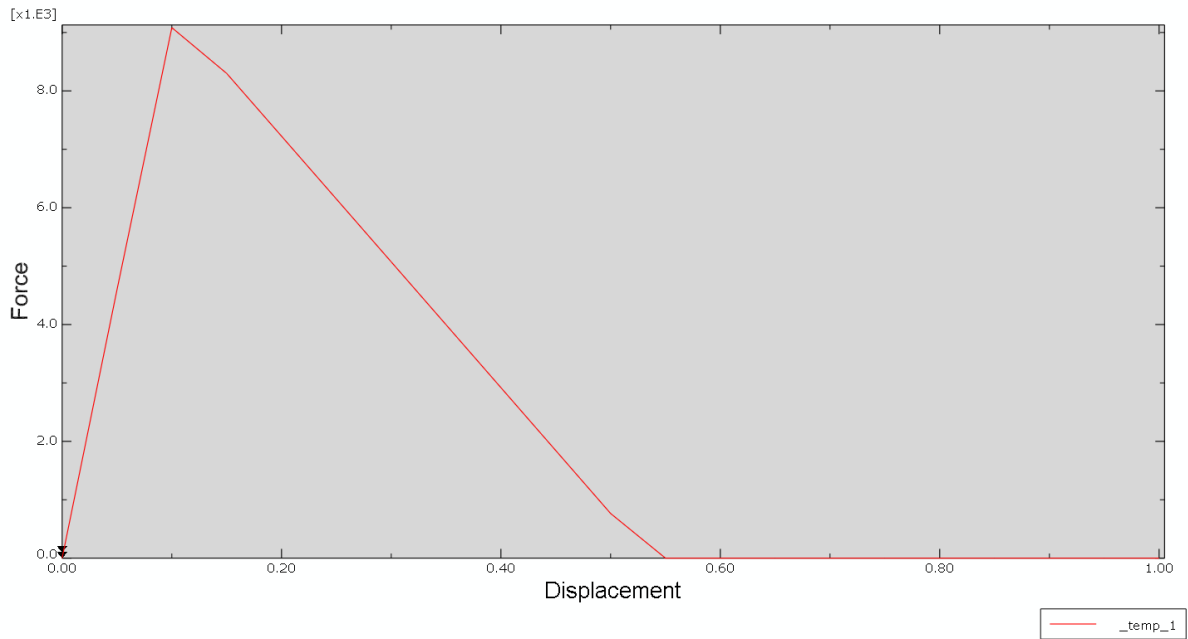
Obrázek B.8: Porušené vzorky s drážkou



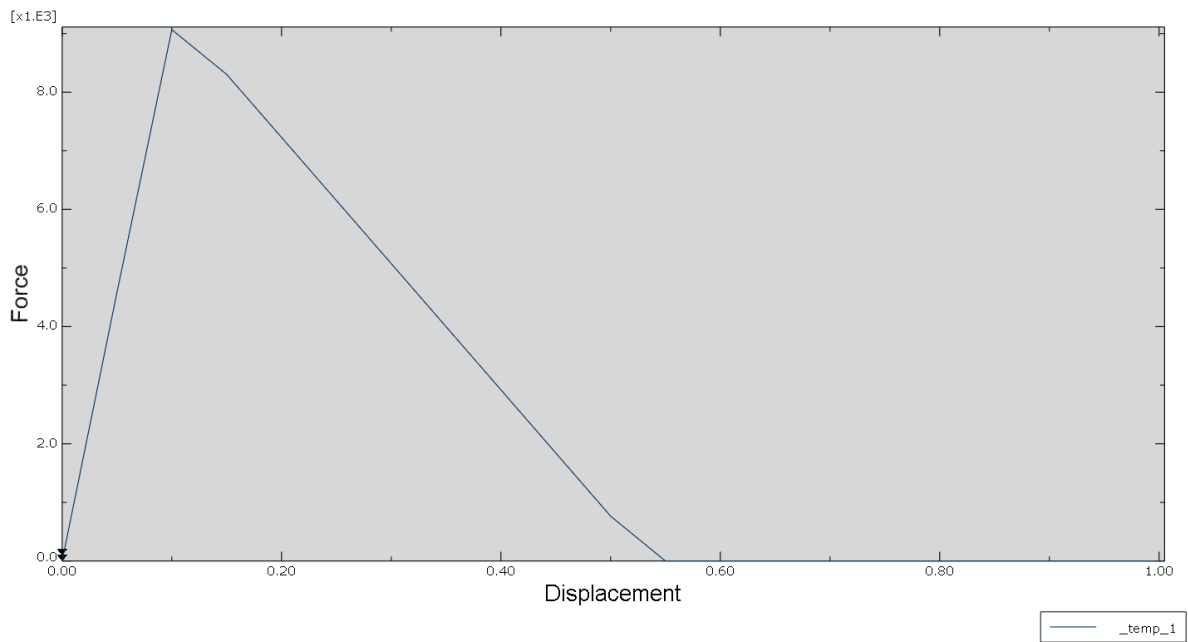
Obrázek B.9: Detailní pohled na porušený vzorek

Příloha C – Závislost síla/posuv ze simulace plochých vzorků

C.1 Spabond SP 345 – slow

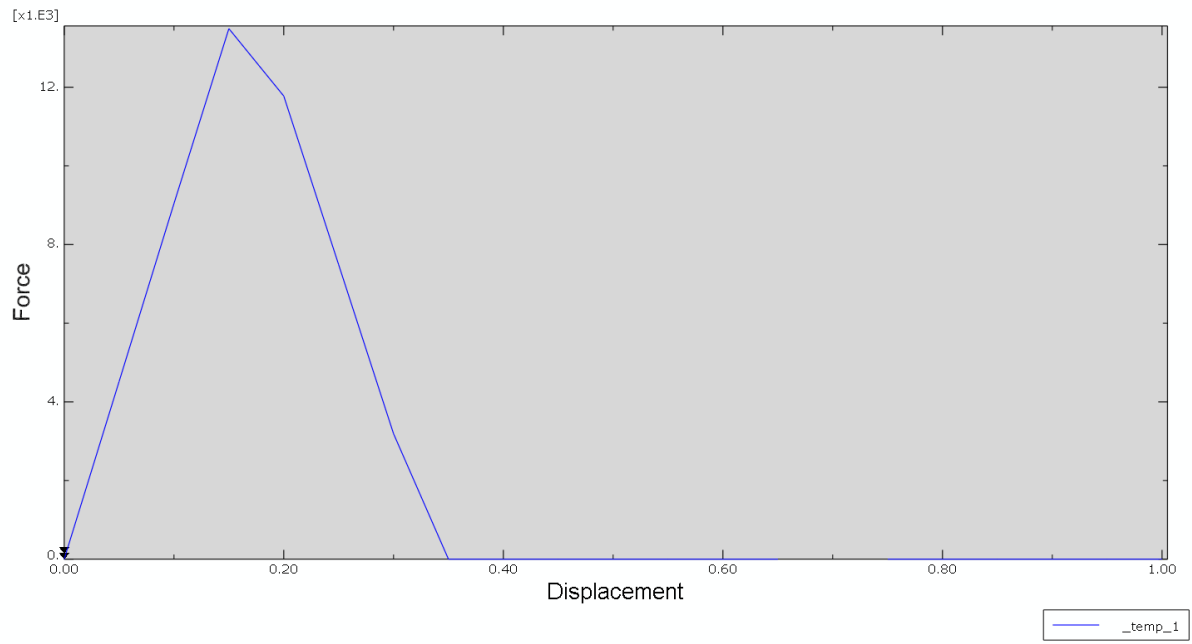


Obrázek C.1: Zobrazení závislosti pro $v = 0,3$

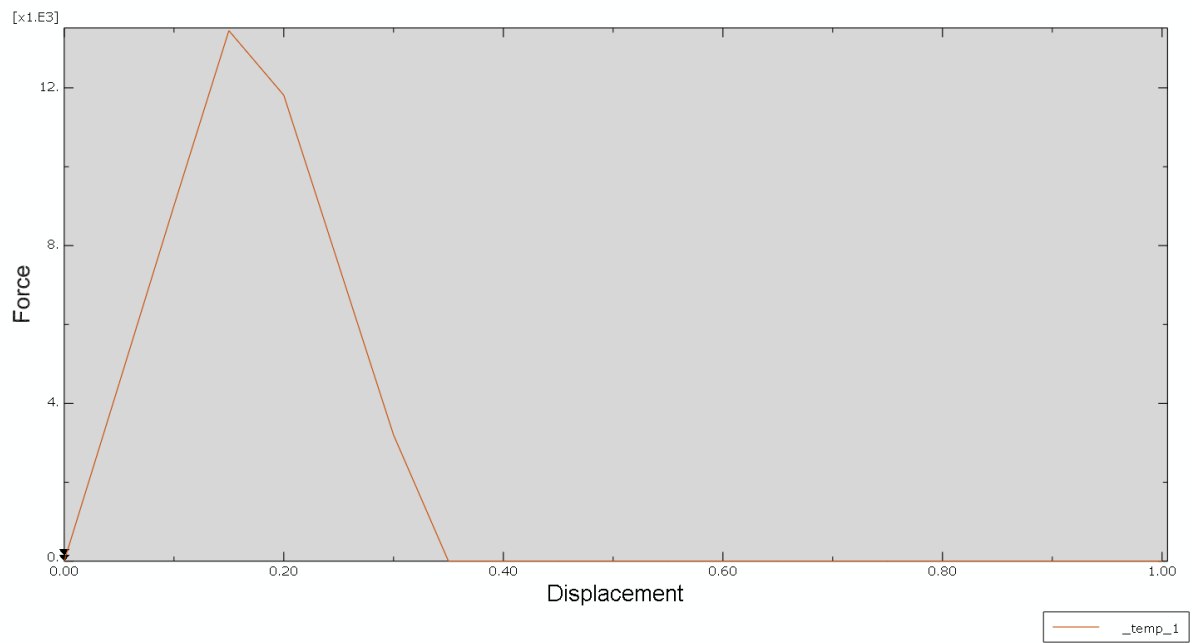


Obrázek C.2: Zobrazení závislosti pro $v = 0,4$

C.2 Loctite EA 9466

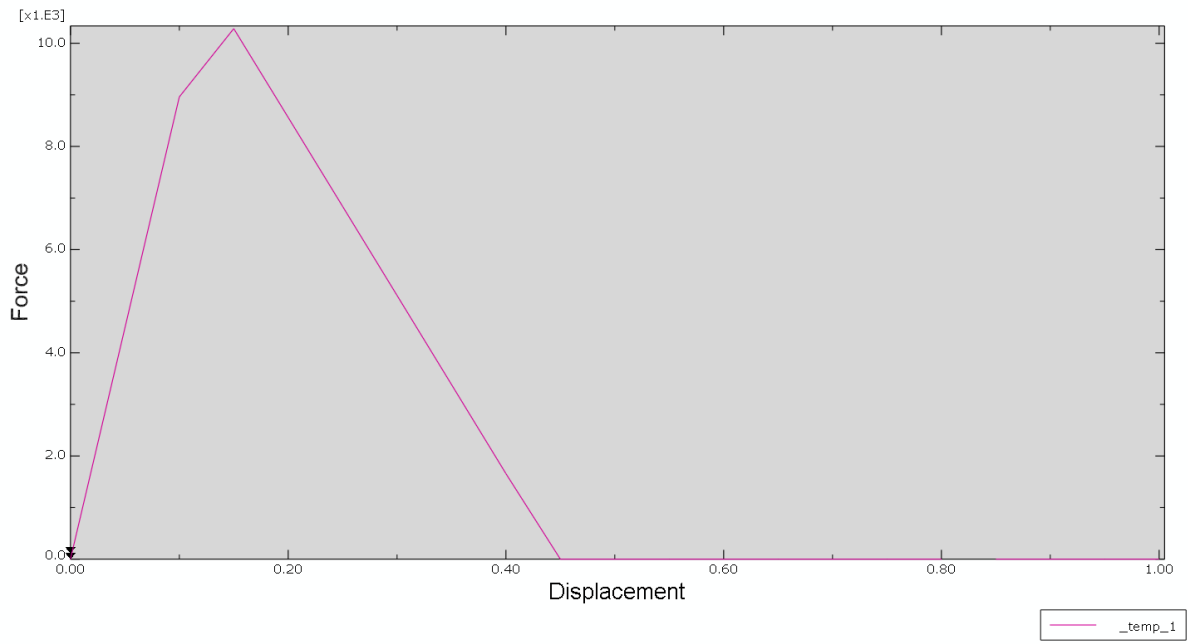


Obrázek C.3: Zobrazení pro $v = 0,3$

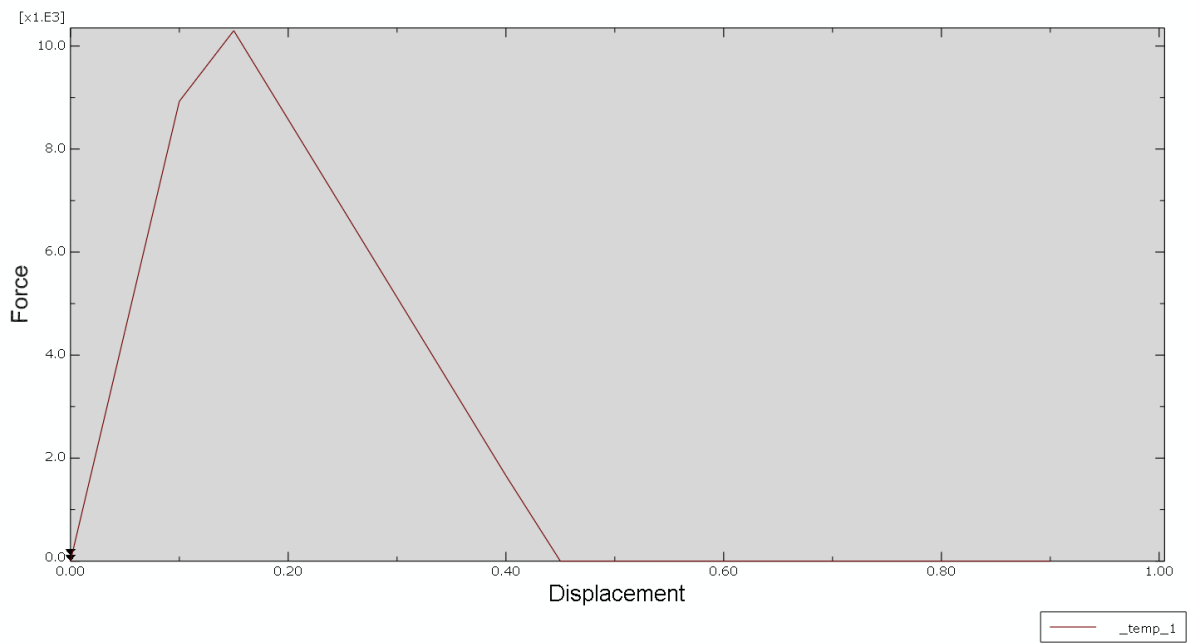


Obrázek C.4: Zobrazení pro $v = 0,4$

C.3 Loctite EA 9514

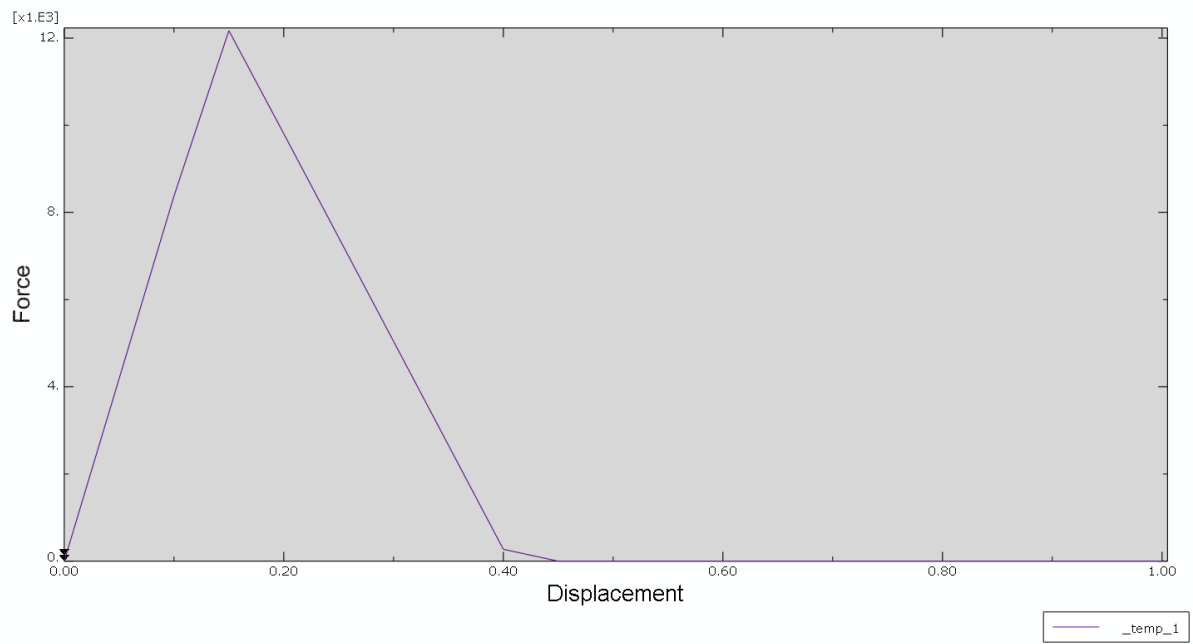


Obrázek C.5: Zobrazení pro $v = 0,3$

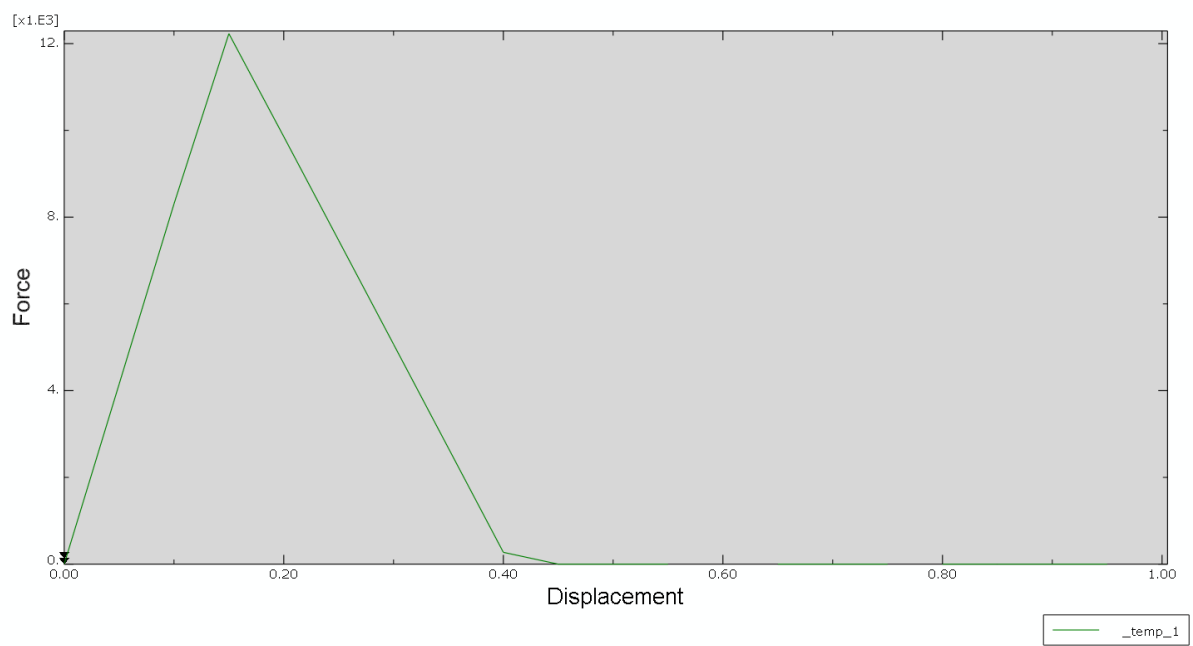


Obrázek C.6: Zobrazení pro $v = 0,4$

C.4 Acralock SA 10 – 15



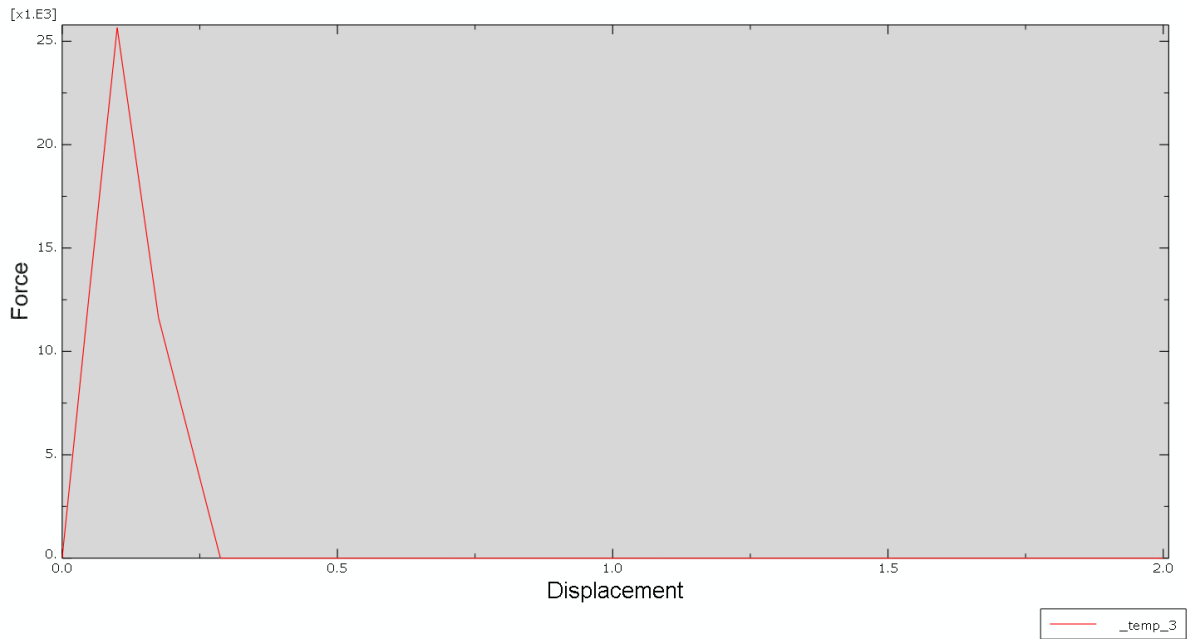
Obrázek C.7: Zobrazení pro $v = 0,3$



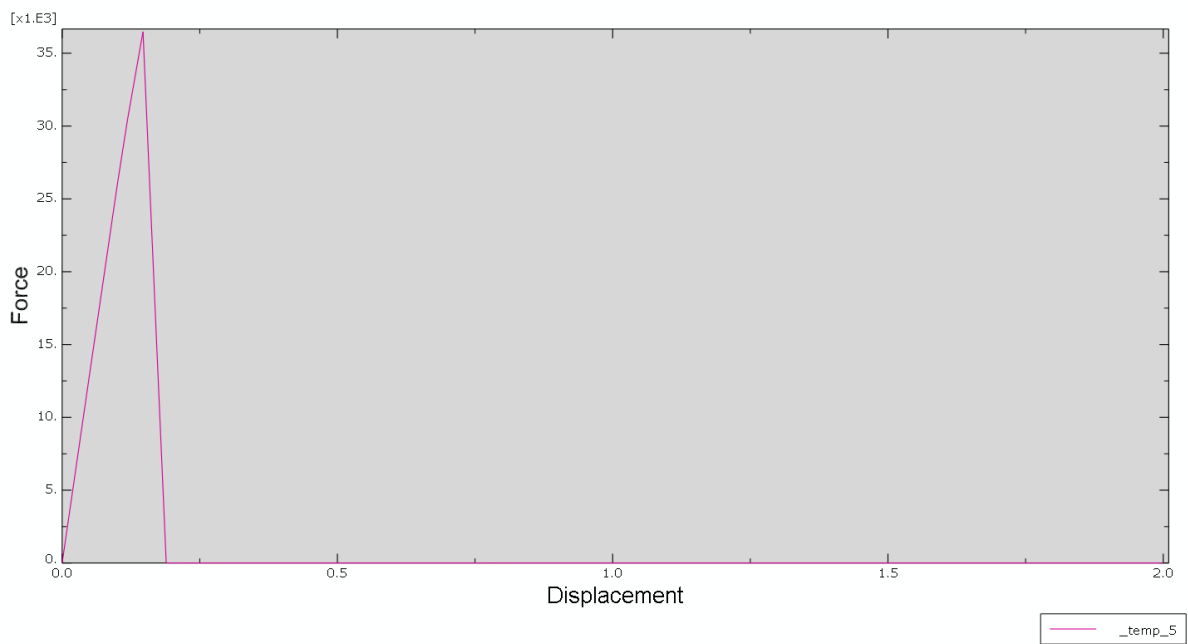
Obrázek C.8: Zobrazení pro $v = 0,4$

Příloha D – Závislost síla/posuv ze simulace trubkových vzorků

D.1 Spabond SP 345 – slow

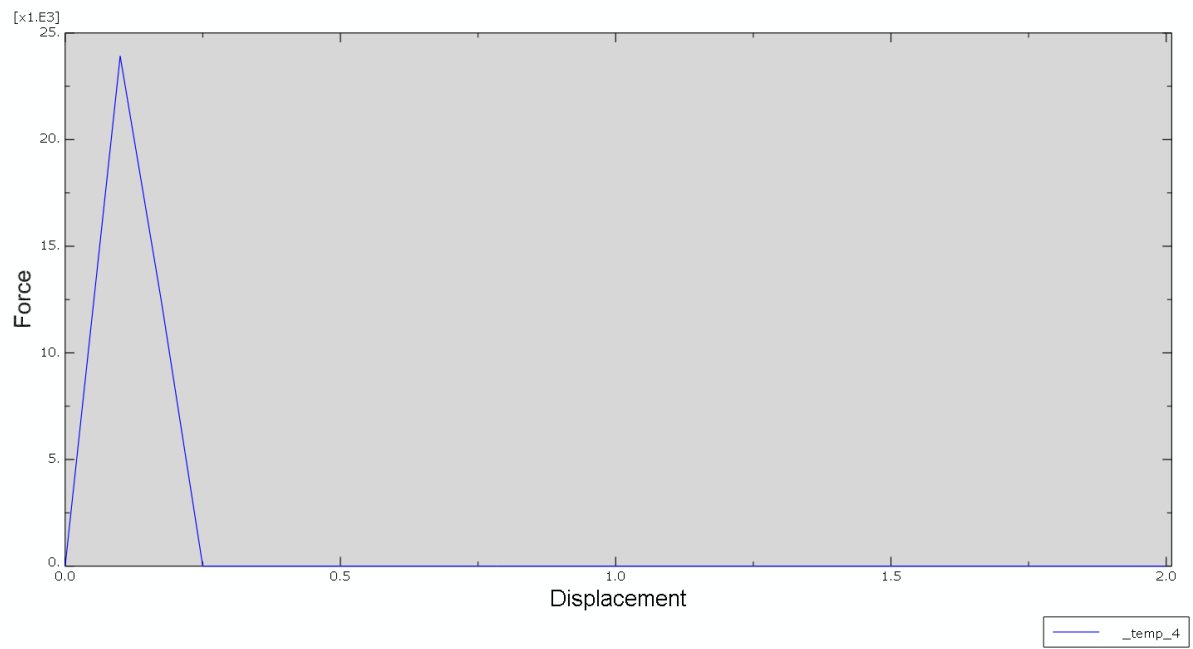


Obrázek D.1: Zobrazení závislosti původního modelu

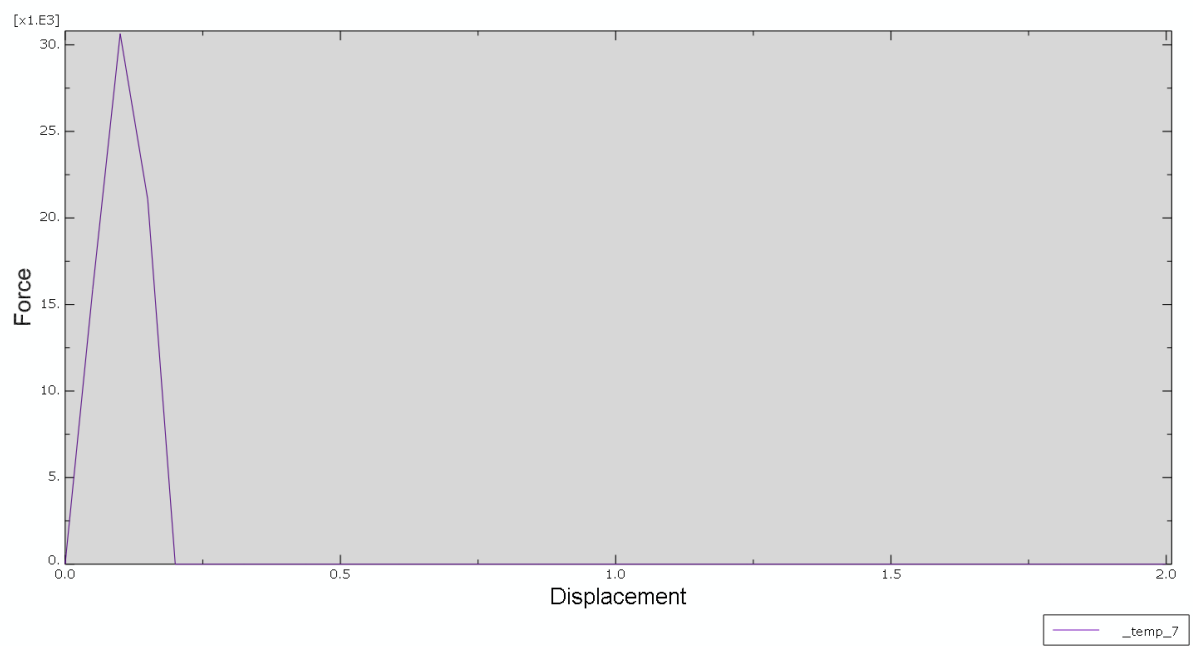


Obrázek D.2: Zobrazení závislosti upraveného modelu

D.2 Loctite EA 9466

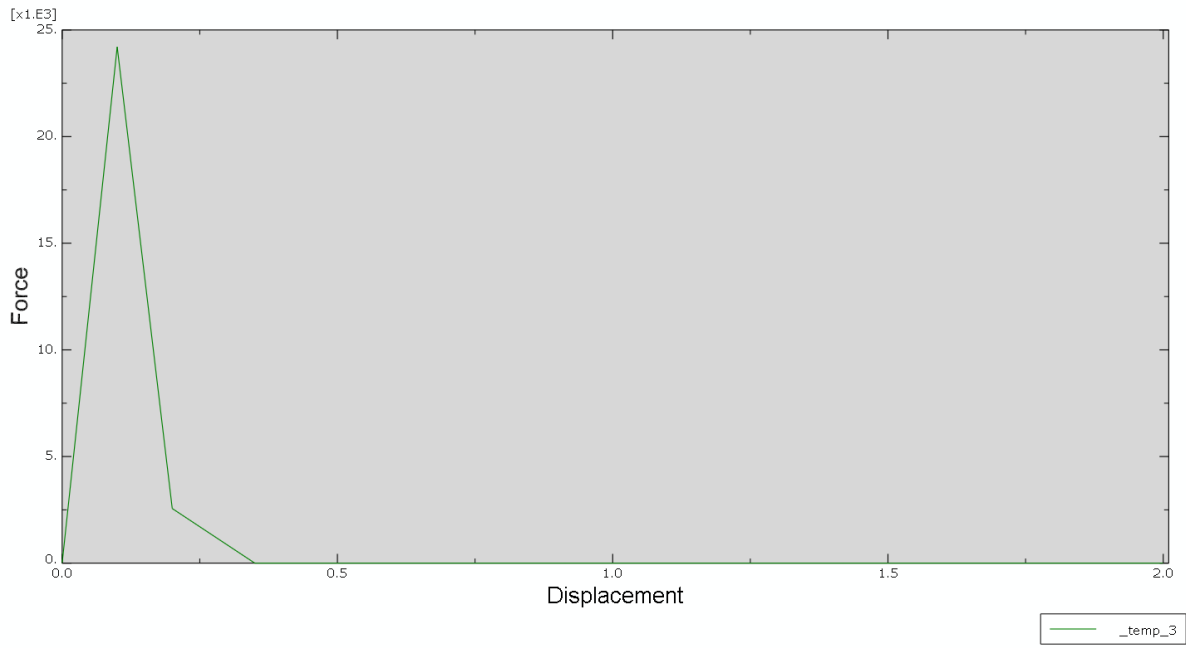


Obrázek D.3: Zobrazení závislosti původního modelu

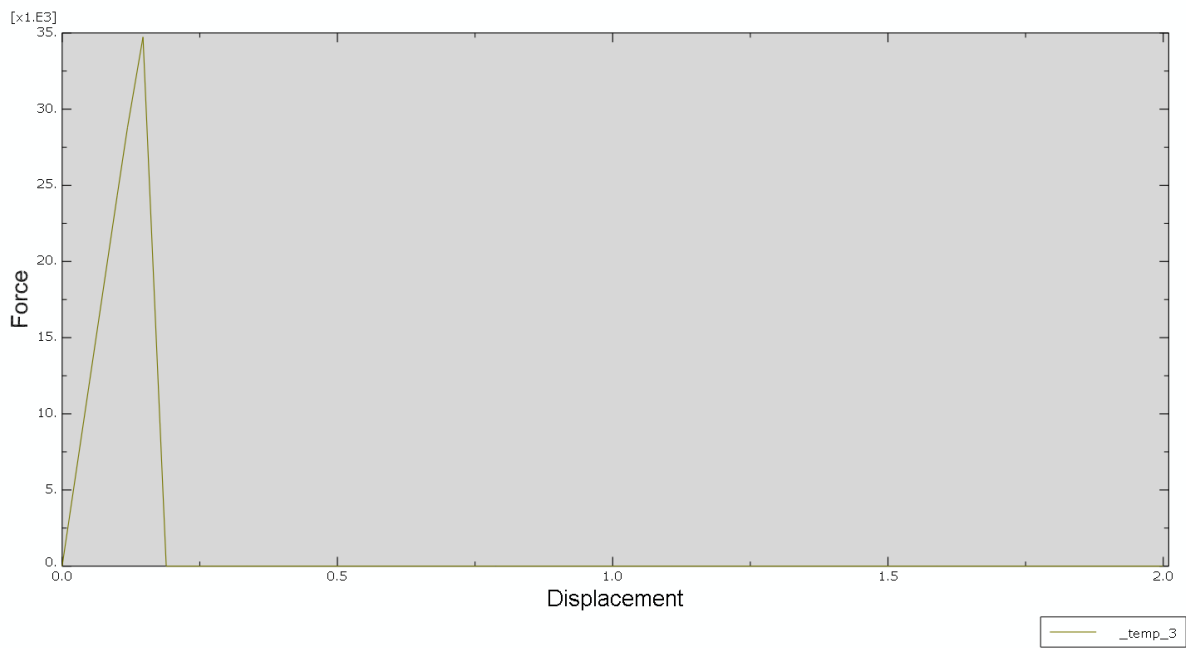


Obrázek D.4: Zobrazení závislosti upraveného modelu

D.3 Loctite EA 9514

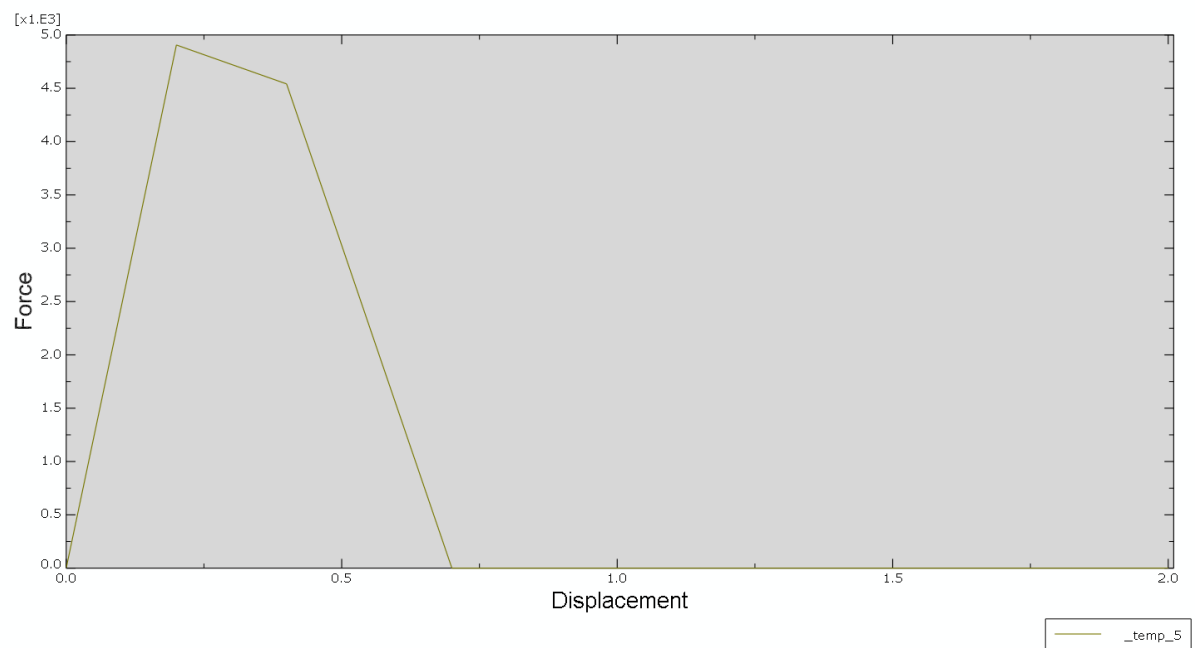


Obrázek D.5: Zobrazení závislosti původního modelu

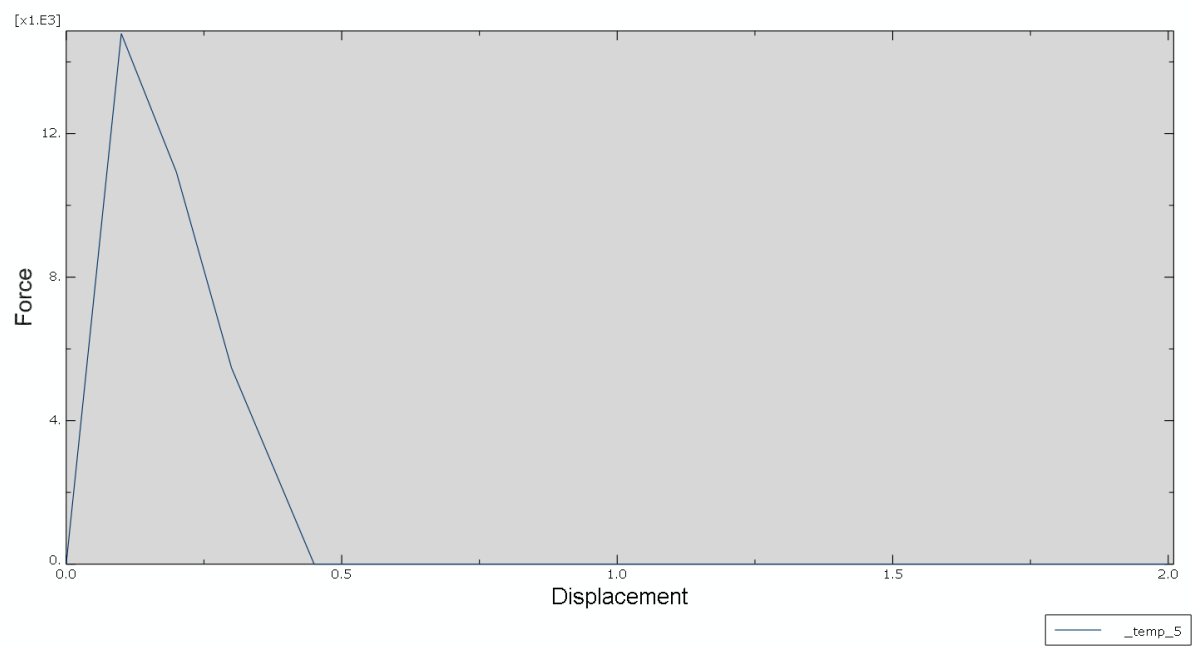


Obrázek D.6: Zobrazení závislosti upraveného modelu

D.4 Acralock SA 10 – 35

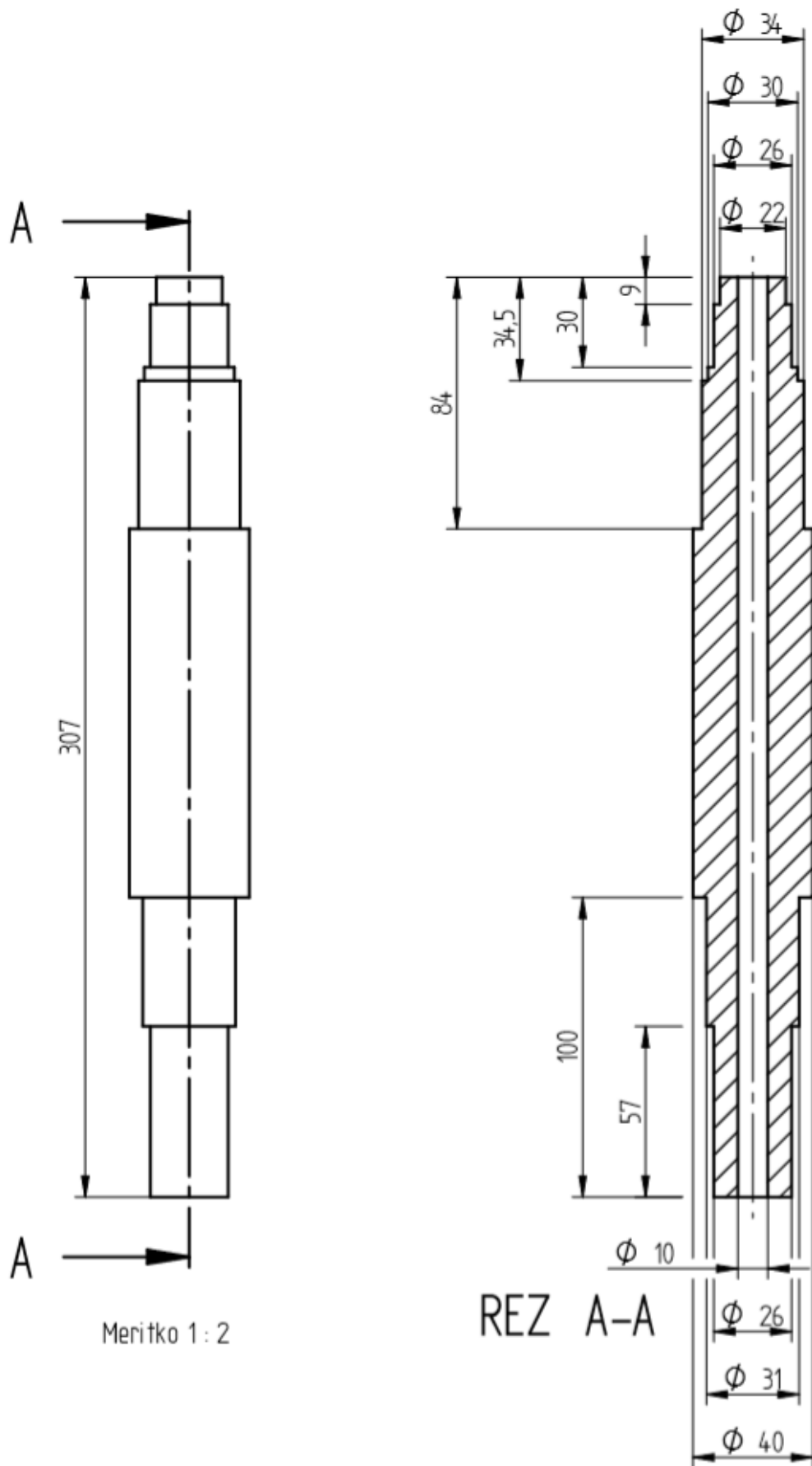


Obrázek D.7: Zobrazení závislosti původního modelu

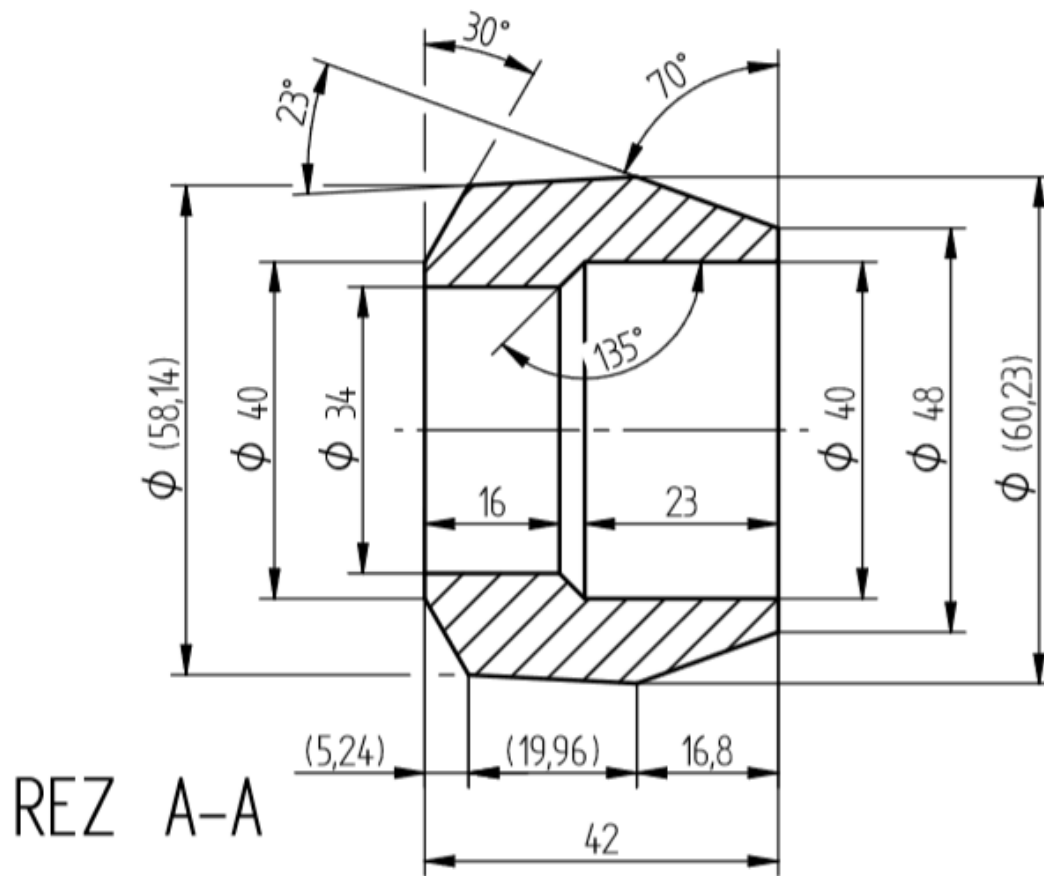


Obrázek D.8: Zobrazení závislosti upraveného modelu

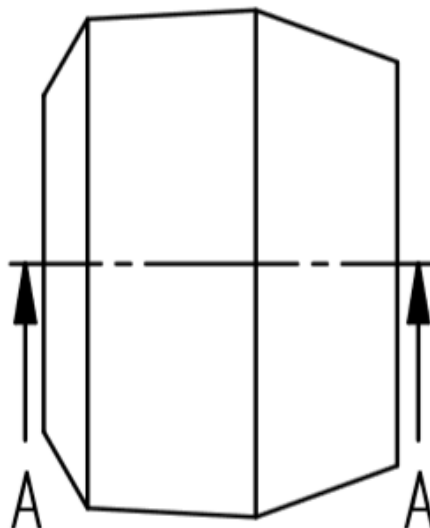
E.2 Upravená kompozitní trubka



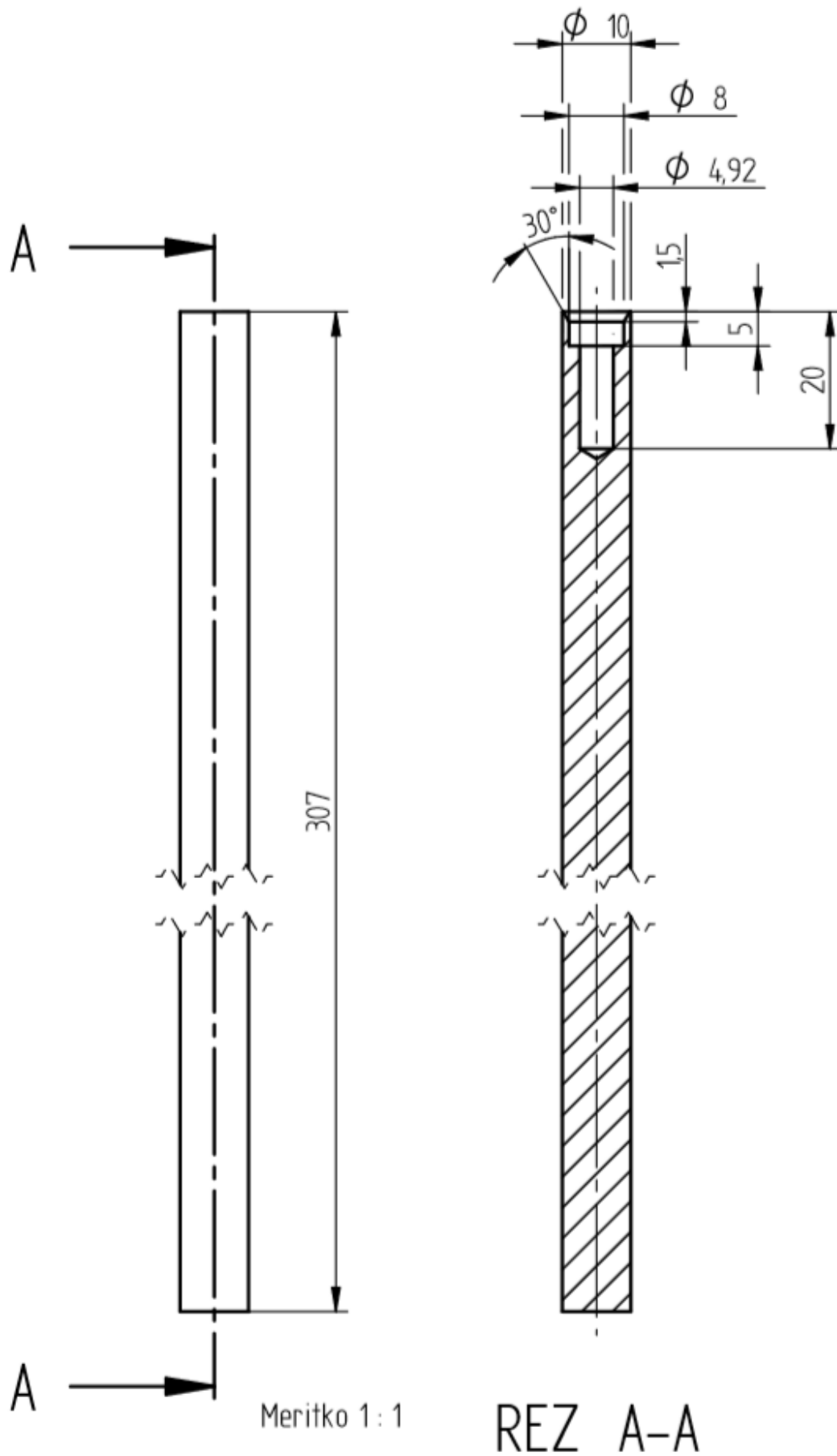
E.3 Ocelový věnec



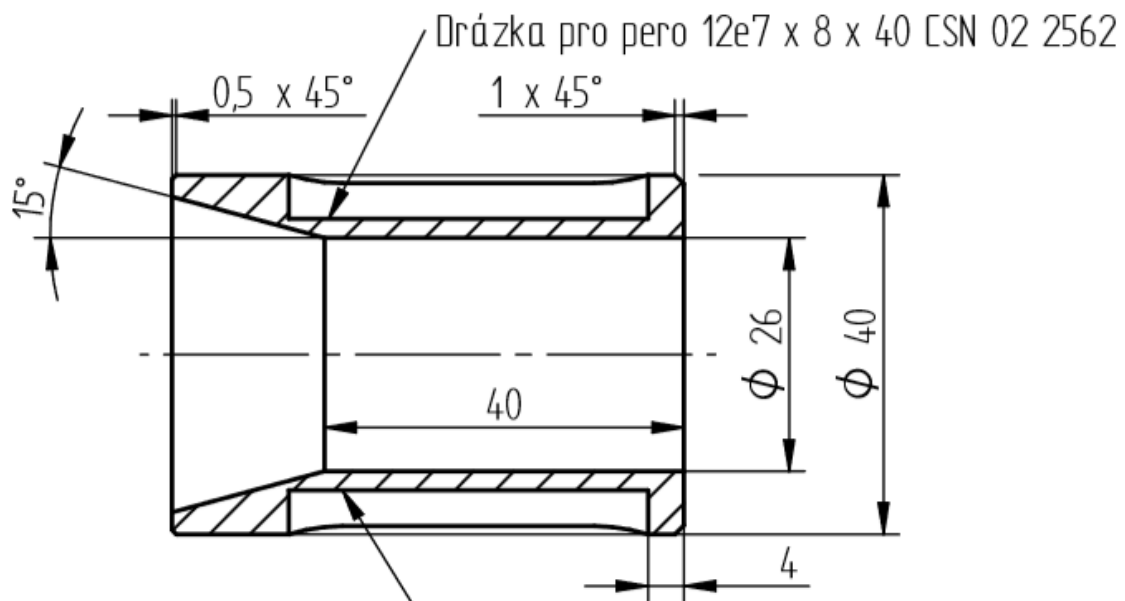
Meritko 1 : 1



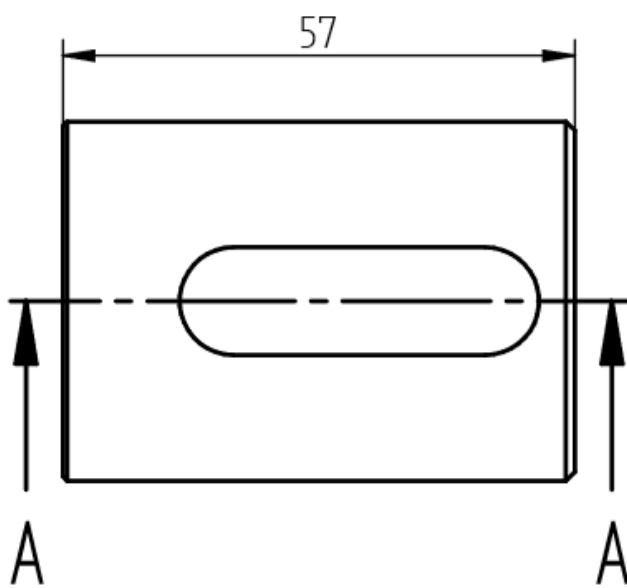
E.4 Ocelový trn



E.5 Ocelová koncovka

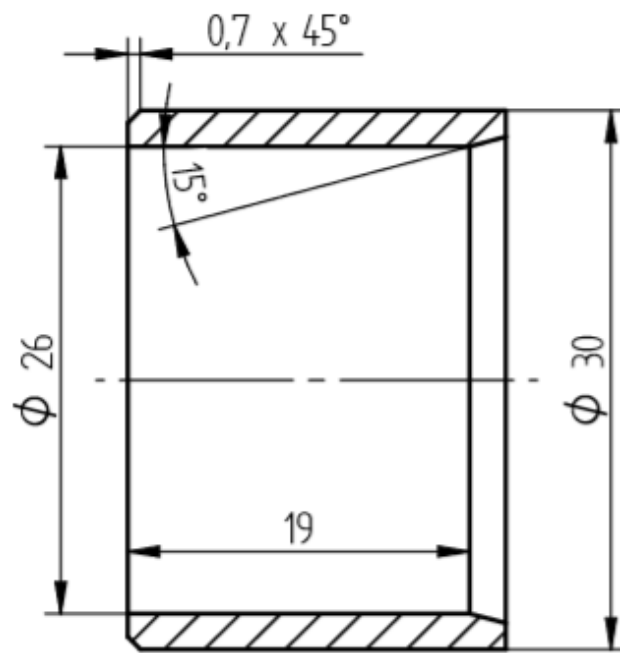


REZ A-A Drážka pro pero 12e7 x 8 x 40 ČSN 02 2562

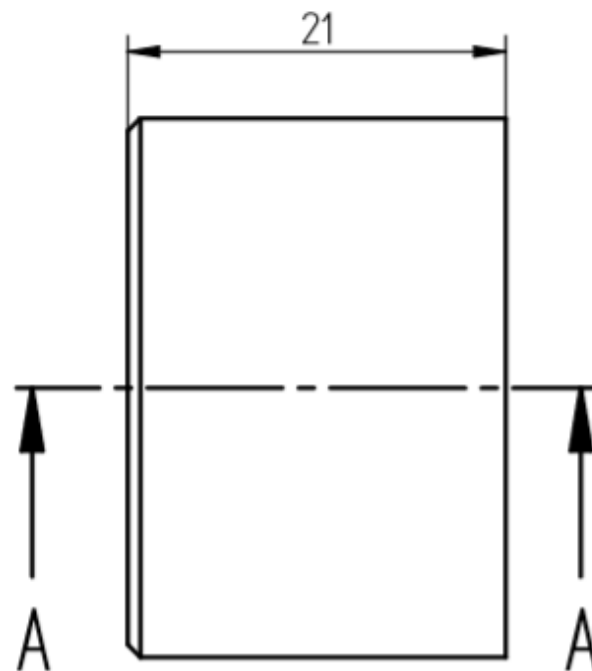


Meritko 1 : 1

E.6 Ocelový kroužek pod ložisko



REZ A-A



Meritko 2 : 1