ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T019 Stavba výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukce lepených spojů kompozitních materiálů

Autor: **Bc. Tomáš KALINA**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tomáš KALINA**
Osobní číslo:	**S15N0071P**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Stavba výrobních strojů a zařízení**
Název tématu:	**Konstrukce lepených spojů kompozitních materiálů**
Zadávající katedra:	**Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování:

Základní požadavky:
Vytvořte rešerši základních postupů při lepení kompozitních materiálů a navrhněte metodiku procesu lepení kompozitních materiálů s kompozitními materiály či kovy. Proveďte experimentální testování navržených variant lepených spojů a jejich zhodnocení na vybraných komponentách daného technického zařízení.

Základní technické údaje:
Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše
2. Specifikace požadavků na vlasnosti spojení
3. Návrh koncepčních variant řešení lepeného spoje
4. Hodnocení variant a výběr optimální varianty konkrétního dílu
5. Technicko-ekonomické zhodnocení vybrané varianty

Rozsah grafických prací:	**dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce:	**50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

BARBERO, E. J. *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition.* **CRC Press, 2010, ISBN-13: 978-1420079159**

CAMPBELL, F. C. *Structural Composite Materials..* **ASM International, 2010, ISBN: 1615031405**

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.** Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce:	**Ing. Jan Pištora** Mubea spol. s r. o.

Datum zadání diplomové práce:	**19. září 2016**
Termín odevzdání diplomové práce:	**2. června 2017**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: ……. **. . . . . .**

podpis autora

Poděkování
Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí práce, doc. Ing. Václavě Lašové, Ph.D. (ZČU/FST/KKS), konzultantovi ze zadávající firmy Ing. Janu Pištorovi (Mubea Transmission Components s.r.o.) a konzultantům z univerzity Ing. Františku Sedláčkovi, Ing. Michalu Skovajsovi (ZČU/FST/KKS) a Ing. Tomáši Kroupovu Ph.D. (ZČU/FAV/KME) za jejich vstřícnost a odborné konzultace.

Dále bych rád poděkoval zaměstnancům společností:
MUBEA Transmission Components s.r.o., Žebrák;
VIZA Auto s.r.o., Plzeň;
Kovodružstvo Plzeň;
RUML Industry s.r.o. Plzeň,
NTIS – Nové technologie pro informační společnost při ZČU
RTI – Regionální technologický institut při ZČU
a v neposlední řadě studentovi ZČU/FST/KMM, Martinu Mrázkovi,
za jejich služby v oblasti výroby a testování.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Kalina	**Jméno** Tomáš
STUDIJNÍ OBOR	2302T019 „Stavba výrobních strojů a zařízení“	
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Doc. Ing. Lašová, Ph.D.	**Jméno** Václava
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS	
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	
NÁZEV PRÁCE	Konstrukce lepených spojů kompozitních materiálů	

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KKS		**ROK ODEVZD.**	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	112		**TEXTOVÁ ČÁST**	80		**GRAFICKÁ ČÁST**	32

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Práce se zabývá návrhem metodiky predikce pevnosti lepených spojů kompozitních materiálů s kovy. Metodika byla následně aplikována na reálný díl - kompozitní přítlačné křídlo vozu Audi R8, do kterého je vlepován insert ze slitiny hliníku. V rámci aplikace metodiky bylo provedeno experimentální testování na standardizovaných vzorcích dle norem ASTM, pro zjištění mechanických parametrů lepidla v adhezi i kohezi. Po analýze současného stavu byla na základě výsledků z numerických simulací (kohezivního modelu) a technicko-ekonomického hodnocení navržených povrchových úprav provedena optimalizace lepeného spoje, která vedla k úspoře nákladů na lepený spoj.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	lepený spoj, adheze, koheze, predikce pevnosti, kohezivní model, MKP, metodika, DCB, ENF, Módy porušení I a II, DP490, EN-AW-7075, sklolaminát, uhlíkový kompozit

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Kalina	**Name** Tomáš
FIELD OF STUDY	2302T019 " Design of Manufacturing Machines and Equipment"	
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Doc. Ing. Lašová, Ph.D.	**Name** Václava
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	
TITLE OF THE WORK	Designing of bonded joints composite materials	

FACULTY	Mechanical Engineering	**DEPARTMENT**	Machine Design	**SUBMITTED IN**	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	112	**TEXT PART**	80	**GRAPHICAL PART**	32

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	This thesis deals with a proposal of methodology prediction of the strength of bonded composite materials with metals. The methodology was applied on a real part - the composite spoiler of Audi R8 car from which the insert of alluminium alloy was pulled out. In the application of methodology, experimental testing was performed on standardized samples according to ASTM standards, for detection of mechanical properties of adhesive in adhesion and cohesion. After the analysis of the current state the optimalization of adhesive joint was done based on results of numerical simulations (cohesive model) and on technical-economical evaluation of proposed surface treatments, which led to cost savings for the adhesive joint.
KEY WORDS	adhesive joint, adhesion, cohesion, prediction of strength, cohesive model, FEM, methodology, DCB, ENF, Failure mode I and II, DP490, EN-AW-7075, metal, fiberglass, carbon fiber composite

Obsah

Seznam uvedených obrázků a tabulek ... 3
Seznam důležitých zkratek a značek ... 5
1 ÚVOD ... 6
1.1 Zadávající společnost – Mubea Transmission Components s.r.o. ... 6
1.2 Upřesnění zadání ... 7
1.3 Časový plán řešení ... 7
2 STAV TECHNIKY (REŠERŠE) ... 8
2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY ... 8
2.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů ... 8
2.1.2 Rozdělení kompozitních materiálů ... 8
2.1.3 Vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí ... 10
2.1.4 Polymerní matrice ... 10
2.1.5 Vlákna ... 11
2.1.6 Lamináty ... 13
2.1.7 Sendvičové konstrukce ... 15
2.2 METODY SPOJOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ ... 16
2.2.1 Rozdělené spojů dle principu spojování ... 16
2.2.2 Ukázky vybraných principů spojování ... 16
2.3 LEPENÉ SPOJE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ ... 18
2.3.1 Teorie lepených spojů kompozitních materiálů ... 18
2.3.2 Způsoby namáhání a únosnost lepených spojů ... 22
2.4 TEORIE PORUŠENÍ LEPENÝCH SPOJŮ ... 23
2.4.1 Přístupy k porušení lepených spojů ... 23
2.4.2 Módy porušení ... 28
2.5 METODY PREDIKCE PEVNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ ... 31
2.5.1 Experimentální testování reálných dílů ... 31
2.5.2 Analytické výpočty ... 31
2.5.3 Pomocí MKP - Metody kombinující běžné 1D, 2D a 3D elementy ... 34
2.5.4 Pomocí MKP - Metody s využitím kohezivních elementů/kontaktu ... 34
3 NÁVRH METODIKY PREDIKCE PEVNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ ... 37
4 APLIKACE NAVRŽENÉ METODIKY ... 40
4.1 ZADANÉ VSTUPNÍ HODNOTY ... 40
4.2 SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA LEPENÝ SPOJ ... 41
4.3 VLASTNOSTI LEPENÝCH MATERIÁLŮ ... 42
4.3.1 Sklolaminátový prepreg - PREG M49/32%/600S8/GE-300 ... 42

4.3.2 Uhlíkový prepreg - MTM57/CF3202VQ 42
4.3.3 Slitina hliníku EN AW 7075 T6 42
4.4 NÁVRH MOŽNÝCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV LEPENÝCH MATERIÁLŮ 42
4.5 LEPIDLO SCOTCH-WELD EXP DP490 43
4.6 STANOVENÍ MECHANICKÝCH PARAMETRŮ LEPIDLA 43
4.6.1 Volba vhodných testovacích vzorků a zkoušek 44
4.6.2 Návrh přípravku na lepení vzorků 46
4.6.3 Návrh přípravku pro upínání DCB vzorků na trhací stroj 48
4.6.4 Výroba zkušebních vzorků 49
4.6.5 Experimentální měření 53
4.6.6 Vyhodnocení zkoušek adheze 54
4.6.7 Stanovení mechanických vlastností na základě zatěžování dle módu I 56
4.6.8 Stanovení mechanických vlastností na základě zatěžování dle módu II 59
4.7 STANOVENÍ POŽADOVANÉ ÚNOSNOSTI LEPENÉHO SPOJE 61
4.8 OVĚŘENÍ PEVNOSTI Z HLEDISKA ADHEZE 62
4.9 OVĚŘENÍ PEVNOSTI Z HLEDISKA KOHEZE 64
4.9.1 Kohezivní model přítlačného křídla 64
4.9.2 Vyhodnocení kohezivního modelu přítlačného křídla 67
4.10 OPTIMALIZACE LEPENÉHO SPOJE 69
4.11 PODNĚT PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ 72
Závěr 74
Seznam použitých zdrojů 76
Seznam použitého softwaru 80
Seznam příloh 80

Seznam uvedených obrázků a tabulek

Obrázek 1 - Monokok vozu McLaren MP4-12C, vyráběný spol. Mubea Carbotech [45] 6
Obrázek 2 - Společnost Mubea Žebrák [45] 6
Obrázek 3 - Časový plán řešení 7
Obrázek 4 - Mechanické vlastnosti polymerních matric [5] [14] 10
Obrázek 5 - Mechanické vlastnosti vláken [31] 12
Obrázek 6 - Tkaniny z aramidových a uhlíkových vláken [36] 13
Obrázek 7 - Skelná vlákna - tkanina z kontinuálních vláken a náhodně uspořádaná vlákna [36] 13
Obrázek 8 - Příklad skládání laminátu z jednotlivých vrstev [37] 13
Obrázek 9 - Volant studentské formule (laminátová skořepina) a rovné desky z karbonových prepregů 13
Obrázek 10 - Orthotropní vrstva 14
Obrázek 11 - Skladba sendvičové konstrukce [39] 15
Obrázek 12 - Monokok vozu McLaren MP4-12C [34] 15
Obrázek 13 - Monokok vozu Formula student [35] 15
Obrázek 14 - Spojení tvarem - spojení čepy a kolíky, spojení nýty a nýtovací maticí [9] 16
Obrázek 15 - Rychloupínací závitové vložky [27] 17
Obrázek 16 - Samořezné závitové vložky [27] 17
Obrázek 17 - Lisované závitové vložky [27] 17
Obrázek 18 - Spojení tvarem - spojení polygony 17
Obrázek 19 - Princip navíjení komp. vláken na trn [6] a ultrazvukového svařování [38] 17
Obrázek 20 - Vazby v lepeném spoji [7] 18
Obrázek 21 - Porovnání rozložení napětí - nýtového a lepeného spoje [40] 19
Obrázek 22 - Možnosti lepení laminátů a zhodnocení - efektivní využití materiálu/pevnost spoje [40] 20
Obrázek 23 - Lepení dvou kompozitních trubek 20
Obrázek 24 - Možnosti lepení insertů do kompozitních trubek 20
Obrázek 25 - Možnosti lepení sendvičových konstrukcí [40] 21
Obrázek 26 - Lepené upínací prvky sendvičových konstrukcí [15] 22
Obrázek 27 - Kovový šroub ukončen na konci dříku plastovou částí [33] 22
Obrázek 28 - Platnost principů lineárně elastické a elasto-plastické lomové mechaniky 23
Obrázek 29 - Závislost působení vnější síly na posunutí dvojice atomů [12] 23
Obrázek 30 - Šíření trhliny ve struktuře [12] 24
Obrázek 31 - Geometrická interpretace Griffithovy rovnice [12] 25
Obrázek 32 - Závislost celkové energie na délce trhliny ve struktuře [12] 25
Obrázek 33 - Napětí ve struktuře obsahující trhlinu [12] 27
Obrázek 34 - Módy porušení I, II a III [12] 27
Obrázek 35 - Integrační cesta při výpočtu J-integrálu [12] 28
Obrázek 36 - Způsob namáhání dle módu I a vyobrazení zkoušky DCB [12] 29
Obrázek 37 - Způsob namáhání dle módu II a vyobrazení zkoušky ENF [12] 30
Obrázek 38 - Průběhy napětí ve vrstvě lepidla [12] 31
Obrázek 39 - Výpočet max. napětí v krajních oblastech vrstvy lepidla v závislosti na způsobu zatížení [1] [12] 32
Obrázek 40 - Srovnání Analytického a Numerického řešení [19] 33
Obrázek 41 - Kohezivní prvky a kohezivní kontakt [13] 36
Obrázek 42 - Souřadnicový systém os O (ss, nn, tt) [13] 36
Obrázek 43 - Princip kohezivního modelu [21] 36

Obrázek 44 - Konstitutivní zákon se změkčením - bilineární, polynomický a exponenciální průběh $\boldsymbol{\sigma i - vi}(t - \boldsymbol{\delta})$ [21] 36
Obrázek 45 - Vývojový diagram navržené metodiky 39
Obrázek 46 - Zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8 40
Obrázek 47 - Lepidlo Scotch-Weld - DP490 43
Obrázek 48 - Rozměry navrženého vzorku pro DCB test dle normy ASTM D5528-01 45
Obrázek 49 - Rozměry vzorku pro ENF test dle normy ASTM D7905 45
Obrázek 50 - Rozměr vzorků pro zjištění adheze dle normy ASTM D5868 46
Obrázek 51 - přípravek na lepení vzorků 47
Obrázek 52 - Přípravek na upínání DCB vzorků 48
Obrázek 53 - Vylaminované kompozitní desky pro výrobu vzorků 49
Obrázek 54 - Nařezané desky na ENF a DCB - úprava před slepením 49
Obrázek 55 - Desky pro DCB a ENF s naneseným lepidlem, před slepením 50
Obrázek 56 - Lepení upínacích hranolů pro DCB test (ukázka jiných vzorků – z uhlíkové tkaniny) 50
Obrázek 57 - Vzorky pro zjištění pevnosti v adhezi před slepením 50
Obrázek 58 - Vyobrazení postupu lepení vzorků na zjištění adheze 51
Obrázek 59 - Vyobrazení všech hotových zkušebních vzorků 52
Obrázek 60 - Trhací stroj - Zwick/Roell Z050 53
Obrázek 61 - Zpracovaná data z experimentálního měření - DCB 56
Obrázek 62 - Kohezivní model DCB testu 57
Obrázek 63 - Ukázka výsledů numerické simulace DCB testu - výsledky posuvů (m) 57
Obrázek 64 - Ukázka výsledů numerické simulace DCB testu - výsledky otevření trhliny (m) 57
Obrázek 65 - Srovnání výsledných průběhu z numerické simulace a zprůměrovaných výsledků experimentálního měření pro DCB test 58
Obrázek 66 - Zpracovaná data z experimentálního měření – ENF 59
Obrázek 67 - kohezivní model ENF testu 59
Obrázek 68 - Ukázka výsledů numerické simulace ENF testu - výsledky posuvů (m) 60
Obrázek 69 - Ukázka výsledů numerické simulace - výsledky smykového napětí (Pa) 60
Obrázek 70 - Srovnání výsledných průběhu z numerické simulace a zprůměrovaných výsledků experimentálního měření pro ENF test 60
Obrázek 71 - Způsob testování křídla na voze 61
Obrázek 72 - Technicko-ekonomické hodnocení povrchových úprav - detialy hodnocení 62
Obrázek 73 - Technicko-ekonomické hodnocení povrchových úprav - výsledný graf 63
Obrázek 74 - MKP model přítlačného křídla 64
Obrázek 75 - Zobrazení směrů materiálu kohezivních elementů v modelu 65
Obrázek 76 - Definice jednotlivých vrstev použitých v modelu 65
Obrázek 77 - Definice materiálových vlastností pro sklolaminátu v sw NX 66
Obrázek 78 - Definice materiálových vlastností pro Twill Carbon v NX 66
Obrázek 79 - Průběh zatížení insertu vynuceným posunutím 66
Obrázek 80 - Max. reakční síla před porušením (N) 67
Obrázek 81 - Celkové posunutí při max. zatěžující síle (mm) 67
Obrázek 82 - Kohezivní porušení - při Fmax (krok 16, t=0,024s) 68
Obrázek 83 - Kohezivní porušení - těsně před prvním porušením (krok 30, t=0,045s) 68
Obrázek 84 - Redukované napětí - insert (MPa) 68
Obrázek 85 - Max. reakční síla před porušením (N) - po optimalizaci 69
Obrázek 86 - Celkové posunutí při max. zatěžující síle (mm) – po optimalizaci 69
Obrázek 87 - Kohezivní porušení - při Fmax (krok 15, t=0,0225s) – po optimalizaci 70

Obrázek 88 - Kohezivní porušení - těsně před prvním porušením (krok 30, t=0,045s) – po optimalizaci 70
Obrázek 89 - Původní insert (vlevo) a optimalizovaný insert (vpravo) 70
Obrázek 90 - Původní a optimalizovaný insert ve vzájemném průniku 71
Obrázek 91 - Zadní přítlačná křídla vozu Audi R8 určená pro experimentální testování 72
Obrázek 92 - Detail navrženého přípravku na upnutí křídla 73
Obrázek 93 - Naznačení principu vkládání a upínání křídla do přípravku 73

Tabulka 1 - Specifikace požadavků na lepený spoj 41
Tabulka 2 - Vlastnosti sklolaminátu PREG M49/32%/600S8/GE-300 [42] 42
Tabulka 3 - Vlastnosti uhlíkového prepregu - MTM57/CF3202VQ [43] 42
Tabulka 4 - Vlastnosti slitiny hliníku EN AW 7075 T6 [44] 42
Tabulka 5 - Navržené testovací vzorky 44
Tabulka 6 - Výsledky testování pevnosti v adhezi 54
Tabulka 7 - Vyčíslení rozdílů původního a optimalizovaného insertu 71

Seznam důležitých zkratek a značek

A	[%]	tažnost materiálu
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
G	[GPa]	modul pružnosti ve střihu
G_{IC}	[J/m2]	energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu I
G_{IIC}	[J/m2]	energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu II
G_{IIC}	[J/m2]	energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu III
k_I	[Gpa/m]	tuhost lepidla při zatížení dle módu I
k_{II}	[Gpa/m]	tuhost lepidla při zatížení dle módu II
k_{III}	[Gpa/m]	tuhost lepidla při zatížení dle módu III
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
v	[-]	Poissonovo číslo
ϱ	[g/cm3]	hustota materiálu
τ_{DS}	[MPa]	dovolené napětí ve smyku
τ_S	[MPa]	napětí ve smyku

4HR / 6HR	čtyřhranná / šestihranná (trubka, hlava apod.)
CF / CFL	carbon fiber laminate
DCB	Double Cantilever Beam
ENF	End Notched Flexure
EPLM	elasto-plastické lomové mechaniky
GF / GFL	fiberglass laminate
KTL	Kataforéza - Kataforetické lakování
LELM	lineárně elastické lomové mechaniky

1 ÚVOD

1.1 Zadávající společnost – Mubea Transmission Components s.r.o.

Společnost Muhr und Bender KG, známá pod názvem Mubea se sídlem v Attendorn v Německu byla založena roku 1916 Josephem Muhrem a dodnes je vlastněna rodinou Muhrových. Mubea je lídrem na trhu v mnoha segmentech automobilového průmyslu a v posledních letech dosáhla globalizace ve všech významných zemích. Roční obrat společnosti dosahuje 2 mld. € a zaměstnává přes 12 000 zaměstnanců po celém světě na 36 výrobních a vývojových místech.
Závod Žebrák byl založen roku 1994, přičemž zde byla postavena první výrobní hala. Dnes zde stojí výrobních hal hned pět. Jen v Žebráku zaměstnává společnost Mubea okolo 900 zaměstnanců. Mezi jejich zákazníky patří významné automobilky jako: Audi, BMW, Chrysler, Daimler, Fiat, Ford, GM, Nissan, Porsche, PSA, Renault, Toyota, VW, Aston Martin apod. Mimo jiné se zde vyrábí napínací systémy řemenů, opěrky hlavy, vlastní stroje a nástroje a v neposlední řadě díly z karbonových kompozitních materiálů.
Roku 2011 došlo k fúzi s rakouskou společností Carbo Tech. Mubea Carbo Tech GmbH se sídlem v Salzburgu má nyní pobočku i zde v Žebráku, kde se od roku 2013 vyrábějí kompozitní díly do luxusních aut.

Obrázek 1 - Monokok vozu McLaren MP4-12C, vyráběný spol. Mubea Carbotech [45]

Obrázek 2 - Společnost Mubea Žebrák [45]

1.2 Upřesnění zadání

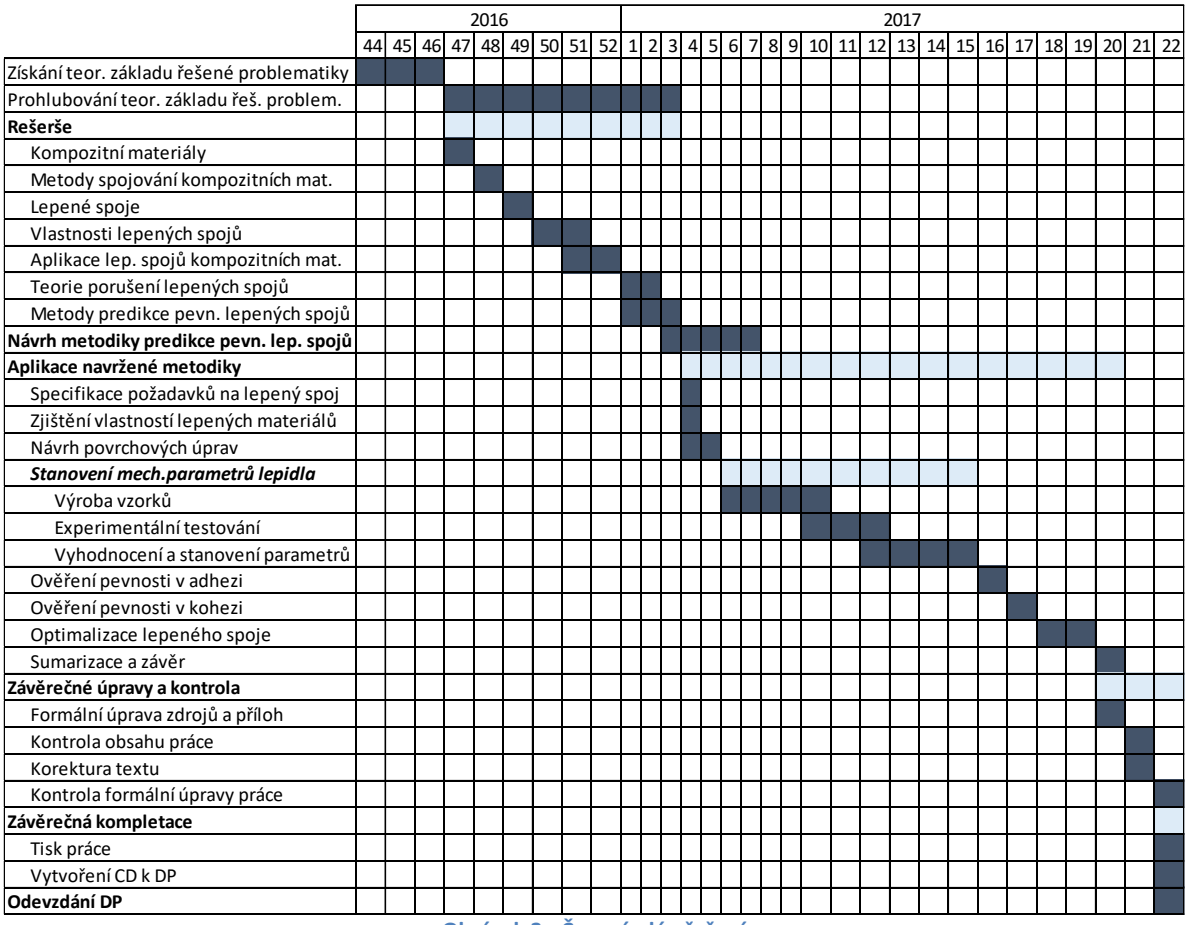
Cílem této práce je návrh metodiky predikce pevnosti lepených spojů kompozitních materiálů s kovy při návrhu jejich konstrukce na základě provedených experimentálních měření a numerických simulací. A následná aplikace navržené metodiky na zadané reálné komponentě.

Existuje nepřeberné množství kombinací lepených materiálů, povrchových úprav a lepidel. Jen společnost Mubea, zadavatel této práce, používá při výrobě svých produktů desítky různých kombinací. Pro zpracování této práce bylo tedy nutné zaměřit se na vybranou užší část této množiny.

Zadavatelem bylo zvoleno jako reprezentativní díl pro aplikaci metodiky zadní přítlačné křídlo pro vůz Audi R8 s vlepovanými inserty ze slitiny hliníku. Pomocí těchto insertů je křídlo přimontováno na vůz. Zadavatelem je definována minimální požadovaná únosnost 3500 N, přičemž tato síla je aplikována rovnoměrně po celé délce křídla a působí ve směru osy nohy křídla. Při opakovaném zatížení touto silou nesmí dojít k žádnému porušení křídla, lepeného spoje ani insertů. Přičemž tato práce je zaměřena hlavně na únosnost samotného lepeného spoje. K analýze lepeného spoje by měla být použita pokročilá numerická simulace s využitím kohezivního modelu.

1.3 Časový plán řešení

Na počátku byl navržen orientační časový plán řešení. Tento časový plán byl v průběhu řešení práce několikrát aktualizován a doplňován. Výsledný časový plán je znázorněn na Obrázek 3.



Obrázek 3 - Časový plán řešení

2 STAV TECHNIKY (REŠERŠE)

2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

2.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů

Principem kompozitního materiálu je dosáhnout smíšením dvou různých materiálů (A a B) vzniku nového materiál (C) s lepšími vlastnostmi, než mají obě zdrojové složky, nebo než je jejich prostý součet.
Platí zde princip synergie, což znamená, že výsledný účinek dvou současně působících složek je větší než souhrn účinků jednotlivých složek. Symbolický zápis tohoto principu je „1+1>2“

Kompozitní materiál se zpravidla skládá z výztuže a matrice. Výztuž je tvrdá/tuhá/pevná nespojitá složka. Naopak matrice je spojitá poddajná složka, která plní funkci pojiva výztuže.

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- *podíl výztuže musí být větší než 5 %*
- *vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice*
- *kompozit musí být připraven smícháním složek*

*Podle těchto podmínek nelze za kompozit považovat plast, obsahující malá množství tuhých barviv, např. částic sazí (černý pigment) nebo oxidů (např. TiO2-bílý pigment) nebo částic (přidávaných pro zlepšení houževnatosti; nejde o výztuž, modul pružnosti materiálu se naopak zmenší), ani slitinu kovů, ve které během ochlazování nebo při tepelném zpracování došlo k vyloučení tvrdé fáze. [*28*, doc. Kořínek, Kompozity-Definice,str.1]*

2.1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

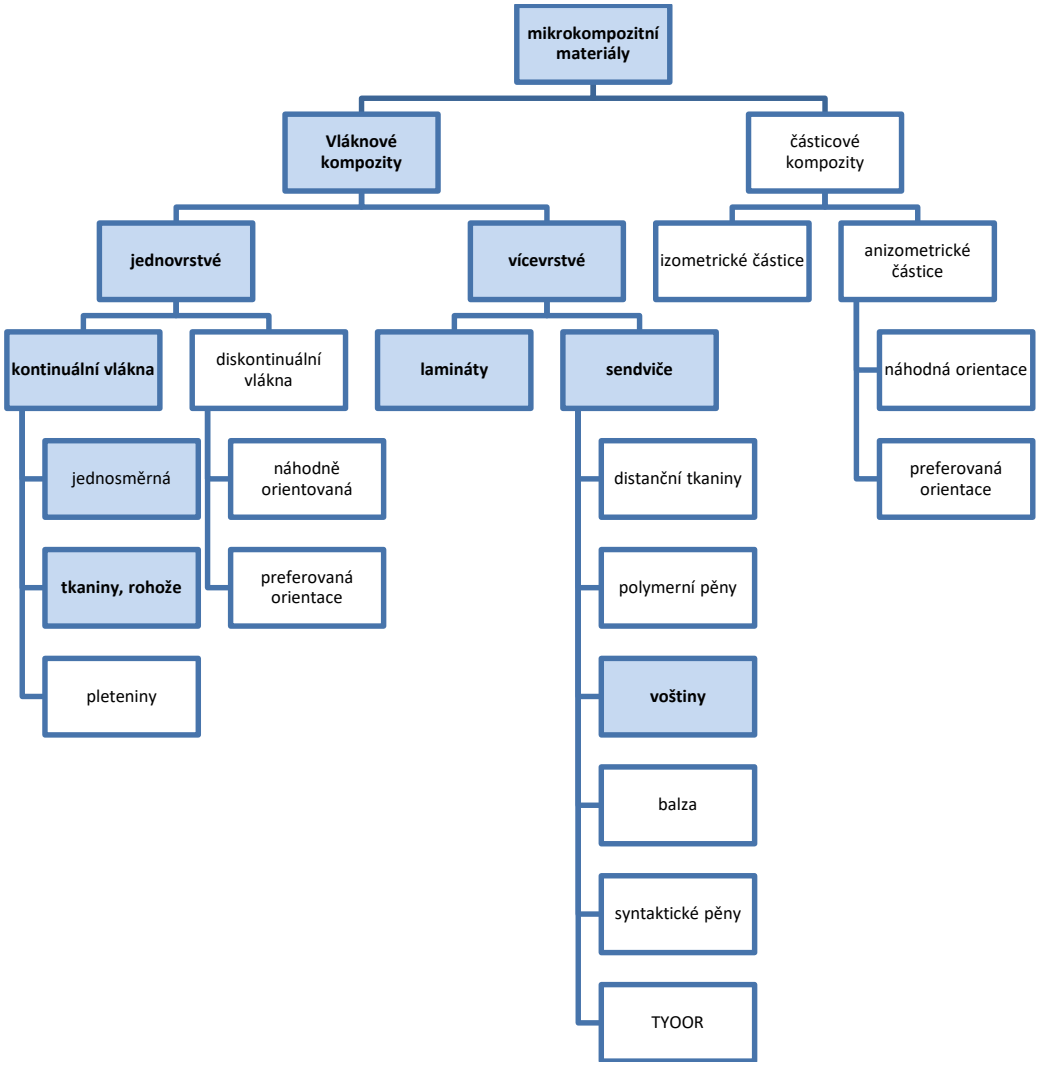
Nanokompozitní materiály
Kompozitní materiály, jejichž rozměry výztuže jsou v řádech jednotek nm.

Mikrokompozitní materiály
Kompozitní materiály, jejichž největší příčné rozměry výztuže jsou v řádech μm.
Tato kategorie má v automobilovém průmyslu největší využití.

Makrokompozitní materiály
Kompozitní materiály, jejichž největší příčné rozměry výztuže jsou v řádech mm až cm. Příklady takových kompozitních materiálů jsou: polymerbeton, železobeton, asfaltová směs na vozovky, vícevrstvé plátované konstrukce apod.

S ohledem na využití v automobilovém průmyslu se budeme dále zabývat pouze mikrokompozitními materiály.

2.1.2.1 Rozdělení mikrokompozitních materiálů



Převzato a upraveno [28]

Podle druhu matrice můžeme kompozitní materiály rozdělit na:

- Kompozity s polymerní matricí (Polymer Matrix Composites - PMC) – nejčastější
- Kompozity s kovovou matricí (Metal Matrix Composites - MMC)
- Kompozity s keramickou matricí (Ceramic Matrix Composites - CMC) – do vys.teplot
- Kompozity s uhlíkovou, skleněnou matricí apod.

Z výše uvedených nás budou dále zajímat kontinuální vlákna, ze kterých se vyrábí lamináty a voštinové sendviče. Co se materiálového složení týče, budeme se dále podrobněji zabývat kompozitními materiály s polymerní matricí a uhlíkovými, skelnými a aramidovými vlákny.

2.1.3 Vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí

Jedná se o nejpoužívanější typ vláknových kompozitních materiálů. Jako matrice jsou použity polymerní pryskyřice, které jsou kombinovány nejčastěji se skelnými, uhlíkovými, nebo aramidovými vlákny.

2.1.4 Polymerní matrice

Polymerní matrice jsou nejčastějším typem používaným ve vláknových kompozitních materiálech. Nejdůležitějšími požadavky kladenými na polymerní matrice jsou vysoká adheze, pevnost a tuhost v tahu, únavová odolnost, odolnost proti vzniku mikrotrhlin a voděvzdornost.

Základní rozdělení:

- Matrice na bázi reaktoplastů:
  - Epoxidové pryskyřice
  - Fenolické pryskyřice
  - Polyimidové, bismaleimidové pryskyřice a další
- Matrice na bázi termoplastů
  - Polyamid (PA)
  - Polypropylen (PP)
  - Polyeterimid (PEI), Polyetersulfon (PES) a další

Epoxidové pryskyřice
Jedná se o nejrozšířenější druh polymerní matrice. Využití pro primární nosné konstrukce.
Výhody:

- dobré mechanické vlastnosti
- dobré kohezní vlastnosti
- velmi dobrá voděvzdornost
- malé smrštění při vytvrzování

Matrice		R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]	ρ [g.cm^{-3}]
Reaktoplastové matrice	Epoxidová	50-95	3,1	4,0	1,15
	Fenolická	40-70	8,4	0,4	1,45
	Polyimidová	55-180	4,0	1-60	1,40
	Bismaleimidová	45-90	4,0	1-25	1,30
Termoplastové matrice	Polyamid (PA6/6)	97	3,0	30	1,18
	Polypropylen (PP)	24,8	1,1	200	0,91
	Polystyren (PS)	23-70	1,0-3,2	2-50	1,05

Obrázek 4 - Mechanické vlastnosti polymerních matric [5] [14]

převzato z: [14, str.14] resp. [5]

2.1.5 Vlákna

V kompozitních materiálech s polymerní matricí se nejčastěji používají vlákna skelná, uhlíková a aramidová. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 5-20 µm. Tato vlákna dále spojují do větších celků:

- **Pramenec** - svazek vzájemně nekroucených vláken
- **Příze (yarn)** - spojitý svazek vzájemně zkroucených vláken nebo pramenců. Využití pro výrobu tkanin.
- **Roving** je soubor paralelních pramenců s malým nebo žádným zkroucením. Vlákna mohou být:
  - dlouhá (označení C - continous)
  - krátká (označení D - discontinous)
  - uspořádána jednosměrně
  - uspořádaná dvojsměrně v podobě tkaniny

Tkanina je tvořena dvěma základními částmi:

- Osnova (warp) je soustava rovnoběžných nití, do kterých je zanášen útek.
- Útek (weft) je nit proplétaná osnovou ve směru příčném (nejčastěji kolmém).

Tkaniny mohou mít různou vazbu vláken

- Plátěnou
- Keprovou
- Saténovou

Na vazbě vláken závisí vlastnosti a tvarovatelnost tkaniny.

[2], [4], [14]

2.1.5.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou nejpoužívanějším typem v leteckém průmyslu. Vyznačují se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi jejich základní vlastnosti patří vysoká pevnost, nízká hmotnost, vysoká únavová pevnost, velmi dobrá elektrická vodivost, nevýhodou je křehkost, nízká interlaminární pevnost a vysoká cena.

Uhlíková vlákna se vyrábí z ropných produktů nebo pyrolýzou organických vláken polyakrylonitrilu. Výhodou pyrolytického procesu je možnost jeho řízení a získání vláken s požadovanými vlastnostmi:

- HT (High Tenacity), HS (High Strength) - vysoká pevnost v tahu a tažnost, nižší modul pružnosti
- IM (Intermediate Modulus) - střední modul pružnosti, vysoká pevnost a dobrá tažnost
- HM (High Modulus) - vysoký modul pružnosti a nižší tažnost
- UHM (Ultra High Modulus) - velmi vysoký modul pružnosti a velmi nízká tažnost

[2], [14]

2.1.5.2 Skelná vlákna

Skelná vlákna mají mechanické vlastnosti srovnatelné s kovy, jsou však výrazně lehčí. Jsou chemicky odolná a teplotně odolná do teploty 400°C. Pro výrobu sklolaminátů se používají tyto druhy skla:

- Sklo E - nejčastěji využívané, nízká cena, horší mechanické vlastnosti
- Sklo S - pro náročnější aplikace, 3x - 4x dražší, než sklo E
- Sklo D - borosilikátové sklo s dobrými dielektrickými vlastnostmi, užívané např. pro konstrukci radomů

[2], [14]

2.1.5.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (zkr. aramid z "aromatický polyamid").

Výhody: vysoká pevnost, dobrá odolnost proti tepelnému namáhání, malá teplotní roztažnost, velmi dobře tlumí vibrace a absorbuje energii

Nevýhody: nízká pevnost v tlaku, pohlcování vlhkosti

Označení typů dle velikosti modulu:

- aramid LM (Low Modulus)
- aramid HM (High Modulus)
- aramid UHM (Ultra High Modulus)

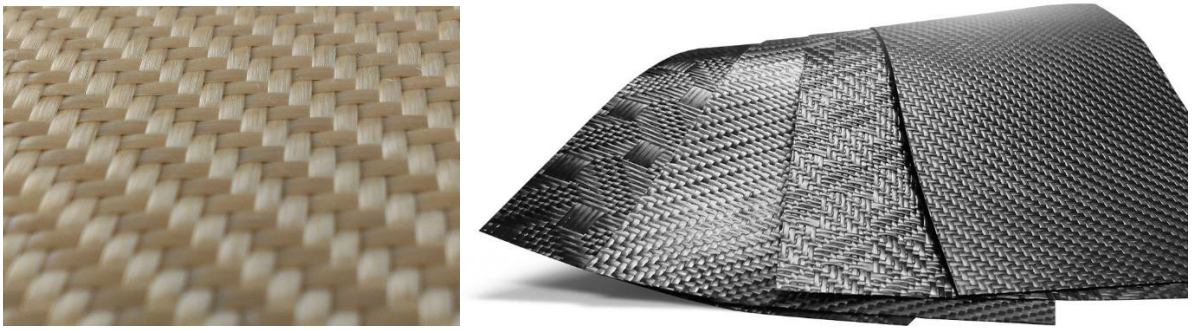
Nejznámějšími obchodními značkami jsou **Kevlar a Twaron.**
Často se používají v kombinaci s uhlíkovými nebo skelnými vlákny, která eliminují nízkou tlakovou pevnost aramidových vláken.

[2], [14]

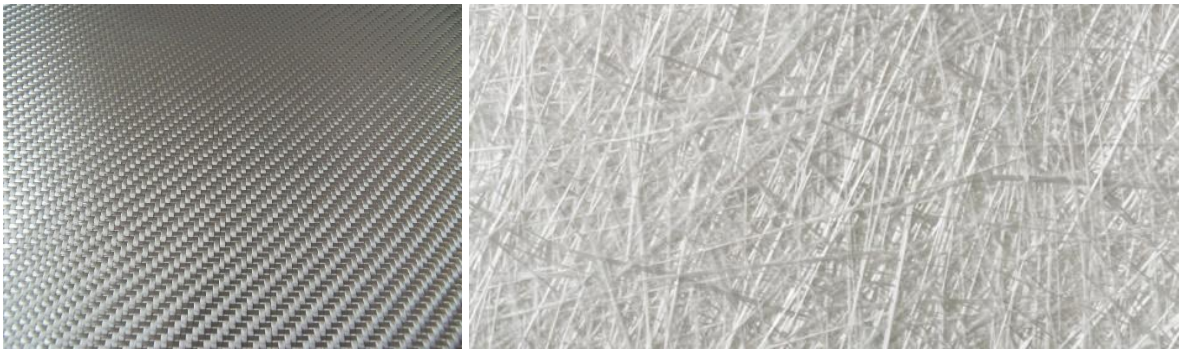
Základní mechanické vlastnosti

Typ vlákna	**Sklo**	**Aramid**	**HS - uhlík**	**HM - uhlík**
Modul pružnosti v podélném směru E_{fL} (MPa)	74 000	130 000	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{fT} (MPa)	74 000	5 400	15 000	6 000
Modulu pružnosti ve smyku G_{fLT} (Mpa)	30 000	12 000	50 000	20 000
Pevnost v tahu σ_{fL} **(MPa)**	2 100	3 000	5 000	3 800
Hustota ρ **(kgm^{-3})**	2 500	1 500	1 600	1 700

Obrázek 5 - Mechanické vlastnosti vláken [31]



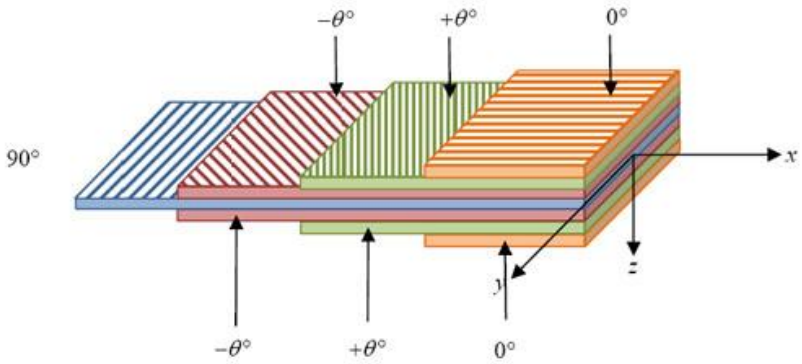
Obrázek 6 - Tkaniny z aramidových a uhlíkových vláken [36]



Obrázek 7 - Skelná vlákna - tkanina z kontinuálních vláken a náhodně uspořádaná vlákna [36]

2.1.6 Lamináty

Laminát je materiál tvořený dvěma a více vrstvami lamin tvořících kompozit. Tloušťka laminátu je oproti plošným rozměrům zpravidla výrazně menší. Lamináty se obvykle vyrábí postupným ukládáním jednotlivých vrstev na sebe. Obecně platí, že největší pevnosti a tuhosti dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny.



Obrázek 8 - Příklad skládání laminátu z jednotlivých vrstev [37]

Obrázek 9 - Volant studentské formule (laminátová skořepina) a rovné desky z karbonových prepregů

Teorie laminátů se dělí na:
• mikromechaniku
• mechaniku orthotropní vrstvy
• makromechaniku laminátu
• teorii porušování laminátu

Orthotropní vrstva

Základním elementem laminátu je tzv. Orthotropní vrstva, což je elementární vrstva s jednosměrným uspořádáním vláken. Tloušťka takovéto vrstvy z jednosměrného prepregu se pohybuje mezi 0,1-0,14mm a objemový podíl vláken se pohybuje mezi 60-80 %.

Jsou-li vlákna dokonale jednosměrně uspořádaná a dokonale soudržná s matricí, lze pomocí jednoduchých vztahů, na základě známých vlastností dílčích složek, spočítat tuhost, pevnost, nebo tepelnou roztažnost laminátu.

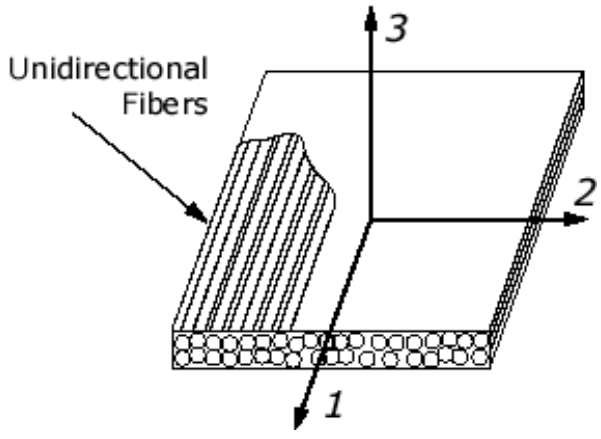
Maximální teoreticky možný objemový podíl vláken v_f v orthotropní vrstvě je:
78,5% pro čtvercové uspořádání a
90,6% pro hexagonální uspořádání s jedním vláknem uprostřed

Technologie, kterými je možno dosáhnout maximálních hodnot v_f jsou:

- ruční nebo strojní kladení jednosměrných prepregů s malým přebytkem pryskyřice, kdy dochází ke spojení a vytvrzení pryskyřice v autoklávu nebo lisu. Při vhodné teplotě, tlaku a odsávání přebytečné pryskyřice dosáhneme optimálního poměru vláken a matrice
- přesné strojní navíjení sdružených pramenů, nebo úzkých prepregů na trn

Elastické vlastnosti orthotropní vrstvy jsou plně charakterizovány čtyřmi elastickými konstantami:

• moduly pružnosti E_1 a E_2
• Poissonovou konstantou v_{12}, nebo v_{21}
• modulem pružnosti ve smyku G_{12}



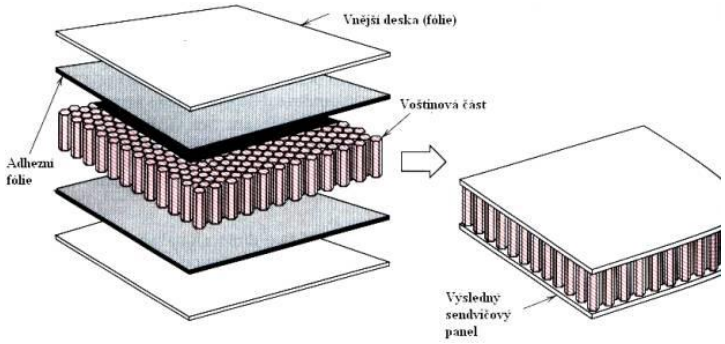
Obrázek 10 - Orthotropní vrstva

Ve směru 3 jsou předpokládány stejné elastické vlastnosti, jako ve směru 2.

Vrstva je dále charakterizována součiniteli tepelné roztažnosti α_1 a α_2 a součiniteli objemové změny vlivem vlhkosti β_1 a β_2. Rozdílné hodnoty těchto součinitelů způsobují u laminátů vnitřní pnutí.

2.1.7 Sendvičové konstrukce

Sendvičová konstrukce je druh laminátu s vloženým jádrem, pro zvýšení ohybové tuhosti konstrukce, která je druhou mocninou tloušťky laminátu. Jádra se vyznačují nízkou hustotou a dostatečnou pevností ve smyku. Jádra mohou být vyrobena z pěn, voštin apod.



Obrázek 11 - Skladba sendvičové konstrukce [39]

V automobilovém průmyslu se sendvičové konstrukce používají např. pro konstrukce Monokoků, nahrazujících ocelový rám.

Obrázek 12 - Monokok vozu McLaren MP4-12C [34]

Obrázek 13 - Monokok vozu Formula student [35]

2.2 METODY SPOJOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

2.2.1 Rozdělené spojů dle principu spojování

Spojení tvarem

- S přídavnými elementy
  - Spoje čepy a kolíky
  - Spoje nýty
  - Spoje šrouby a závity
- Vlastním tvarem spojovaných součástí
  - Spoje polygony

Spojení pomocí speciálních vložek

- Rychloupínací závitové vložky
- Samořezné závitové vložky
- Lisované závitové vložky
- Nýtovací matice

Svěrné spoje

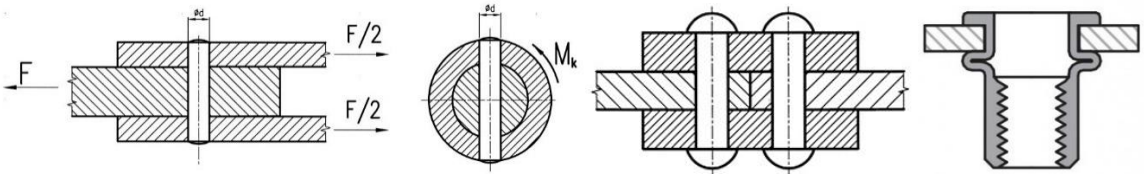
Svarové spoje (ultrazvukové svařování)

Navíjené spoje (navinutí kompozitních vláken přímo na insert)

Lepené spoje

Případně je možné použití kombinace dvou a více typů spojení.
Např.: lepený spoj pojištěný tvarovým spojem tak, aby nedošlo při povolení lepeného spoje k nežádoucímu uvolnění součásti a případnému poškození zařízení. Při narušení lepeného spoje by zařízení nefungovalo plnohodnotně, ale „v nouzovém režimu“ by bylo umožněno nechat zařízení doběhnout, odstavit a opravit.

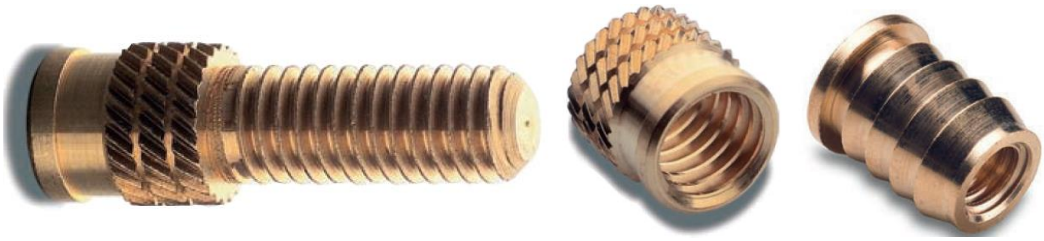
2.2.2 Ukázky vybraných principů spojování



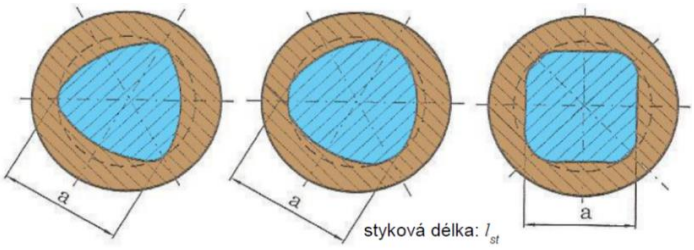
Obrázek 14 - Spojení tvarem - spojení čepy a kolíky, spojení nýty a nýtovací maticí [9]

Obrázek 15 - Rychloupínací závitové vložky [27]

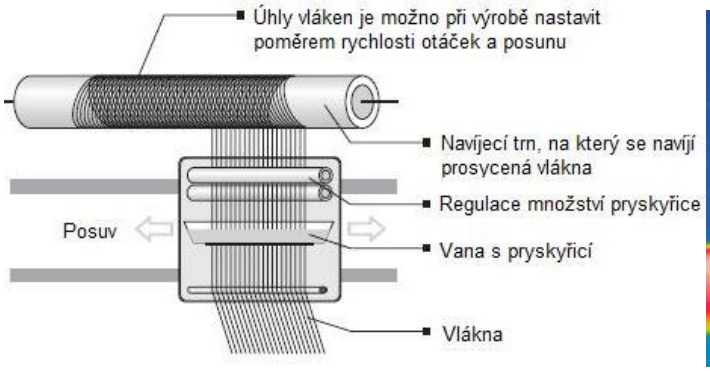
Obrázek 16 - Samořezné závitové vložky [27]

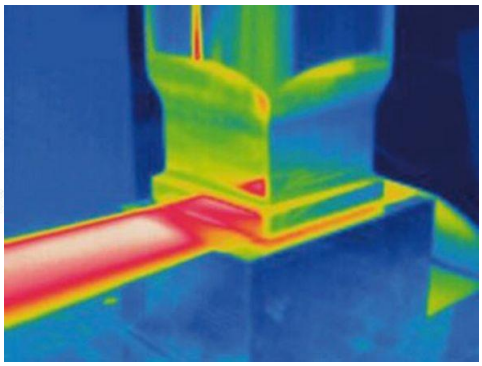


Obrázek 17 - Lisované závitové vložky [27]



Obrázek 18 - Spojení tvarem - spojení polygony





Obrázek 19 - Princip navíjení komp. vláken na trn [6] a ultrazvukového svařování [38]

V dalších částech se budeme zabývat již pouze lepenými spoji.

2.3 LEPENÉ SPOJE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

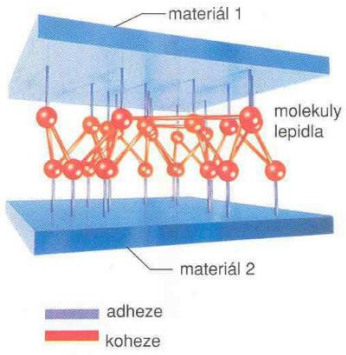
2.3.1 Teorie lepených spojů kompozitních materiálů

Lepený spoj je nerozebiratelné spojování součástí ze stejných nebo různých materiálů s využitím přídavného materiálu - lepidla.

Každý lepený materiál má své specifické vlastnosti, a proto neexistuje žádné univerzální lepidlo. Podle lepeného materiálu se vybírá vhodné lepidlo, aby byl spoj kvalitní a pevný. Na pevnost lepeného spoje má velký vliv i úprava lepených ploch, která se provádí pomocí různých čističů nebo mechanicky.

Princip lepeného spoje
Mezi kapalinou a pevnou látkou je lepší přilnavost, než mezi dvěma pevnými látkami, proto se využívají lepidla, kdy lepidlo v kapalném stavu vyplní mikropóry a nerovnosti mezi dvěma pevnými lepenými díly a po určitém čase vytvrdne a změní se v pevné skupenství. Aby lepidlo plnilo svoji funkci, musí lepený povrch dobře smáčet.

Lepený spoj vzniká za působení adheze a koheze. Síly, které vyvolají přilnavost adherendu a adheziva, se nazývají adheze. Vlastní soudržnost ztuhlého nebo vytvrzeného filmu lepidla se nazývá koheze.



Obrázek 20 - Vazby v lepeném spoji [7]

Základní rozdělení lepidel

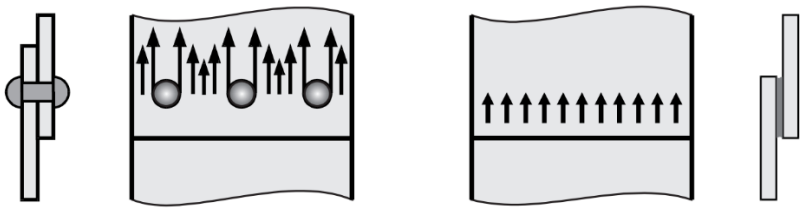
1) Podle složení
- jednosložková lepidla – lepidla smíchaná s ředidlem, k vytvrzení dochází na vzduchu po odpaření ředidla, případně odebráním kyslíku, vlhkosti vzduchu nebo teplem, lepící plochy se mohou spojit až po zaschnutí lepícího filmu

- dvousložková – působí po smíchání dvou složek (lepidla a tužidla), následuje rychlá reakce, směs nutno zpracovat během předepsané doby

2) Podle teploty zpracování
- lepidla tuhnoucí za studena - jsou schopny se vytvrdit díky chemické reakci za pokojové teploty (20 °C), doba tvrzení je podle druhu 5 sekund až několik dní

- lepidla tuhnoucí za tepla - vytvrdnou při zahřátí na 150 °C až 250 °C během 5 minut až několika hodin [29]

Výhody lepených spojů
- bez potřeby vytváření otvorů - konstrukčních vrubů (pro šrouby, nýty apod.)
- rovnoměrnější rozložení napětí
- bez tepelného ovlivnění
- relativně levné a lehké
- jednoduchá montáž
- spojování rozdílných materiálů
- zachovávají integritu povrchu
- mohou sloužit jako elektrické izolanty
- zvyšují odolnost proti dynamickému zatížení
- snižuje náchylnost na únavu materiálu
- vyrovnávají výrobní tolerance spojovaných součástí
- tlumí rázy a vibrace

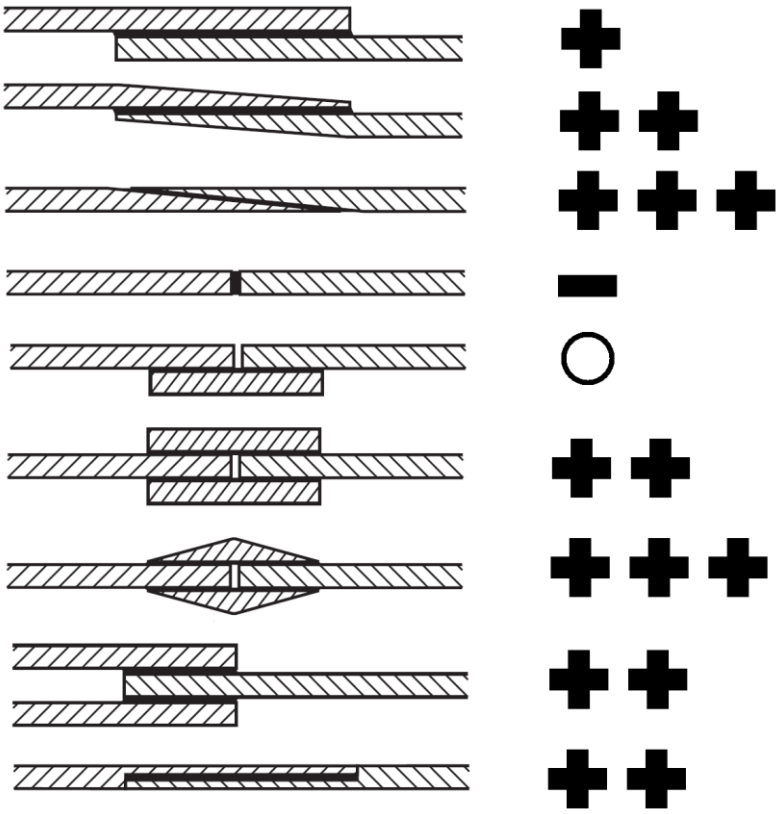


Obrázek 21 - Porovnání rozložení napětí - nýtového a lepeného spoje [40]

Vlivy na kvalitu lepeného spoje
- materiál lepených dílů
- povrchová úprava lepených ploch
- kvalita odmaštění lepených ploch
- typ lepidla
- tloušťka vrstvy lepidla

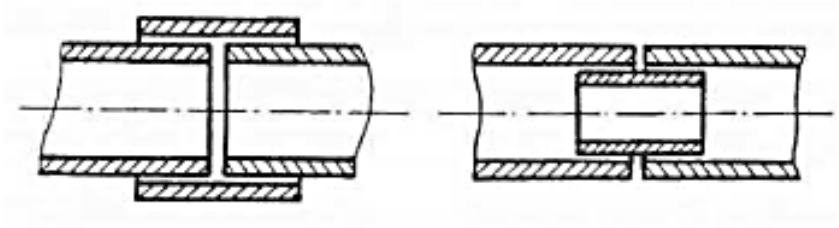
Požadavky na lepené spoje
- adhezivní pevnost
- kohezivní pevnost
- teplotní odolnost
- únavová pevnost
- chemická odolnost a odolnost proti vlhkosti
- vysoký poměr deformace a pevnosti

Možnosti lepení laminátů



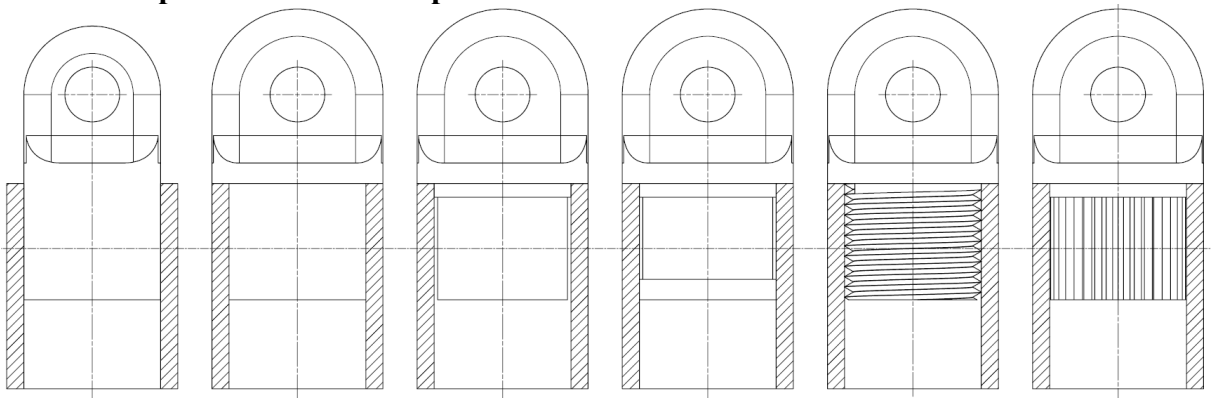
Obrázek 22 - Možnosti lepení laminátů a zhodnocení - efektivní využití materiálu/pevnost spoje [40]

Možnosti lepení kompozitních trubek



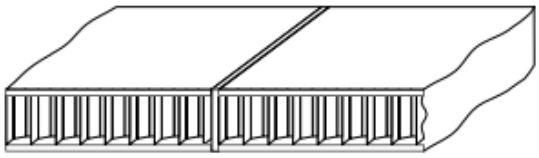
Obrázek 23 - Lepení dvou kompozitních trubek

Možnosti lepení insertů do kompozitních trubek

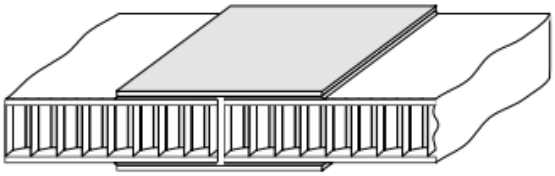


Obrázek 24 - Možnosti lepení insertů do kompozitních trubek

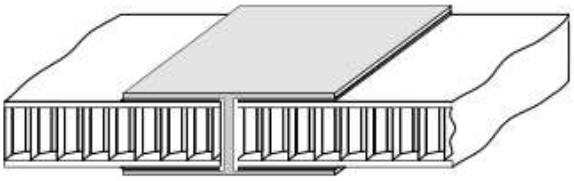
Možnosti lepení sendvičových konstrukcí



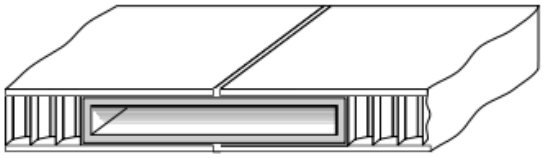
Čelní spojeni - vhodné pro nezatížené časti



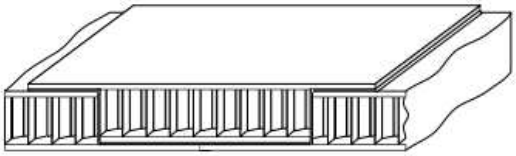
Spoj zpevněný přídavným materiálem



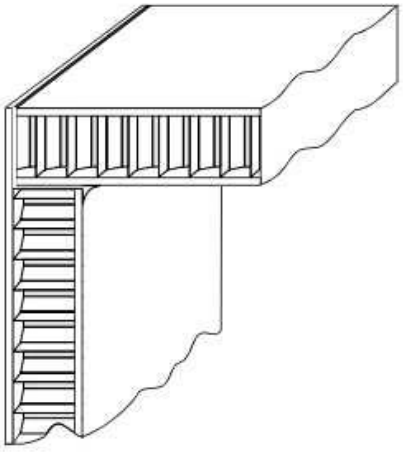
Spoj podporovaný „H“ profilem
- vhodný pro sériovou výrobu



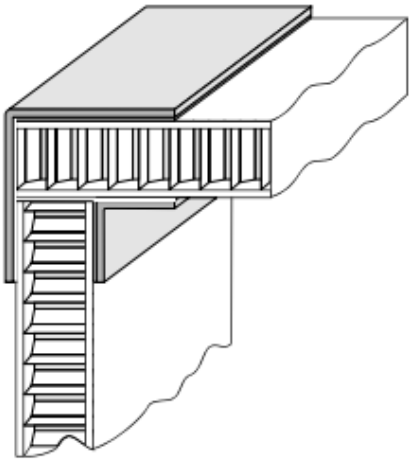
Spoj zpevněný speciální vložkou (dřevěnou)
- vhodné pro sériovou výrobu



Spoj za použití nadstavením stejným typem sendviče



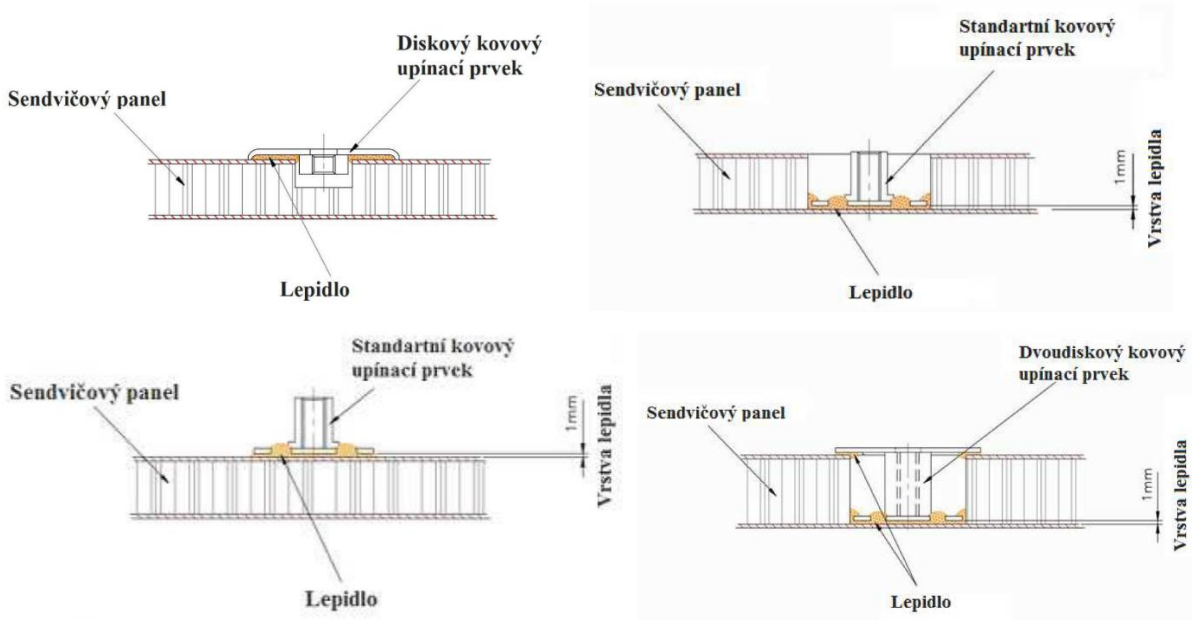
Jednoduché spojení bez přídavného materiálu – malá pevnost



Spoj podporovaný lištami „L“ profilu

Obrázek 25 - Možnosti lepení sendvičových konstrukcí [40]

Lepené upínací prvky



Obrázek 26 - Lepené upínací prvky sendvičových konstrukcí [15]

Obrázek 27 - Kovový šroub ukončen na konci dříku plastovou částí [33]

Jednou z aplikací v automobilovém průmyslu je kovový šroub ukončen na konci dříku plastovou částí. Spojování tímto způsobem je velmi rychlé. K vytvrzení lepidla se používají LED lampy a trvá jen 5 sekund. Spoj je možné ihned zatížit. Takzvaný „lepicí šroub“ o průměru 25 mm vykazuje pevnost v tahu 200 N.

2.3.2 Způsoby namáhání a únosnost lepených spojů

Lepené spoje mohou být namáhány různými způsoby zatížení. Obecně mají lepené spoje vysokou pevnost ve smyku a tlaku, a to i při dynamickém namáhání. V případně nízko-cyklové i vysoko-cyklové únavy překonávají svarové spoje. Naopak méně odolné jsou lepené spoje při namáhání odlupem a ohybem. Je-li to možné, je vhodné upravit konstrukci tak, aby nebyl lepený spoj těmito způsoby namáhán.

2.4 TEORIE PORUŠENÍ LEPENÝCH SPOJŮ

2.4.1 Přístupy k porušení lepených spojů

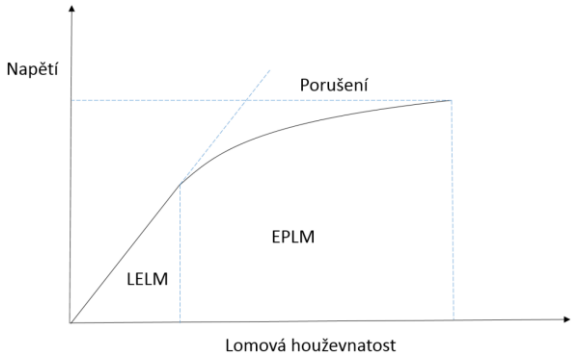
Při zatěžování lepených spojů může docházet jak k elastické, tak i k plastické deformaci.

Přístupy popisující způsoby porušení:

- lineárně elastické lomové mechaniky (dále LELM)
- elasto-plastické lomové mechaniky (dále EPLM)

LELM vychází z mechaniky kontinua a platí za předpokladu, že plastická zóna před čelem trhliny je malá [30] [12]. LELM platí pouze v oblasti Hookeova zákona.

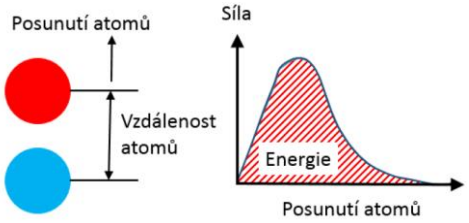
Parametrem popisujícím porušení je buď tzv. „hnací síla trhliny“, jejíž definice plyne z energetické bilance, nebo faktor intenzity napětí. Přístup založený na energetické bilanci se jeví za ekvivalentní klasickým napěťovým analýzám trhlin. Na rozdíl od nich přináší globální parametry potřebné pro hodnocení bezpečnosti při porušování struktury. V případě přístupu elasto-plastické lomové mechaniky může být porušení popsáno pomocí tzv. parametru „J-integrál“ J_{IC}, nebo celkovým otevřením čela trhliny δ_c. Tyto parametry zahrnují i oblast charakteristickou pro vznik plastické deformace blízko čela trhliny při iniciaci a vývoji porušení ve struktuře. Čím je oblast plastické deformace na čele trhliny větší, tím větší je nepřesnost výsledků získaných přístupem elastické lomové mechaniky [30], [12].



Obrázek 28 - Platnost principů lineárně elastické a elasto-plastické lomové mechaniky

Griffithův přístup

Griffithův přístup je založen na zjišťování práce potřebné k porušování atomových vazeb ve vazbě na deformační energii, která se uvolňuje při růstu trhliny. Pevné látky jsou složeny z atomů, jejichž dvojice leží v určité vzdálenosti od sebe. V rovnovážném stavu se tyto atomy vzájemně silově neovlivňují. Při jejich vzájemném přibližování dochází ke vzniku síly, která oba atomy začne odpuzovat. Naproti tomu oddalování dvojice atomů od sebe má za výsledek vznik přitažlivé síly [12] [3].

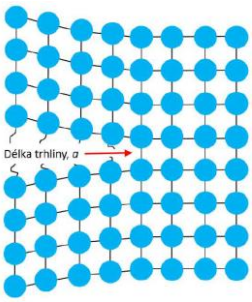


Obrázek 29 - Závislost působení vnější síly na posunutí dvojice atomů [12]

Při oddalování atomu dochází zpočátku ke zvyšování síly potřebné k pohybu atomů. Při překročení dané vzdálenosti začínají vazby slábnout. V konečně fázi dojde k jejich porušení. Tím dojde k poklesu síly až na nulu. Plocha pod křivkou v grafu síla-posunutí atomů je znázornění energie atomové vazby.

Porušení dle energetického kritéria a faktoru intenzity napětí

Podle Griffithova energetického principu dochází k porušení materiálu, pokud uvolněná elastická energie na čele trhliny je schopna vyvolat v pružném tělese vznik nových povrchů [12] [3].



Obrázek 30 - Šíření trhliny ve struktuře [12]

Množství práce nutné pro porušení celého systému

Při postupném porušování atomových vazeb v materiálu vzniká trhlina o délce a. Množství práce nutné pro porušení celého systému [12] je popsáno rovnicí:

$$E_{bond} = 2 \cdot \gamma_S \cdot a \cdot B \qquad (1)$$

kde:

γ_S *... energie potřebná k porušení atomových vazeb na jednotkové ploše*

a *... délka trhliny*

B *... šířka trhliny*

Deformační energie

Deformační energie dílu o určitém objemu V namáhaném na tah, vychází z Hookeova zákona [12] a je popsána rovnicí:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V \qquad (2)$$

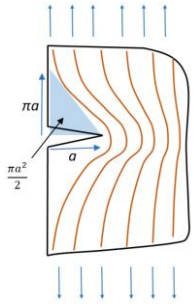
Kde:

U *... energie dílu, ve kterém není přítomna trhlina*

Trhlina šířící se v materiálu způsobí jeho rozdělení na dvě poloviny. Následkem toho dochází k odlehčení obou polovin a uvolnění deformační energie U v důsledku šíření trhliny v celém dílu. Při existenci trhliny v materiálu se velikost neporušeného objemu mění, hodnota deformační energie je závislá na délce trhliny [12] a popisuje ji rovnice:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V - \frac{\sigma^2}{2E} \pi B a^2 \qquad (3)$$

Při porušování roste uvolněná deformační energie kvadraticky s délkou trhliny a. Tuto závislost lze graficky interpretovat pomocí Obrázek 31, kde je znázorněna nezatížená část materiálu nad a pod prasklinou, která má trojúhelníkový tvar popsaný šířkou B, výškou πa a délkou trhliny a [12].



Obrázek 31 - Geometrická interpretace Griffithovy rovnice [12]

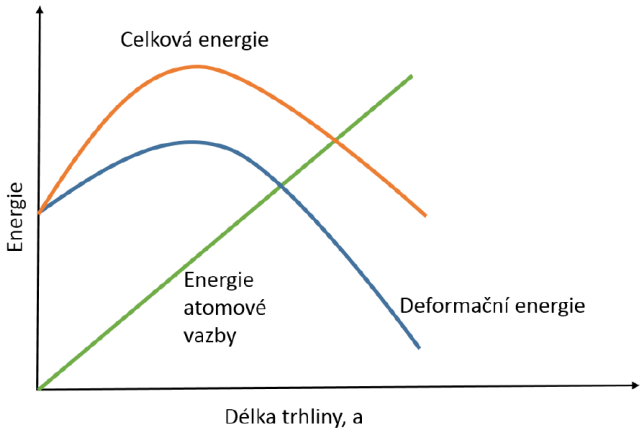
Objem obou trojúhelníků:

$$V = 2 \cdot B \cdot \frac{\pi a^2}{2} \qquad (4)$$

Celková energie systému
(součet rovnic (1) a (3)).

$$E_{celková} = 2\gamma_S aB + \frac{\sigma^2}{2E} V - \frac{\sigma^2}{2E} \pi B a^2 \qquad (5)$$

$E_{celková}$ je celková energie systému a je graficky znázorněna na Obrázek 32, kde je popsána stabilní a nestabilní oblast šíření trhliny. Stabilní část popisuje vzestupná tendence oranžové křivky až do jejího maxima. V této oblasti musí být pro další šíření trhliny energie do systému dodávána. V oblasti klesající tendence oranžové křivky dochází při růstu trhliny ke snížení celkové energie a trhlina může růst bez vnějšího zásahu. Jedná se o nestabilní situaci vedoucí ke kompletnímu porušení systému vlivem spontánního růstu trhliny [12].



Obrázek 32 - Závislost celkové energie na délce trhliny ve struktuře [12]

Rovnice popisující mez stability šíření trhliny:

$$\frac{E_{celková}}{da} = 2\gamma_S B - \frac{\sigma^2}{E}\pi B a = 0 \qquad (6)$$

Z výše uvedené rovnice eliminujeme B a vyjádříme z ní kritické lomové napětí:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2\gamma_S E}{\pi a}} \qquad (7)$$

Dosazením rovnice (8) do rovnice (7) získáme rovnici (9):

$$G_C = 2\gamma_S \qquad (8)$$

$$G_C = \frac{{\sigma_f}^2 \pi a}{E} \qquad (9)$$

GC ... Griffithova kritická rychlost uvolňování deformační energie

Pomocí rovnice (10) lze rovnici (9) vyjádřit pomocí tzv. faktoru intenzity napětí *Kc*.

$$K_C = \sigma_f \sqrt{\pi a} \qquad (10)$$

$$G_C = \frac{{K_C}^2}{E} \qquad (11)$$

Při hodnocení bezpečnosti dle určitého módu musí být splněna následující podmínka:

$$G_i < G_{iC} \quad pro\ všechna \ \ i = 1,2,3 \qquad (12)$$

Celková energie

$$G = G_I + G_{II} + G_{III} \qquad (13)$$

kde: i ... index módu porušení
(Platí díky ortogonalitě jednotlivých módů porušení v lineárně elastické oblasti).

Irwinova hypotéza
Irwinova hypotéza týkající se uzavírání trhliny zavádí vztah mezi (13) a (11) pomocí rovnice (14) [12].

$$E^* = \frac{E}{1 - \upsilon^2} \qquad (14)$$

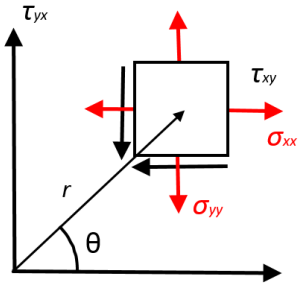
$$G = \frac{{K_I}^2}{E^*} + \frac{{K_{II}}^2}{E^*} + \frac{{K_{III}}^2}{2\mu} \qquad (15)$$

kde:
μ *... modul pružnosti ve smyku lepidla*
υ *... Poissonova konstanta*

Energetický přístup a přístup intenzity napětí jsou platné v případě lineárně elastických materiálů. Faktor intenzity napětí K_{ic} popisuje stav struktury, která obsahuje trhlinu při zatížení vnější silou.

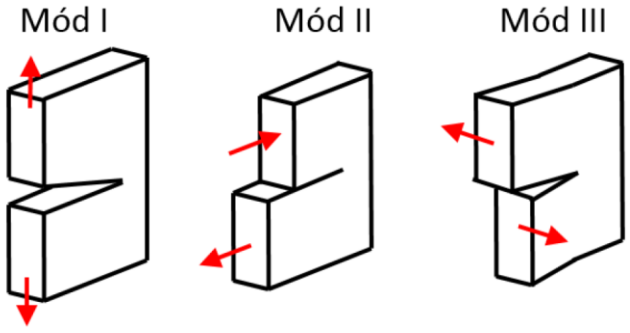
Napětí v okolí trhliny je v souřadnicovém systému popsaném dle Obrázek 33, vyjádřeno rovnicí

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{zz}\end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\Pi r}}\begin{Bmatrix}f_1(\theta)\\ f_2(\theta)\\ f_3(\theta)\end{Bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\Pi r}}\begin{Bmatrix}g_1(\theta)\\ g_2(\theta)\\ g_3(\theta)\end{Bmatrix} \quad (16)$$



Obrázek 33 - Napětí ve struktuře obsahující trhlinu [12]

kde:
K_i ..... *faktor intenzity napětí*
f, g ...funkce závislé na způsobu porušení
r, θ ...popisují polární souřadnice [8]



Obrázek 34 - Módy porušení I, II a III [12]

Struktura lze považovat za bezpečnou, za předpokladu platnosti podmínky:

$$f\left(\frac{K_i}{K_{iC}}\right) < 1, pro\ všechna\ i = 1{,}2 \quad (17)$$

kde:
f ... funkce závisí na konkrétním použitém kritériu porušení

J-integrál

J-integrál popisuje vznik a vývoj trhliny dle principů EPLM. Pro nelineární a elastické materiály platí za podmínek kvazi-statického zatěžování, že J-integrál je ekvivalentem celkové rychlosti uvolňování energie systému [12], což je popsáno v rovnici:

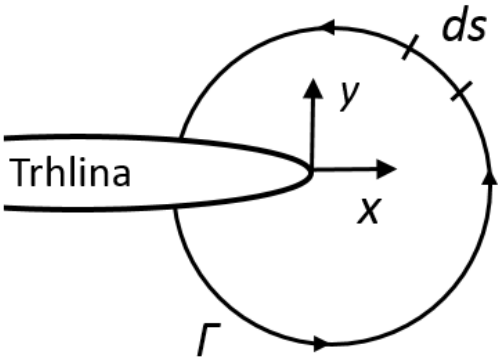
$$J = \frac{d\Pi}{dA} = G \qquad (18)$$

$$J = \int_{\Gamma} \omega dy - T_i \frac{\delta u_i}{\delta x} ds \qquad (19)$$

J-integrál vypočteme pomocí rovnice:

$$\omega = \int_0^{\varepsilon ij} \sigma_{ij}\, d\varepsilon_{ij} \qquad (20)$$

kde:
ω … hustota deformační energie
T … vektor napětí
u … vektor posunutí



Obrázek 35 - Integrační cesta při výpočtu J-integrálu [12]

2.4.2 Módy porušení

U lepených spojů může dojít při zatížení ke:

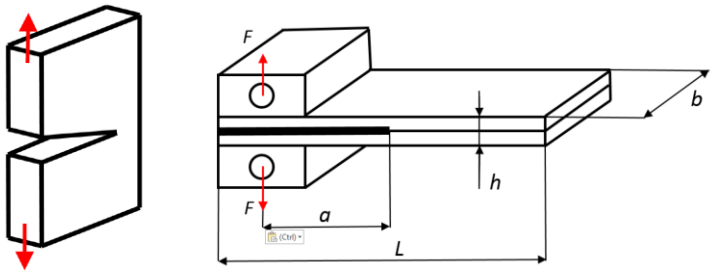
- kohezivnímu porušení vrstvy lepidla
- adhezivnímu porušení na rozhraní lepidla a lepeného materiálu
- porušení jednoho z materiálů
  (u kompozitních materiálů hlavně delaminace)

Rozlišujeme 3 základní módy porušení (I, II, III, případně jejich kombinaci). Módy se liší orientací zatížení vzhledem k orientaci čela trhliny. Módy mají odlišný způsob vzniku a vývoje porušení, resp. mají odlišnou hodnotu energie potřebné ke vzniku a vývoji porušení spoje (lomové houževnatosti). Jednotlivé módy mají také rozdílné hodnoty kritické napjatosti před čelem trhliny a posunutí v místě trhliny.

MÓD I

Tzv. otevření čela trhliny (z anglického Opening). Zatěžující síla působí na čelo trhliny, a to kolmo na plochu lepidla.

Pro tento mód zatěžován existuje tzv. DCB test. (z anglického Double Cantilever Beam).



Obrázek 36 - Způsob namáhání dle módu I a vyobrazení zkoušky DCB [12]

Tento test je definován v normě:

- ASTM D5528-01: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites [24]

Z výsledků této zkoušky je možné získat hodnoty k_I - tuhost vrstvy lepidla a lomové houževnatosti lepidla (G_{Ic}) při zatěžování dle módu I.

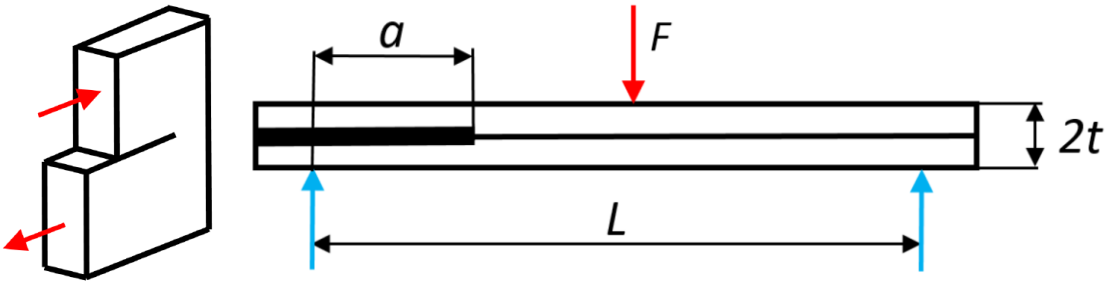
$$G_{iC} = \frac{3F_C\delta_C}{2b(a+\Delta)} \qquad (21)$$

kde:
G_{Ic} *... energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu I*
F_c *.... kritická hodnota síly při iniciaci porušení*
δ_C *... příslušné kritické posunutí*
b *.... šířka vzorku*
a *.... délka trhliny na počátku testu*
Δ*.... korekce délky trhliny vycházející z normy*
k_I*....tuhost vrstvy lepidla*

MÓD II

Tzv. smyk (z anglického Sliding). Lepený spoj je namáhán střihem ve směru rovnoběžném k ploše lepidla a kolmo na čelo trhliny (tzv. in-plane shear).

Pro tento mód zatěžován existuje tzv. ENF test. (z anglického End-notched Flexure).



Obrázek 37 - Způsob namáhání dle módu II a vyobrazení zkoušky ENF [12]

Tento test je definován v normě:

- ASTM D7905/D7905M: Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites [25]

Z výsledků této zkoušky je možné získat hodnoty k_{II} - tuhost vrstvy lepidla a lomové houževnatosti lepidla (G_{Ic}) při zatěžování dle módu II.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 F_C \delta_C}{2b(2L^3 + 3a^3)} \qquad (22)$$

kde:
G_{IIc} *... energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu II*
F_c *... kritická hodnota síly při iniciaci porušení*
δ_C *... příslušné kritické posunutí*
b *... šířka vzorku*
a *... délka trhliny na počátku testu*
L*... vzdálenost mezi podporami*
k_{II}*… tuhost vrstvy lepidla*

Mód III a Mix mode - není blíže rozebírán v této práci. Více viz [12].

2.5 METODY PREDIKCE PEVNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ

Existuje několik možností, jak predikovat pevnost lepených spojů a každý z nich má své výhody i nevýhody.

- Experimentální testování reálných dílů
- Analytické výpočty
- MKP výpočet
  - metody kombinující běžné 1D, 2D a 3D elementy
  - kohezivní modely

2.5.1 Experimentální testování reálných dílů

Testování reálného dílu je zde myšleno ve smyslu, že použijeme metodu „kvalifikovaného odhadu“, kdy pouze na základě citu a zkušeností navrhneme lepený díl, který otestujeme přímo na reálném dílu a na základě výsledků experimentálního testování případně provedeme korekce a experiment provedeme znovu, což opakujeme, dokud nedosáhneme požadovaného výsledků. Samozřejmě je to jedna z možností, pokud nemáme možnost využít pokročilejších metod, ale tato metoda má velké množství záporů. Mezi nevýhody patří finanční a časová náročnost a testování reálných dílů, kdy je díl často znehodnocen. Navíc z výsledků experimentu nemusí být dobře patrné, co optimalizovat pro efektivní zlepšení stavu.

2.5.2 Analytické výpočty

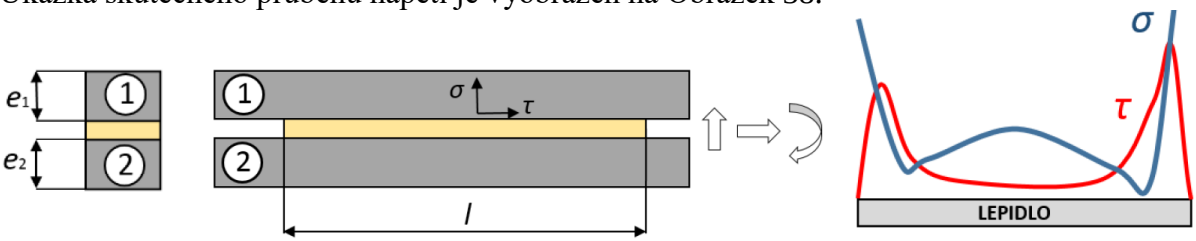
Zjednodušené lze pevnost lepeného spoje vyhodnocovat pomocí středního smykového napětí:

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} \leq \tau_{Ds} \quad ; \quad A = b \cdot l \qquad (23)$$

Kde:

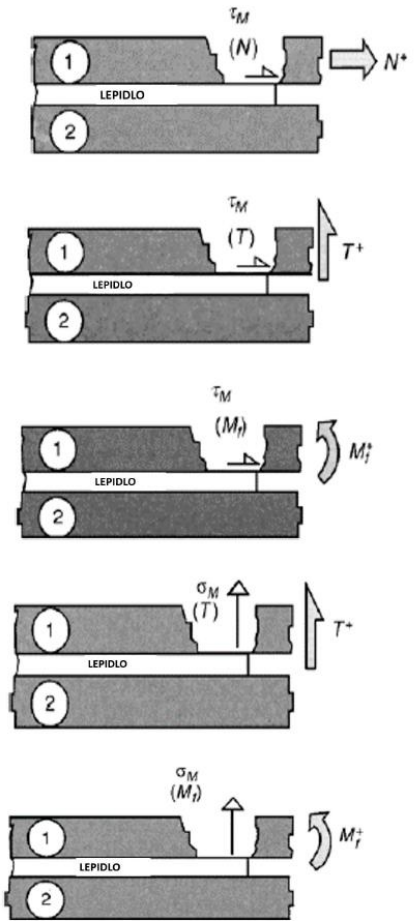
τ ... *napětí ve smyku*
τ_{Ds} ... *dovolené napětí ve smyku*
F_{max} ... *max. zatěžovací síla*
A ... *plocha lepeného spoje*
b ... *šířka lepeného spoje*
l ... *délka přeplátování*

Velikost tohoto napětí se však neshoduje se skutečným průběhem napětí ve vrstvě lepidla. Ukázka skutečného průběhu napětí je vyobrazen na Obrázek 38.



Obrázek 38 - Průběhy napětí ve vrstvě lepidla [12]

Výpočet max. napětí v krajních oblastech vrstvy lepidla v závislosti na způsobu zatížení



$$\tau_M = \frac{\alpha_1}{2\sqrt{\alpha_1 + \alpha_2}} \times N^+$$

$$\tau_M = \frac{3}{4e_1} \times T^+$$

$$\tau_M = \frac{3\alpha_1}{e_1\sqrt{\alpha_1 + \alpha_2}} \times {M_f}^+$$

$$\sigma_M = \frac{\beta_1\sqrt{2}}{(\beta_1 + \beta_2)^{3/4}} \times T^+$$

$$\sigma_M = \frac{\beta_1}{\sqrt{\beta_1 + \beta_2}} \times {M_f}^+$$

Obrázek 39 - Výpočet max. napětí v krajních oblastech vrstvy lepidla v závislosti na způsobu zatížení [1] [12]

Výpočet koeficientů:

$$\alpha_1 = \frac{G_c}{E_1 e_1 e_c}; \quad \alpha_2 = \frac{G_c}{E_2 e_2 e_c}; \quad \beta_1 = \frac{12E_c}{E_1 e_1^3 e_c}; \quad \beta_2 = \frac{12E_c}{E_2 e_2^3 e_c}, \tag{24}$$

Omezení platnosti koeficientů:

$$0.6 \leq \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad \text{a} \quad \frac{\beta_1}{\beta_2} \leq 2$$

$$(\alpha_1 + \alpha_2) \times l^2 \geq 9$$

$$(\beta_1 + \beta_2) \times l^2 \geq 4 \times 6^4 \tag{25}$$

Kde:
E_c ..... modul pružnosti v tahu lepidla
E_1, E_2 .... moduly pružnosti v tahu lepených dílů ve směru zatížení
G_c ..... modul pružnosti ve smyku lepidla,
e_1,e_2 ..... tloušťky příslušných adeherendů
e_c ..... tloušťka vrstvy lepidla

[1] [12]

Analytický výpočet DCB testu

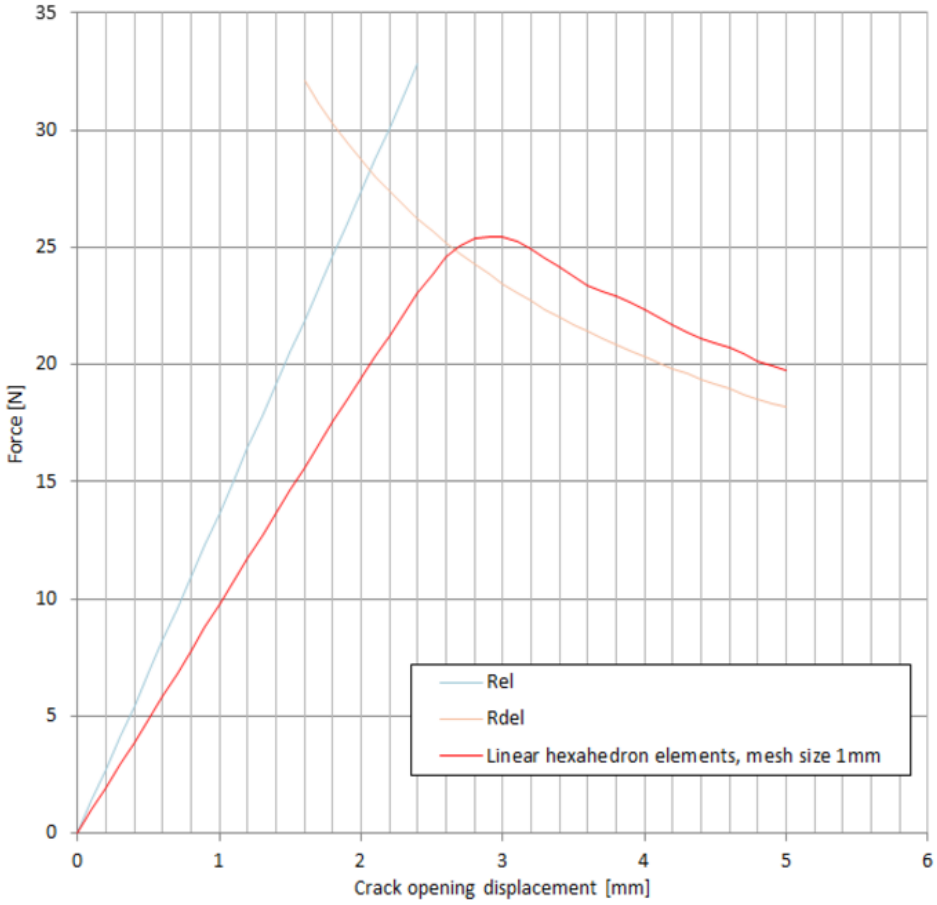
Analytický výpočet DCB testu vychází z Bernouliho nosníkové teorie a LELM [19] [20] a je popsaný rovnicemi 26 a 27. První rovnice vyjadřuje předpis průběhu napětí do porušení. Druhá rovnice vyjadřuje předpis průběhu napětí při porušování.

$$R_{el} = \frac{3}{2}\frac{E_1 I}{a_0^3}\Delta \qquad (26)$$

$$R_{del} = \sqrt{\frac{3}{2}\frac{(bG_{IC}E_1 I)^{3/2}}{E_1 I \Delta}} \qquad (27)$$

kde:
R_{el} *... Napětí [MPa] (před prvním porušením)*
R_{del} *... Napětí [MPa] (při porušování)*
E_1 *... Youngův modul pružnosti v tahu lepeného materiálu, ve směru 1 [MPa]*
I *... Kvadratický moment průřezu v ohybu – lepeného materiálu [mm^4]*
a_0 *... Počáteční délka trhliny [mm]*
Δ *... Korekce vycházející z normy [1/mm] ASTM D5528*
b *... Šířka vzorku [mm]*
G_{IC} *... Energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu I [J/m^2]*

Na Obrázek 40 je znázorněno porovnání analytického a numerického řešení.



Obrázek 40 - Srovnání Analytického a Numerického řešení [19]

2.5.3 Pomocí MKP - Metody kombinující běžné 1D, 2D a 3D elementy

V MKP analýze lze pro idealizaci vrstvy lepidla použít běžné prvky pro konečno-prvkové analýzy. Prvkům jsou definovány materiálové vlastnosti, které buď získáme od výrobce, nebo se zjišťují pomocí experimentálních měření. Vrstvu lepidla lze nahradit 2D, 3D elementy, kontaktem, systémem lineárních pružin, nebo prvky, které zjednodušeně nahrazují lepení, například prvek SSG v softwaru Siemens NX, či prvek TIE v softwaru Abaqus.

Těmito prvky lze popsat jen lineární oblast kohezivního chování lepidla do iniciace porušení. Oblast vývoje porušení tyto prvky neumožňují modelovat [12].

2.5.4 Pomocí MKP - Metody s využitím kohezivních elementů/kontaktu

Často implementovanými metodami do komerčních programů bývají metody VCCT a CZM, popřípadě jejich deriváty, jako např. Discrete cohesive zone model a Continuous cohesive zone model. Porušení kohezivního rozhraní lze také modelovat pomocí rozšířené metody konečných prvku XFEM [13].

Virtual crack closure technique (VCCT)

Metoda VCCT je podobná metodě CZM. Metoda VCCT využívá principu lineární elastické lomové mechaniky (LELM). Tuto metodu lze použít jen, pokud je v modelu již zavedena trhlina a i při kombinovaném namáhání existuje pouze jedno čelo trhliny. V tomto modelu lze popsat jen šíření jedné existující trhliny, nelze jí popsat vznik náhodné trhliny. Parametrem popisujícím šíření trhliny je rychlost uvolňování deformační energie vnitřních sil *G*. Jako pevnostní kritérium v metodě VCCT pro obecné třírozměrné úlohy je v konečno-prvkovém softwaru Abaqus 6.14 implementováno třírozměrné B-K kritérium [13] ve tvaru:

$$\frac{G_{\mathrm{T}}}{G_{\mathrm{I}}^{c}+\left(\left(G_{\mathrm{II}}^{c}-G_{\mathrm{I}}^{c}\right)\frac{G_{\mathrm{II}}}{G_{\mathrm{T}}}+\left(G_{\mathrm{III}}^{c}-G_{\mathrm{I}}^{c}\right)\frac{G_{\mathrm{III}}}{G_{\mathrm{T}}}\right)\left(\frac{G_{\mathrm{II}}+G_{\mathrm{III}}}{G_{\mathrm{T}}}\right)^{\eta}}=1 \qquad (28)$$

kde:

$G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$

Na rozdíl od metody CZM nedochází k ovlivnění tuhosti prvku rozhraní do jeho porušení (není iniciováno poškození). Výhodou této metody je, že není nutno přesně určit rozložení napětí v okolí čela trhliny. Je-li trhlina namáhána kombinací módů I a II, lze jejich poměr určit tak, že symetrická část tenzoru napjatosti je spojena s módem namáhání I a anti-symetrická část s módem II. Obecnou nevýhodou této metody je nutnost existence velmi husté sítě výpočtového modelu a z toho vyplývající hardwarová náročnost [13].

Cohesive zone model (CZM)

Tato metoda využívá kohezivního materiálového modelu. Realizace muže být implementována pomocí kohezivního kontaktu nebo kohezivních prvků. Na Obrázek 41 je znázorněn rozdíl mezi kohezivním kontaktem a kohezivními prvky. Konstitutivní vztahy mezi napětím a posuvem jsou označované jako *traction-separation law*.

Na rozdíl od metody VCCT má CZM model konečnou tuhost a dochází zde k iniciaci poškození kohezivního rozhraní po dosažení maximálního trakčního napětí t_0 (*resisting traction*). Po dosažení tohoto napětí ztrácí spoj svoji tuhost *k* i přesto, že jsou uvažovány jen

elastické deformace. Vzájemné posuvy ve všech 3 základních směrech mezi koincidenčními uzly (nebo plochami) jsou označovány jako separace (*separation*).

Dosáhne-li separace kritické hodnoty, dochází k porušení spoje a uzly jsou rozpojeny. Konstitutivní vztahy mohou mít libovolný průběh závislosti $t - \delta$. Nejpoužívanější jsou bilineární a exponenciální závislosti. *Traction-separation law* lze pro obecný třírozměrný problém [13] zapsat jako:

$$t = K\delta \tag{29}$$

kde:
t *... vektor trakčních napětí*
K *...matice tuhosti kohezivního rozhraní*
δ *... vektor separací*

V kartézském systému os ***O*** (*nn, ss, tt*) platí [13]

$$\begin{bmatrix} t_{nn} \\ t_{ss} \\ t_{tt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{nn} \\ \delta_{ss} \\ \delta_{tt} \end{bmatrix}, \tag{30}$$

kde:
t_{nn} *[Pa] ... trakční napětí působící ve směru nn*
k_{nn} *[Pa/m] ... tuhost spoje ve směru nn,*
δ_{nn} *[m] ... separace (relativní posuv uzlu/ploch/kombinace plochy-uzlu) ve směru nn*
obdobně je tomu tak pro směry ss a tt.
Orientace uvedených směrů je vyobrazena na Obrázek 42.

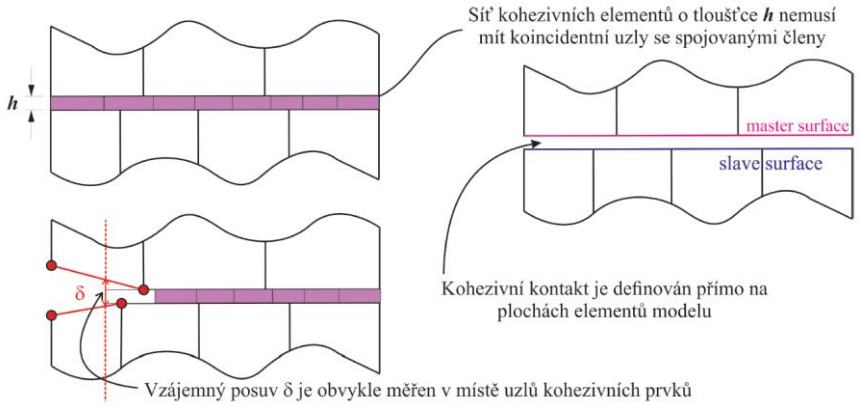
Plocha pod křivkou traction-separation je rovna kritické hodnotě parametru *Gc*.

Často používaný zjednodušený zápis [13] je:

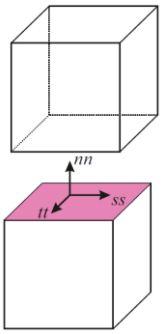
$$\begin{bmatrix} t_{nn} \\ t_{ss} \\ t_{tt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{nn} \\ \delta_{ss} \\ \delta_{tt} \end{bmatrix} \tag{31}$$

Kam jsou potřeba doplnit pouze 3, místo 9 potřebných parametrů.

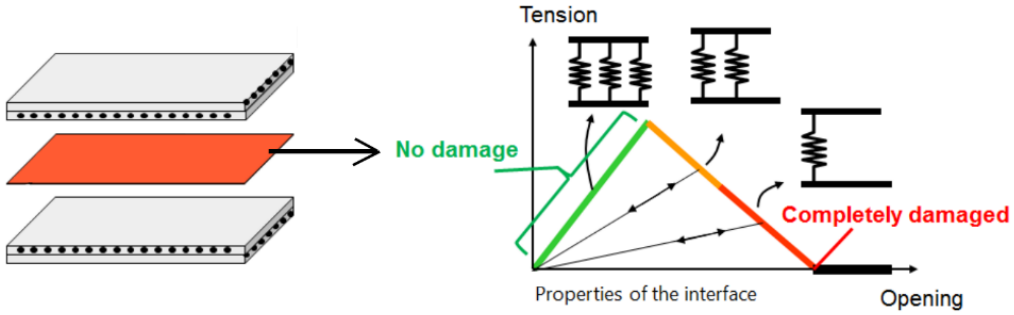
Na Obrázek 41 je znázorněn rozdíl mezi kohezivním kontaktem a kohezivními prvky. Obrázek 43 zobrazuje princip kohezivního modelu, který si můžeme představit, jako soustavu pružin, u kterých dojde při překročení určitého zatížení k přerušení.



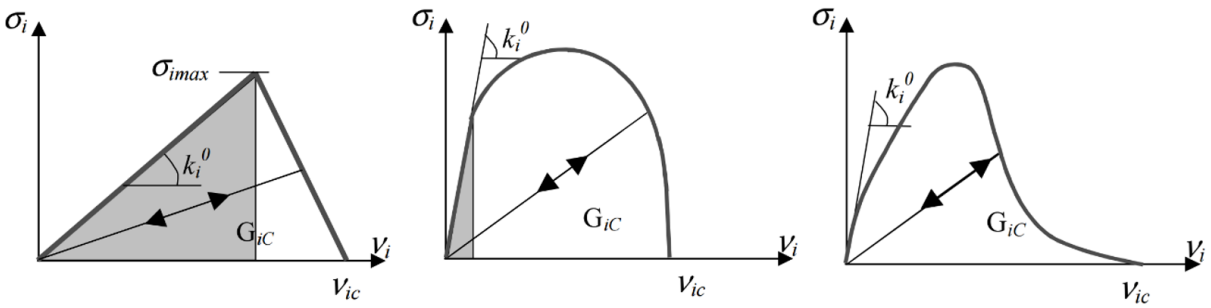
Obrázek 41 - Kohezivní prvky a kohezivní kontakt [13]



Obrázek 42 - Souřadnicový systém os O (ss, nn, tt) [13]



Obrázek 43 - Princip kohezivního modelu [21]



Obrázek 44 - Konstitutivní zákon se změkčením - bilineární, polynomický a exponenciální průběh $\sigma_i - v_i(t-\delta)$ [21]

3 NÁVRH METODIKY PREDIKCE PEVNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ

Popis metodiky

Při návrhu lepeného spoje bývá jako vstup zadána geometrie a materiál obou lepených dílů, na základě čehož byla vytvořena specifikace požadavků.
Jedním z prvních kroků při návrhu lepeného spoje bylo získání potřebných mechanických vlastností materiálů, které požadujeme slepit (E, G, ν atd.). Buď může být využito hodnot garantovaných výrobcem materiálu, nebo se ideálně provedou experimentální zkoušky materiálu. Poté může být navrženo několik možných povrchových úprav, kde záleží nejen na zajištění dobré přilnavosti (adhezivních vlastností) lepidla, ale např. i na tom, zda požadavky vyžadují nějaký stupeň protikorozní ochrany.
Na základě vlastností lepených materiálu a požadavků na lepený spoj může být z katalogových listů, na základě doporučení výrobcem, nebo na základě předchozích zkušeností, zvoleno vhodné lepidlo. Zde by bylo spíše výjimkou, pokud by v katalogovém listu byly uvedeny všechny potřebné parametry lepidla. Pokud se nepodaří najít potřebné parametry v odborných článcích, standardně je pro zjištění těchto parametrů nutno provést experimentální testování, které bylo provedeno v tomto případě.

Získání pevnostních vlastností lepidla

Pro kompletní návrh/ověření pevnosti lepeného spoje je potřeba stanovit kohezivní a adhezivní vlastnosti lepidla. Samozřejmě ne ve všech případech jsou adhezivní vlastnosti zapotřebí, záleží zde na způsobu zatěžování lepeného spoje [7].
Před samotným zjišťováním potřebných kohezivních vlastností lepidla bylo důležité stanovit, jakým způsobem bude lepený spoj zatěžován.
Z hlediska možného porušení lepených spojů jsou rozeznávány tzv. 3 základní módy porušení a dále tzv. mix mód, což je kombinace základních módů (viz. kapitola 2.4.2 Módy porušení). Pokud je znám mód porušení, na základě toho je vybrána odpovídající normalizovaná zkouška (DCB dle ASTM D5528-01 [24], ENF dle ASTM D7905 [25], …). Pro možnost realizace experimentálního testování bylo nutné vyrobit zkušební vzorky dle normy a vzorky slepit. Poté může následovat testování, které je prováděno většinou na trhacím stroji s příslušným příslušenstvím.

Po provedení zkoušek následovalo jejich vyhodnocení. V první fázi bylo provedeno vykreslení průběhů grafů jednotlivých vzorků. V případě, že se nějaký/é vzorek/y extrémně vymyká/jí oproti ostatním, je vhodné zhodnotit, zda nebyl u vzorku přítomen nějaký defekt, jako např. kavity v lepidle, nebo nevhodná technologie lepení (např. neočištěné přetečení lepidla, které vzorek vyztuží, na základě čehož může být vzorek vyřazen ze statistiky). Pokud jsou připravena odfiltrovaná data, tyto data jsou zprůměrována, z čehož je získán průměrný průběh závislosti síly na prodloužení.

Nyní musí být z těchto průběhů stanoveny požadované mechanické parametry lepených spojů, přesněji: k_I, k_{II}, k_{III}, G_{IC}, G_{IIC}, G_{IIIC}, případně jejich poměr v případě mix módu (záleží na módu zatížení). Tyto parametry byly získány tak, že byl pomocí MKP vytvořen kohezivní model odpovídající zkoušky, kam byly zadány vlastnosti lepených materiálů, rozměry vzorků a prvotní „odhad“ výše uvedených požadovaných parametrů (příp. je možné pro stanovení prvotního odhadu využít předchozí měření lepených spojů s podobnými vlastnostmi). Po vypočtení tohoto modelu byl získán jakýsi první průběh závislosti F-Δl. Dle tvaru tohoto průběhu byla provedena korekce vstupních parametrů k_i, G_{iC} a tento proces byl opakován,

dokud se výsledky z modelu dostatečně nepřiblížili průběhům z experimentálního testování. Když bylo dosaženo dostatečné shody výstupů z kohezivního modelu a experimentu, byly prohlášeny dané parametry k_i, G_{iC} za finální.

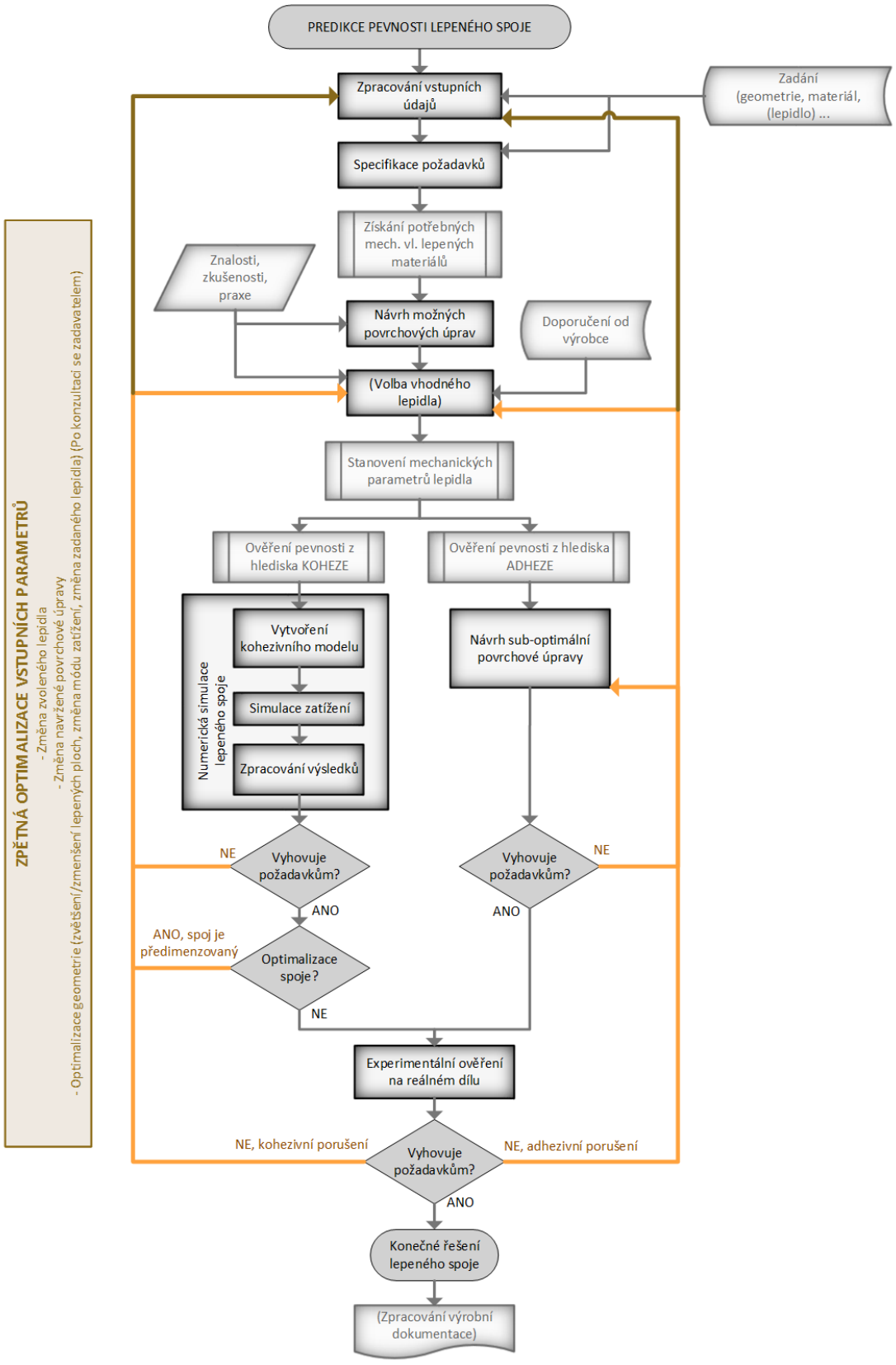
U adhezivních vlastností lepených spojů je to trochu něco jiného, jelikož neexistuje triviální model, jak do výpočtu zahrnout vliv drsnosti povrchu. Proto byl navržen následující postup. Již výše byly navrženy možné povrchové úpravy jednotlivých lepených materiálů. Byly tedy vyrobeny zkušební vzorky přeplátovaného spoje *(lap-joint)*, dle normy ASTM D5868 [26], od každé z těchto navržených povrchových úprav, které byly podrobeny zkoušce tahem, kde lepidlo bylo na přeplátovaném spoji namáháno na smyk. Z této zkoušky byl získán průběh F-Δl. Δl byla pro nás nyní relevantní, navíc zde byl zahrnut výrazný vliv deformace spojovaného materiálu. Zde byla vyhodnocována hlavně maximální síla do porušení spoje přepočtena na střední hodnotu smykové pevnosti, respektive její porovnání pro různé povrchy.

Návrh z hlediska Adheze
Je-li známa velikost lepené plochy a požadovaná síla, kterou má lepený spoj přenést, může být dopočtena minimální požadovaná pevnost v adhezi, která může být dále srovnávána s pevnostmi jednotlivých povrchových úprav. Může zde být tedy zvolena vhodná povrchová úprava tak, aby byl zajištěn přenos potřebné síly, nebo může být naopak na základě zvolené povrchové úpravy dopočtena minimální potřebná plocha lepeného spoje.

Pokud je možné z navržených povrchových úprav nějakou zvolit a je zvolena, může být pokročeno dále. Pokud žádná z navržených úprav nevyhovuje, je zde možnost vrátit se k návrhu povrchových úprav a navrhnout nějakou další, která nebyla zprvu navržena např. kvůli technické, nebo finanční náročnosti. Druhou z možností je vrátit se až ke vstupním hodnotám a po dohodě se zadavatelem optimalizovat geometrii (např. zvětšení lepené plochy), nebo změnit materiál lepených dílů, nebo změnit lepidlo a proces zcela, nebo z části opakovat.

Návrh z hlediska koheze
V předchozích krocích byly na základě experimentálního testování a následného vyhodnocení získány všechny, nebo některé z parametrů: k_I, k_{II}, k_{III}, G_{IC}, G_{IIC}, G_{IIIC}, případně jejich poměr v případě mix módu. Nyní již mohl být vytvořen kohezivní model řešeného lepeného spoje, kam byly definovány mechanické parametry lepidla právě pomocí parametrů získaných dříve. Pokud lepený spoj dle kohezivního modelu nevyhoví, je zde opět možnost vrátit se zpět k volbě lepidla, kde může být zvoleno lepidlo s vyšší pevností, nebo opět po dohodě se zadavatelem mohou být upraveny vstupní hodnoty. V případě, že lepený spoj dle výsledků z kohezivního modelu vyhoví, může nás zajímat fakt, zda není tento lepený spoj příliš předimenzovaný. Například zda by nestačila menší slepená plocha, nebo zda nepoužít levnější méně pevné lepidlo, přičemž obě varianty by vedly k finanční úspoře. Vyhoví-li lepený spoj a není nutné provést další optimalizaci, může být přikročeno k dalšímu kroku.

Experimentální ověření na skutečném dílu
Poté co byl proveden návrh z hlediska adheze a z hlediska koheze, může být přikročeno k experimentálnímu ověření navrženého lepeného spoje na prototypu skutečného výrobku. Pokud zkouška nevyhoví, tzn. bude se výrazně rozcházet od výpočtového modelu, je nutné vrátit se zpět a zhodnotit postup, zda nevznikla někde v procesu návrhu chyba, nebo zda nebyla zvolena malá míra bezpečnosti. Pokud experimentální ověření vyhoví, bylo dosaženo finálního řešení a může být zpracována výrobní dokumentace pro lepení dílů.



Obrázek 45 - Vývojový diagram navržené metodiky

Vývojový diagram metodiky je podrobněji a na větším formátu vyobrazen v: Příloha č. 5.

4 APLIKACE NAVRŽENÉ METODIKY

Pro aplikaci bylo zadavatelem zvoleno zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8. Tento produkt již společnost Mubea sériově vyrábí, ale to nebrání tomu, aby na něm mohla být otestována navržená metodika. Lepený spoj byl při návrhu křídla počítán zjednodušeně jako vrstva epoxidové pryskyřice a bylo zde vyhodnocováno redukované napětí srovnávané s pevností lepidla z datasheetu. Kohezivní model by měl chování lepeného spoje ověřit s vyšší přesností. Pokud se budou výsledky lišit, bude následně provedena optimalizace lepeného spoje.

4.1 ZADANÉ VSTUPNÍ HODNOTY

Zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8

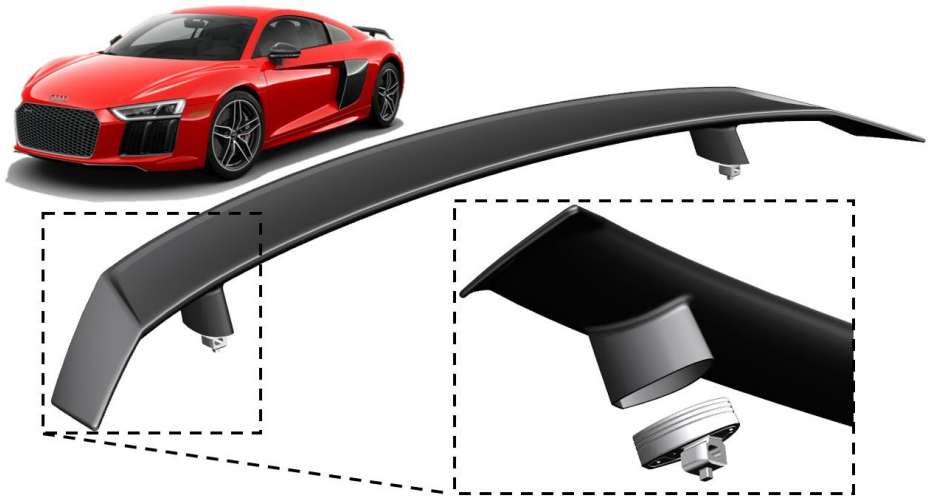
Zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8 je vytvořeno z prepregů se skelnou a uhlíkovou tkaninou. Tento laminátový kompozitní díl je formován jako celek za využití vícedílné negativní formy. Do nohou křídla má být následně vlepovaný insert ze slitiny hliníku EN AW 7075 T6, přičemž je požadována protikorozní ochrana insertu proti povětrnostním vlivům. V tomto případě je zadáno i lepidlo, které má být použito, konkrétně se jedná o lepidlo Scotch-Weld DP-490 výrobce 3M, jelikož ho společnost Mubea již používá ve své produkci a má s ním dobré zkušenosti. Lepidlo může být aplikováno po celém vnější ploše, která přichází do kontaktu s laminátem.

Z hlediska zátěžných stavů pro ověření min. pevnosti lepeného spoje je definována síla 3500 N, která je aplikována rovnoměrně na zadní křídlo, působící ve směru osy Z vzhůru, při níž nesmí dojít k žádnému porušení lepeného spoje, nebo jiné části přítlačného křídla.

Přítlačné křídlo je tvořeno z kombinace čtyř tkaninových a dvou rovingových prepregů, přesněji:

- CF - PREG M49/42%/370T2/CHS-12K/1250mm
- **CF - PREG M49/42%/245T2/AS4-3K/1250mm, Twill 2x2, (visual quality)**
- **GF - PREG M49/32%/600S8/GE-300/1250mm Twill 2x2, (visual quality)**
- UD - PREG MTM49-3/M40J(12K)-300 35%RV
- Dry UD - CFK Roving Eckverstärkung [45]

Z čehož dva z výše uvedených materiálů se nachází v lepené oblasti (ve výčtu vyznačeny tučným písmem).



Obrázek 46 - Zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8

4.2 SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA LEPENÝ SPOJ

Na základě zadaných vstupních údajů byla vytvořena specifikace požadovaných vlastností a jejich požadovaných hodnot. Jednotlivým požadovaným vlastnostem byla přiřazena váha, dle jejich důležitosti.

Požadované reflektované vlastnosti	Požadované hodnoty	Váha (0-4)
1. Požadavky k funkcím a účinkům (v provozní etapě)		
přilnavost lepidla k materiálu	vysoká	4
pevnost (soudržnost) vlastního lepidla	střední - vysoká	4
min. únosnost křídla	3 500 N	4
deformace při zatížení	malé	2
náročnost na zástavbu	malá	2
2. Požadavky k provozuschopnosti (v provozní etapě)		
životnost	vysoká, (min. 20 let)	4
odolnost	vysoká odolnost proti venkovním povětrnostním podmínkám	3
frekvence používání/zatěžování	velmi vysoká	3
údržba	žádná	3
provozní náklady	nulové	3
3. Požadavky k člověku (ZDRAVÍ, ERGONOMIE, HYGIENA apod.)		
zdravotní nezávadnost použitých materiálů	nevyžadováno (přípustné použití nebezpečných látek s adekvátními ochrannými pomůckami)	1
ochrana člověka při práci s nebezpečnými látkami	maximální	4
zdravotní nezávadnost výstupních materiálů	výhradně	3
čistitelnost / omyvatelnost	střední	2
design /estetičnost	nesmí narušovat estetický vzhled	2
vůně	bez nepříjemného zápachu	2
4. Požadavky k ostatním technickým prostředkům/systémům ve všech etapách (mimo provozní)		
náročnost na vývoj	střední	2
náročnost na výrobu	nízká	3
náročnost na montáž	nízká	2
5. Požadavky k akt. a reakt. mater. a ekolog. okolnímu přírodnímu systému ve všech etapách		
ekologičnost použitých materiálů	nevyžadováno (přípustné méně ekologické materiály)	1
ekologičnost výstupních materiálů	nevyžadováno (přípustné méně ekologické materiály)	1
potřeba materiálů a energií	minimální	2
množství odpadových materiálů a energií	minimální	2
6. Požadavky k manažerskému (informačnímu) systému ve všech etapách		
legislativa a závazné předpisy	neporušit	4
patenty a licence	neporušit	4
závazné normy	dodržet	3
typ výroby	sériová	2
Celkové náklady na vývoj a testování	střední	2
Celkové náklady na výrobu	nízké	3
čas. náročnost výroby vzorků a realizace zkoušek	1 měsíc	1
čas. náročnost výroby v sériové výrobě	nízká	3

Tabulka 1 - Specifikace požadavků na lepený spoj

4.3 VLASTNOSTI LEPENÝCH MATERIÁLŮ

4.3.1 Sklolaminátový prepreg - PREG M49/32%/600S8/GE-300

skladba: 8H satin
gramáž výztuže: 600 g/m^2
gramáž prepregu: 880 g/m^2
typ vláken: sklo typu E
Pevnost v tahu: 550 MPa

E_{11}	20 GPa	G_{12}	4,2 GPa	ν_{12}	0,13
E_{22}	19 GPa	G_{23}	3,7 GPa	ν_{23}	0,34
E_{33}	9 GPa	G_{13}	4,2 GPa	ν_{13}	0,13

Tabulka 2 - Vlastnosti sklolaminátu PREG M49/32%/600S8/GE-300 [42]

4.3.2 Uhlíkový prepreg - MTM57/CF3202VQ

skladba: Twill 2x2 (VQ – visual quality)
gramáž prepregu: 245g/m^2
typ vláken: uhlíková
Pevnost v tahu: 709 MPa

E_{11}	63,4 GPa	G_{12}	3,4 GPa	ν_{12}	0,29
E_{22}	60,9 GPa	G_{23}	2,1 GPa	ν_{23}	0,41
E_{33}	7,3 GPa	G_{13}	3,4 GPa	ν_{13}	0,29

Tabulka 3 - Vlastnosti uhlíkového prepregu - MTM57/CF3202VQ [43]

4.3.3 Slitina hliníku EN AW 7075 T6

Jedná se o slitinu na bázi hliníku, zinku a hořčíku. EN AW-7075 má v atmosférických podmínkách nižší odolnost proti korozi, jelikož je legována mědí.

Pevnost v tahu	min. 530 MPa
0,2% mez kluzu	min. 460 MPa
Modul pružn. v tahu – E	70 GPa

Tabulka 4 - Vlastnosti slitiny hliníku EN AW 7075 T6 [44]

4.4 NÁVRH MOŽNÝCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV LEPENÝCH MATERIÁLŮ

Sklolaminát a uhlíkový laminát lze použít bez povrchové úpravy, nebo je možné jejich povrch mechanicky zdrsnit. Dále je u laminátů možné použití různých chemických úprav lepených ploch pomocí tzv. primerů apod., ale tyto přípravky jsou vázány na konkrétní typy lepidel a použité materiály. Zde byl navržen pouze odmaštěný povrch a povrch mechanicky zdrsněný brusným papírem P80.

U slitiny hliníku byla větší možnost přípravy povrchu, v tomto případě byly zvoleny následující povrchové úpravy:

- pouze odmaštěný povrch
- pískování
- eloxování
- kataforetické lakování (KTL) s následným zdrsněním brusnou pěnou

4.5 LEPIDLO SCOTCH-WELD EXP DP490

DP490 je černé thixotropní dvousložkové epoxidové lepidlo na vyplňování mezer s mimořádně dobrými aplikačními charakteristikami. Je určeno k použití v aplikacích vyžadujících odolnost a vysokou pevnost a je vhodné zejména na konstrukci složených sestav. Tento produkt má vynikající odolnost proti teplu a povětrnostním vlivům [41].

Doba aplikace:	minimálně 1,5 hod
Doba pro dosažení manipulační pevnosti:	4 – 6 hod
Doba pro dosažení úplné pevnosti:	7 dnů
Pevnost ve střihu:	30,2 $\frac{N}{mm^2}$
Pevnost při odlupu:	160 N/25mm

Pozn.: Všechny uvedené hodnoty platí při teplotě 23°C .

Obrázek 47 - Lepidlo Scotch-Weld - DP490

4.6 STANOVENÍ MECHANICKÝCH PARAMETRŮ LEPIDLA

Lepený spoj bude v tomto případě zatěžován primárně smykem (in-plane shear), tzn. módem II. Do kohezivního modelu jsou však zadávány parametry pro všechny módy porušení i přesto že je zde počítáno pouze s jedním z nich. Aby do kohezivního modelu nebyla zadávána nereálná data, byl zde kromě módu II testován rovnou i mód I. Mód III zde testován nebyl. Pokud nejsou známy parametry pro Mód III, často se uvažují shodné s parametry módu II, i když tyto hodnoty ve skutečnosti přesně shodné nejsou. Tyto parametry bude možné využít v případě použití tohoto lepidla a materiálu při jiné aplikaci, kde bude lepený spoj zatěžován odlišným způsobem.
Jelikož se jedná o zatížení smykem, bude zde důležité zhodnotit i vliv adheze.

Navrhovaný lepený spoj bude ve skutečnosti namáhán mix módem a navíc ne jen jedním, ale hned několika zátěžnými stavy. Jelikož by byla definice všech těchto možných zátěžných stavů složitá a složité a finančně náročné by bylo i jejich testování je tato problematika zjednodušena. Zadavatel v tomto případě definuje statické zatížení křídla silou 3500 N, která je rovnoměrně rozložena po délce křídla a při které nesmí dojít k porušení lepeného spoje při zatěžování insertů ve směru osy nohy křídla.

4.6.1 Volba vhodných testovacích vzorků a zkoušek

Jak již bylo uvedeno v teoretické části, pro Mód I je doporučována standardizovaná zkouška DCB (dle ASTM D5528-01) [24]. Pro Mód II je doporučována standardizovaná zkouška ENF (dle ASTM D7905/D7905M) [25]. Těmito zkouškami je zkoumána vlastní soudržnost lepidla, tzn. jeho kohezivní vlastnosti.

Pro testování adhezivních vlastností byly navrženy vzorky dle normy ASTM-D5868-01 [26]. Jedná se o přeplátovaný spoj, který je zatěžován tahem, přičemž lepidlo je namáháno smykem.

Uvedené zkoušky byly provedeny ve výzkumném centru - NTIS - Nové technologie pro informační společnost, na stroji ZWICK/ROELL Z050.

zjišťováno	test	materiál	povrchová úprava	Mn.	rozměry vzorku
Kohezní vlastnosti	DCB	sklolaminát	zdrsněno-P80	8	T1,5 - 20x130
	ENF	sklolaminát	zdrsněno-P80	8	T1,5 - 20x180
Adhezní vlastnosti	Smyk	uhlíkový kompozit - hor.str.	pouze odmaštěno	4	T2,5 - 25x100
			zdrsněno-P80	4	T2,5 - 25x100
		sklolaminát -dol.str.	pouze odmaštěno	4	T1,8 - 25x100
			zdrsněno-P80	4	T1,8 - 25x100
		hliníková slitina EN AW 7075	pouze odmaštěno	4	T2,0 - 25x100
			pískováno	4	T2,0 - 25x100
			KTL + zdrsněno pěnou	4	T2,0 - 25x100
			Elox	4	T2,0 - 25x100

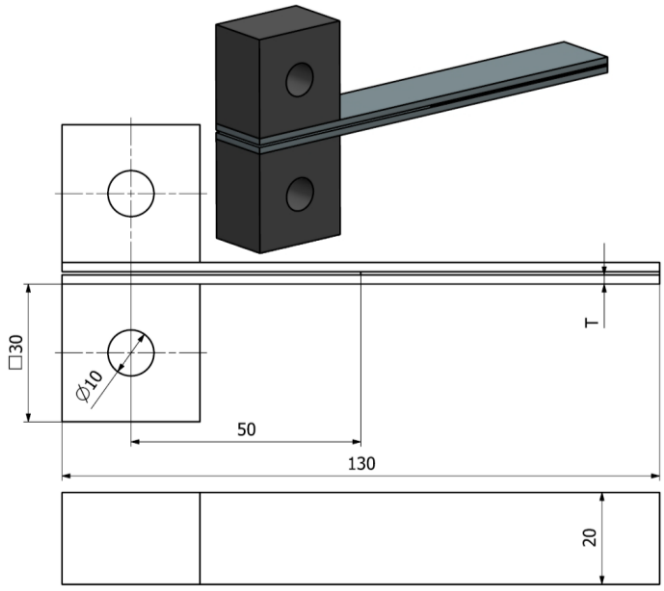
zdrsněno-P80	mechanicky zdrsněno - brusným papírem P80
zdrsněno pěnou	mechanicky zdrsněno brusnou pěnou Mirka Mirlon VF
KTL	Kataforicky lakováno - 14+/-2µm
Elox	tvrdě eloxováno dle DIN 17611
pouze odmaštěno	odmaštěno technickým lihem
Mn.	množství testovaných vzorků

pozn.: všechny typy povrchových úprav byly před lepením odmaštěny.

Tabulka 5 - Navržené testovací vzorky

DCB test

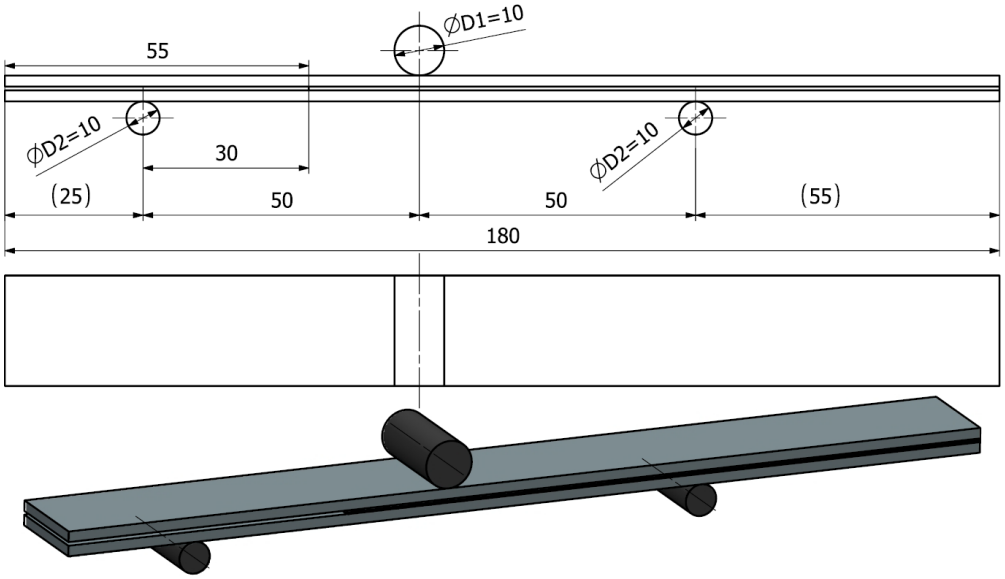
DCB test je zkouška pro testování kohezivních vlastností lepidla při módu I a proto je postačující provést tuto zkoušku pouze na jednom materiálu. Materiál obou beamů by měl být shodný. Pro tuto zkoušku byl jako materiál beamů zvolen sklolaminát s jednou pohledovou vrstvou karbonu (dle složení na reálném dílu). Vzorky pro DCB test byly navrženy dle normy ASTM D5528-01 [24].



Obrázek 48 - Rozměry navrženého vzorku pro DCB test dle normy ASTM D5528-01

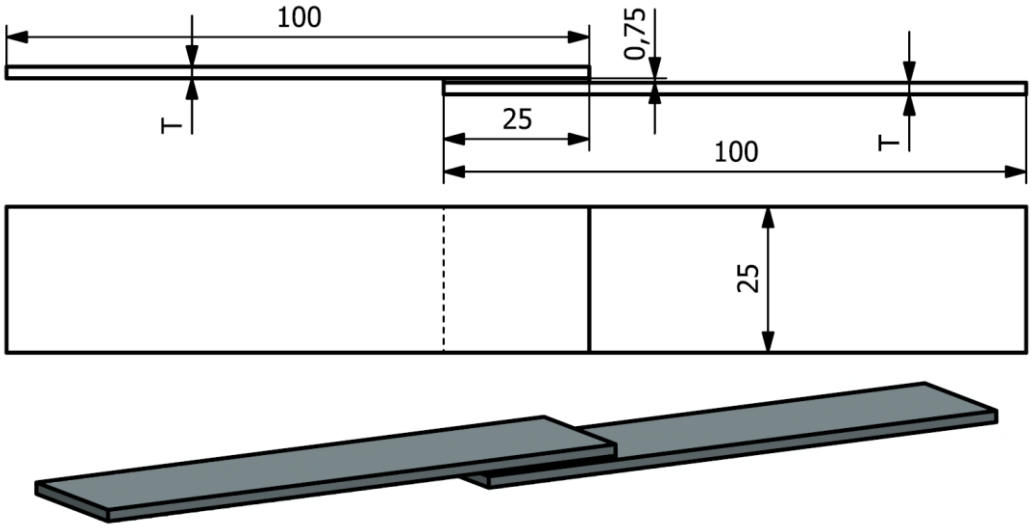
ENF test

ENF test je zkouška pro testování kohezivních vlastností lepidla při módu II a proto je postačující provést tuto zkoušku pouze na jednom materiálu. Materiál obou beamů by měl být shodný. Pro tuto zkoušku byl zvolen shodný materiál, jako u DCB testu. Vzorky pro ENF test byly navrženy dle normy ASTM D7905/D7905M [25].



Obrázek 49 - Rozměry vzorku pro ENF test dle normy ASTM D7905

Přeplátovaný spoj pro zjištění pevnosti v adhezi
Vzorky pro zkoušky adheze ve smyku byly navrženy dle normy ASTM D5868 [26]. Jedná se o přeplátovaný spoj namáhaný smykem. Bylo zvoleno několik kombinací materiálů a jejich povrchových úprav - viz. Tabulka 5.



Obrázek 50 - Rozměr vzorků pro zjištění adheze dle normy ASTM D5868

4.6.2 Návrh přípravku na lepení vzorků

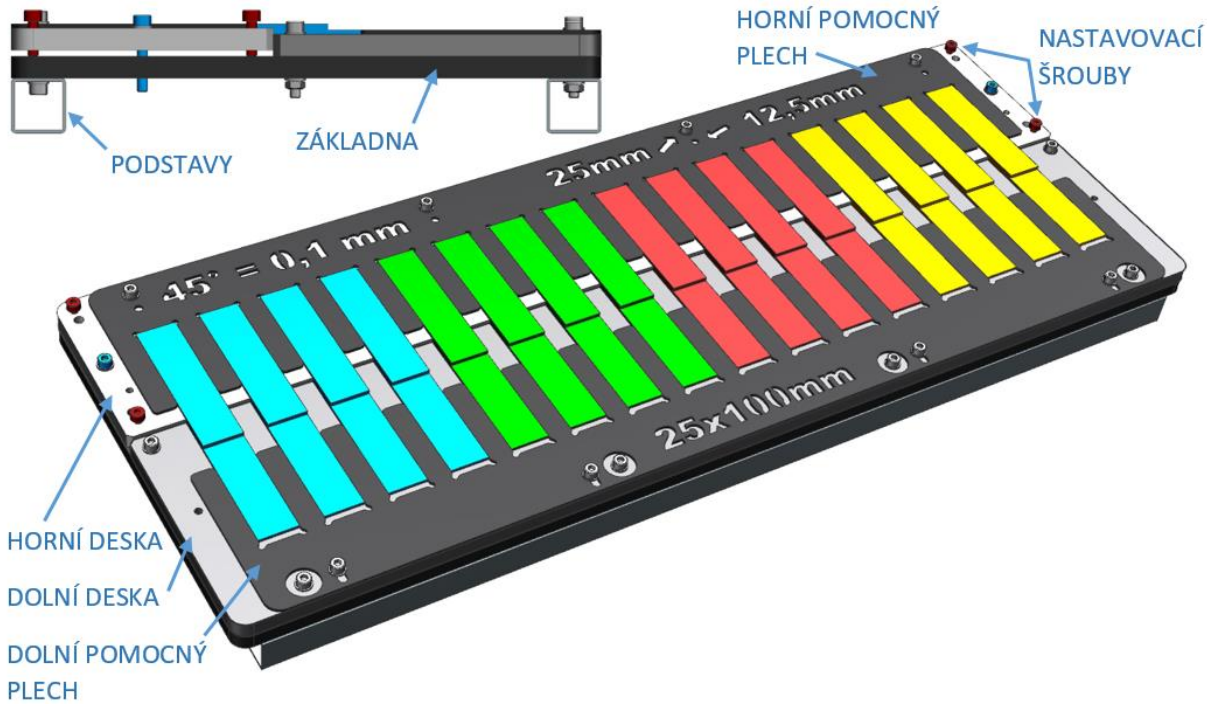
S ohledem na fakt, že se zde jedná o testování většího množství vzorků přeplátovaných spojů a je požadováno přesné ustavení lepených částí vůči sobě, byl pro lepení vzorků navržen přípravek. Přípravek byl navržen s ohledem na jednoduchou výrobu i obsluhu. Kromě vyříznutí několika závitů ručním závitníkem je celý přípravek vypálen z plechů a profilů laserovým paprskem.

Přípravek se skládá ze dvou 4HR trubek, sloužících jako podstavy, tří desek z plechu tloušťky 10mm, dvou plechů tloušťky 1,5mm a spojovacího materiálu.
Největší deska je pevně spojena se 4HR trubkami a slouží jako základna. Přední deska je pevně přišroubována k základně. Zadní deska je s ohledem na univerzálnost nastavitelná. Pomocí čtyř šroubů s vnitřním 6HR (na Obrázek 51 vyznačeny červenou barvou) se nastaví potřebná výška zadní desky, vůči přední desce (dle tloušťky vzorků a požadované tloušťky lepidla) a poté se deska zafixuje pomocí dalších dvou šroubů (na obr. vyznačeny modrou barvou). Na obou menších deskách jsou připevněny pomocné plechy, zajišťující přesné ustavení dvou lepených dílů vůči sobě.

Horním pomocným plechem je možné nastavit přesah vzorků na 12,5, nebo 25mm. Spodní pomocný plech je možno pomocí drážek posunout a přitlačit tak vzorky k čelní stěně zadní desky (vyžaduje přesnou jednotnou délku všech vzorků).

Postup při lepení vzorků v navrženém přípravku:

- Nastavení výšky zadní desky (šrouby M5x0,8 -> tzn. otočení šroubu o 45° ≈ 0,1mm změna výšky)
- Nastavení přesahu pomocí horního pomocného plechu
- Nastavení předního pomocného plechu do přední krajní polohy
- Uložení spodního dílu zkušebního vzorku (doražen k čelní hraně zadní desky)
- (případné přisunutí spodního pomocného plechu ke vzorku)
- Nanesení lepidla na lepené plochy
- Uložení horního dílu zkušebního vzorku
- Nechat lepidlo vytvrdit

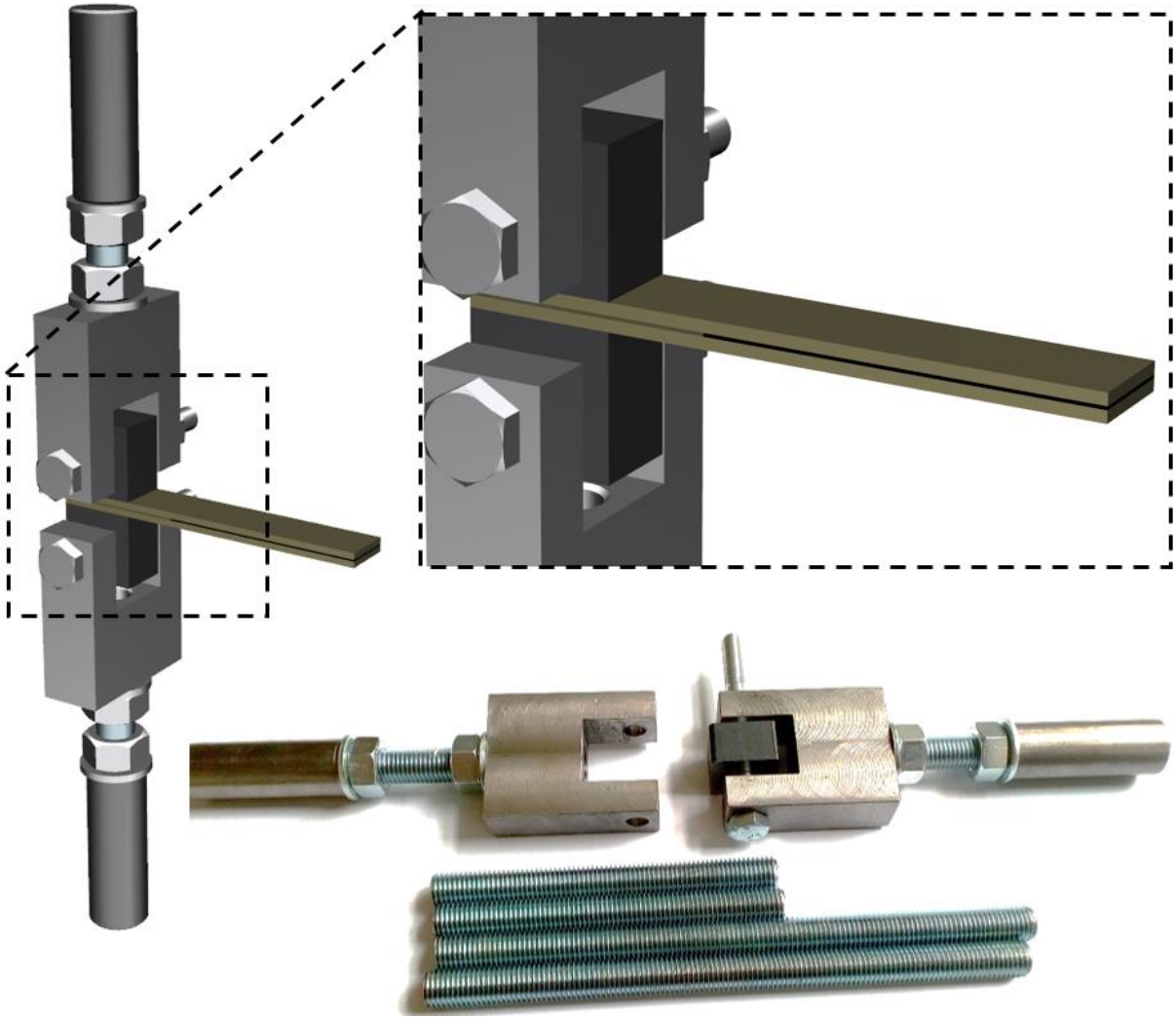


Obrázek 51 - přípravek na lepení vzorků

4.6.3 Návrh přípravku pro upínání DCB vzorků na trhací stroj

Norma ASTM D5528 připouští dva způsoby uchycení vzorku do stroje při testování. Prvním z nich je pomocí pantu, jenž má jedno křídlo přilepeno na vzorku a druhé upnuto do čelistí. Druhým možným způsobem je uchycení pomocí hranolu s dírou, který se upne pomocí čepu, nebo šroubu do čelisti. S přihlédnutím k počtu vzorků byla z ekonomického a ergonomického hlediska zvolena druhá možnost. Při tomto způsobu upnutí je výměna vzorků podstatně rychlejší, protože čelisti se ustaví pouze jednou a pak probíhá zajištění vzorků pouze zasunutím čepu/šroubu. Při použití pantů se každý vzorek vždy přesně ustavuje do čelistí tak, aby byla zajištěna souosost vzorku se směrem zatěžování.

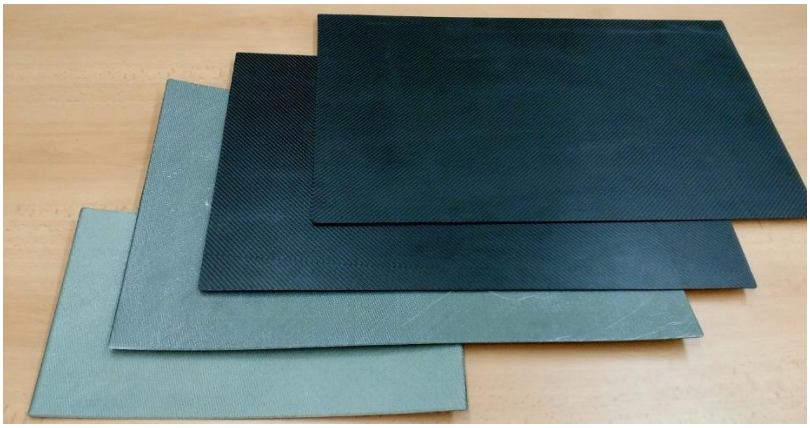
Jelikož v laboratoři, kde bude tento test prováděn, nemají přípravek pro uchycení DCB vzorků tímto způsobem, byl pro možnost upínání hranolů do čelistí stroje navržen a následně vyroben přípravek na upínání. Tento přípravek je univerzální pro různé šířky vzorků do 25mm a libovolné délky. Pomocí vložených závitových tyčí je možno čelisti přesně ustavit vůči sobě a také zvětšit světlou výšku mezi čelistmi pro možnost lepšího přístupu ke vzorkům, případnému měření a pořizování fotografií.



Obrázek 52 - Přípravek na upínání DCB vzorků

4.6.4 Výroba zkušebních vzorků

Zaprvé bylo nutné vylaminovat desky ze skelného laminátu požadovaných tlouštěk. Vzorky byly vyrobeny dle skutečné struktury na reálných dílech, tzn., je zde jedna „pohledová“ vrstva karbonu. Rovné desky se laminovali na skleněnou desku a z vrchní strany byly překryty strhávací fólií. Následně byly opatřeny jednotlivými infuzními vrstvami a za vysokého tlaku a teploty byly vytvrzeny v autoklávu. Pro zkoušky testování pevnosti lepených spojů z hlediska adheze byly zajištěny plechy ze slitiny hliníku EN AW 7075 o tloušťce 2 mm.

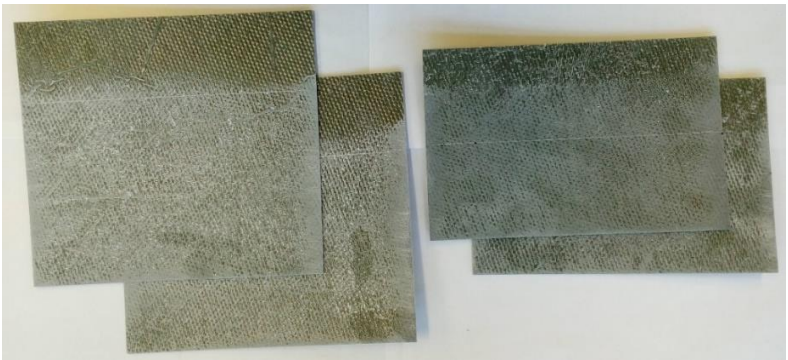


Obrázek 53 - Vylaminované kompozitní desky pro výrobu vzorků

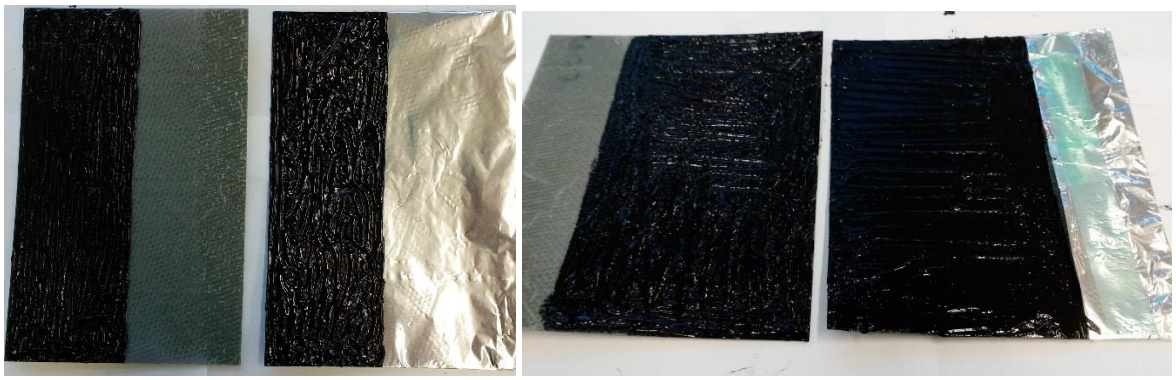
Výroba vzorků DCB a ENF

- nařezání dvou párů desek o rozměrech 200x130mm (DCB), resp. 200x180 (ENF), pomocí vodního paprsku
- Příprava lepených ploch
    - zdrsnění lepených ploch
    - odmaštění všech ploch
- slepení desek
- nařezání slepených desek na jednotlivé vzorky, pomocí vodního paprsku
- odmaštění a nalepení upínacích hranolů (pouze pro DCB)

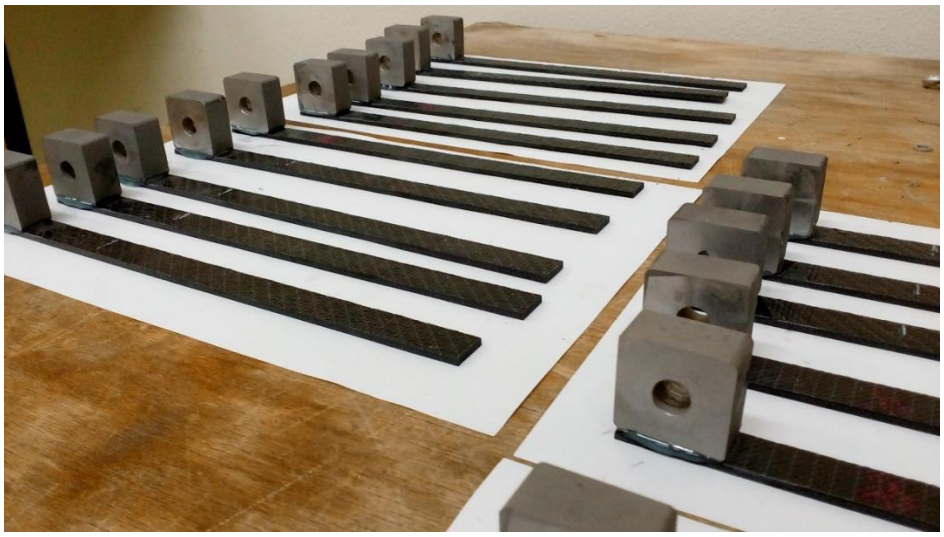
Na Obrázek 54 jsou znázorněny nařezané desky pro výrobu vzorků na ENF a EDB testy, kde je provedeno mechanické zdrsnění před slepením. Na Obrázek 55 jsou tytéž desky, s již naneseným lepidlem, kde část, která nemá být slepena, je překryta dvojitou vrstvou hliníkové fólie. Na Obrázek 56 jsou z již slepených desek nařezané na jednotlivé vzorky, na které jsou lepeny upínací hranolky.



Obrázek 54 - Nařezané desky na ENF a DCB - úprava před slepením



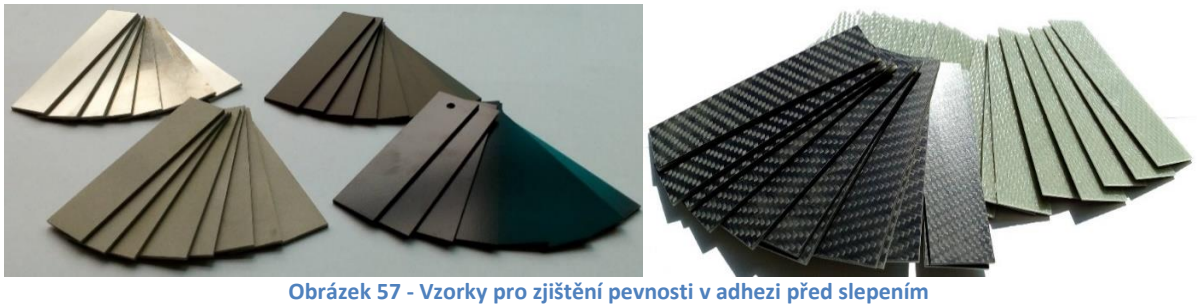
Obrázek 55 - Desky pro DCB a ENF s naneseným lepidlem, před slepením



Obrázek 56 - Lepení upínacích hranolů pro DCB test (ukázka jiných vzorků – z uhlíkové tkaniny)

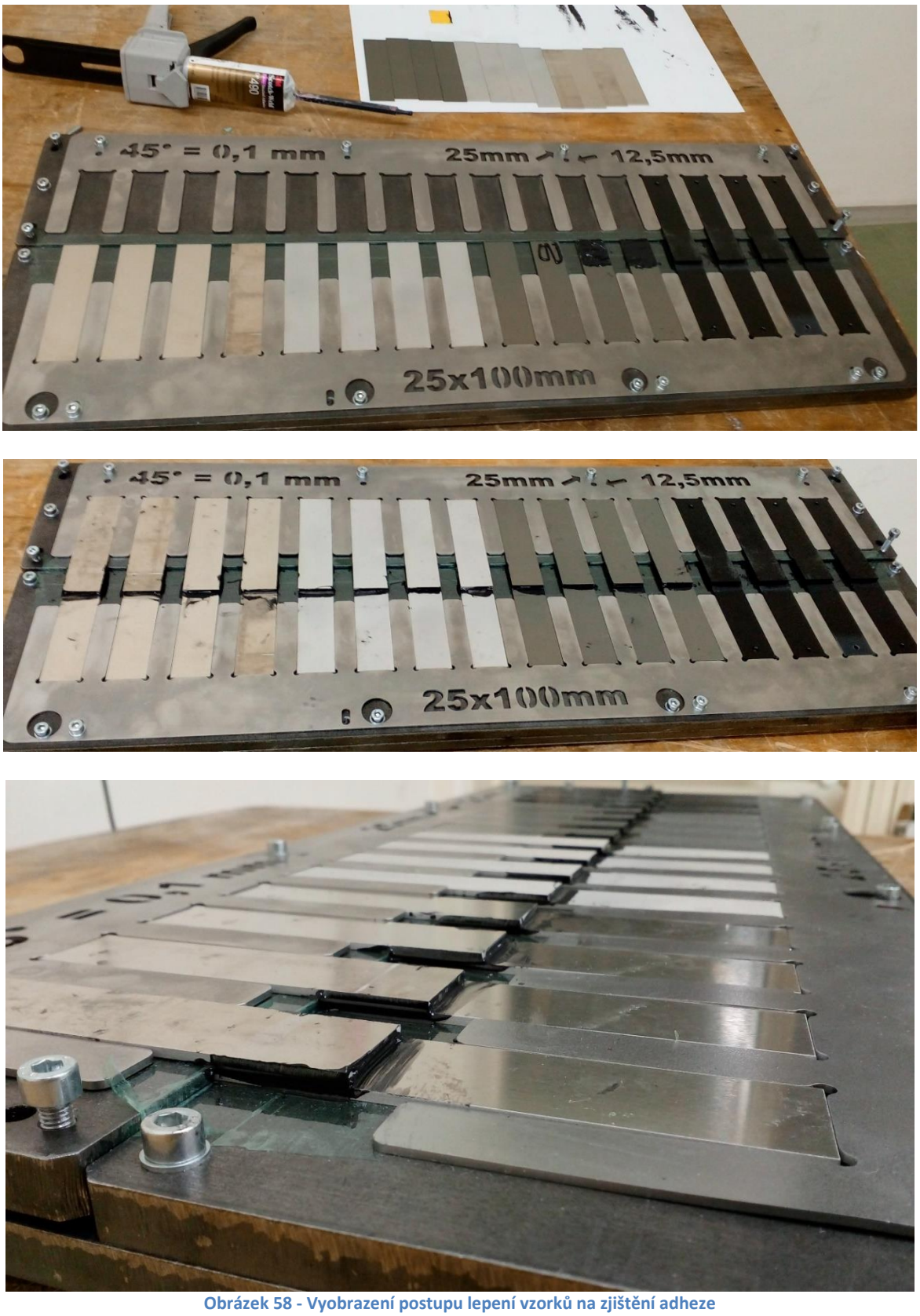
Výroba vzorků pro zjištění pevnosti v adhezi

- nařezání vzorků rovnou na konečný rozměr 25x100mm, pomocí vodního paprsku
- Příprava lepených ploch
    - zajištění - Kataforetické lakování
    - zajištění - Eloxování
    - zajištění - pískování
    - zdrsnění brusným papírem
    - odmaštění všech vzorků
- slepení jednotlivých vzorků (pomocí navrženého přípravku)



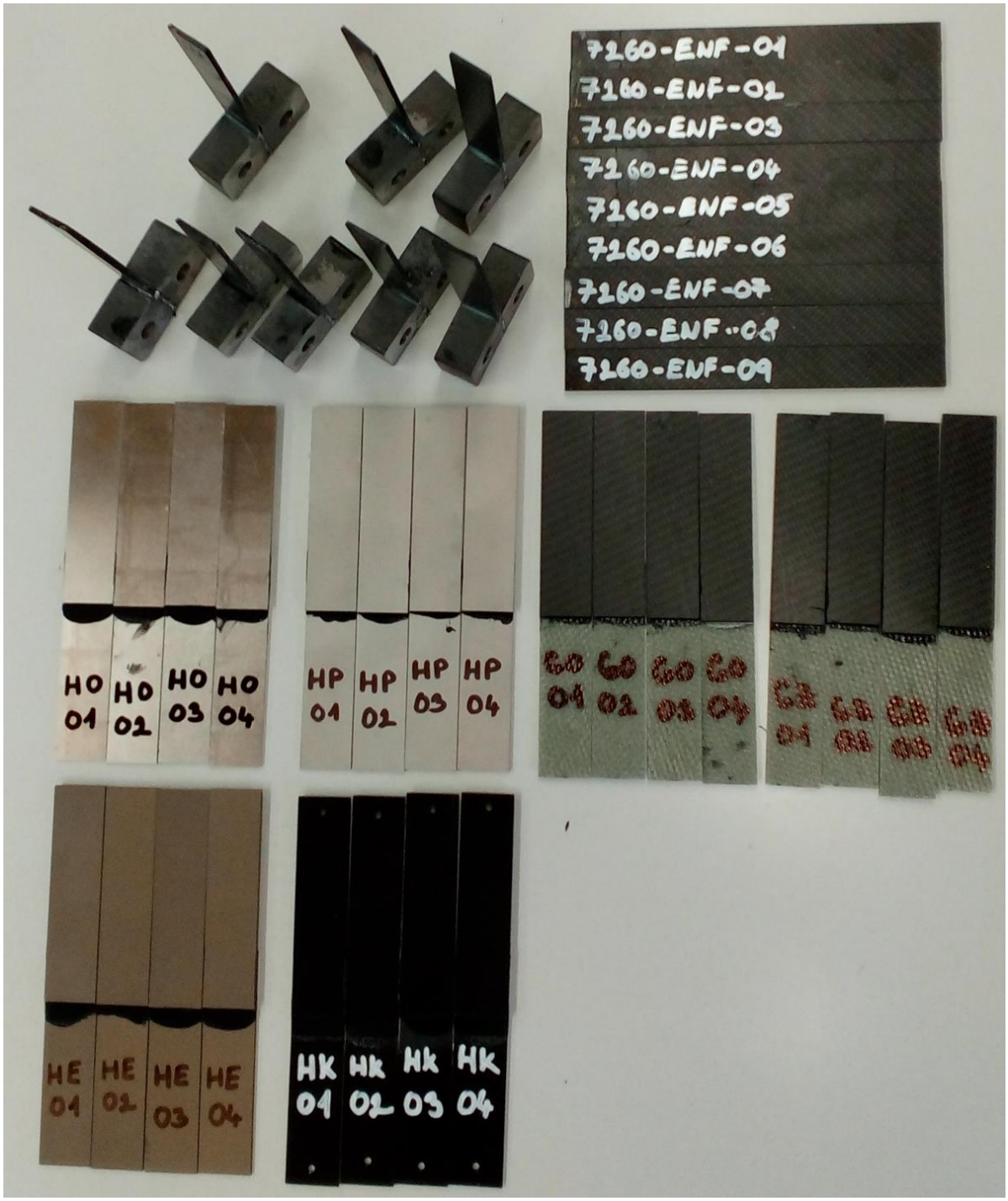
Obrázek 57 - Vzorky pro zjištění pevnosti v adhezi před slepením

Vzorky pro stanovení pevnosti v adhezi, přeplátované spoje (lap-joints), jsou nařezány rovnou na konečné rozměry a jsou na nich provedeny navržené povrchové úpravy. Jednotlivé vzorky jsou následně lepeny v přípravku. Postup lepení je znázorněn na Obrázek 58.



Obrázek 58 - Vyobrazení postupu lepení vzorků na zjištění adheze

Na Obrázek 59 jsou vyobrazeny již hotové vzorky pro DCB a ENF testy a přeplátované spoje pro stanovení pevnosti v adhezi.

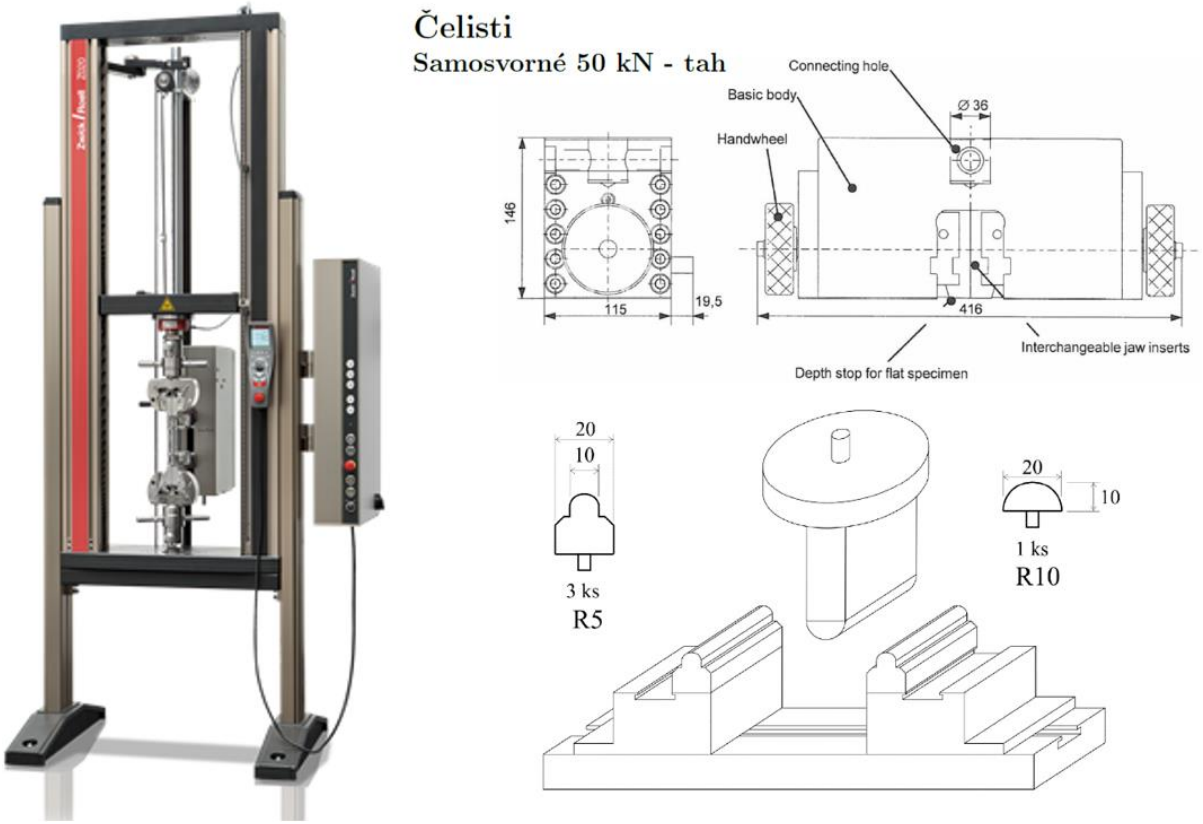


Obrázek 59 - Vyobrazení všech hotových zkušebních vzorků

4.6.5 Experimentální měření

Uvedené zkoušky byly realizovány na **stroji Zwick/Roell Z050** ve výzkumném centru NTIS při Fakultě aplikovaných věd na Západočeské univerzitě v Plzni. Jedná se o trhací stroj s maximální tažnou silou 50kN, vybavený extenzometry, několika typy čelistí, přípravkem pro tříbodový ohyb (resp. pro ENF test).

Vzorky pro DCB testy byly upínány do navrženého přípravku a ENF vzorky byly zatěžovány pomocí přípravku na tříbodový ohyb dle normy ASTM D7905/D7905M [25]. Vzorky pro stanovení adheze byly upínány přímo do čelistí troje, které je možné vůči sobě vyosit, čímž bylo eliminováno přesazení vzorků vůči sobě.



Obrázek 60 - Trhací stroj - Zwick/Roell Z050

Více o nastavení a průběhu experimentálního měření - viz. Příloha č. 1 a Příloha č. 2.

4.6.6 Vyhodnocení zkoušek adheze

Zde je vyhodnocována hlavně maximální síla do porušení spoje přepočtena na střední hodnotu smykové pevnosti, respektive její porovnání pro různé povrchy. Deformace je zde relevantní, navíc je výrazně ovlivněna vlastnostmi spojovaného materiálu.

U žádné z provedených zkoušek nedošlo k čistě kohezivnímu porušení. Z čehož vyplývá, že vlastní lepidlo je velmi pevné a při zatížení smykem bude slabým místem lepeného spoje s použitím tohoto lepidla pravděpodobně právě přilnavost lepidla k lepenému materiálu.

SK.	Č. VZORKU	síla F [N]						STŘ. HODNOTA SMYKOVÉ PEVNOSTI V TAHU [MPa]
		NAMĚŘENA	MIN	PRŮMĚR	MAX	ROZDÍL MAX/MIN		
GO	GO_01	6 949	6 949	**7 448**	7 980	1 031	15%	11,9
	GO_02	7 980						
	GO_03	7 415						
	GO_04*							
GZ	GZ_01	4 618	4 437	**4 794**	5 434	997	22%	7,7
	GZ_02	5 434						
	GZ_03	4 437						
	GZ_04	4 687						
KHO	KHO_01***		10 129	**10 343**	10 541	412	4%	16,5
	KHO_02	10 541						
	KHO_03	10 359						
	KHO_04	10 129						
KHZ	KHZ_01	8 444	7 452	**8 013**	8 444	992	13%	12,8
	KHZ_02**							
	KHZ_03	8 143						
	KHZ_04	7 452						
HE	HE_01	9 964	8 965	**9 686**	10 749	1 784	20%	15,5
	HE_02	8 965						
	HE_03	10 749						
	HE_04	9 068						
HK	HK_01	14 505	12 622	**13 879**	14 508	1 886	15%	22,2
	HK_02	12 622						
	HK_03	14 508						
	HK_04*							
HO	HO_01**		8 549	**8 673**	8 797	249	3%	13,9
	HO_02	8 549						
	HO_03*							
	HO_04	8 797						
HP	HP_01	14 894	14 185	**14 532**	14 894	708	5%	23,3
	HP_02	14 185						
	HP_03	14 401						
	HP_04	14 649						

Červeně podbarvené hodnoty jsou vyřazeny z hodnocení na základě:

* přítomnosti bubliny v lepidle, která snížila pevnost lepeného spoje

** přítomnosti neočištěných přetoků lepidla => zvětšena styková plocha (slepením z boku) => nežádoucí zvýšení pevnc

*** hodnota výrazně odlišná od třech zbylých, které jsou téměř shodné

Tabulka 6 - Výsledky testování pevnosti v adhezi

V Tabulka 6 jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty sil potřebných pro porušení zkušebních vzorků, jejichž průměrná hodnota pro danou skupinu je přepočtena na střední hodnotu pevnosti ve smyku.
Na základě těchto hodnot můžeme zvolit vhodnou povrchovou úpravu tak, abychom zajistili přenos potřebné síly, nebo naopak na základě zvolené povrchové úpravy dopočítat minimální potřebnou plochu lepeného spoje.
Je zde třeba však zdůraznit, že se jedná o zjednodušený výpočet s uvažováním středního napětí, protože ve skutečnosti napětí v lepeném spoji není po celé jeho ploše konstantní. Je tedy potřeba počítat s dostatečnou bezpečností.

Obecně bychom čekali, že se zdrsněním povrchu (a tím i zvětšením stykových ploch) se bude pevnost lepeného spoje zvětšovat. To však nemusí být vždy pravdou. Na základě několika výzkumů (např. [17], [16], [18] apod.) se ukazuje, že pro různé materiály existuje různě velká hodnota optimální drsnosti pro dosažení co možná největší pevnosti lepeného spoje. A při překročení této hranice dochází opět ke snižování pevnosti lepeného spoje.

Například zde [17] je uváděna optimální drsnost pro lepené ocelové vzorky v rozmezí hodnot Ra 0,37 až 0,48 μm, která byla dosažena brusným papírem zrnitosti 400. Nebo Budhe [16] uvádí optimální drsnost pro lepení vzorků ze slitiny hliníku Ra = 1,68 ± 0,14 um.

Na základě výše uvedeného, lze odůvodnit, proč v našich testech dosahují zdrsněné vzorky z kompozitních materiálů nižší pevnosti, než vzorky, které byly pouze odmaštěny, bez dalšího mechanického zdrsnění. Pro zdrsnění vzorků z kompozitních materiálů zde byl použit relativně hrubý brusný papír P80, kterým byl laminát porušen až na vlákna, a to umožnilo vytržení vláken z materiálu (viz. Příloha č. 1 - Průběh a výsledky zkoušek).
Z toho důvodu nelze na základě těchto výsledků konstatovat, že zdrsněný povrch laminátu vede ke snížení pevnosti. Pro nalezení optimální drsnosti daného materiálu je potřeba vytvořit velké množství vzorků s jemně odstupňovanou drsností. Pravděpodobně bychom tak našli drsnost povrchu laminátu, při které by dosahovala pevnost lepeného spoje vyšších hodnot, než u pouze očištěných vzorků. Na základě optimálních drsností jiných materiálů lze předpokládat, že bychom u laminátu měli dosáhnout spíše menší drsnosti, než jaké je dosaženo na současných vzorcích. To je však otázka dalších výzkumů a toto téma není z důvodů značného rozsahu v této práci dále řešeno. Názory na optimální drsnost laminátu se v literatuře různí, nejčastěji jsou však doporučovány brusné papíry se zrnitostí P120-P400.

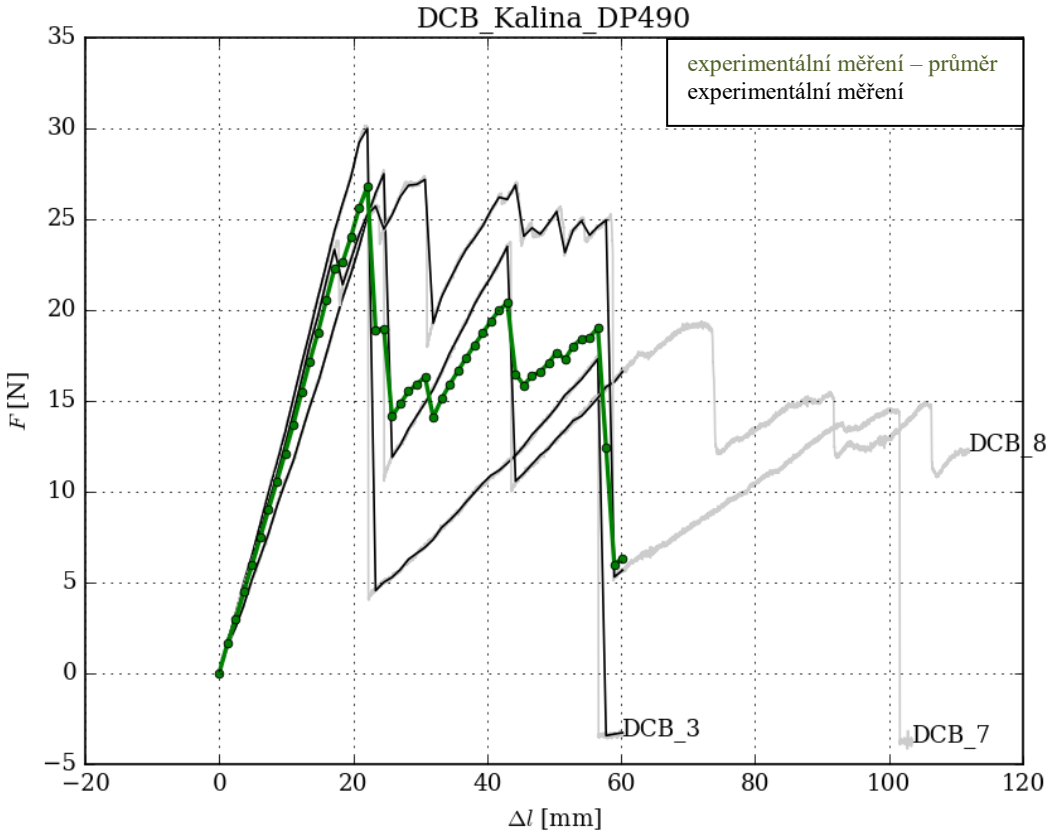
V Tabulka 6 je dále uvedeno porovnání pevnosti lepeného spoje pro různé povrchové úpravy hliníkové slitiny. Z naměřených hodnot vyplývá, že největší pevnosti v adhezi dosahují pískované vzorky. Jedná se o finančně nízkonákladnou povrchovou úpravu, avšak povrch materiálu není chráněn proti okolním vlivům. Pokud požadujeme ochranu lepeného materiálu proti vlivu okolí, jeví se jako nevhodnější použití kataforického lakování (dále pouze KTL). Taktéž se jedná o finančně relativně nízkonákladnou povrchovou úpravu, která však chrání díl i proti korozi a dalším okolním vlivům. Další v pořadí je eloxovaný vzorek, který dosahuje o 30% nižší pevnosti než vzorek s KTL, ale může být volen např. z estetických důvodů. Nejnižší pevnosti dosahuje vzorek pouze odmaštěného hliníku bez povrchové úpravy.

Podrobnější rozbor výsledků zkoušky adheze (včetně popisu způsobu porušení vzorků) je součástí: Příloha č. 1.

4.6.7 Stanovení mechanických vlastností na základě zatěžování dle módu I

Vyhodnocení DCB testů

Na Obrázek 61 jsou vyobrazena zpracovaná data z experimentálního měření. Černou barvou jsou vykresleny jednotlivé naměřené průběhy a zelenou barvou je pak vyznačena křivka vzniklá zprůměrováním naměřených průběhu.



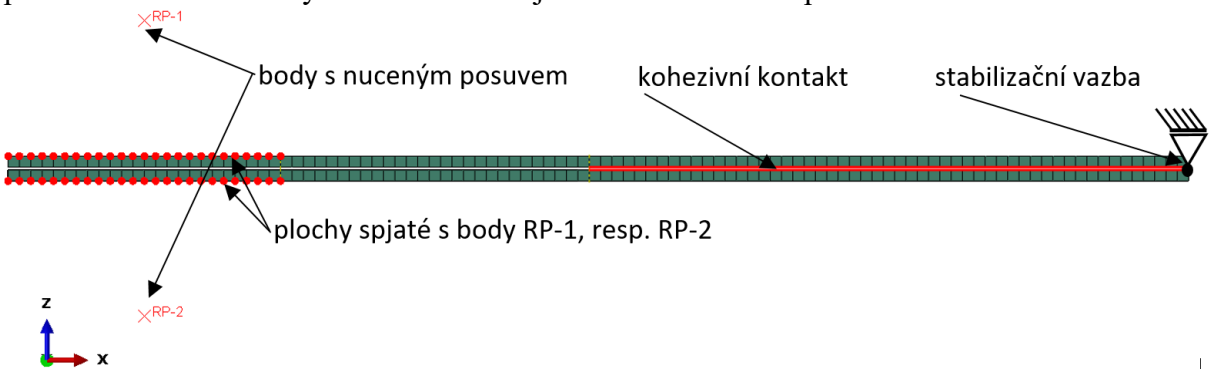
Obrázek 61 - Zpracovaná data z experimentálního měření - DCB

Dalším krokem je vytvoření kohezivního modelu odpovídajícího DCB testu, který je sestaven se shodnými podmínkami, jako při experimentálním testování. Tzn., jsou zde definovány vlastnosti materiálu, rozměry vzorku a prvotní „odhad“ výše uvedených požadovaných parametrů, které jsou postupně optimalizovány, dokud nedojdeme k požadované shodě výsledků numerického výpočtu a experimentálního měření.

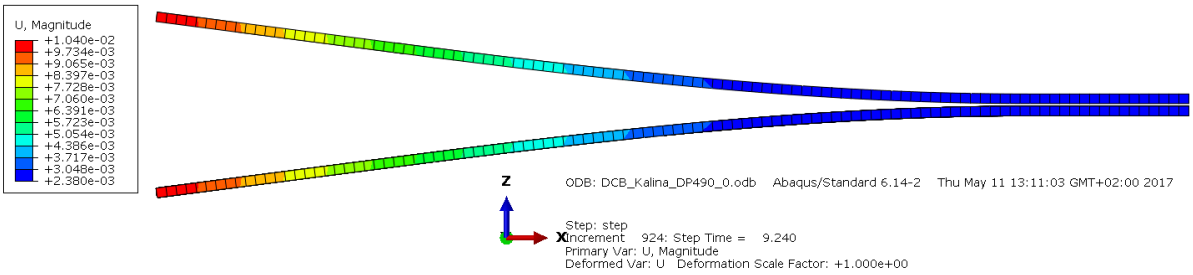
***Poznámka**: V našem případě byl pro sestavení kohezivního modelu použit skript vytvořený Ing. Tomášem Kroupou Ph.D. a Ing. Petrem Hanzlíkem z katedry mechaniky na Fakultě aplikovaných věd, ZČU v Plzni. Tento skript je napsaný ve skriptovacím programovacím jazyce Python. Tomu skriptu jsou předkládány vstupní hodnoty (rozměry, materiálová data apod. viz výše), skript sestaví výpočtový model v programu Abaqus, který spočte a výstupem je již výše zmíněný průběh závislosti F-Δl.*

Kohezivní model DCB testu

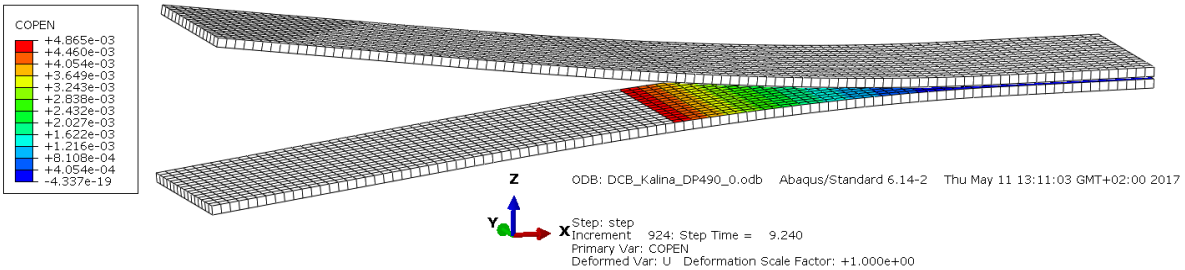
Kohezivní model je vytvořen v SW Abaqus 6.14 a jedná se o nelineární úlohu. Laminátové nosníky jsou tvořeny 3D elementy (typu BRICK) a mají definované rozměry a materiálové vlastnosti dle zkušebních vzorků (viz. Obrázek 48, Tabulka 2 a Tabulka 3), mezi nimiž je nastaven kohezivní kontakt. Upínací hranoly jsou zde nahrazeny body RP-1 a RP-2, které jsou definovány v těžištích hranolů a plochami, na které jsou hranoly na reálném vzorku přilepeny. Tyto body jsou spojeny s odpovídajícími plochami funkcí Coupling. Model je zatížen nuceným posuvem ve směru osy +/-Z v bodech RP-1 a RP-2 se shodnou hodnotou a opačnou orientací. Pro stabilizaci úlohy je na konci nosníků definována vazba zamezující posuv ve směru Z. Body RP-1 a RP-2 mají současně zamezen posuv ve směru X a Y.



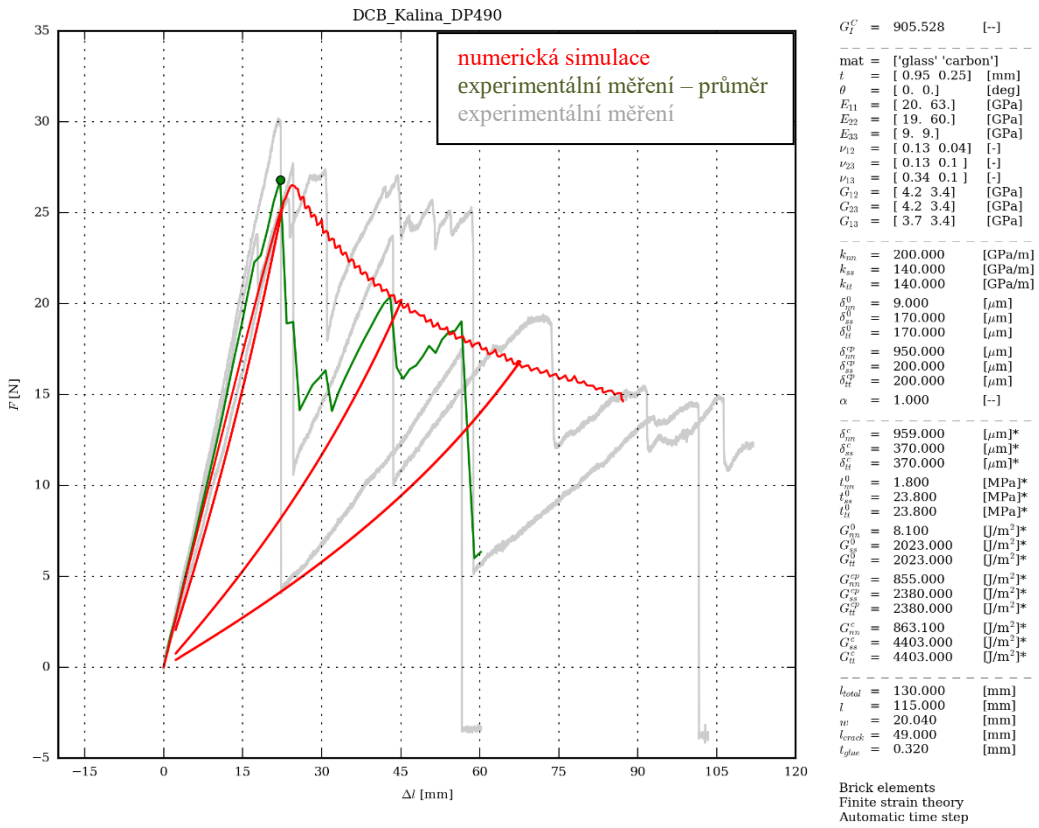
Obrázek 62 - Kohezivní model DCB testu



Obrázek 63 - Ukázka výsledů numerické simulace DCB testu - výsledky posuvů (m)



Obrázek 64 - Ukázka výsledů numerické simulace DCB testu - výsledky otevření trhliny (m)



Obrázek 65 - Srovnání výsledných průběhu z numerické simulace a zprůměrovaných výsledků experimentálního měření pro DCB test

Po několika iteracích jsme dospěli k požadované shodě výsledků numerické simulace a experimentálního testování. Získané kohezivní parametry pro mód I jsou zapsány v rovnici (32) a (33) níže.

Výsledné kohezivní parametry pro mód I:

$$G_{IC} = 905{,}5\ \frac{J}{m^2} \tag{32}$$

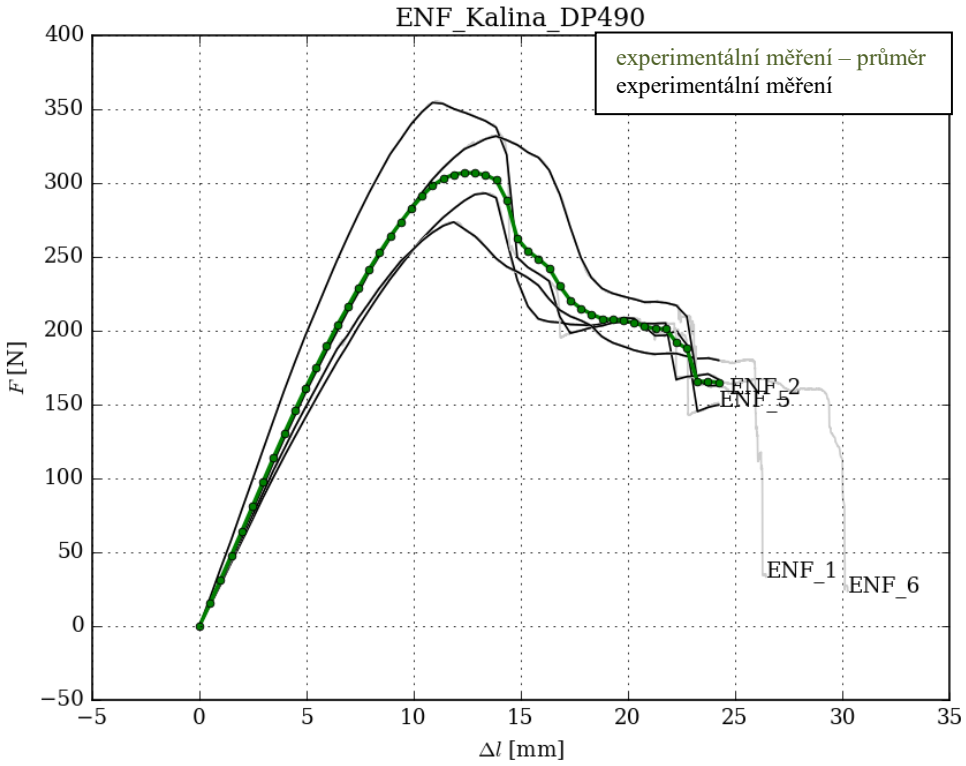
$$k_I = 200\ \frac{GPa}{m} \tag{33}$$

kde:
G_{IC} *… energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu I*
k_I *… tuhost lepidla při zatížení dle módu I*

4.6.8 Stanovení mechanických vlastností na základě zatěžování dle módu II

Vyhodnocení ENF testů

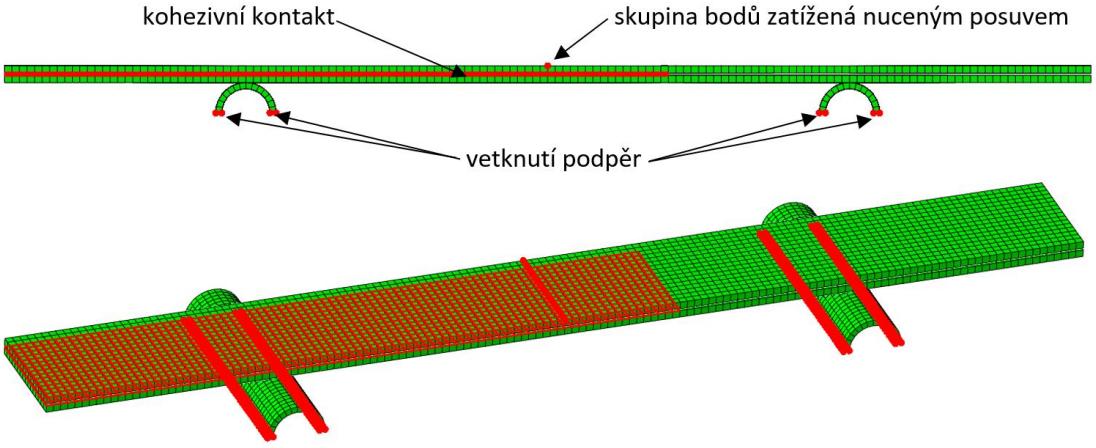
Na Obrázek 66 jsou vyobrazena zpracovaná data z experimentálního měření. Černou barvou jsou vykresleny jednotlivé naměřené průběhy a zelenou barvou je pak vyznačena křivka vzniklá zprůměrováním naměřených průběhu.



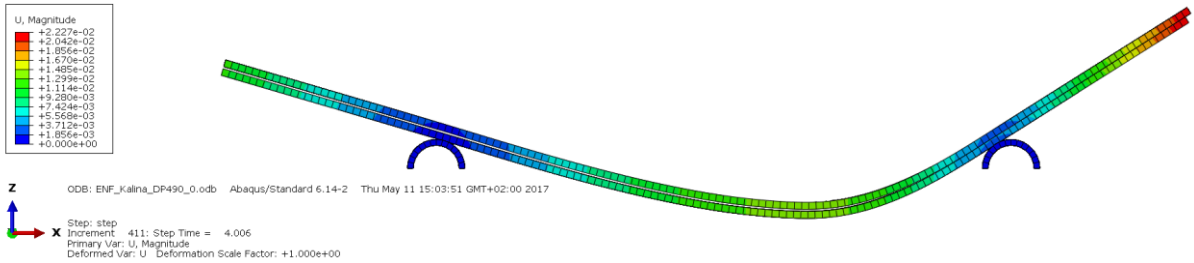
Obrázek 66 - Zpracovaná data z experimentálního měření – ENF

Kohezivní model ENF testu

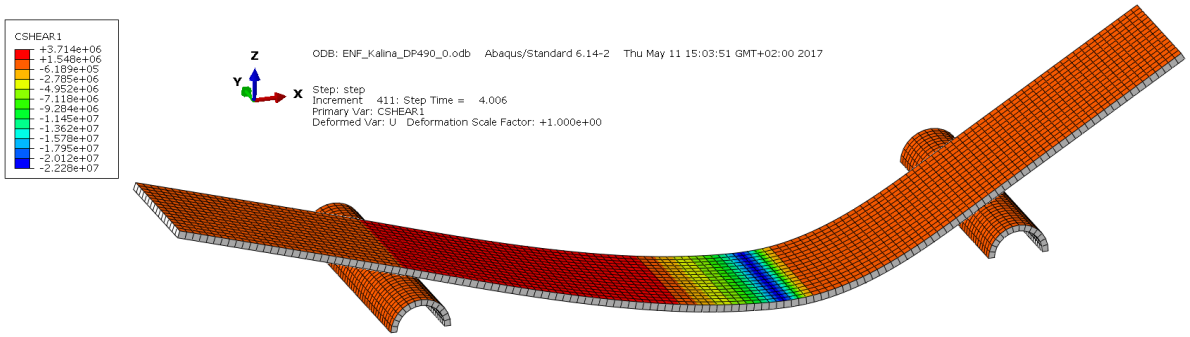
Kohezivní model je vytvořen v SW Abaqus 6.14 a jedná se o nelineární úlohu. Laminátové nosníky jsou tvořeny 3D elementy (typu BRICK) a mají definované rozměry a materiálové vlastnosti dle zkušebních vzorků (viz. Obrázek 49, Tabulka 2a Tabulka 3), mezi nimiž je nastaven kohezivní kontakt. Ve výpočtovém modelu je uvažována zjednodušená geometrie podpor, které mají definovány vlastnosti oceli. Spodní konce podpor jsou pevně vetknuty. Mezi vzorkem a podporami je nastaven kontakt. Model je zatěžován nuceným posuvem, který je aplikován na skupinu bodů v polovině mezi podporami.



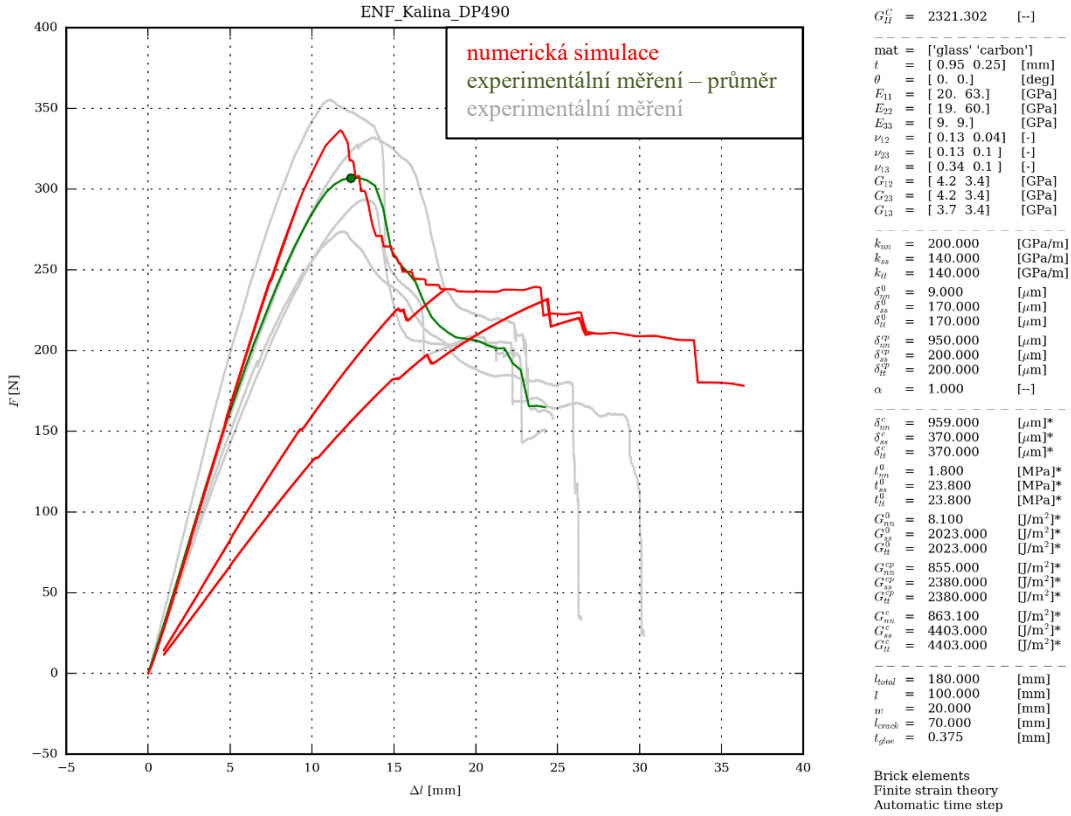
Obrázek 67 - kohezivní model ENF testu



Obrázek 68 - Ukázka výsledů numerické simulace ENF testu - výsledky posuvů (m)



Obrázek 69 - Ukázka výsledů numerické simulace - výsledky smykového napětí (Pa)



Obrázek 70 - Srovnání výsledných průběhu z numerické simulace a zprůměrovaných výsledků experimentálního měření pro ENF test

Po několika iteracích jsme dospěli k požadované shodě výsledků numerické simulace a experimentálního testování. Získané kohezivní parametry pro mód II jsou zapsány v rovnici (34) a (35) níže.

Výsledné kohezivní parametry pro mód II:

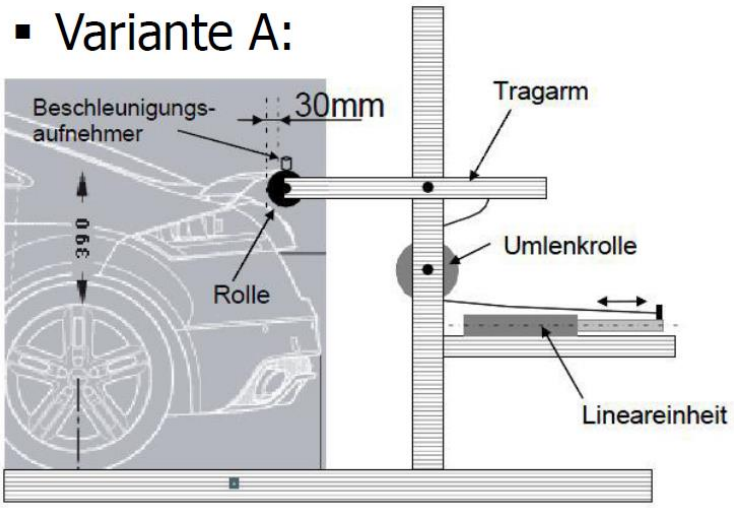
$$G_{IIC} = 2321{,}3\ \frac{J}{m^2} \tag{34}$$

$$k_{II} = 140\ \frac{GPa}{m} \tag{35}$$

kde:
G_{IIC} … *energie uvolněná při porušení kohezivní vazby při zatěžování dle módu II*
k_{II} … *tuhost lepidla při zatížení dle módu II*

4.7 STANOVENÍ POŽADOVANÉ ÚNOSNOSTI LEPENÉHO SPOJE

Dle specifikace požadavků musí přítlačné křídlo přenést kvazi-statické zatížen 3500 N. Toto zatížení je aplikováno ve směru osy insertu a při opakovaném namáhání tímto zatížením nesmí dojít k porušení lepeného spoje.



Obrázek 71 - Způsob testování křídla na voze

V numerických simulacích i následném experimentálním testování je uvažováno s kvazistatickým zatížením. Kvalita lepených spojů, a s ní spojená jejich únosnost, je ovlivněna mnoha faktory. Tyto faktory je nutno zohlednit v míře bezpečnosti navrhovaného lepeného spoje. Při stanovení míry bezpečnosti je zde vycházeno z [32b].

$$F_{S-1ins} = \frac{F_{P-k\check{r}} \cdot k_{m1} \cdot k_{m2} \cdot k_{m3}}{i} = \frac{3500 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}8 \cdot 1{,}25}{2} = 5906\ N \tag{36}$$

kde:

F_{P-1ins}	*požadovaná statická únosnost lepeného spoje*
$F_{P-k\check{r}}$	*požadovaná minimální statická únosnost přítlačného křídla*
k_{m1}	*bezpečnost zohledňující nepřesnost kohezivních a adhezivních parametrů lepidla*
k_{m2}	*bezpečnost zohledňující nedodržení předepsané tloušťky lepidla*
k_{m3}	*bezpečnost zohledňující dlouhodobé zatěžování*
i	*počet insertů na jedno křídlo*

Požadovaná statická únosnost lepeného spoje je 5906 N.

4.8 OVĚŘENÍ PEVNOSTI Z HLEDISKA ADHEZE

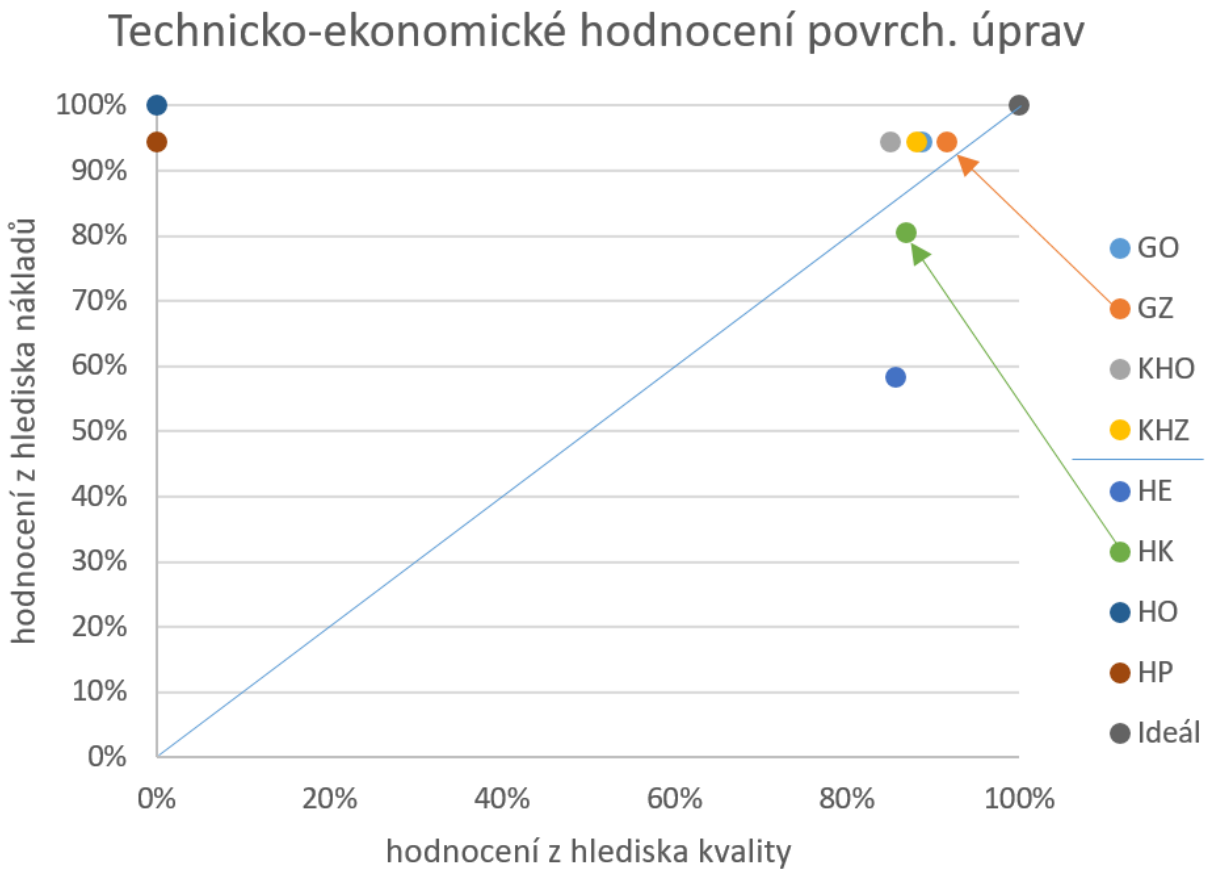
Požadovaná statická únosnost lepeného spoje je 5906N. Z CAD modelu byla odečtena maximální styková plocha insertu, která je 6 224 mm^2. Tzn., že minimální požadovaná pevnost v adhezi je teoreticky pouze 0,95 MPa. Tuto pevnost s dostatečnou rezervou splňují všechny výše navržené a otestované povrchové úpravy. Jedná se však o velké zjednodušení, protože na reálném dílu nebude lepený spoj namáhán čistě střihem a díky tvaru insertu bude rozložení napětí výrazně nerovnoměrné. Nebylo zde tedy vycházeno z absolutních hodnot, ale spíše z porovnání jednotlivých povrchových úprav vůči sobě. Pro zvolení sub-optimální povrchové úpravy bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

Technicko-ekonomické zhodnocení variant

Požadované reflektované vlastnosti	Váha (0-4)	GO	GZ	KHO	KHZ	HE	HK	HO	HP	Ideál
vysoká přilnavost lepidla k materiálu	4	2	4	2	4	3	4	2	4	4
min. přenesitelná síla 3500N, bez porušení spoje	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
malé deformace při zatížení	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
vysoká životnost (min. 20 let)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
vysoká odolnost proti venkovním povětrnostním podmínkám	3	4	4	4	4	4	4	0	0	4
zdravotní nezávadnost výstupních materiálů	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
čistitelnost/omyvatelnost	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
design/estetičnost	2	4	4	4	4	4	3	1	1	4
náročnost na vývoj	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
náročnost na výrobu	2	4	3	1	1	2	2	3	3	4
náročnost na montáž	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
potřeba materiálů a energií	2	3	3	3	2	2	2	3	2	4
potřeba příslušenství při výrobě	0	3	2	3	2	2	2	3	2	4
vznik odpadových materiálů a energií	1	3	2	3	2	2	2	3	3	4
dodržení závazných norem	4	4	4	4	4	4	4	0	0	4
vhodnost pro sériovou výrobu	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
čas. náročnost výroby v sériové výrobě	2	3	3	3	3	2	2	4	3	4
		149	154	143	148	144	146	115	119	168
		89%	**92%**	85%	88%	86%	**87%**	0%	0%	100%

Výčet jednotlivých složek nákladů	Váha (0-4)	GO	GZ	KHO	KHZ	HE	HK	HO	HP	Ideál
náklady na vývoj a testování	1	2	2	2	2	3	3	4	4	4
Výrobní náklady	4	4	4	4	4	1	3	4	4	4
Logistické náklady	2	4	4	4	4	3	3	4	3	4
provozní náklady	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
náklady na údržbu	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		34	34	34	34	21	29	36	34	36
		94%	**94%**	94%	94%	58%	**81%**	100%	94%	100%

Obrázek 72 - Technicko-ekonomické hodnocení povrchových úprav - detialy hodnocení



Obrázek 73 - Technicko-ekonomické hodnocení povrchových úprav - výsledný graf

legenda:

GO	*sklolaminát - odmaštěno*
GZ	*sklolaminát - mechanicky zdrsněno*
KHO	*uhlíkový laminát - odmaštěno*
KHZ	*uhlíkový laminát - mechanicky zdrsněno*
HE	*slitina hliníku - eloxováno*
HK	*slitina hliníku - kataforeticky lakováno*
HO	*slitina hliníku - odmaštěno*
HP	*slitina hliníku - pískováno*

Na základě provedeného technicko-ekonomického hodnocení byla zvolena jako sub-optimální kombinace povrchových úprav možnost - mechanické zdrsnění laminátu brusným papírem* a kataforetické lakování slitiny hliníku s následným zdrsněním brusnou pěnou.

*S ohledem na fakt, že při experimentálních testech byla použita nevhodná zrnitost brusných papírů, bylo zde přihlédnuto k údajům z literatury a i přes výsledky experimentálních měření bylo hodnoceno mechanické zdrsnění brusným papírem jako vhodnější, z technického hlediska, než samotné odmaštění. Je však nutné provést více experimentálních měření pro nalezení optimální drsnosti (viz. 4.6.6 Vyhodnocení zkoušek adheze).

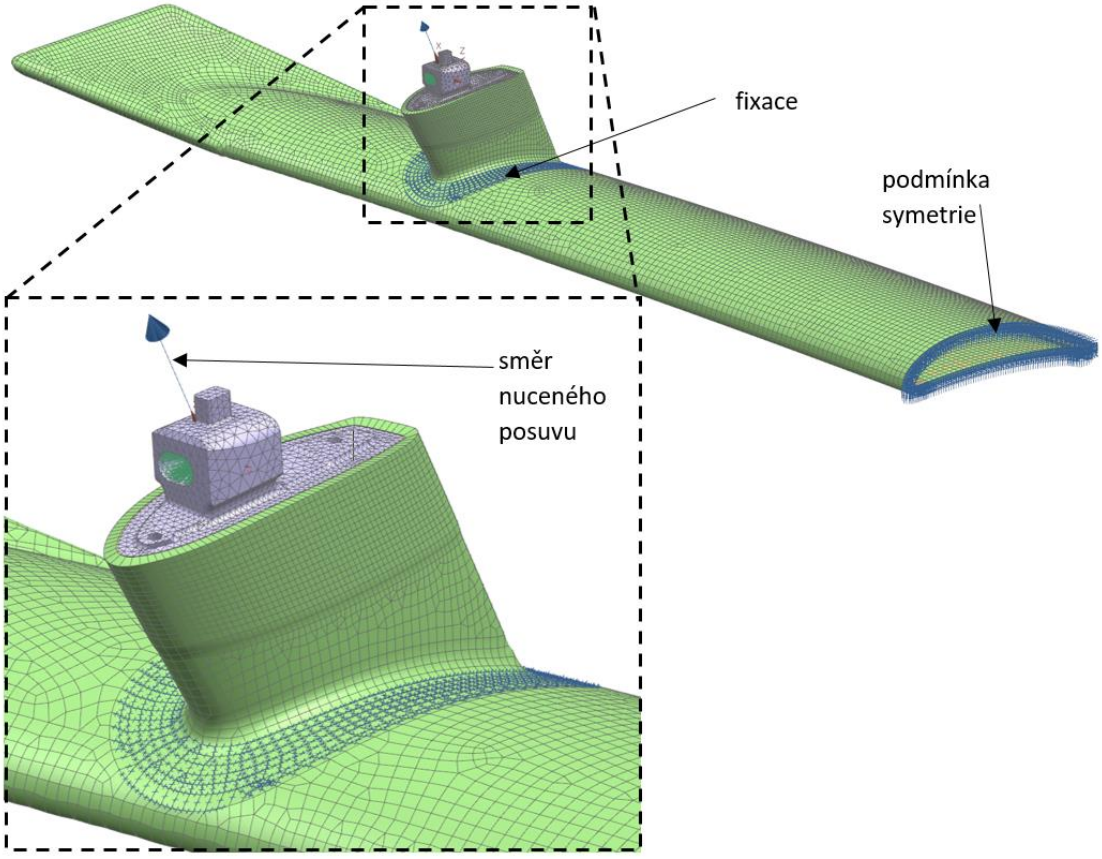
4.9 OVĚŘENÍ PEVNOSTI Z HLEDISKA KOHEZE

4.9.1 Kohezivní model přítlačného křídla

Na základě zadané geometrie v CAD modelu byl vytvořen numerický MKP model sestavy křídla v softwaru Siemens NX. Kompozitní laminát byl vytvořen za využití modulu Siemens NX Laminate Composites. Laminátový díl křídla byl vytvořen za pomoci 2D sítě (tvořené elementy CQUAD4), která byla následně extrůdována do 3D sítě (s elementy typu 3D wedge). Samotný lepený spoj byl vytvořen za pomoci tzv. kohezivních 3D elementů s definovanými fyzikálními vlastnostmi typu „cohesive damage“.

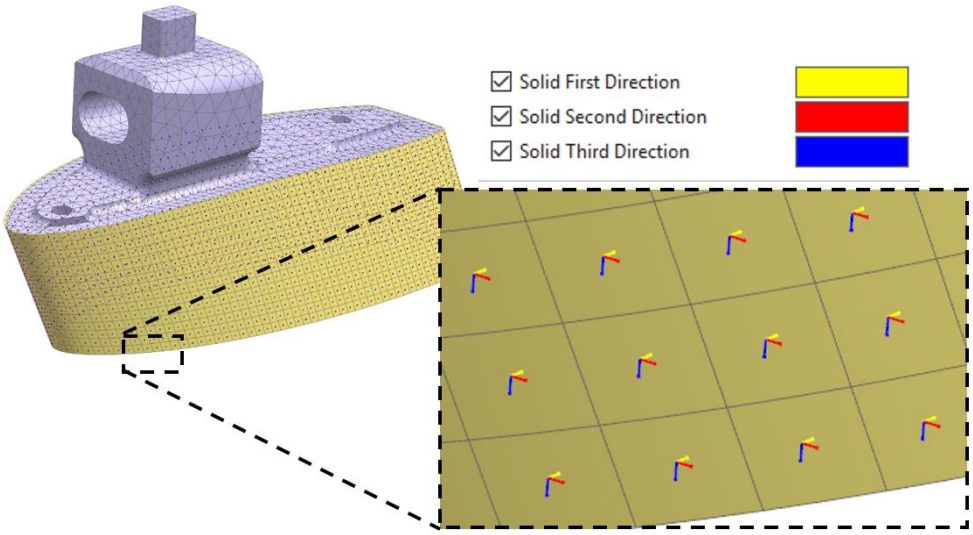
Materiálové vlastnosti laminátu i insertu jsou v modelu definovány dle:

- Skladba jednotlivých vrstev laminátu - viz. Příloha č. 3 -
- Tabulka 2 - Vlastnosti sklolaminátu PREG M49/32%/600S8/GE-300 [42]
- Tabulka 3 - Vlastnosti uhlíkového prepregu - MTM57/CF3202VQ [43]
- Tabulka 4 - Vlastnosti slitiny hliníku EN AW 7075 T6 [44]



Obrázek 74 - MKP model přítlačného křídla

Pro umožnění vyhodnocení přesných hodnot vůči směru zatěžování, byla nastavena kohezivním elementům odpovídající materiálová orientace viz Obrázek 75.



Obrázek 75 - Zobrazení směrů materiálu kohezivních elementů v modelu

Samotné laminátové skladbě křídla byla nastavena odpovídající skladba jednotlivých vrstev (tkanin). Layout skladby jednotlivých vrstev tkanin je uveden na Obrázek 76.

Layup Modeler

Layup Definition

Layup Name: Layup 1

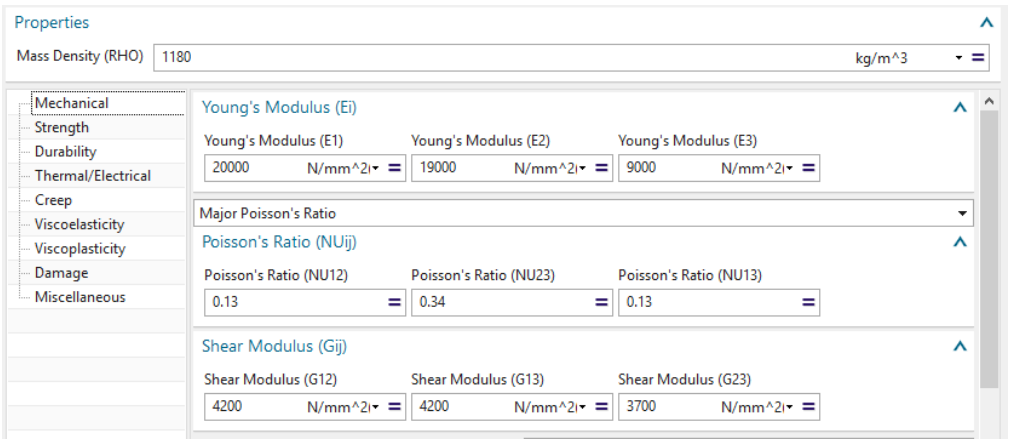
Stacking Recipe: Regular

Paste Repetition: 1

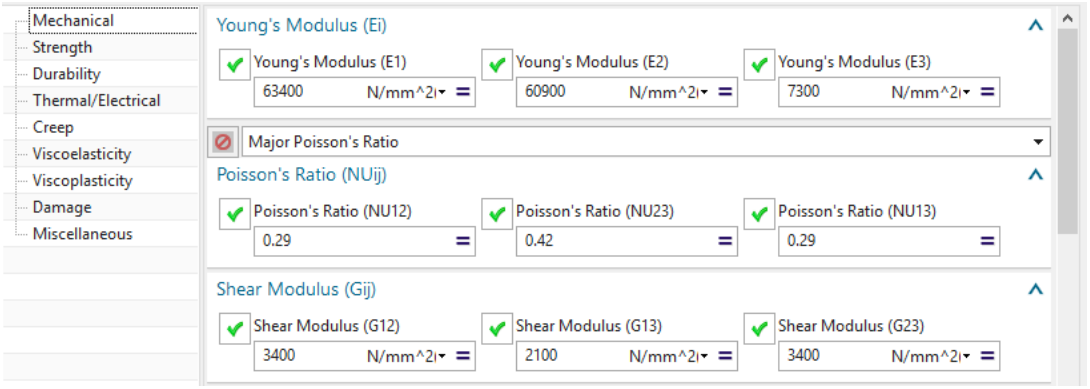
Reverse Plies and Glob

Global Ply Id	Composition	Thick...	Angle	Status	Description	Solid Property
1	Twill Carbon ...	0.287	45	Up-to-date		Layered
5	Twill Carbon ...	0.287	0	Up-to-date		Layered
6	Twill Carbon ...	0.287	45	Up-to-date		Layered
4	GF	0.52	0	Up-to-date		Layered
7	GF	0.52	45	Up-to-date		Layered
8	GF	0.52	0	Up-to-date		Layered
9	GF	0.52	0	Up-to-date		Layered
10	GF	0.52	0	Up-to-date		Layered
11	Twill Carbon ...	0.287	0	Up-to-date		Layered
12	Twill Carbon ...	0.287	45	Up-to-date		Layered

Obrázek 76 - Definice jednotlivých vrstev použitých v modelu

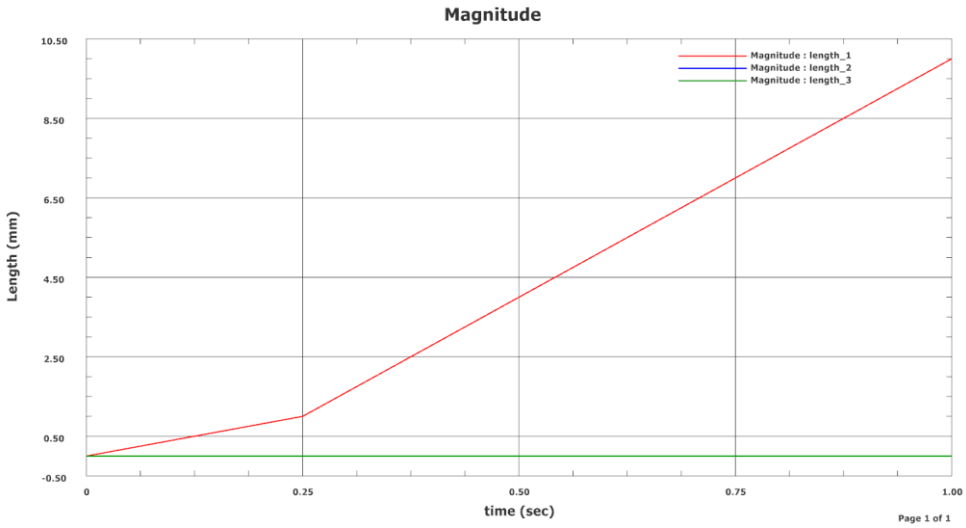


Obrázek 77 - Definice materiálových vlastností pro sklolaminátu v sw NX



Obrázek 78 - Definice materiálových vlastností pro Twill Carbon v NX

Insert je zatěžován vynuceným posunutím, jehož průběh je vyobrazen na Obrázek 79. Z počátku, před předpokládaným prvním poškozením je nastaven pomalejší nárůst posunutí v závislosti na čase a to do posunutí 1mm. Dále je již nastaven rychlejší nárůst posunutí. Úloha je nastavena s jemným krokem, po 0,0015sec.

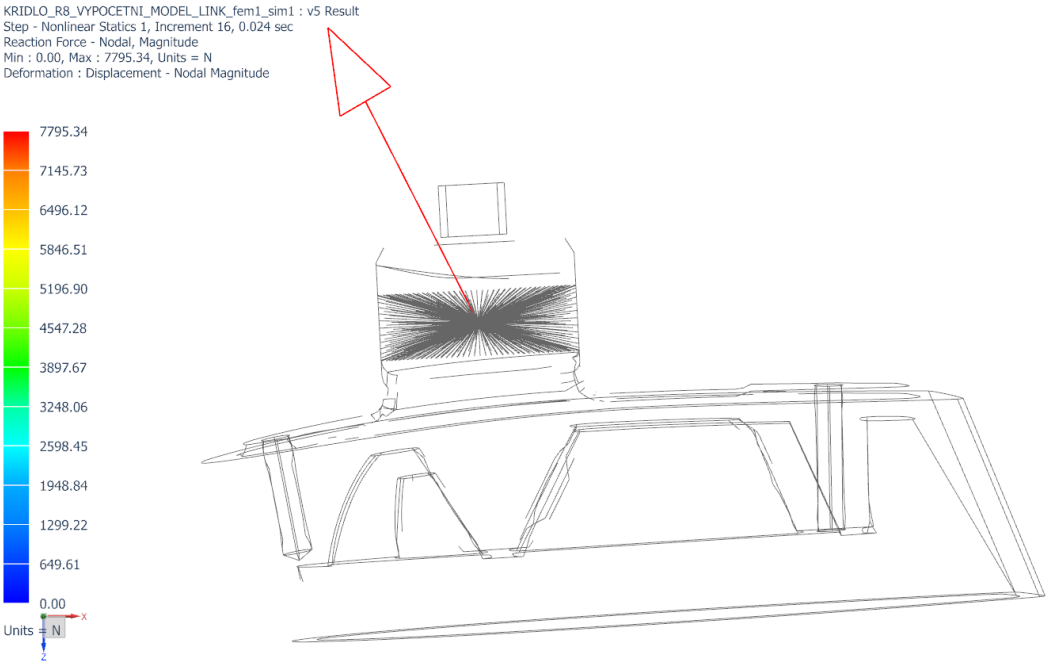


Row ID	time (sec)	length_1 (mm) *	length_2 (mm) *	length_3 (mm) *
1	0	0	0	0
2	0.25	1	0	0
3	1	10	0	0

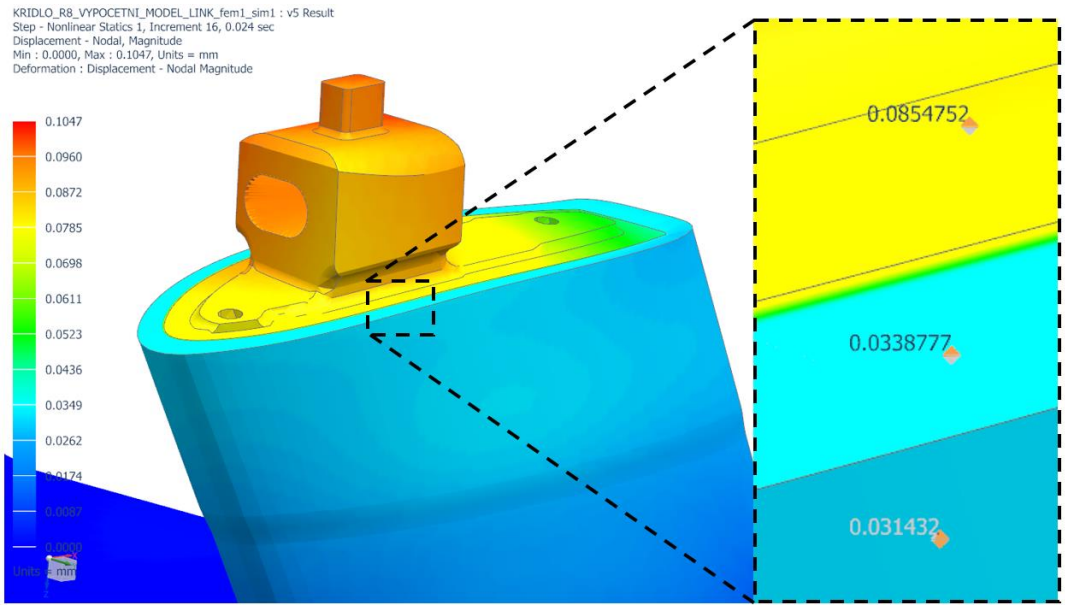
Obrázek 79 - Průběh zatížení insertu vynuceným posunutím

4.9.2 Vyhodnocení kohezivního modelu přítlačného křídla

Z výsledků MKP výpočtu nás bude nejvíce zajímat maximální reakční síla do prvního porušení lepeného spoje. Tyto výsledky jsou znázorněny na Obrázek 80. Dále je zde vyhodnocováno celkové posunutí při maximální síle a koeficient kohezivního porušení.



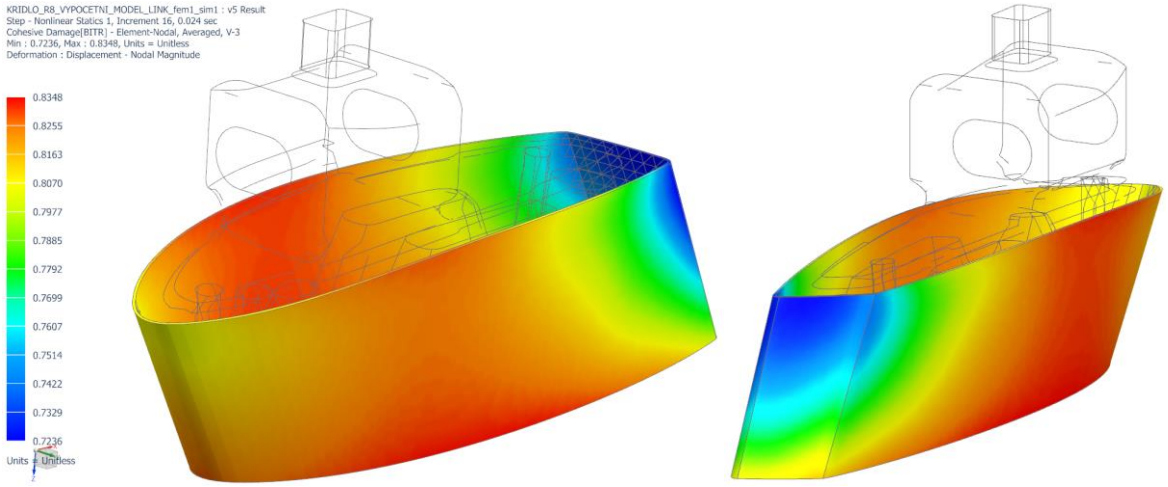
Obrázek 80 - Max. reakční síla před porušením (N)



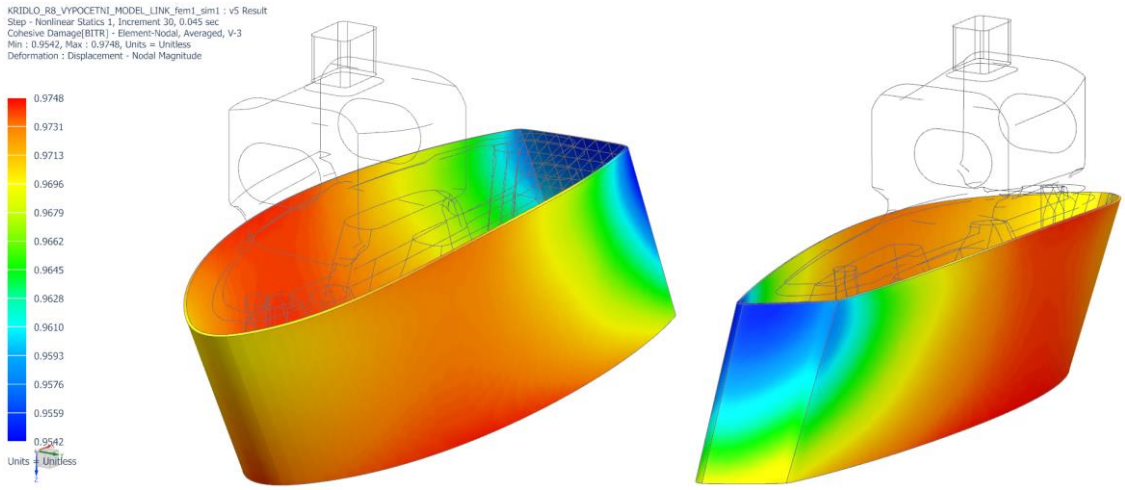
Obrázek 81 - Celkové posunutí při max. zatěžující síle (mm)

Při maximální síle F = 7795 N je max. celkové posunutí 0,105mm, přičemž rozdíl mezi posunutím insertu a posunutím laminátu v blízkosti insertu je cca 0,05mm, což je přibližná deformace vrstvy lepidla. Při maximálním zatížení dosahuje koeficient poškození hodnoty pouze 0,835. Při dalším zatěžování (posuvem) reakční síla klesá, to proto, že již dochází ke ztrátě tuhosti vrstvy lepidla a při přiblížení se koeficientu porušení hodnotě jedné dojde k prvnímu porušení lepidla. V tomto případě dojde k prvnímu porušení při kroku 30, v čase

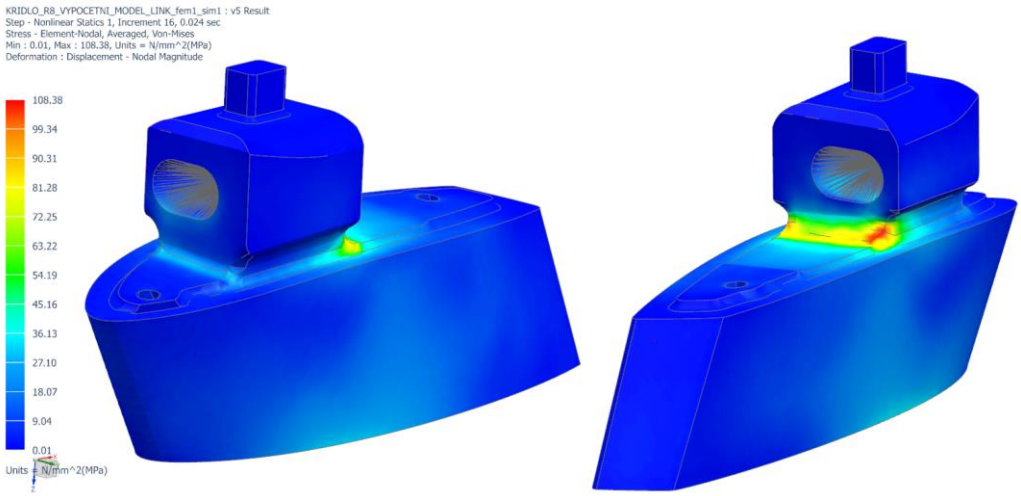
t=0,045s. Jedná se o obdobný průběh, jako můžeme sledovat u ENF testů (Obrázek 66), kde také dochází i přes narůstající prodloužení ke snižování síly před prvním poškozením.



Obrázek 82 - Kohezivní porušení - při Fmax (krok 16, t=0,024s)



Obrázek 83 - Kohezivní porušení - těsně před prvním porušením (krok 30, t=0,045s)

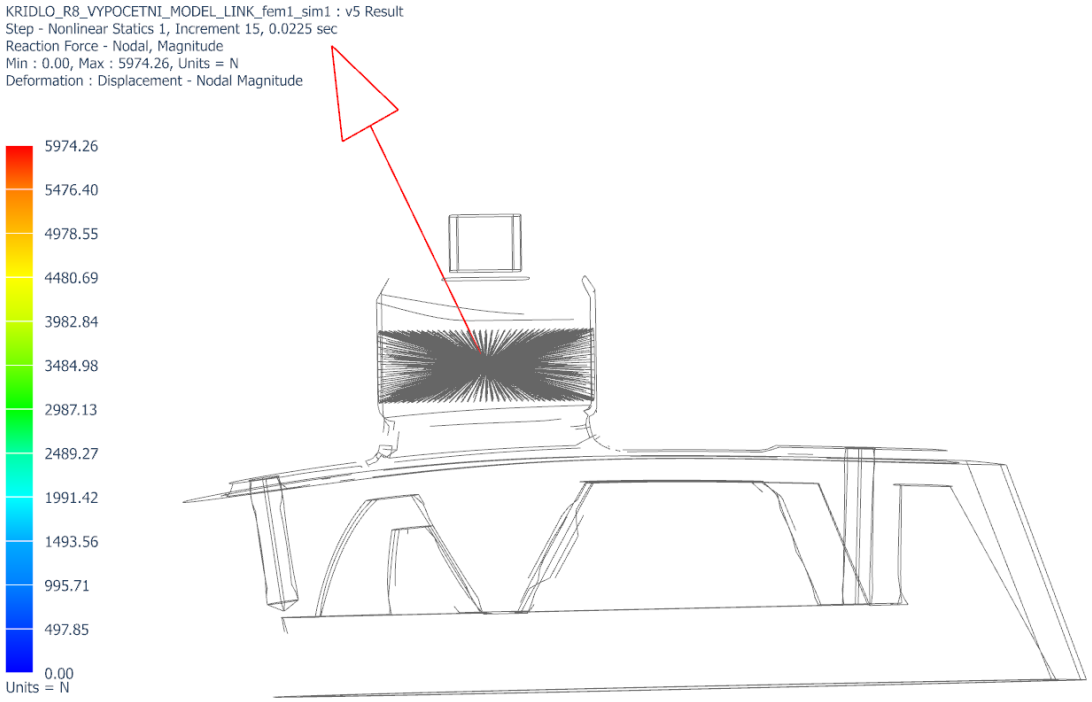


Obrázek 84 - Redukované napětí - insert (MPa)

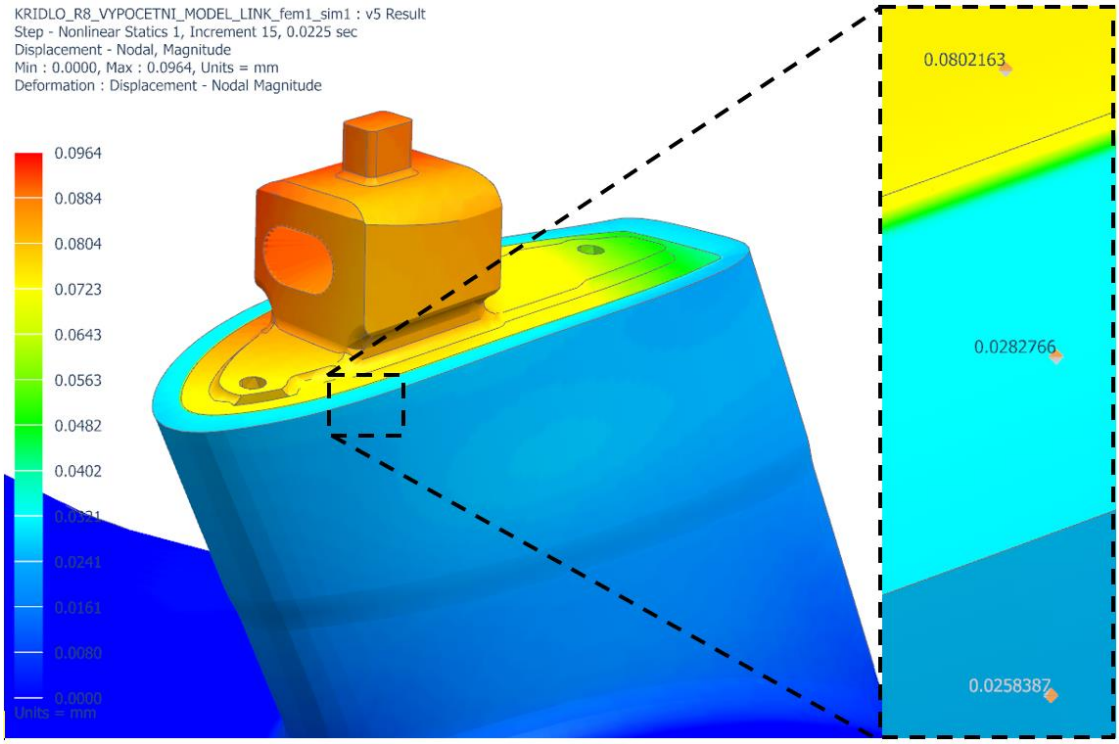
Při maximální síle F = 7795 N se v těle insertu vyskytuje redukované napětí o hodnotě max. 108 MPa. Minimální zaručená mez kluzu v tahu pro slitinu EN AW 7075 je 460 MPa. Což znamená, že insert při tomto zatížení vyhovuje s bezpečností 4,2.

4.10 OPTIMALIZACE LEPENÉHO SPOJE

Z výsledků výše uvedené analýzy stávajícího řešení vyplývá, že je lepený spoj předimenzovaný. Z tohoto důvodu byla následně provedena optimalizace insertu, která spočívala ve snížení. V původním výpočtovém modelu byla postupně zmenšována výška insertu a numerická simulace byla znovu přepočtena s takto upraveným insertem. Tento postup byl opakován do té doby, než jsme se přiblížili k požadované reakční síle.

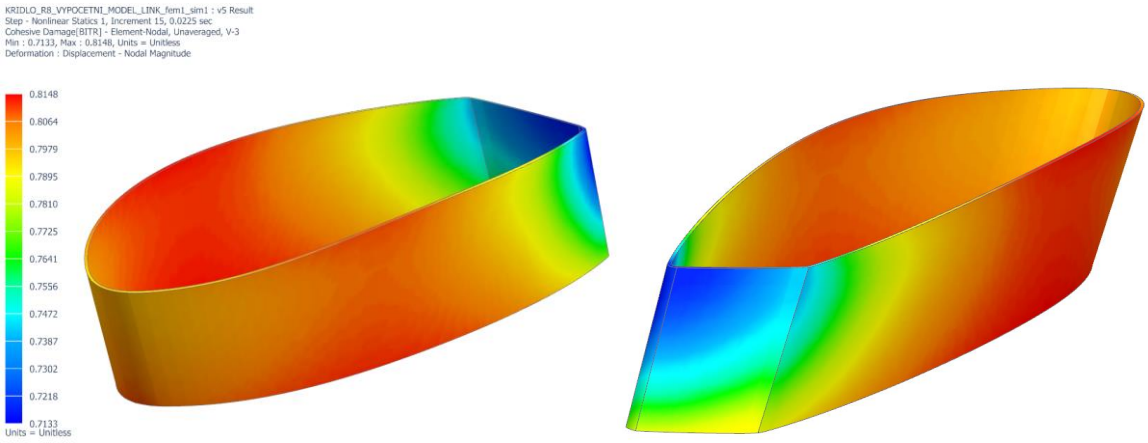


Obrázek 85 - Max. reakční síla před porušením (N) - po optimalizaci

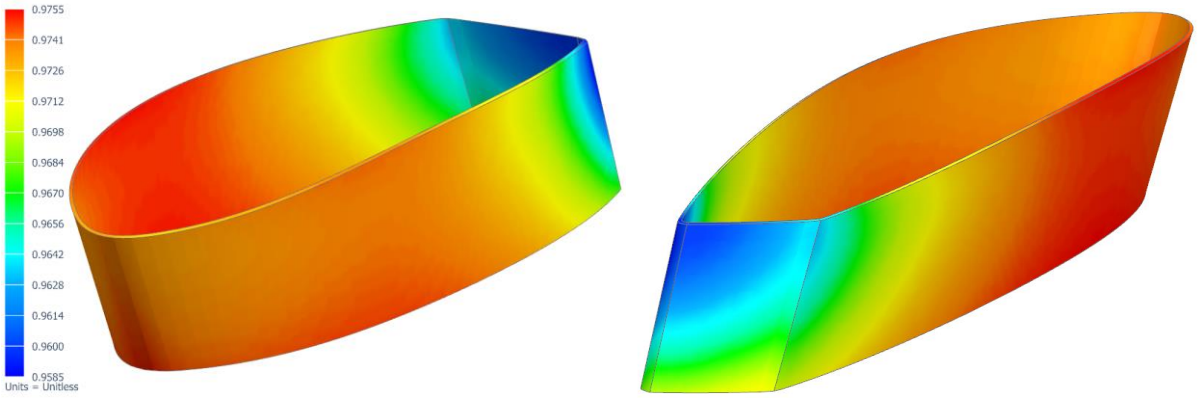


Obrázek 86 - Celkové posunutí při max. zatěžující síle (mm) – po optimalizaci

Při maximální síle F = 5974 N je max. celkové posunutí 0,0964mm, přičemž rozdíl mezi posunutím insertu a posunutím laminátu v blízkosti insertu je cca 0,05mm, což je přibližná deformace vrstvy lepidla.

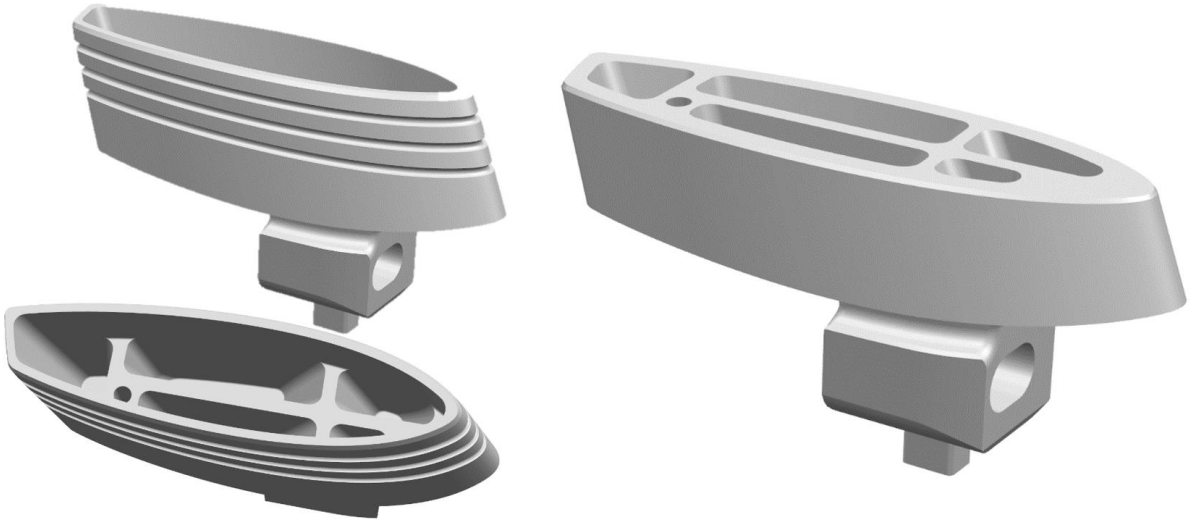


Obrázek 87 - Kohezivní porušení - při Fmax (krok 15, t=0,0225s) – po optimalizaci



Obrázek 88 - Kohezivní porušení - těsně před prvním porušením (krok 30, t=0,045s) – po optimalizaci

Při maximálním zatížení dosahuje koeficient poškození hodnoty pouze 0,815. V tomto případě dojde k prvnímu porušení při kroku 30, v čase t=0,045s.



Obrázek 89 - Původní insert (vlevo) a optimalizovaný insert (vpravo)

Na Obrázek 89 je porovnání původního a optimalizovaného insertu. Na Obrázek 90 je pak znázorněn vzájemný průnik těchto dvou insertů.

Obrázek 90 - Původní a optimalizovaný insert ve vzájemném průniku

Výška insertu byla postupně snižována z původních 26mm, až na výšku 16,5mm, kdy jsme se dostatečně přiblížili k požadované reakční síle. Požadovaná statická únosnost lepeného spoje byla stanovena na $F_{P-1ins} = 5906\ N$. Statická únosnost navrženého insertu je 5974N.

	výška	lepená plocha	hmotnost	celkový povrch	objem polotovaru	statická únosnost
	h(mm)	S(mm2)	m (g)	A(mm2)	V(mm3)	F_{Smax}
původní insert	26	6 224	152	20 841	240 124	7 795
optimalizovaný insert	16,5	4 351	136	16 359	203 915	5 974
rozdíl v %	37%	30%	11%	22%	15%	23%

Tabulka 7 - Vyčíslení rozdílů původního a optimalizovaného insertu

Díky snížení insertu o 9,5mm bylo dosaženo zmenšení lepené plochy o 30%, z čehož vyplývá cca o 30% menší spotřeba lepidla. Objem potřebného polotovaru na obráběný insert byl snížen o 15%. Z toho vyplývá nejen úspora materiálu, ale i prostředků na obrábění, díky menšímu množství odebíraného objemu materiálu. Celkový povrch insertu se zmenšil o 22%, což znamená snížení nákladů na lakování.
Celková hmotnost insertu byla snížena o 11%.

Z numerických simulací dále vyplývá, že únosnost lepeného spoje není přímo úměrná jeho délce/výšce. Přesto, že jsme snížili lepenou plochu o 30%, únosnost lepeného spoje klesla pouze o 23%.

4.11 PODNĚT PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ

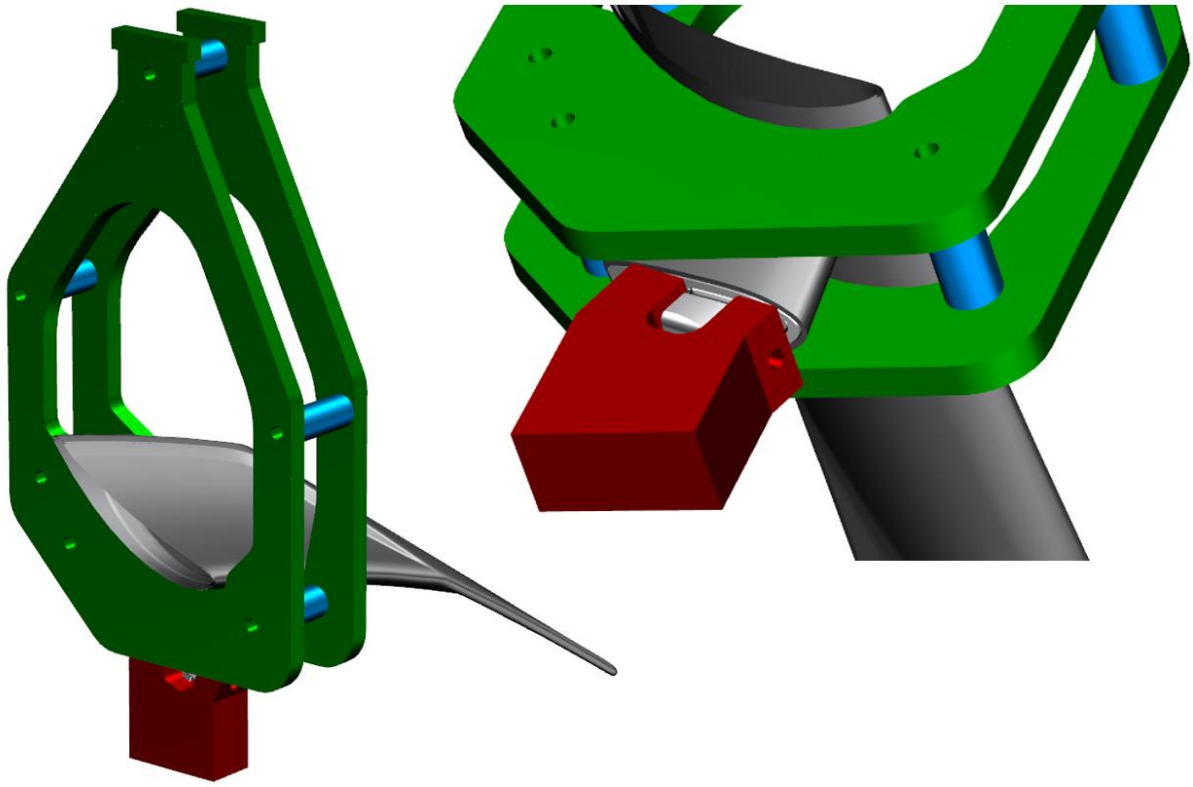
Pro ověření výsledků numerických simulací je vhodné provést experimentální testování na reálném díle.

Společnost Mubea poskytla pro testování několik kusů přítlačných křídel. Jedná se o kusy vyřazené výstupní kontrolou kvality z důvodu pohledové vady, nicméně vlepené inserty jsou u těchto křídel zcela v pořádku. Experimentální testování reálného křídla není již součástí této práce, nicméně v rámci této diplomové práce byl navržen přípravek pro plánované experimentální testování, který se v současné době vyrábí.

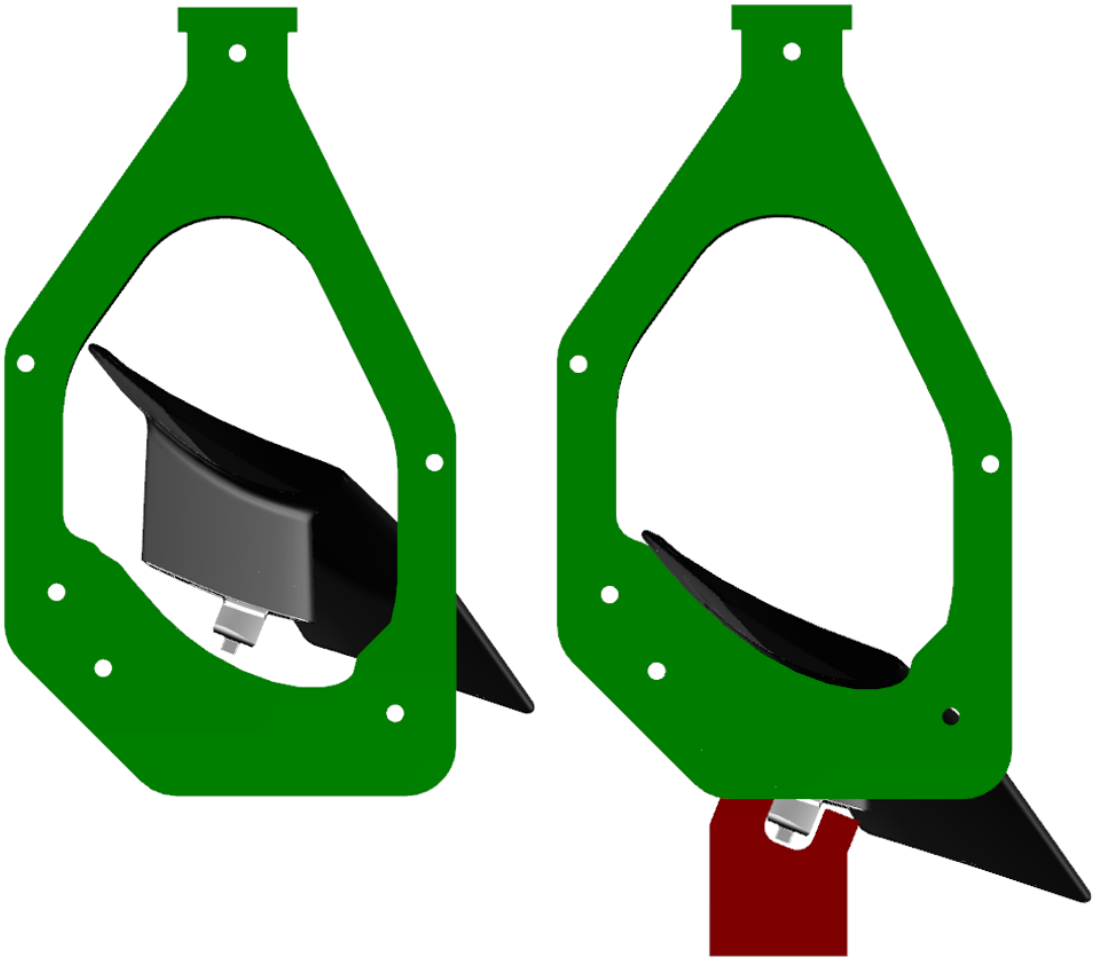
Obrázek 91 - Zadní přítlační křídla vozu Audi R8 určená pro experimentální testování

Experimentální testování reálného křídla bude realizováno na trhacím stroji **Zwick/Roell Z050,** stejně jako předcházející testovací vzorky.

Pro možnost uchycení křídla do trhacího stroje byl navržen přípravek vyobrazený na Obrázek 92 a Obrázek 93, jehož dolní část bude sevřena do čelistí a horní díl bude zasunut do T-drážky v upínací desce stroje. Přípravek pro upnutí křídla je navržen s ohledem na jednoduchou výrobu, montáž a použití. Jedná se o dva díly vypálené z plechu laserem, několika distančních trubek a šroubů, které prochází skrze trubky a spojují obě hlavní brány. Spodní díl je předpálen z ocelového hranolu pomocí laseru a následně je do něj vyvrtán otvor pro uchycení insertu pomocí šroubu procházejícího otvorem v insertu. Brány jsou navrženy tak, aby se směr zatěžování shodoval se směrem zatížení v numerické simulaci. vnitřní prostor brány je dostatečně velký, aby do ní mohlo být prostrčeno testované křídlo viz. Obrázek 93.



Obrázek 92 - Detail navrženého přípravku na upnutí křídla



Obrázek 93 - Naznačení principu vkládání a upínání křídla do přípravku

Závěr

Cílem této práce bylo navržení metodiky predikce pevnosti lepených spojů při návrhu jejich konstrukce na základě provedených experimentálních měření a numerických simulací. Přičemž tato navržená metodika měla být aplikována na reálném díle.

Před vlastním řešením byl proveden průzkum současného stavu techniky, co se týče vlastností a metod spojování kompozitních materiálů s kovy. Dále jsme se podrobněji zaměřili na vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí a na vlastnosti a teorii porušení lepených spojů. Před vlastním návrhem metodiky bylo nutné prověřit různé možnosti predikce pevnosti lepených spojů.

Na základě rešerše byla navržena obecná metodika predikce lepených spojů kompozitních materiálů s kovy. Navržená metodika byla poté aplikována na vybraném reálném díle. Konkrétně bylo vybráno zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8. Toto přítlačné křídlo je vyrobeno z laminátu a je do něj vlepován insert pro uchycení křídla ze slitiny hliníku. Při reálných podmínkách bude tento lepený spoj zatěžován různými zátěžnými stavy. Zadavatelem byla problematika způsobu namáhání zjednodušena a byl zadán požadavek, že u daného křídla nesmí dojít k porušení při statickém zatížení v tahu silou 3500 N ve směru osy nohy křídla. Na základě zadané požadované minimální únosnosti křídla a koeficientů bezpečnosti byla určena minimální únosnost lepeného spoje při kvazistatickém zatížení 5906 N.

Při analýze zadaného spoje bylo postupováno dle navržené metodiky, přesněji na základě zadání byla vytvořena specifikace požadavků a byly zjištěny mechanické vlastnosti lepených materiálů a základní vlastnosti zadaného lepidla. Dle zadaných lepených materiálů bylo navrženo několik možností jejich povrchových úprav.

Dále bylo přikročeno ke stanovení mechanických parametrů lepidla v kohezi i adhezi. Pro tyto účely byly navrženy vhodné vzorky pro realizaci odpovídajících experimentálních zkoušek. Jednalo se o DCB test pro zjištění kohezivních parametrů při zatížení dle módu I podle normy ASTM 5528-01 a ENF test pro zjištění kohezivních parametrů při zatížení dle módu II podle normy ASTM D7905. Pro zjištění adhezivních vlastností lepidla a vybraných povrchových úprav byly navrženy zkušební vzorky dle normy ASTM D5868. Pro výrobu přeplátovaných lepených spojů (lap-joints) a pro upnutí DCB vzorků na trhací stroj, byly navrženy a vyrobeny odpovídající přípravky.

Pomocí zpracovaných výsledků experimentálního testování a série numerických simulací kohezivního modelu dané zkoušky byly stanoveny kohezivní parametry lepidla pro módy I a II a adhezivní vlastnosti lepidla s jednotlivými povrchovými úpravami lepených materiálů.

V programu NX 11 byl vytvořen kohezivní model přítlačného křídla, kde byly definovány kromě mechanických vlastností lepených materiálů i získané kohezivní parametry lepidla. V tomto kohezivním modelu byl insert zatěžován nuceným posuvem ve směru osy nohy křídla. Z tohoto modelu byla následně odečtena maximální reakční síla před prvním porušením. Maximální reakční síla před prvním porušením dosahuje hodnoty 7795 N.

Tato reakční síla odpovídá únosnosti současného lepeného spoje a je výrazně vyšší, než minimální požadovaná únosnost, tzn., že lepený spoj je předimenzovaný. Z tohoto důvodu bylo přikročeno k optimalizaci insertu a velikosti lepené plochy. Jelikož geometrie laminátu a

geometrie insertu vystupující ven z nohy křídla je pevně dána, optimalizace byla realizována postupným snižováním délky styčné lepené plochy insertu.

Na základě provedené optimalizace byla navržena upravená geometrie insertu. Díky snížení insertu o 9,5 mm bylo dosaženo zmenšení lepené plochy o 30 %, z čehož vyplývá cca o 30 % menší spotřeba lepidla. Objem potřebného polotovaru na obráběný insert byl snížen o 15 %. Z toho vyplývá nejen úspora materiálu, ale i prostředků na obrábění, díky menšímu množství odebíraného objemu materiálu. Celkový povrch insertu se zmenšil o 22 %, což znamená snížení nákladů na lakování. Celková hmotnost insertu byla snížena o 11 %.

Výstupy z numerických simulací je vhodné ověřit experimentem na reálném dílu, který již však značně přesahuje rozsah zadání diplomové práce. Přesto v rámci této práce byl navržen přípravek pro možnost upnutí křídla a insertu do trhacího stroje za účelem budoucího experimentálního testování reálného křídla, které se v tuto chvíli připravuje.

Predikce pevnosti lepených spojů pomocí kohezivních modelů se jeví jako přesněji vystihující reálný lepený spoj, oproti analytickým výpočtům, kde díky výraznému zjednodušení mohou vycházet až poloviční hodnoty minimální únosnosti, než jakých ve skutečnosti dosahuje reálný lepený spoj. Mimo jiné, dle analytických výpočtů, je únosnost lepeného spoje přímo úměrná délce spoje, což vyvrací několik experimentálních testování a výzkumné práce [12].

Toto tvrzení dokládají i naše výsledky. Přestože jsme snížili lepenou plochu o 30 %, únosnost lepeného spoje klesla pouze o 23 %.

Pro přesnější stanovení kohezivních parametrů lepidla by bylo vhodné provést experimentální měření na větším počtu vzorků. Pro podrobnější rozbor vlivu drsnosti povrchu a různých povrchových úprav by bylo vhodné provést série experimentálních měření, kde by bylo od různé povrchové úpravy provedeno několik sad vzorků s jemně odstupňovanou drsností povrchu.

Sumarizace výstupů:

- Navržená metodika, jak postupovat při návrhu lepeného spoje s využitím experimentálního testování na vzorcích a numerického kohezivního modelu, ověřena na vzorovém příkladu
- Získané kohezivní parametry lepidla SW DP490 pro Mody zatížení I, II
- Získané adhezivní vlastnosti lepidla SW DP490 na několika různých povrchových úpravách slitiny hliníku EN AW 7075 T6 a sklolaminátu a jejich Technicko-ekonomické zhodnocení
- konstrukce přípravku pro efektivní testování DCB vzorků
- konstrukce přípravku pro efektivní lepená lap-joint vzorků
- Návrh na optimalizaci reálného dílu, na který byla aplikována navržená metodika a na základě které byly navrženy úpravy vedoucí ke snížení nákladů

Seznam použitých zdrojů

Knižní publikace

[1] D. GAY, S. V. HOA A S. W. TSAI, *Composite Materials - Design and Applications*, Boca Raton, London, New York, Washingtom, D.C.: CRC Press LLC, 2003.

[2] GRUNDLAGEN, VERARBEITUNG, ANWENDUNGEN. *Faserverbundwerkstoffe Handbuch*, Edition 06/2009. Waldenbuch: RG Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2009. 237 s.

[3] A. A. GRIFFITH, „The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Philosophical Transactions,* sv. Series A, č. 221, pp. 163-198, 1920.

[4] SAINT-GOBAIN ADFORS. *Sklovláknitý roving*. Litomyšl: Saint-Gobain Vertex, s.r.o., 2008. 5 s.

[5] DANIEL, I. M., ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials.* Oxford: Oxford University Press, 1994. 384 s. ISBN 0-19-507506-4

[6] CHUNG, DEBORAH D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X

[7] KOLEKTIV AUTORŮ. *Loctite, Worlwide Design Handbook*. 2. vyd. Mainz: Erasmusdruck GmbH, 1998. 452 s. ISBN 0-9645590-0-5

[8] N. VIGROUX, *APPROXIMATE METHODS FOR EVALUATING MODE MIXITY IN DELAMINATED COMPOSITES*, UNIVERSITY OF FLORIDA, Florida, 2009.

[9] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J., *Příručka strojního inženýra - Obecné strojní části 1*. Praha: Computer Press, 1999. 356s. ISBN 80-7226-055-3.

[10] HOSNEDL, S., *Systémové navrhování technických produktů*. Plzeň: ZČU, 2012. ISBN 978-80-261-0125-3.

[11] ŘASA,J.,ŠVERCL,J., *Strojnické tabulky 1*, Praha:SCIENTIA, 2004,ISBN: 80-7183-312-6

Kvalifikační práce

[12] BERNARDIN,P., *Disertační práce - Spojování kompozitních materiálů s kovem*. Plzeň: ZČU, 2016

[13] HANZLÍK,P., *Diplomová práce – Parametricky tvořený model standardizovaných testu kohezivních spojů*. Plzeň:ZČU-FAV, 2016

[14] VLČEK,D., *Bakalářská práce – Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů*. Brno:VUT, 2011

[15] JAKES,T., *Bakalářská práce – Návrh možností spojů a přechodů v kompozitních aplikacích*. Zlín:UTB, 2013

Odborné články

[16] BUDHE, S., GHUMATKAR, A., BIRAJDAR,N., M. D. BANEA, Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength, *Applied Adhesion Science2015*, DOI: 10.1186/s40563-015-0050-4, 2015.

[17] MULLER,M., Vliv drsnosti ocelového povrchu na pevnost lepeného spoje, *MM Průmyslové spektrum*, Kód článku: 030908, 2003.

[18] S. W. Lee a D. Lee, „Static and Dynamic Torque Characteristic of Composite Cocured Single Lap Joint," *Journal of Composite Materials,* pp. 2188-2201, Vol.31 No.21 1997.

[19] SKOVAJSA,M.,SEDLÁČEK,F., *Numerical simulation of delamination in laminated composite plates using cohesive elements,* 27TH DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation, DOI:10.2507, 2017

[20] Miroslav Marjanovic, Günther Meschke, Djordje Vuksanovic, *A finite element model for propagating delamination in laminated composite plates based on the Virtual Crack Closure method*., 2016

[21] M. Bruyneel, J.P. Delsemme, P. Jetteur1 and F. Germain, *A study of complex delaminations in laminated composite structures with SAMCEF*, University of Liège, Belgium, 26-28 May 2008

[22] P. Bernardin, F. Sedláček, T. Kroupa, V. Lašová a P. Hanzlík, „IDENTIFICATION OF THE COHESIVE PARAMETERS FOR MODELING OF ADHESIVELY BONDED JOINTS BETWEEN FLAT EPOXY COMPOSITE ADHERENDS," *Materiali in Tehnologije (2016),* In Print.

[23] P. Bernardin, F. Sedláček, V. Lašová a R. Kottner, „IDENTIFICATION OF MECHANICAL PARAMETERS OF COMPOSITE-TO-METAL TUBULAR LAP JOINT UNDER TORSIONAL LOADING," *Materiali in Tehnologije (2016),* In Print.

Normy

[24] Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, Designation: D 5528-01 (Reapproved 2007)

[25] Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, Designation: D7905/D7905M

[26] Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, Designation: D5868-01

Publikace na internetu

[27] KERB KONUS.*Threaded inserts for plastic and wood*. [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: www.kerbkonus.de/proddb/

[28] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity*. [online]. [cit.2016-11-20]. Dostupné z: www.mujweb.cz/zkorinek/

[29] *Informační web nejen pro žáky oboru strojírenství – mechatronika* [online]. [cit.2016-11-20]. Dostupné z: www.mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-s-09_lepenespoje.pdf

[30] L. Náhlík a P. Hutař, *Základy lomové mechaniky*, [Online]. Dostupné z: hutar.wz.cz/lomovka/08.pdf. [Přístup získán 20 11 2015].

[31] LAŠ, V. *Přednášky z předmětu: Mechanika kompozitních materiálů 1 - Úvod do modelován v mechanice.* ZČU v Plzni

[32] KLEMENT, J. *Přednášky z předmětu Letecké materiály*. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2010.

[32b] Kolektiv autorů. *Design and Testing of Bonded and Bolted Joints*. National Physical Laboratory, Scotland, 2007. [online]. [cit.2017-05-20]. Dostupné z: www.npl.co.uk/upload/pdf/bonded-bolted-manual.pdf

Internetové zrdoje

[33] MM-SPEKTRUM. *Lepení může nahradit klasické techniky spojování.* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.mmspektrum.com/novinka/lepeni-muze-nahradit-klasicke-techniky-spojovani.html

[34] AUTO-FUN. [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.img.auto.cz/autofun_cz/img/galleries/90_54b788561f9fa.jpg

[35] FORMULA ELECTIC BELGIUM. . [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.formulaelectric.be

[36] HAUFLER COMPOSITES. . [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.haufler.com

[37] NPTEL INDIA. [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.nptel.ac.in

[38] TECHMAGAZIN. [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.techmagazin.cz/576

[39] PED-MUNI. [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm

[40] HEXCEL. [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.hexcel.com/resources/technology-manuals

Datesheety materiálů

[41] Scotch-Weld™ EXP™ DP490, *3M*

[42] Epoxy E-Glass Woven prepreg, M49/32%/600S8/GE-300, *HexPly®*

[43] Cosmetic carbon prepreg, MTM57/CF3202VQ, *CYTEC*

[44] Slitina hliníku EN AW-7075 T6, dostupné z: www.alunet.cz/ENAW-7075

Další zdroje

[45] MUBEA Transmission Components s.r.o.. *Vnitropodnikové informační zdroje* (3D modely, výkresová dokumentace, návodky, apod.)

Seznam použitého softwaru

NX 10 & 11	(Siemens)
Abaqus 6.14	(Dassault Systemes)
Anaconda 2	(Continuum Analytics)
Python	(Python Software Foundation)
Inventor 2016	(Autodesk)
AutoCAD 2016	(Autodesk)
Word 2016	(Microsoft)
Excel 2016	(Microsoft)
Project 2016	(Microsoft)
PSPad	(Ing. Jan Fiala, VUT Brno)

Seznam příloh

Přílohy vevázané

Příloha č. 1 - Průběh a výsledky zkoušek pevnosti v adhezi

Příloha č. 2 – Průběh a výsledky DCB a ENF testů

Příloha č. 3 - Výtah z pracovního postupu laminace křídla a lepení insertů

Příloha č. 4 - Datasheety použitých materiálů a lepidla

Přílohy oddělené

Příloha č. 5 - Návrh metodiky predikce pevnosti lepených spojů - POSTER

Příloha č. 6 - VÝKRES SESTAVY - DP-UP-S00 - Upnutí DCB - montážní sestava

Příloha č. 7 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-UP-D01 - Upnutí DCB - vidlice

Příloha č. 8 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-UP-D02 - Upnutí DCB – tyč

Příloha č. 9 - VÝKRES SESTAVY - DP-LEP-S00 - LEPENÍ LAP-JOINT - montážní sestava

Příloha č. 10 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D01 - LEPENÍ LAP-JOINT - Deska základní

Příloha č. 11 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D02 - LEPENÍ LAP-JOINT - Deska dolní

Příloha č. 12 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D03 - LEPENÍ LAP-JOINT - Deska horní

Příloha č. 13 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D04 - LEPENÍ LAP-JOINT - Plech pomocný dolní

Příloha č. 14 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D05 - LEPENÍ LAP-JOINT - Plech pomocný horní

Příloha č. 15 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-LEP-D06 - LEPENÍ LAP-JOINT - Podstava

Příloha č. 16 - VÝKRES SESTAVY - DP-UP2-S00 - montážní sestava

Příloha č. 17 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-UP2-D01 - Upnutí křídla - brána 1

Příloha č. 18 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-UP2-D02 - Upnutí křídla - brána 2

Příloha č. 19 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-UP2-D03 - Upnutí křídla - trubka

Příloha č. 20 - VÝROBNÍ VÝKRES - DP-INS-OPT-D01 - Insert – optimalizovaný

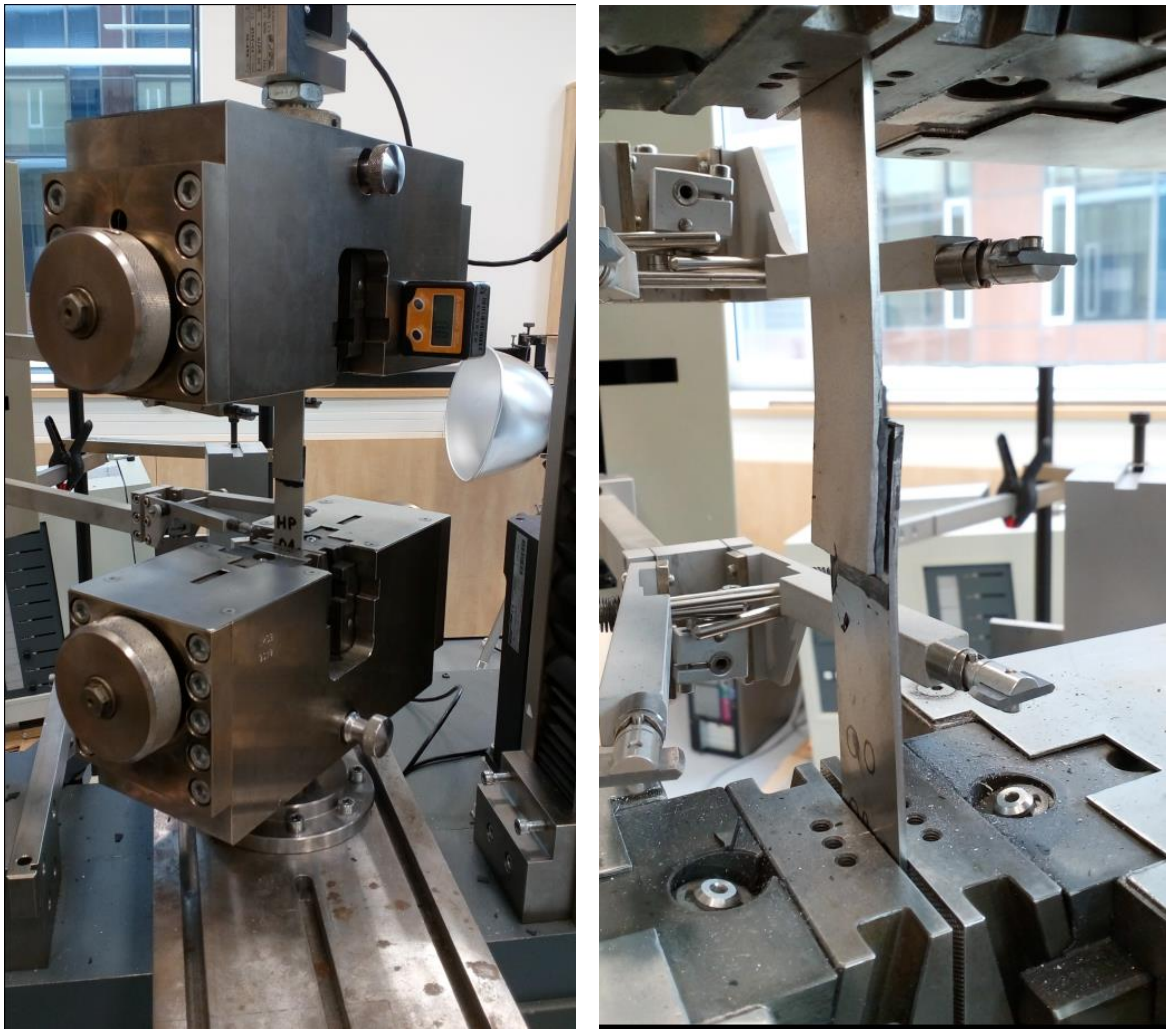
Příloha č.1

Průběh a výsledky zkoušek pevnosti v adhezi

Průběh a výsledky zkoušek pevnosti v adhezi

Testování pevnosti v adhezi bylo prováděno na trhacím stroji Zwick/Roell Z050. Vzorky byly upínány přímo do čelistí stroje, vždy v délce 25mm na každé straně, tzn. že vzdálenost mezi čelistmi byla nastavena na 125mm. Vzdálenost mezi rameny tenzometrů byla zvolena na 80mm. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 13mm/min, dle normy ASTM D5868 [26].

Při tomto měření byla odečítána zatěžující síla [N] ze silové buňky a prodloužení vzorků [mm] pomocí extenzometrů i z příčníku stroje.



Obrázek P1 - 1 - ukázka jednoho ze vzorků po testu

V tabulce na obrázku P1 - 2 jsou uvedeny způsoby porušení, stav povrchu a identifikované vady jednotlivých vzorků.

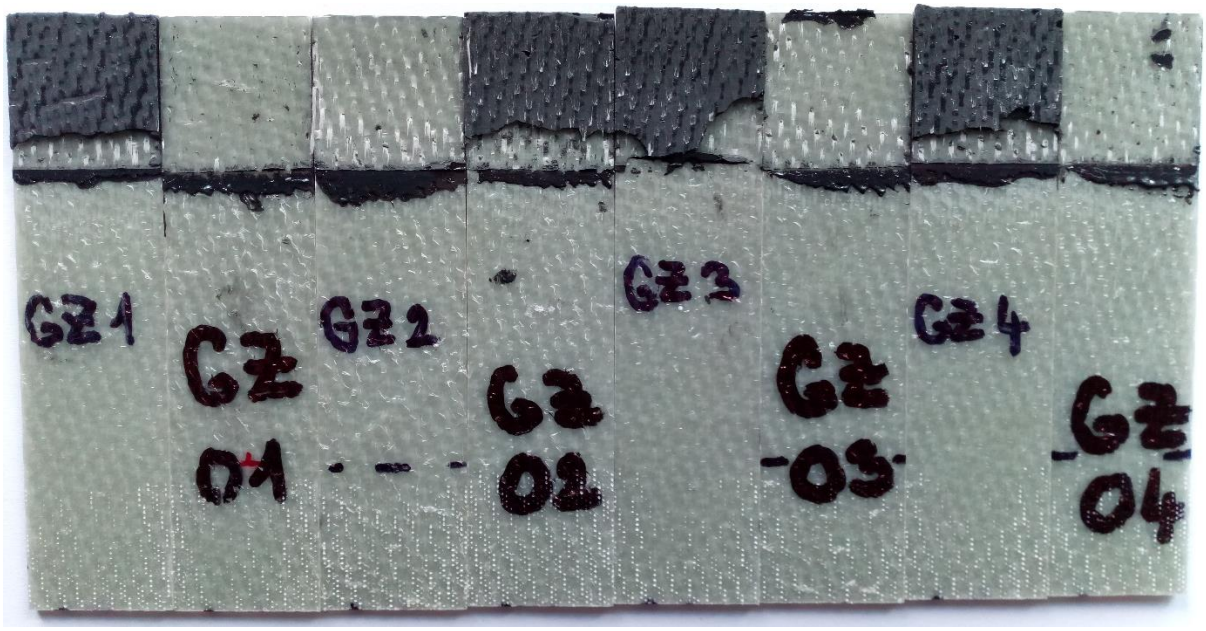
Na obrázcích P1 - 3 až P1 - 5 jsou vyobrazeny jednotlivé vzorky po zkoušce.
Na obrázku P1 - 6 jsou vyobrazeny detaily zbytků lepidla z různých povrchových úprav.

zjišťováno	test	materiál	strana mat.	povrchová úprava		č.	rozměry vzorku	porušení	stav povrchu	vady
Adhezní vlastnosti	Smyk	uhlíkový kompozit	horní strana	pouze odmaštěno	KHO	1	T2,5 - 25x100	A/VYTRŽENÍ PRYSKYŘICE na vlákna 50:50	lepidlo zůstalo zcela nebo z části na jednom z beamů	BUBLINA-malá
						2				-
						3				-
						4				-
				zdrsněno	KHZ	1		VYTRŽENÍ PRYSKYŘICE AŽ VYTRŽENÍ VLÁKEN	lepidlo zůstalo zcela nebo z části na jednom z beamů	-
						2				-
						3				-
						4				-
		sklolaminát	dolní strana	pouze odmaštěno	GO	1	T1,8 - 25x100	A	lepidlo se téměř všechno oddělilo od obou beamů	BUBLINA-malá
						2				BUBLINA-hodně malá
						3				BUBLINA-malá
						4				-
				zdrsněno	GZ	1		A / VYTRŽENÍ PRYSKYŘICE NA VLÁKNA	vytžená vlákna-částečně, lepidlo zůstalo na jednom z beamů	-
						2				BUBLINA-malá
						3				-
						4				BUBLINA-střední
		hliníková slitina EN AW 7075		pouze odmaštěno	HO	1	T2,0 - 25x100	A	z jedné strany odlepeno téměř všechno lepidlo, na druhé straně zůstalo částečně (i celé, ale je nalomeno)	-
						2				-
						3				-
						4				BUBLINA-hodně malé, více
				pískováno	HP	1		A	z jedné strany odlepeno téměř všechno lepidlo, na druhé straně zůstalo částečně (<50%)	BUBLINA-malá
						2				BUBLINA-malá
						3				
						4				BUBLINA-malá
				KTL + zdrsněno pěnou	HK	1		A	z jedné strany odlepeno všechno lepidlo, na druhé straně zůstalo částečně (<40%) ; LEPIDLO STRHLO 100% KTL	-
						2				-
						3				-
						4				-
				Elox	HE	1		A	z jedné strany odlepeno všechno lepidlo, na druhé straně zůstalo částečně (<30%) ; LEPIDLO STRHLO 50% eloxu na 75% vzorků	-
						2				-
						3				-
						4				-

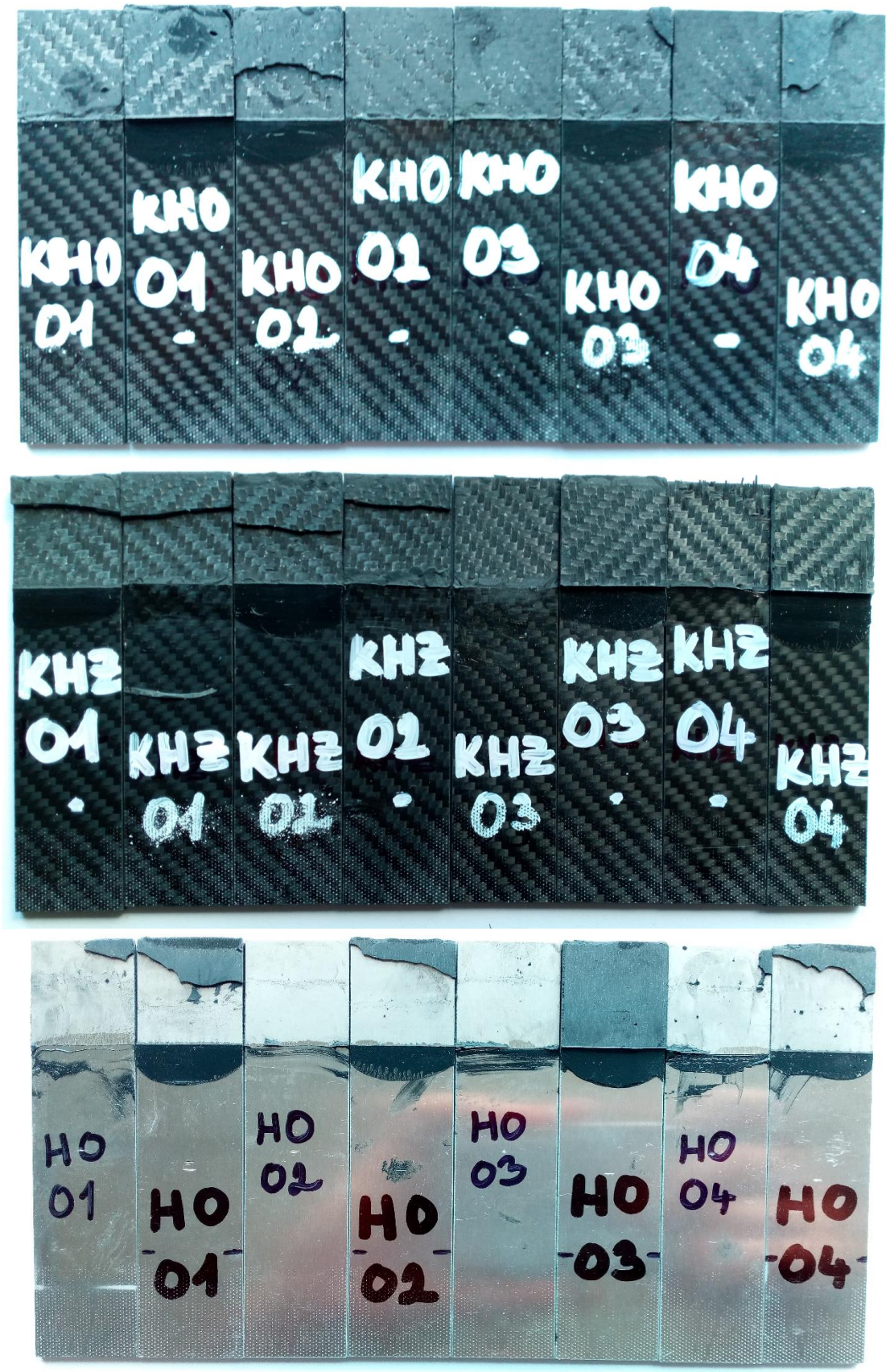
zdrsněno	mechanicky zdrsněno - brusným papírem P120
zdrsněno pěnou	mechanicky zdrsněno brusnou pěnou Mirka Mirlon VF
KTL	Kataforicky lakováno - 14+/-2µm
Elox	tvrdě eloxováno dle DIN 17611
pouze odmaštěno	odmaštěno technickým lihem
Mn.	množství testovaných vzorků

pozn.: všechny typy povrchových úprav byly před lepením odmaštěny.

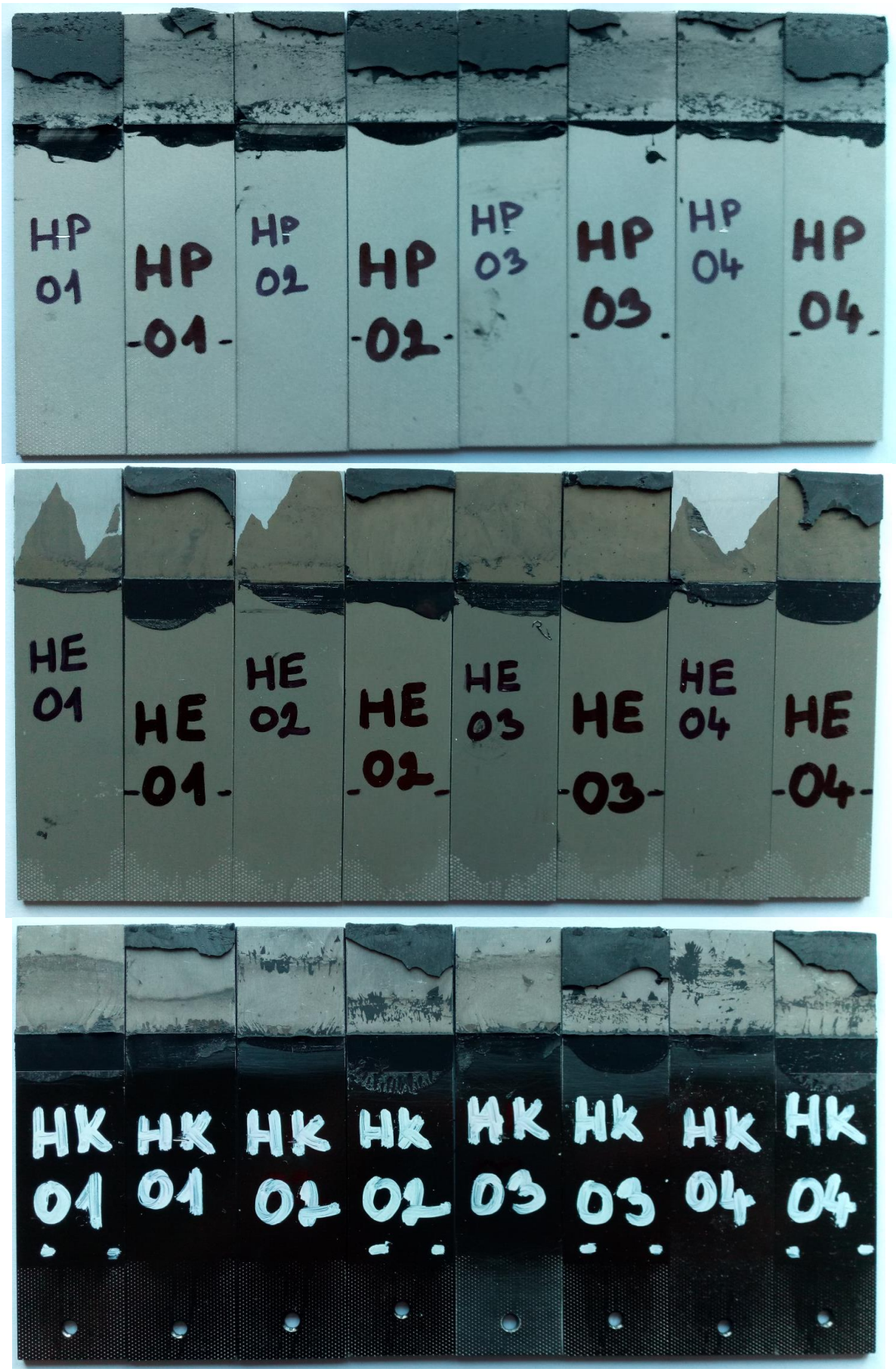
Obrázek P1 - 2 - typ porušení, stav povrchu a vady jednotlivých lepených vzorků



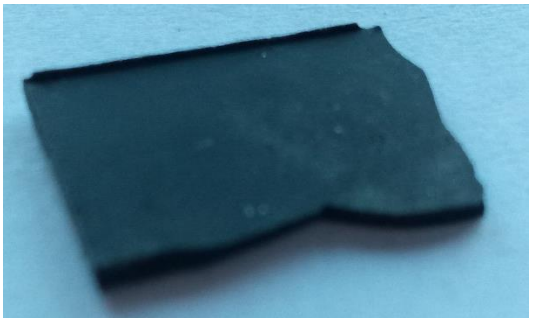
Obrázek P1 - 3 - Vzorky - pevnost v adhezi - sklolaminát - odmaštěn a mech. zdrsněn



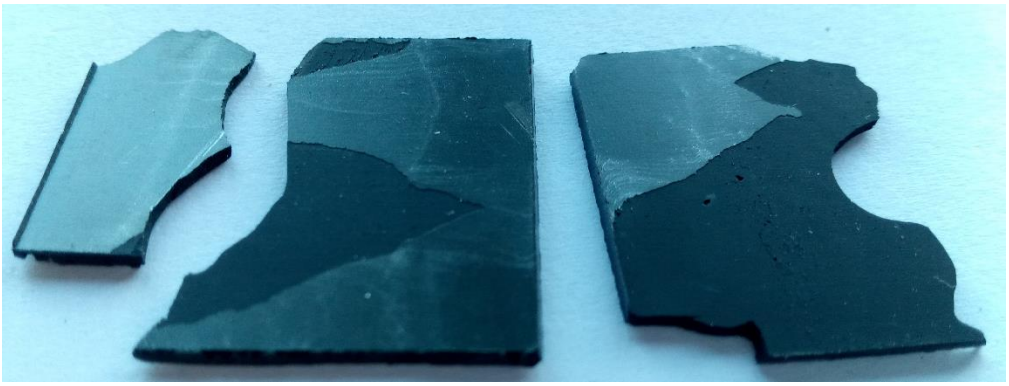
Obrázek P1 - 4 - Vzorky - pevnost v adhezi - karbon - odmaštěn a mech. zdrsněn a odmaštěný hliník



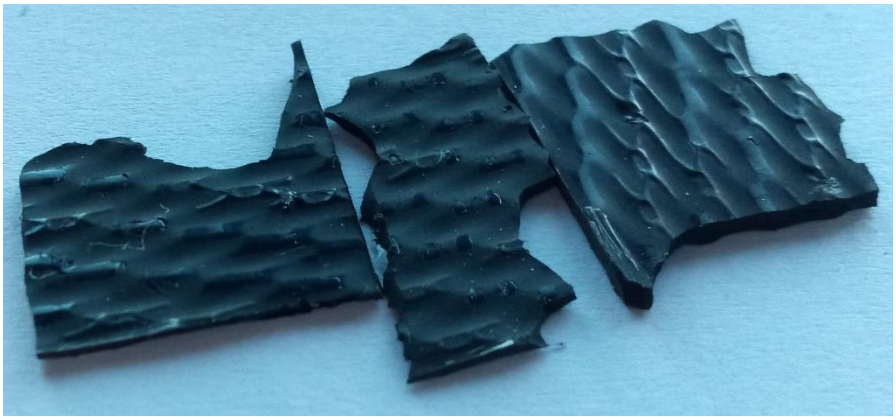
Obrázek P1 - 5 - Vzorky - pevnost v adhezi - hliníková slitina - pískováno, eloxováno, KTL



Obrázek P1 - 6 - Zbytek lepidla z hladkého povrchu



Obrázek P1 - 7 - Zbytek lepidla s vrstvou eloxu



Obrázek P1 - 8 - Zbytek lepidla z laminátu

Obrázek P1 - 9 - zbytek lepidla z laminátu s vytrženými vlákny

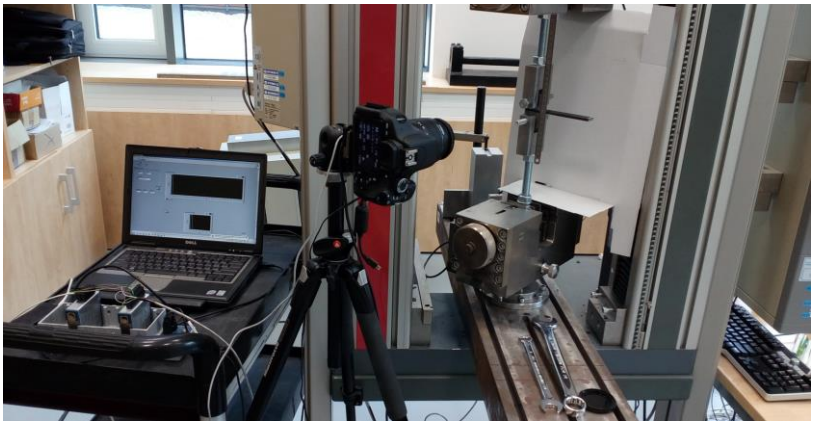
Příloha č.2

Průběh a výsledky DCB a ENF testů

Průběh a výsledky DCB a ENF testů

Vzorky pro DCB testy byly upínány pomocí navržených čelistí - viz. kapitola 4.6.3. na trhací stroj Zwick/Roell Z050. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 5mm/min, dle normy ASTM D5528-01 [24]. Při tomto měření byla odečítána zatěžující síla [N] ze silové buňky a posunutí příčníku stroje [mm]. Z důvodu velkých posunutí nebylo možné měřit posunutí pomocí extenzometrů. Na obrázku P2 - 3 je zobrazen průběh DCB testu v několika fázích.

Vzorky pro ENF testy byly uloženy na podpory přípravku pro tříbodový ohyb na trhacím stroji Zwick/Roell Z050. Vzorky byly zatěžovány trnem o předepsaném poloměru. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 1,6mm/min, dle normy ASTM D7905/D7905M [25]. Při tomto měření byla odečítána zatěžující síla [N] ze silové buňky a posunutí příčníku stroje [mm]. Z důvodu velkých posunutí nebylo možné měřit posunutí pomocí extenzometrů. Na obrázku P2 - 4 je zobrazen průběh ENF testu v několika fázích.



Obrázek P2 - 1 - Aparatura při DCB testu

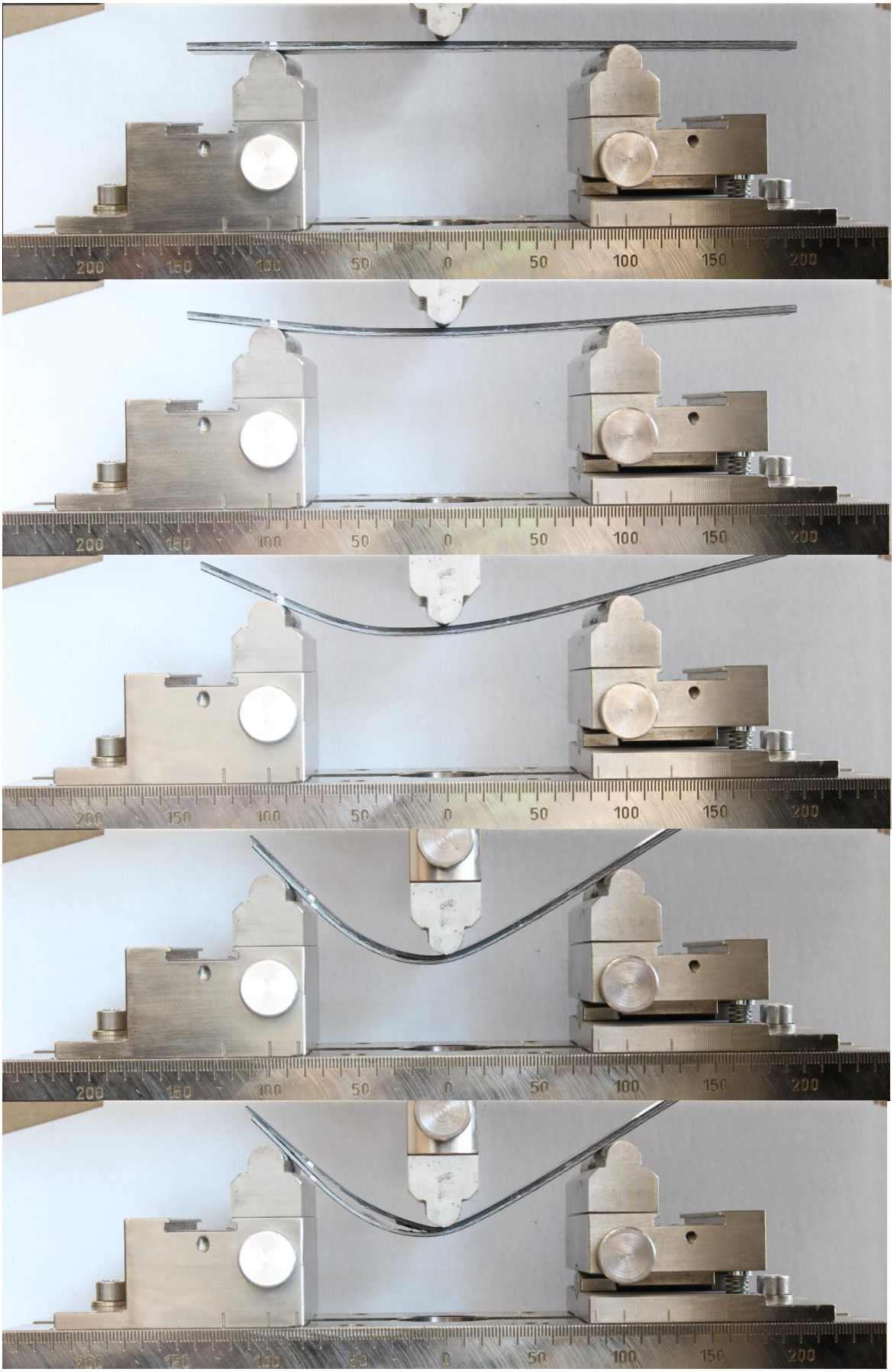
zjišťováno	test	materiál	povrchová úprava	č.	rozměry vzorku	celk. tl. (vč. lepidla) 1	2	3	4	5
kohezivní vlastnosti	DCB	sklolaminát	zdrsněno	1	T1,5 - 20x130	2,53	2,49	2,50	2,50	---
				2		2,50	2,45	2,51	2,43	---
				3		2,71	2,61	2,58	2,53	---
				4		2,66	2,68	2,60	2,45	---
				5		3,41	3,52	3,51	3,35	---
				6		3,68	3,57	3,36	3,06	---
				7		2,47	2,39	2,41	2,44	---
				8		2,50	2,56	2,47	2,53	---
				9						
				10						
	ENF	sklolaminát	zdrsněno	1	T1,5 - 20x180	2,57	2,56	2,54	2,59	2,69
				2		2,85	2,70	2,60	2,61	2,68
				3		2,68	2,73	2,85	2,99	2,96
				4		2,64	2,62	2,60	2,60	2,62
				5		2,63	2,53	2,51	2,71	2,69
				6		3,11	3,15	3,19	3,32	3,29
				7		3,34	3,37	3,47	3,55	3,58
				8		3,44	3,42	3,37	3,37	3,42
				9		---	---	---	---	---
				10		---	---	---	---	---

zdrsněno	mechanicky zdrsněno - brusným papírem P120
Mn.	množství testovaných vzorků

pozn.: všechny typy povrchových úprav byly před lepením odmaštěny.

Obrázek P2 - 2 - rozměry DCB a ENF vzorků

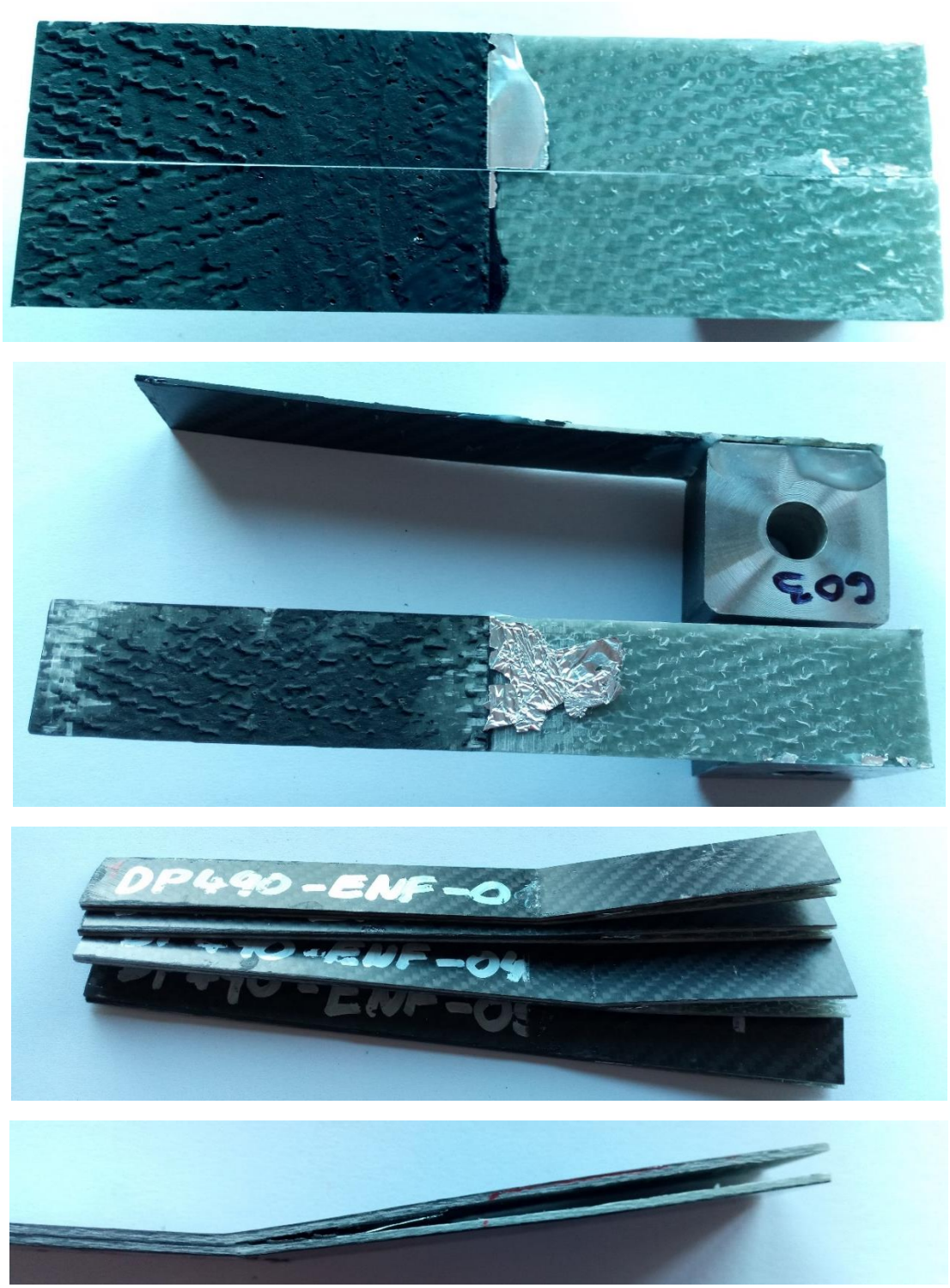
Obrázek P2 - 3 - Průběh zkoušky jednoho ze vzorků při DCB testu



Obrázek P2 - 4 - Průběh zkoušky jednoho ze vzorků při ENF testu

Na obrázku P2 - 05 jsou znázorněny ukázky vzorků po experimentálním měření. Ve vrchní části nalezneme vyobrazený vzorek DCB testu, kde je vidět částečně kohezivní a částečně adhezivní porušení lepeného spoje. Na obrázku je dále vidět, docílení rovné hrany trhliny pomocí použité hliníkové fólie.

Ve spodní části obrázku jsou vzorky pro ENF testy, kde je vidět, že ke konci zatěžování vzorku došlo většinou k poškození jednoho z lepených materiálů.



Obrázek P2 - 5 - Ukázka vzorků po provedení DCB a ENF testů

Příloha č.3

Výtah z pracovního postupu laminace křídla a lepení insertů

Výtah z pracovního postupu laminace křídla a lepení insertů

Zadní přítlačné křídlo vozu Audi R8 je tvořeno z laminátu skládající se z několika vstav skelných vláken a jedné pohledové vrstvy uhlíkové tkaniny.

Na následujících stránkách je uveden výtah z návodky popisující pracovní postup laminace a následného lepení insertu do vytvrzeného křídla. Jsou zde uvedeny pouze části týkající se lepeného spoje, tzn. z laminace pouze laminace nohou křídla.

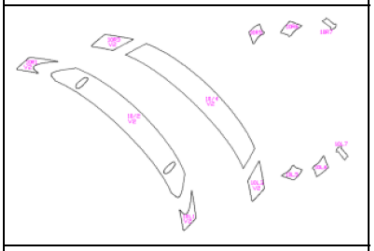
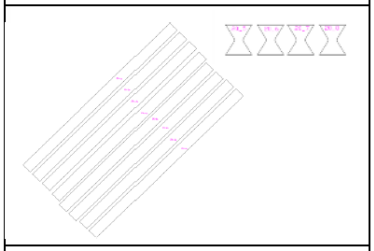
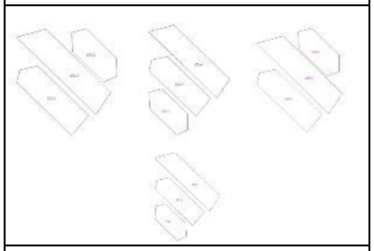
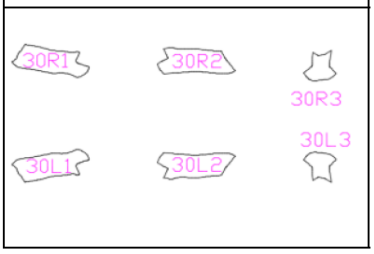
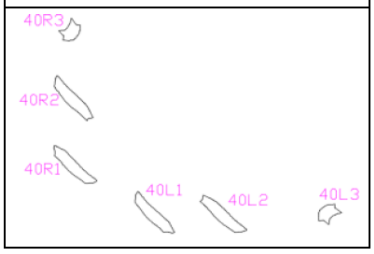
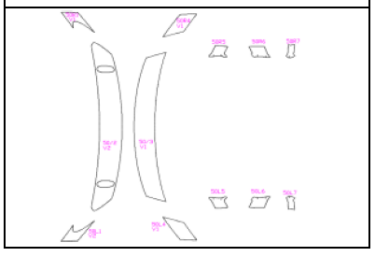
Jednotlivé nástřihové plány jsou postupně kladeny do kovové formy a v průběhu kladení je forma několikrát vyvakuována, aby jednotlivé vrstvy dokonale vyplnili záhyby. Po nakladení vrstev, umístění fólií, pytle apod. je křídlo vytvrzeno v autoklávu.

Proces lepení začíná upnutím insertu do přípravku a mechanické zdrsnění insertu i laminátu. Následuje odmaštění acetonem. Na vnitřní stěny laminátu i na insert jsou naneseny „housenky“ lepidla, které jsou následně rovnoměrně rozetřeny štětcem. Pomocí přípravku je insert vsunut do nohy křídla a následně zajištěn upínkami. Vytvrzování lepidla probíhá v peci vytrváním na teplotě 80°C po dobu 60minut.

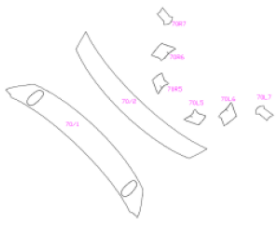
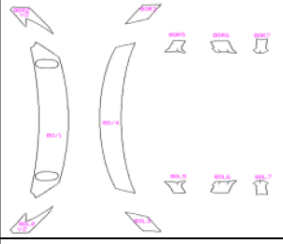
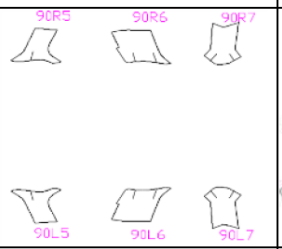
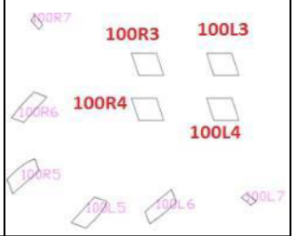
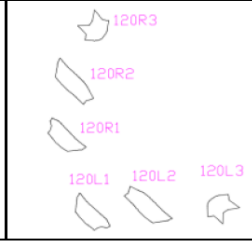
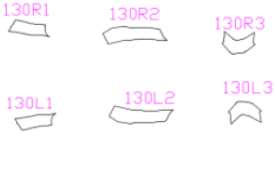
AA_Einlegen - AUD_R8D Heckfluegel																
Krok / *Step*	10	12	13	15	20	25	30	40	50	70	80	90	100	110	120	130
Orientace / *Orientierung*	±45°	0°	0°/90°	Vorkomp.	±45°	±45°	0°/90°	±45°	0°/90°	±45°	0°/90°	0°/90°	±45°	0°/90°	±45°	0°/90°
Material	CF	UD	Dry UD		CF	CF2	CF	CF	GF	GF	GF	GF	GF	CF	CF	CF
Pozn. / *Bemerkung*							VL	VL						VL	VL	VL
Strana / *Seite*	9,10,15-19	11,16,19	12, 27	13,26,35,58-60	39-41,57,74	32-34,37,38	20-22	23-25	29, 43, 48	30,44,49	31, 45, 50	51	52, 53	54	55	56

Obrázek P3 - 6 - Jednotlivé kroky laminace křídla

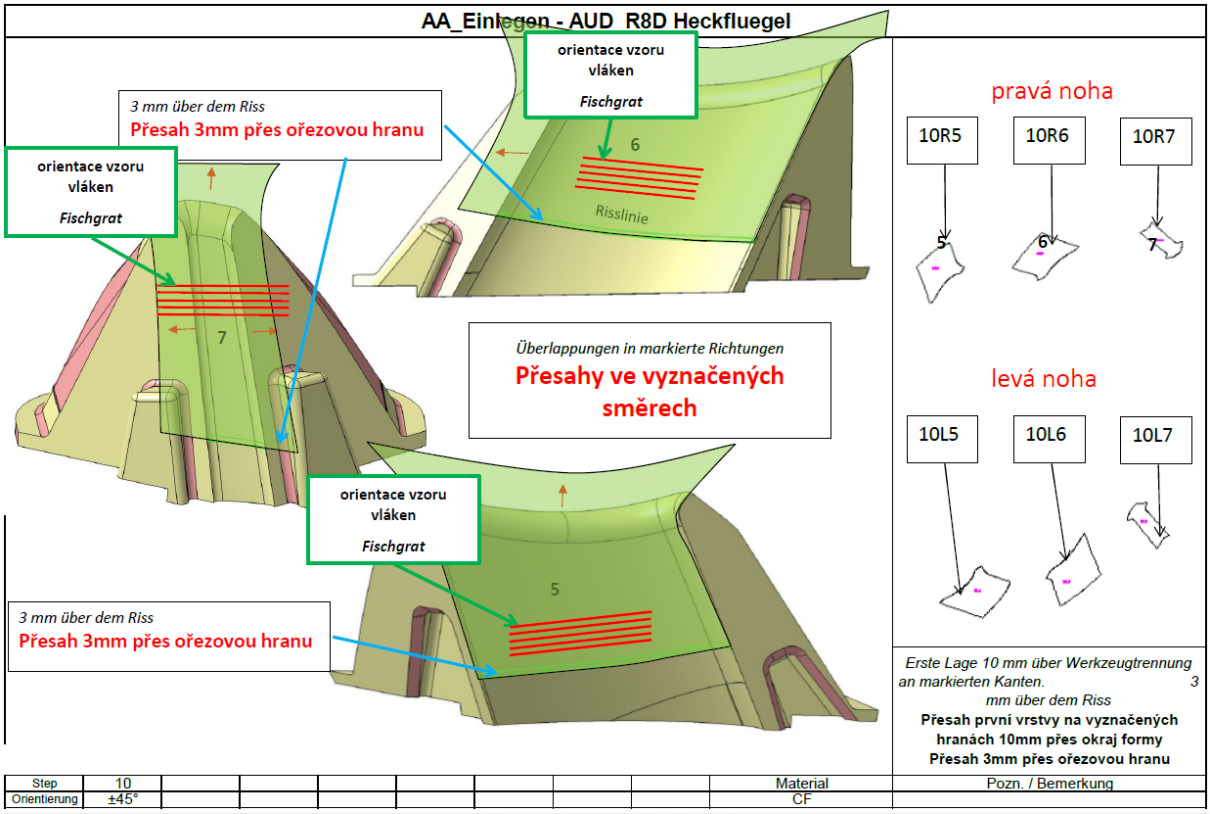
Schnittübersicht / Přehled střihů - AUD_R8D Heckfluegel

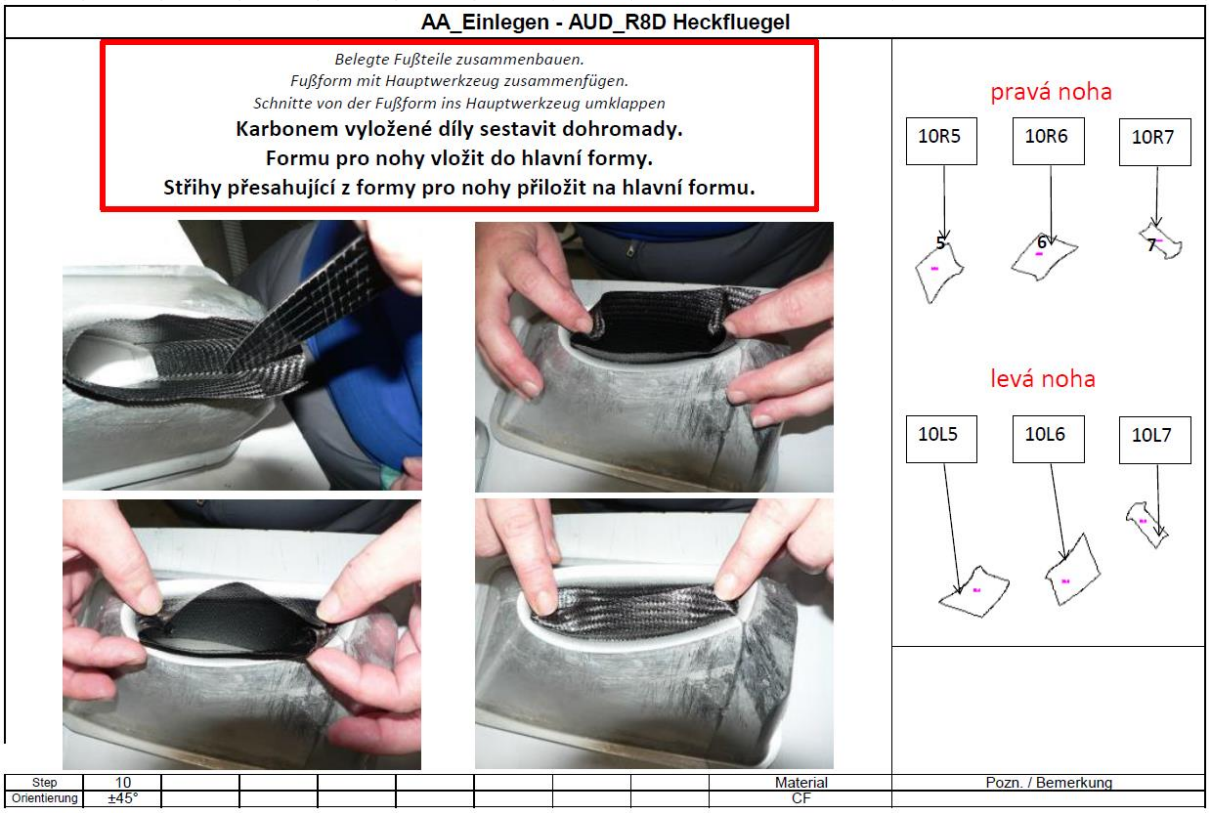
10	20	25
±45°	±45°	±45°
CF	CF	CF2
		
30	**40**	**50**
0°/90°	±45°	0°/90°
CF	CF	GF
		

Schnittübersicht / Přehled střihů - AUD_R8D Heckfluegel

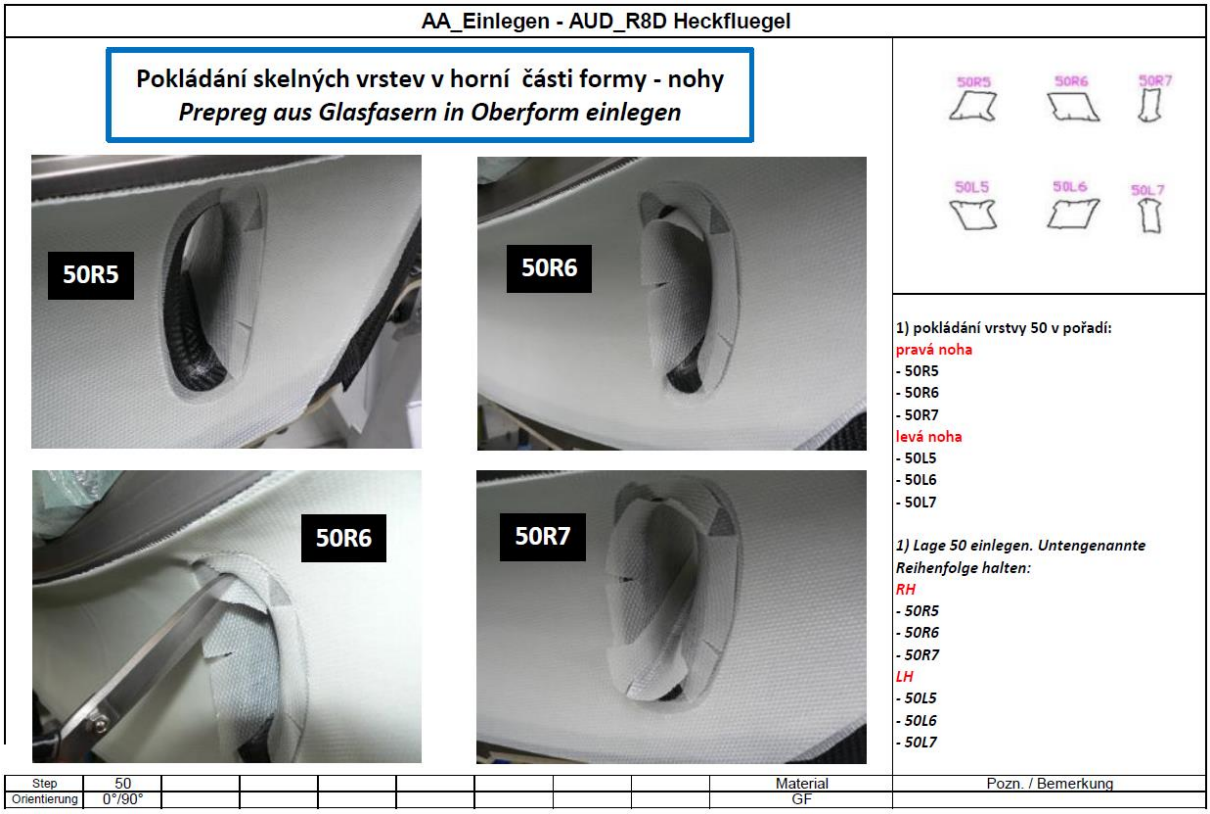
70	80	90	100
±45°	0°/90°	0°/90°	±45°
GF	GF	GF	GF
			
110	**120**	**130**	
0°/90°	±45°	0°/90°	
CF	CF	CF	
VL	VL	VL	
			

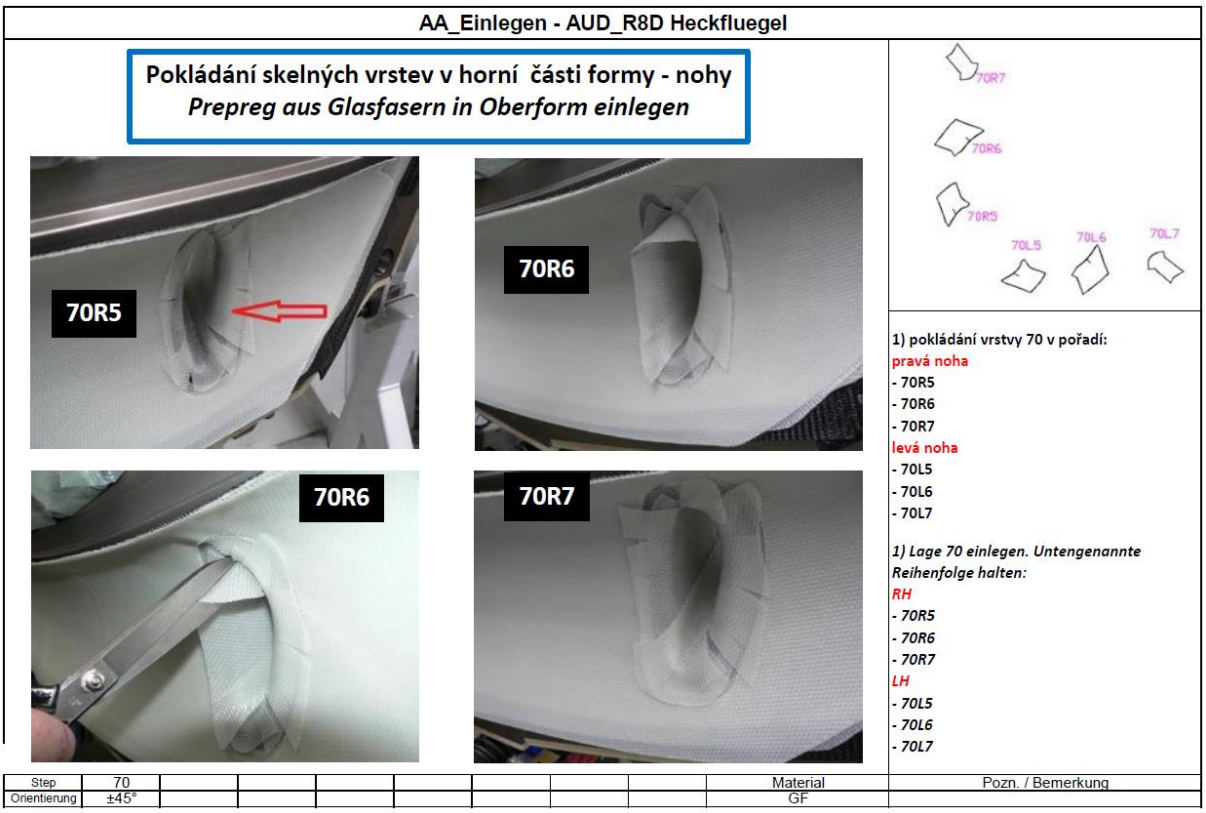
Obrázek P3 - 7 - Nástřihové plány pro laminaci křídla





Obrázek P3 - 8 - Postup laminace křídla 1

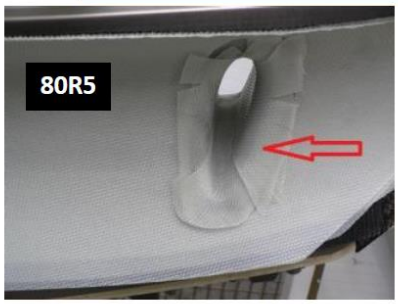


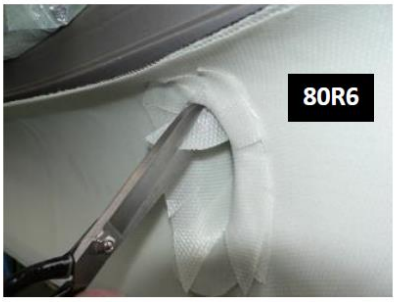


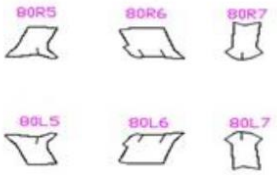
Obrázek P3 - 9 - Postup laminace křídla 2

AA_Einlegen - AUD_R8D Heckfluegel

Pokládání skelných vrstev v horní části formy - nohy
Prepreg aus Glasfasern in Oberform einlegen







1) pokládání vrstvy 80 v pořadí:
pravá noha
- 80R5
- 80R6
- 80R7

levá noha
- 80L5
- 80L6
- 80L7

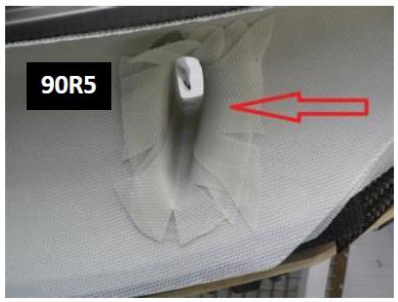
1) Lage 80 einlegen. Untengenannte Reihenfolge halten:
RH
- *80R5*
- *80R6*
- *80R7*

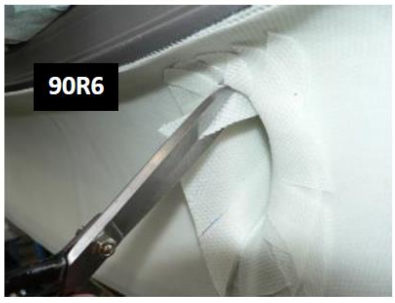
LH
- *80L5*
- *80L6*
- *80L7*

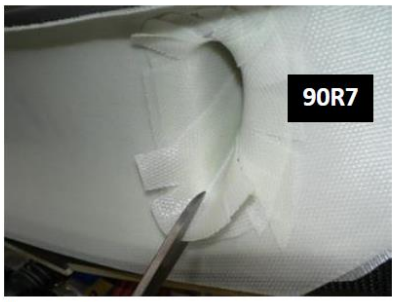
Step	80								Material	Pozn. / Bemerkung
Orientierung	0°/90°								GF	

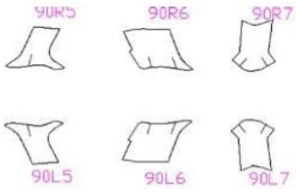
AA_Einlegen - AUD_R8D Heckfluegel

Pokládání skelných vrstev v horní části formy - nohy
Prepreg aus Glasfasern in Oberform einlegen









1) pokládání vrstvy 90 v pořadí:
pravá noha
- 90R5
- 90R6
- 90R7

levá noha
- 90L5
- 90L6
- 90L7

1) Lage 90 einlegen. Untengenannte Reihenfolge halten:
RH
- *90R5*
- *90R6*
- *90R7*

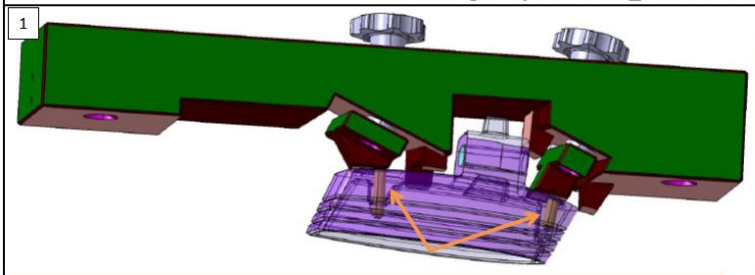
LH
- *90L5*
- *90L6*
- *90L7*

Step	90								Material	Pozn. / Bemerkung
Orientierung	0°/90°								GF	

Obrázek P3 - 10 - Postup laminace křídla 3

Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL

1



2

- Insert mit Schrauben an der Aufnahme fixieren (Bild 1).
- Die Oberfläche des beschichteten Inserts mit Mirka Mirlon Schleifvlies VF Rot anschleifen (Bild 2).
- Schmutz von der Rillen mit Bürste reinigen (Bild 3).
- Die Oberfläche des beschichteten Inserts reinigen und entfetten mit Aceton (Bild 4)

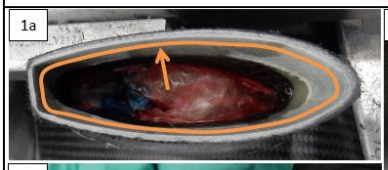
- Inserty společně se šrouby založit do přípravku (Obr. 1)
- Vnější plochy před lepením obrousit pomocí Mirka Mirlon VF červený (Obr. 2)
- Nečistoty z drážek vymést štětečkem (Obr. 3)

3

4

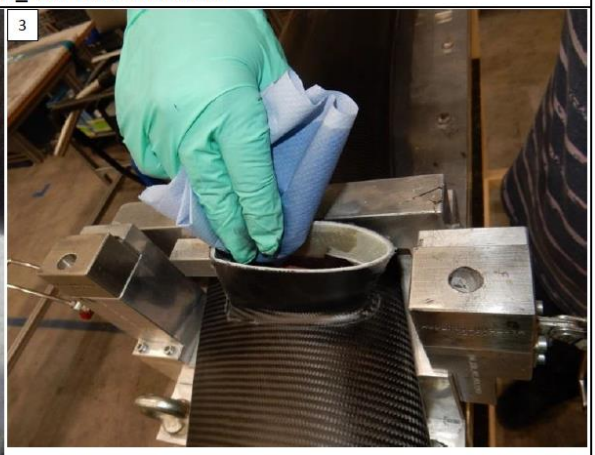
Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL

1a



2

3



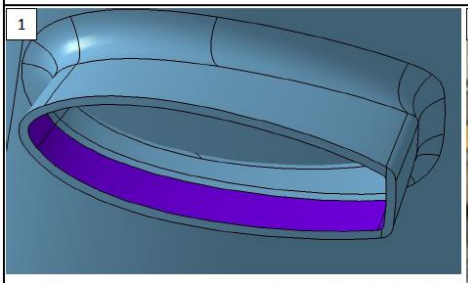
1b

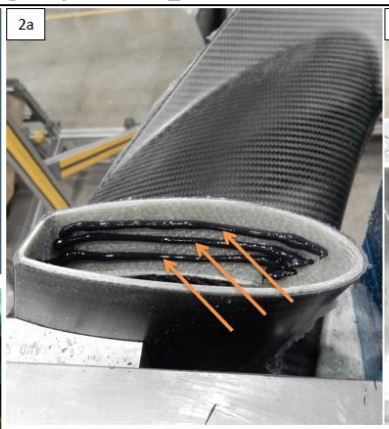
- Die Verklebeflächen innen Bein mit Schleifpapier P240 anschleifen (Bild 1a, 1b).
- Nach dem Schleifen, trocken blasen Sägemehl von innen Bein (Bild 2).
- Heckflügel in der Vorrichtung fixieren.
- Die Oberfläche reinigen und entfetten mit Aceton (Bild 3).

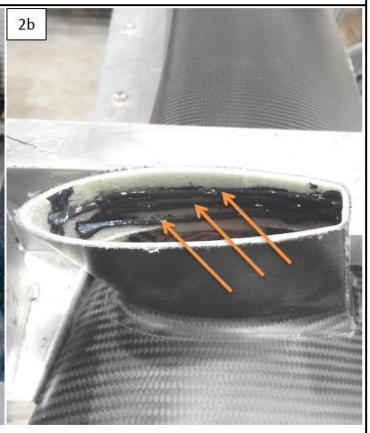
- Lepené plochy uvnitř nohou obrousit papírem P120 (Obr. 1a, 1b)
- Po obroušení lepených ploch vyfoukat piliny z vnitřku nohou (Obr. 2)
- Zadní křídlo zajistit v přípravku
- Lepené plochy před nanesením lepidla očistit a odmastit acetonem (Obr. 3)

Obrázek P3 - 11 - Postup lepení insertu 1

Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL



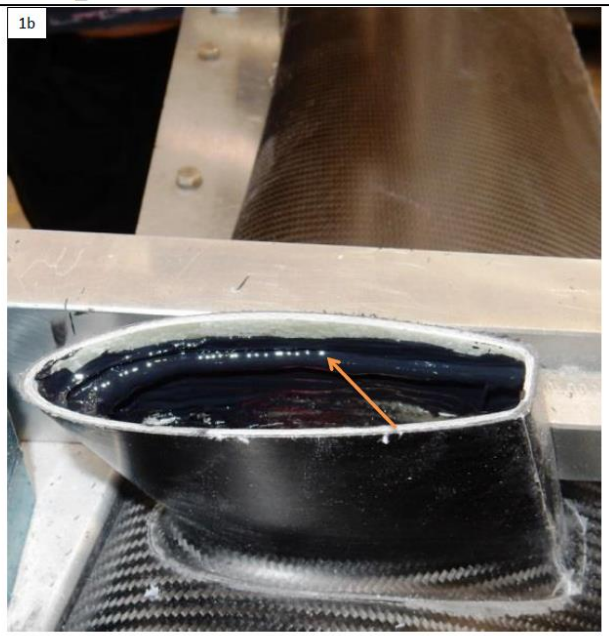




-Klebstoff an den Klebeflächen aufbringen. Auf die Klebeflächen gleichmäßig Klebstoff aufbringen (Bild 1).
- Drei "Klebstoffraupe" auf beiden Seiten der Beine aufbringen (Bild 2a, 2b).
- Die "Klebstoffraupe" mit Bürste auf der gesamten Klebefläche verreiben (Bild 3).

- Nanést lepidlo na lepené plochy křídla. Lepidlo nanést na lepené plochy rovnoměrně (Obr. 1).
- Na lepenou plochu nanést tři "housenky" lepidla po obou stranách nohy (Obr. 2a, 2b).
- Nanesené lepidlo rozetřít štětcem po celé lepené ploše (Obr. 3).

Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL

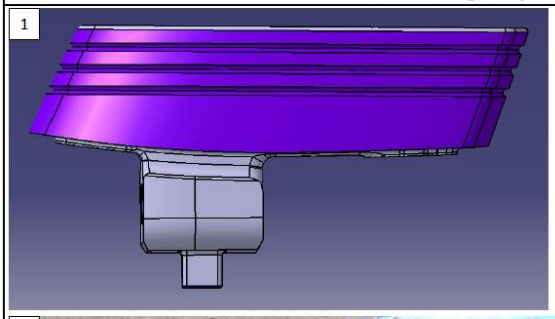


- Noch einmal eine "Klebstoffraupe" auf beiden Seiten der Beine aufbringen (Bild 1a, 1b).
- Na rozetřené lepidlo nanést ještě jednu "housenku" lepidla (Obr. 1a, 1b).

Obrázek P3 - 12 - Postup lepení insertu 2

Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL

1



2

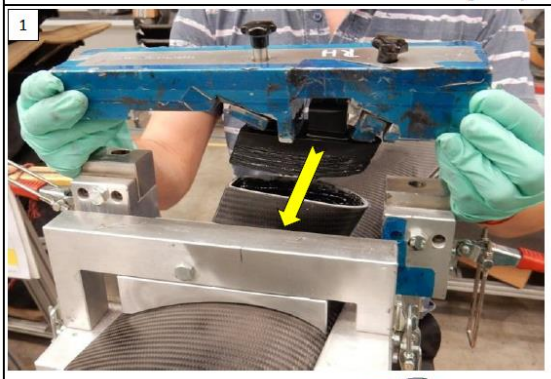
3

- Auf die Klebeflächen gleichmäßig Klebstoff aufbringen (Bild 1).
- Die "Klebstoffraupe" auf beiden Seiten der Insert aufbringen (Bild 2).
- Die "Klebstoffraupe" mit Bürste auf der gesamten Klebefläche verreiben (Bild 3).

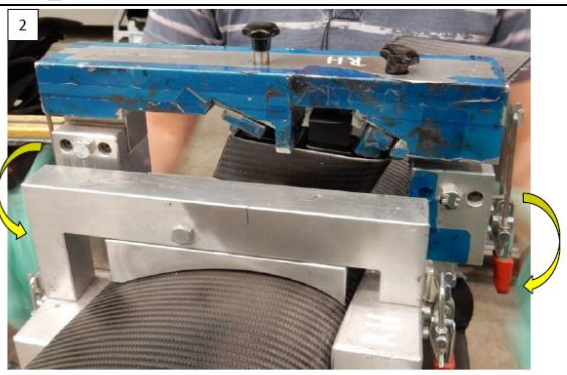
- Lepidlo nanést na lepené plochy rovnoměrně (Obr. 1).
- Na lepenou plochu insertu nanést "housenku" lepidla po obou stranách (Obr. 2).
- Nanesené lepidlo rozetřít štětcem po celé lepené ploše (Obr. 3).

Verklebung / Lepení - AUD_R8D HECKFLUEGEL

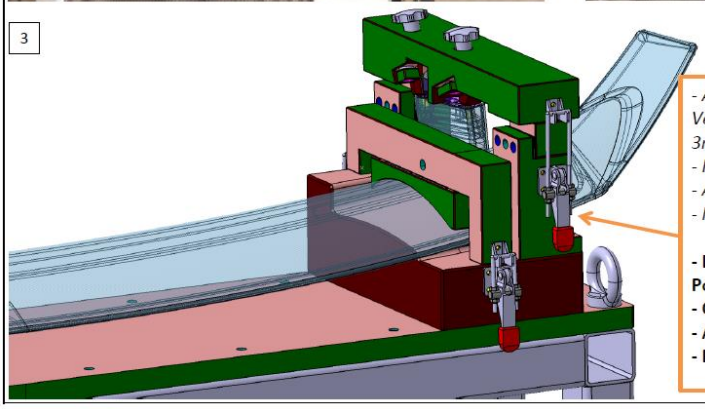
1



2



3



- Aufnehmer mit den darauf montierten Instert in die Verklebeposition bringen mit Distanzplatte den Distanz cca. 3mm erahlten (Bild 1).
- Klebstoffaustritt reinigen.
- Aufnahme mit spannere fixieren (Bild 2, 3).
- Nach dem aushärten Klebstoff nachfüllen.

- Držák s inserty založit do křídla a ustavit do pozice (Obr. 1). Pomocí distančí podložky udržet mezeru cca. 3mm.
- Očistit přetoky lepidla.
- Až poté dotáhnout upínky (Obr. 2, 3).
- Po vytvrzení vyplnit drobné spáry lepidlem.

Obrázek P3 - 13 - Postup lepení insertu 3

Příloha č.4

Datasheety použitých materiálů a lepidla

- sklolaminátový prepreg - PREG M49/32%/600S8/GE-300

- uhlíkový prepreg - MTM57/CF3202VQ

- Lepidlo DP 490 (3M)

CONFIDENTIAL

CYTEC MATERIALS DATABASE

MTM57/CF3202VQ
Normalised to 55% Vf

Material Details:	**MTM57/CF3202VQ (245 gsm 2x2 twill visual quality)**					
Typical Processing:	**120°C Autoclave Cure**					
Characteristics:	**Cosmetic carbon prepreg**					
Autoclave Cure Conditions for Data:			**1 Hr @ 120°C**			
Postcure for Data:			**None**			
			Test Conditions for Data			
Property	**Test Method**	**Units**	**20°C Dry**			
Tensile Modulus	**D 3039**	**GPa**	**63.4**			
Compressive Modulus	**D 3410**	**GPa**	**58.4**			
Trans. Tensile Modulus	**D 3039**	**GPa**	**62.6**			
Trans. Comp. Modulus	**D 3410**	**GPa**	**57.3**			
Tensile Strength	**D 3039**	**MPa**	**709**			
Compressive Strength	**D 3410**	**MPa**	**724**			
Trans. Tensile Strength	**D 3039**	**MPa**	**720**			
Trans. Comp. Strength	**D 3410**	**MPa**	**730**			
Tensile Strain to Failure	**D 3039**	**%**	**1.12**			
Comp. Strain to Failure	**D 3410**	**%**	**1.23**			
Trans. Tensile Strain	**D 3039**	**%**	**1.15**			
Trans. Comp. Strain	**D 3410**	**%**	**1.27**			
In-Plane Shear Modulus	**D 3518**	**GPa**	**3.4**			
In-Plane Shear Strength	**D 3518**	**MPa**	**109.9**			
Maj. Tensile Poisson's Ratio	**D 3039**	**-**	**0.04**			
Maj. Comp. Poisson's Ratio	**D 3410**	**-**	**0.02**			
Min. Tensile Poisson's Ratio	**D 3039**	**-**	**0.03**			
Min. Comp Poisson's Ratio	**D 3410**	**-**	**0.01**			
Flexural Modulus	**CRAG 200**	**GPa**				
Flexural Strength	**CRAG 200**	**MPa**				
ILSS	**D 2344**	**MPa**	**78.7**			
All unidirectional data normalised to 55% fibre volume fraction (except for ILSS and In-Plane Shear).						

Checked by: **Date:**

All statements, technical information and recommendations contained in this data sheet are given in good faith and are based on tests believed to be reliable, but their accuracy and completeness are not guaranteed. They do not constitute an offer to any person and shall not be deemed to form the basis of any subsequent contract, nor to constitute any warranty or representation as to quality, merchantability or fitness for purpose. All products are sold subject to seller's Standard Terms and Conditions of Sale. Accordingly, the user shall determine the suitability of the products for their intended use prior to purchase and shall assume all risk and liability in connection therewith. It is the responsibility of those wishing to sell items made from or embodying the products to inform the user of the properties of the products and the purposes for which they may be suitable, together with all precautionary measures required in handling those products. The information contained herein is under constant review and liable to be modified from time to time.

© **Copyright 2002 – The Advanced Composites Group. All rights reserved.**

HexPly® M49/32%/600S8/GE-300

Epoxy Matrix

Product Data Sheet

Description

HexPly® M49/32%/600S8/GE-300 is a Epoxy E-Glass Woven prepreg, whereby M49 is the resin type; 32% is the resin content by weight; 600S8/GE-300 is the reinforcement reference and GE-300 represents E-Glass fibre. This data sheet is complementary to the M49 resin data sheet, which should be consulted for additional information.

Reinforcement Data

			0°	90°
Nominal Area Weight	g/m²	600	300	300
Composition		8H satin		
Fibre Type		E-Glass		
Nominal Fibre Density	g/cm³	2.56		

Matrix Properties

Glass transition temperature of laminate (Cure cycle: 90 min @ 120°C)	°C	110 (DMA onset, 5°C/min, 1Hz, 15µm)
Nominal Resin Density	g/cm³	1.18

Prepreg Data

Nominal Area Weight	g/m²	882
Nominal Resin Content	weight %	32
Tack Level		High

Processing

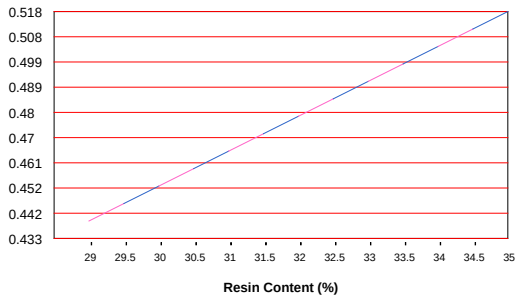
Cure Cycle		@ 90 °C	360 min
	or	@ 120 °C	90 min
	or	@ 140 °C	30 min
Recommended heat up rate		ºC/min	3 - 5
Pressure gauge		bar	3 - 7

The optimum cure cycle, heat up rate and dwell period depend on part size, laminate construction, oven capacity and thermal mass of tool.

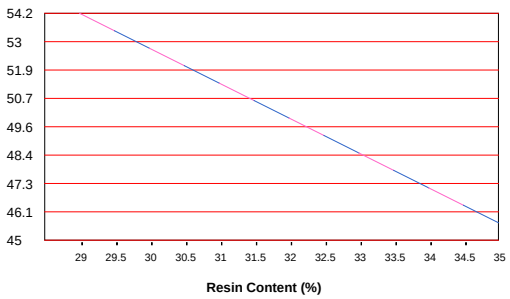
Cured Laminate Properties

(nominal composite density 1.86 g/cm³)

RESIN CONTENT % vs CURED PLY THICKNESS



RESIN CONTENT % vs FIBRE VOLUME %



The above graphs enable the fibre volume content of a laminate to be estimated using the measured cured ply thickness. The calculation assumes no resin loss.

HexPly® M49/32%/600S8/GE-300

Mechanical Properties

(Normalised to 50% fibre volume, except for ILSS)

Mechanical Properties are based on 120 °C cure for 90 min, at 7 bar pressure and -0.9 bar vacuum.

Data is the result from several tests on Autoclave cured laminates. Some of the values achieved will have been higher, and some lower, than the figure quoted. These are nominal values.

Warp (RT / Dry)	Tensile	Flexural	ILSS	Compression
Strength (MPa)	550	660	56	460
Modulus (GPa)	20	21	.	-
Test Method	EN 2747	EN 2746	EN 2377	EN 2850 B

NB: Flexural results are not normalised

Prepreg Storage Life

Shelf Life[1]: 12 months at -18°C/0°F (from date of manufacture).

[1] Shelf Life: the maximum storage life for HexPly® prepreg, when stored continuously, in a sealed moisture-proof bag, at -18°C/0°F or 5°C/41°F. To accurately establish the exact expiry date, consult the box label.

Out Life[2]: 30 days at Room Temperature.

[2] Out Life: the maximum accumulated time allowed at room temperature between removal from the freezer and cure.

Prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polyethylene bag, thus preventing condensation. (A full reel in its packing can take up to 48 hours).

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fine fibrous materials should be observed, and a Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean disposable inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components.

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. All users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other terms

® Copyright Hexcel Corporation

For other worldwide sales office telephone numbers
and a full address list please go to :
http://www.hexcel.com/contact/salesoffices

Scotch-Weld™
Lepidlo **EPX™ DP490**

Informace o produktu

Aktualizováno: březen 1996
Nahrazuje vydání z: listopadu 1993

Popis produktu

DP490 je černé thixotropní dvousložkové epoxidové lepidlo na vyplňování mezer s mimořádně dobrými aplikačními charakteristikami.
Je určeno k použití v aplikacích vyžadujících odolnost a vysokou pevnost a je vhodné zejména na konstrukci složených sestav.
Tento produkt má vynikající odolnost proti teplu a povětrnostním vlivům.

Fyzické vlastnosti
Nejsou určeny pro specifikační účely

	ZÁKLAD	**KATALYZÁTOR**
Měrná tíha	1,00	1,00
Konzistence	Pasta, která se nesesedá	Pasta, která se nesesedá
Směšovací poměr Podle hmotnosti Podle objemu	100 100	50 50
Barva	Černá	Špinavě bílá
Doba aplikace	Minimálně 1,5 h při 23 °C	
Doba pro dosažení manipulační pevnosti	4 až 6 h při 23 °C	
Doba pro dosažení úplné pevnosti	7 dnů (test úplné účinnosti po jednom týdnu)	
Doba skladovatelnosti	15 měsíců od data expedice ze skladu 3M, pokud je uloženo v původní krabici při teplotě 21 °C (70 °F) a relativní vlhkosti 50 %	

Výkonnostní charakteristiky
Nejsou určeny pro specifikační účely

Výkonnostní charakteristiky vytvrzeného lepidla

Byly testovány dva vytvrzovací cykly:

Vytvrzovací cyklus 1	7 dnů při 23 °C
Vytvrzovací cyklus 2	24 h při 23 °C, 1 h při 80 °C

Výkonnostní charakteristiky (pokrač.)
Nejsou určeny pro specifikační účely

Teplota a účinnost při střihání a odlupování

(Leptaný hliník) Pevnost ve střihu podle BS 5350 C5. Pevnost adheze byla testována odlupováním pomocí volného válce podle BS 5350 C9.
Testy probíhaly při 23 °C, není-li uvedeno jinak.

Teplota (°C)	Pevnost ve střihu (1) (N/mm^2)	Pevnost ve střihu (2) (N/mm^2)	Pevnost adheze DaN/cm
-55	23,7	31,6	neuvádí se
23	30,2	28,7	9,24
80	11,9	12,7	7,32
120	2,8	3,2	neuvádí se
150	1,9	1,7	neuvádí se

Přilnutí k leptanému hliníku po stárnutí vlivem povětrnostních podmínek

Podmínky stárnutí	Pevnost adheze (N/mm^2)
Regulace RT	26,2
Voda při 23 °C, 750 h	25,6
50 °C, rel. vlhkost 96 %, 750 h	22,0
120 °C, 750 h	25,3
175 °C, suché teplo, 120 h	29,6
Skydroll 500B při 23 °C, 750 h	27,6
JP4 při 23 °C, 750 h	28,7
Hydraulický olej při 23 °C, 750 h	29,5

DP490 vykazuje dobré přilnutí k řadě plastových povrchů dokonce po prostém otření rozpouštědlem.
Tento typ přilnutí lze dále zdokonalit pomocí brusného materiálu 3M Scotchbrite a základového nátěru Scotch-Weld 3901.

Plasty	Pevnost adheze (N/mm^2)
Epoxid zesílený uhlíkovými vlákny	36,1 (kohezní)
Směs na tvarování polyesterových desek	4,3 (substrát)
Fenol zesílený skleněnými vlákny	30,3 (kohezní)
ABS (plněný)	3,2 (substrát)
PVC (plněný)	2,9 (substrát)
Azloy (polykarbonát plněný sklem)	3,0 (adheze)
Valox (PET plněný sklem)	1,4 (substrát)
PMMA	3,7 (adheze)
Noryl (tm XTRA) (PPO plněný sklem)	4,9 (adheze)

Skladovací podmínky

Produkt skladujte při teplotách 15 °C až 25 °C, abyste dosáhli maximální životnosti.

Pokyny pro použití a čištění

Vložte náplň do aplikátoru 3M EPX a upevněte ji svorkou.

Odstraňte víčko k opakovanému uzavírání.

Vytlačte trochu lepidla a zajistěte, aby obě složky volně vytékaly.

Připojte správnou směšovací hubici (měla by obsahovat 20 nebo více prvků).

Lepidlo dávkujte podle potřeby.

Po použití nechte hubici na místě a soupravu uložte nebo odstraňte hubici, otřením vyčistěte špičku a vraťte víčko.

Při dalším použití odstraňte starou hubici se ztvrdlým lepidlem a nasaďte novou nebo odstraňte víčko a nasaďte novou hubici.

Příprava povrchu:
Stupeň přípravy povrchu je závislý na požadované pevnosti spojení a podmínkách prostředí, kterým bude spojená sestava pravděpodobně vystavena. U většiny plastů (kromě acetalu, polyetylénu, polypropylénu a některých dalších materiálů s nízkou povrchovou energií) zajistí dobré přilnutí otření rozpouštědlem s čisticím přípravkem 3M VHB, následované obroušením materiálem 3M Scotchbrite 7447 a dalším otřením rozpouštědlem dočista. Tímto způsobem se také aplikují práškové povrchové nátěry a další vypalovací nátěrové systémy.

Stejná povrchová příprava zajistí dobré přilnutí ke kovovým povrchům. Cílem je kromě zlepšení mechanického přilnutí odstranit volné potahy oleje, vosku, prachu, částic po drcení, uvolněných nátěrů a všech dalších kontaminačních látek. Vynikající přilnutí k mnoha kovovým substrátům zajistí rovněž broušení čistým, jemným ocelovým pískem.

Pokud se předpokládá působení vlivu vlhkého prostředí na kovové substráty, doporučujeme doplňující základový nátěr 3M Scotch-Weld 3901. Jinak lze použít techniky potahování pomocí chemické konverze v kombinaci se základním nátěrem, které zajistí nejlepší trvanlivost.

Čištění:
Přebytečné nezatvrdlé lepidlo lze odstranit těmito rozpouštědly:

Přípravek na čištění povrchů 3M VHB (na bázi slabého alkoholu)
Rozpouštědlo 3M Scotch-Grip č. 2 (ketonová směs)
Průmyslový čisticí přípravek 3M (aerosol)

Další informace o produktu

Chcete-li další informace o přípravě náročných povrchů nebo pravděpodobném vlivu agresivních prostředí, obraťte se na vašeho prodejce produktů 3M.

Zdravotní a bezpečnostní informace

Bezpečnostní opatření:
Produkt způsobuje vážné podráždění očí, může způsobit trvalé poškození zraku. Dráždí pokožku. Při kontaktu s pokožkou může způsobit zvýšení citlivosti. Vyhněte se kontaktu s pokožkou a očima. Používejte vhodné rukavice a ochranu očí nebo obličeje.

Kontaminovaný oděv před dalším použitím vyperte. Vyhněte se dlouhodobému vdechování výparů. Vyhněte se vdechování prachu při broušení ztvrdlého materiálu.

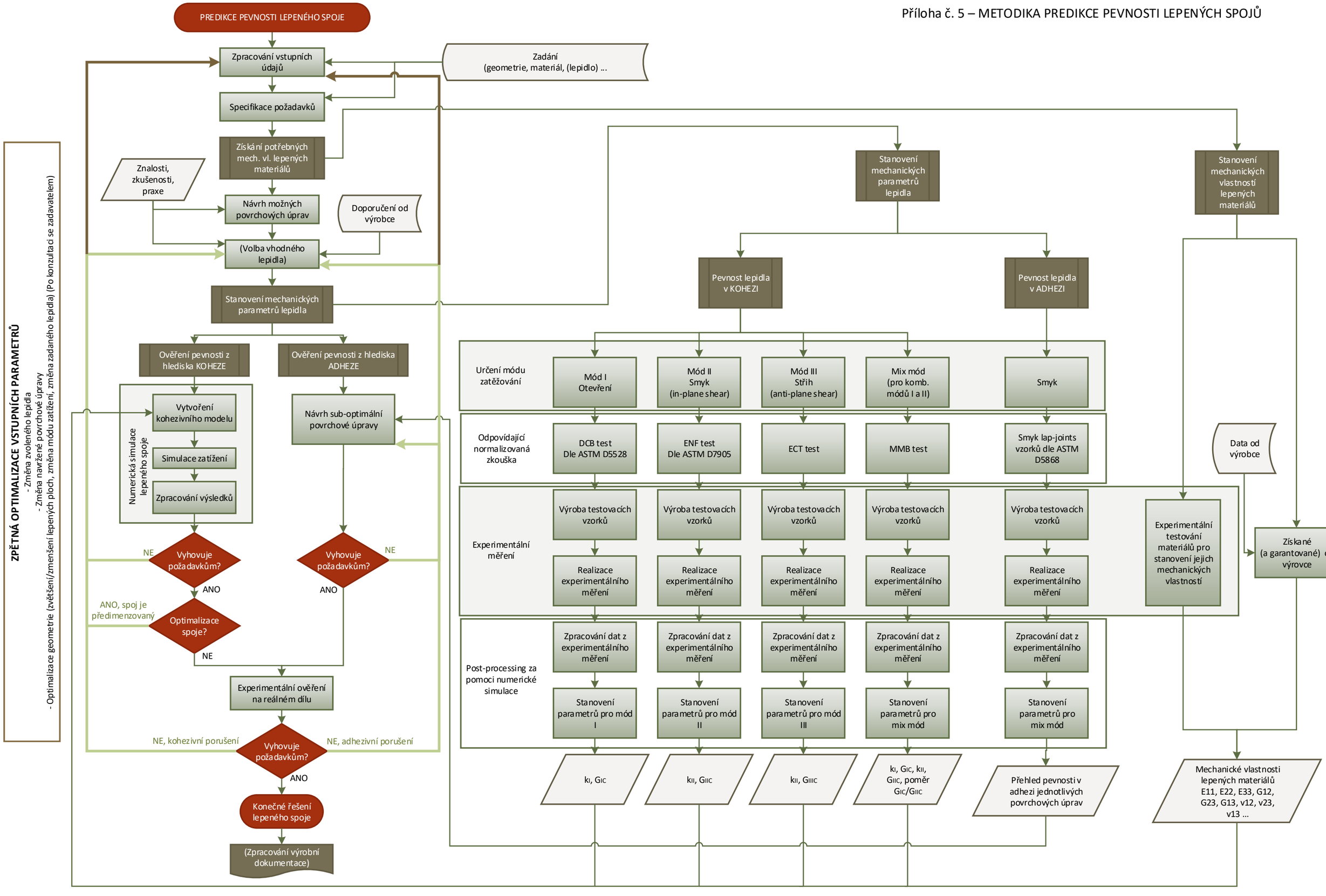
První pomoc:

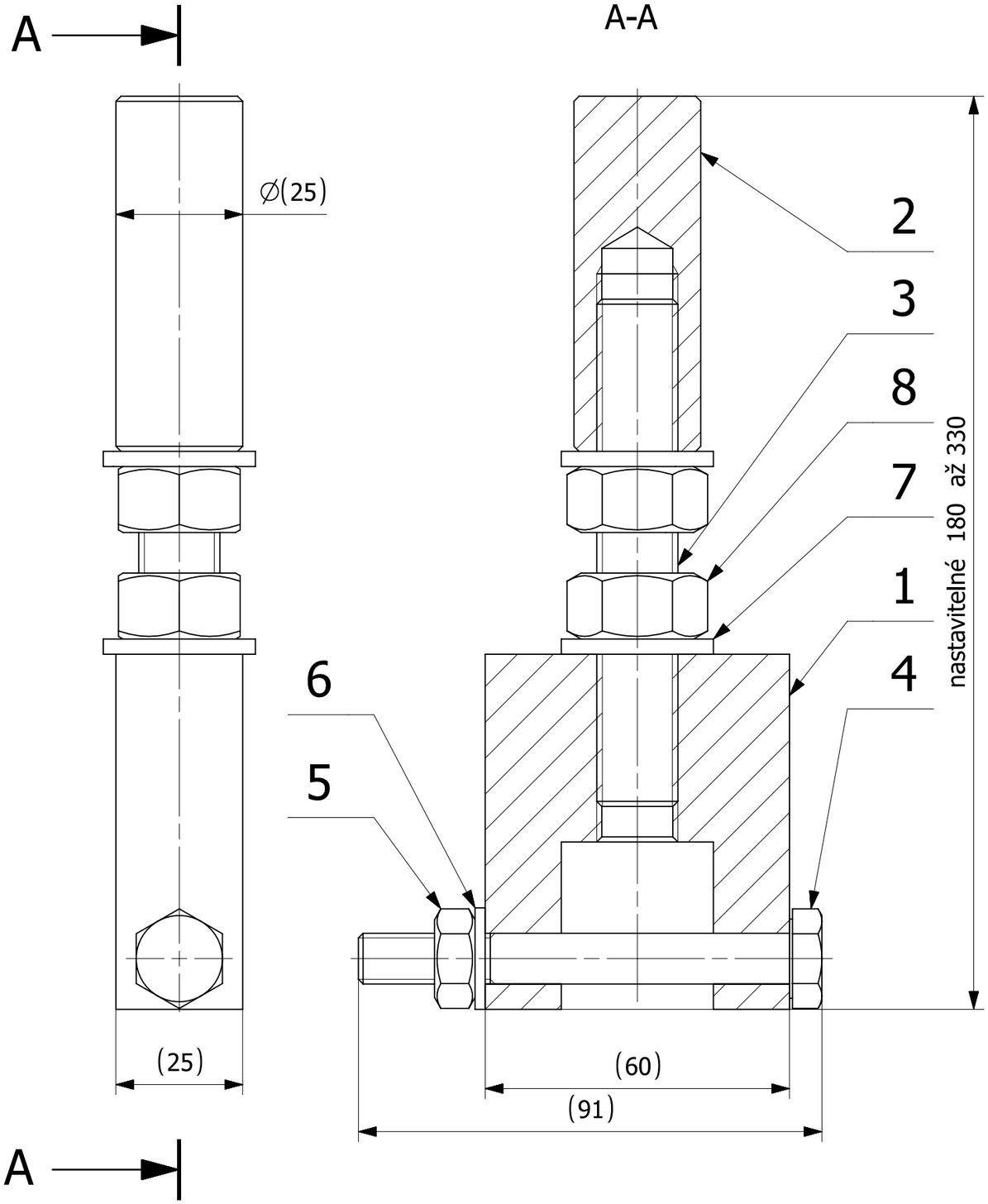
Kontakt s očima: Otevřené oči okamžitě vypláchněte množstvím vody, proplachujte je alespoň 15 minut. Zavolejte lékaře.

Kontakt s pokožkou: Pokožku okamžitě opláchněte množstvím vody a mýdlem.

Chcete-li další informace, laskavě se obraťte na toxikologické oddělení v centrále v Bracknellu, tel. (0344) 858000.

3M EPX, Duo-Pak, Scotch-Grip, Scotchlite a Scotch-Weld jsou ochranné známky spol. 3M.


PREDIKCE PEVNOSTI LEPENÉHO SPOJE
Zpracování vstupních údajů
Zadání (geometrie, materiál, (lepidlo) ...
Specifikace požadavků
Získání potřebných mech. vl. lepených materiálů
Znalosti, zkušenosti, praxe
Návrh možných povrchových úprav
Doporučení od výrobce
(Volba vhodného lepidla)
Stanovení mechanických parametrů lepidla
Ověření pevnosti z hlediska KOHEZE
Ověření pevnosti z hlediska ADHEZE
Numerická simulace lepeného spoje
Vytvoření kohezivního modelu
Simulace zatížení
Zpracování výsledků
Návrh sub-optimální povrchové úpravy
NE
Vyhovuje požadavkům?
ANO
NE
Vyhovuje požadavkům?
ANO
ANO, spoj je předimenzovaný
Optimalizace spoje?
NE
Experimentální ověření na reálném dílu
NE, kohezivní porušení
Vyhovuje požadavkům?
NE, adhezivní porušení
ANO
Konečné řešení lepeného spoje
(Zpracování výrobní dokumentace)
ZPĚTNÁ OPTIMALIZACE VSTUPNÍCH PARAMETRŮ
- Změna zvoleného lepidla
- Změna navržené povrchové úpravy
- Optimalizace geometrie (zvětšení/zmenšení lepených ploch, změna módu zatížení, změna zadaného lepidla) (Po konzultaci se zadavatelem)
Stanovení mechanických parametrů lepidla
Stanovení mechanických vlastností lepených materiálů
Pevnost lepidla v KOHEZI
Pevnost lepidla v ADHEZI
Určení módu zatěžování
Mód I Otevření
Mód II Smyk (in-plane shear)
Mód III Střih (anti-plane shear)
Mix mód (pro komb. módů I a II)
Smyk
Odpovídající normalizovaná zkouška
DCB test Dle ASTM D5528
ENF test Dle ASTM D7905
ECT test
MMB test
Smyk lap-joints vzorků dle ASTM D5868
Data od výrobce
Experimentální měření
Výroba testovacích vzorků
Realizace experimentálního měření
Experimentální testování materiálů pro stanovení jejich mechanických vlastností
Získané (a garantované) od výrovce
Post-processing za pomoci numerické simulace
Zpracování dat z experimentálního měření
Stanovení parametrů pro mód I
Stanovení parametrů pro mód II
Stanovení parametrů pro mód III
Stanovení parametrů pro mix mód
kI, GIC
kII, GIIC
kII, GIIIC
kI, GIC, kII, GIIC, poměr GIC/GIIC
Přehled pevnosti v adhezi jednotlivých povrchových úprav
Mechanické vlastnosti lepených materiálů E11, E22, E33, G12, G23, G13, v12, v23, v13 ...



Světlá výška mezi čelistmi lze nastavit pomocí tří párů závitových tyčí až do 600mm.

8	MATICE M16		8.8 Pozink	DIN 934			2
7	PODLOŽKA 17		200HV	DIN 125			2
6	PODLOŽKA 10,5		100HV	DIN 125			1
5	MATICE M10		8.8 Pozink	DIN 934			1
4	ŠROUB M10x85		8.8 Pozink	DIN 931			1
3C	ZÁVITOVÁ TYČ M16 -250mm		8.8 Pozink	DIN 975			1
3B	ZÁVITOVÁ TYČ M16 -150mm		8.8 Pozink	DIN 975			1
3A	ZÁVITOVÁ TYČ M16 -100mm		8.8 Pozink	DIN 975			1
2	UPNUTI DCB - TYČ	PR30-100	S235JR	EN 10277-2	0,22kg	DP-UP-D02	1
1	UPNUTÍ DCB - VIDLICE	30x65x75	S235JRG2	EN 10277-2	0,56kg	DP-UP-D01	1
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	Norma	C.hmot.	Cislo výkresu	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	Material	Norm	Weight	Drawing No.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	23.1.2017	KALINA Tomáš		
Prezkousel / Checked by				
Schvalil / Approved by				
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: Pripravek_uchyceni_DCB_Assembly_DRW

Soubor-vykres / DRW-file: Pripravek_uchyceni_DCB_Assembly_DRW

Projekt / Project: UPNUTÍ - DCB

C.sestavy / Assembly No.

C.hmot.sestavy

Meritko / Scale: 1:1

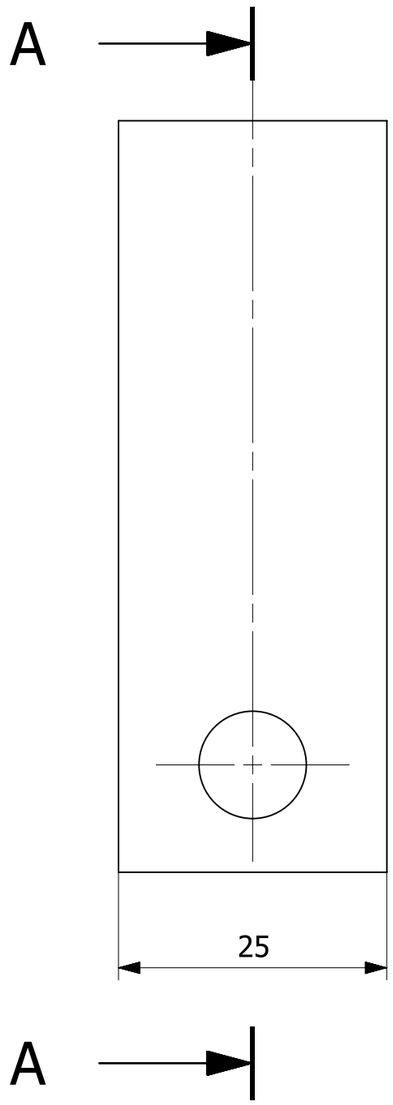
Nazev / Title: UPNUTÍ DCB - MONT. SESTAVA

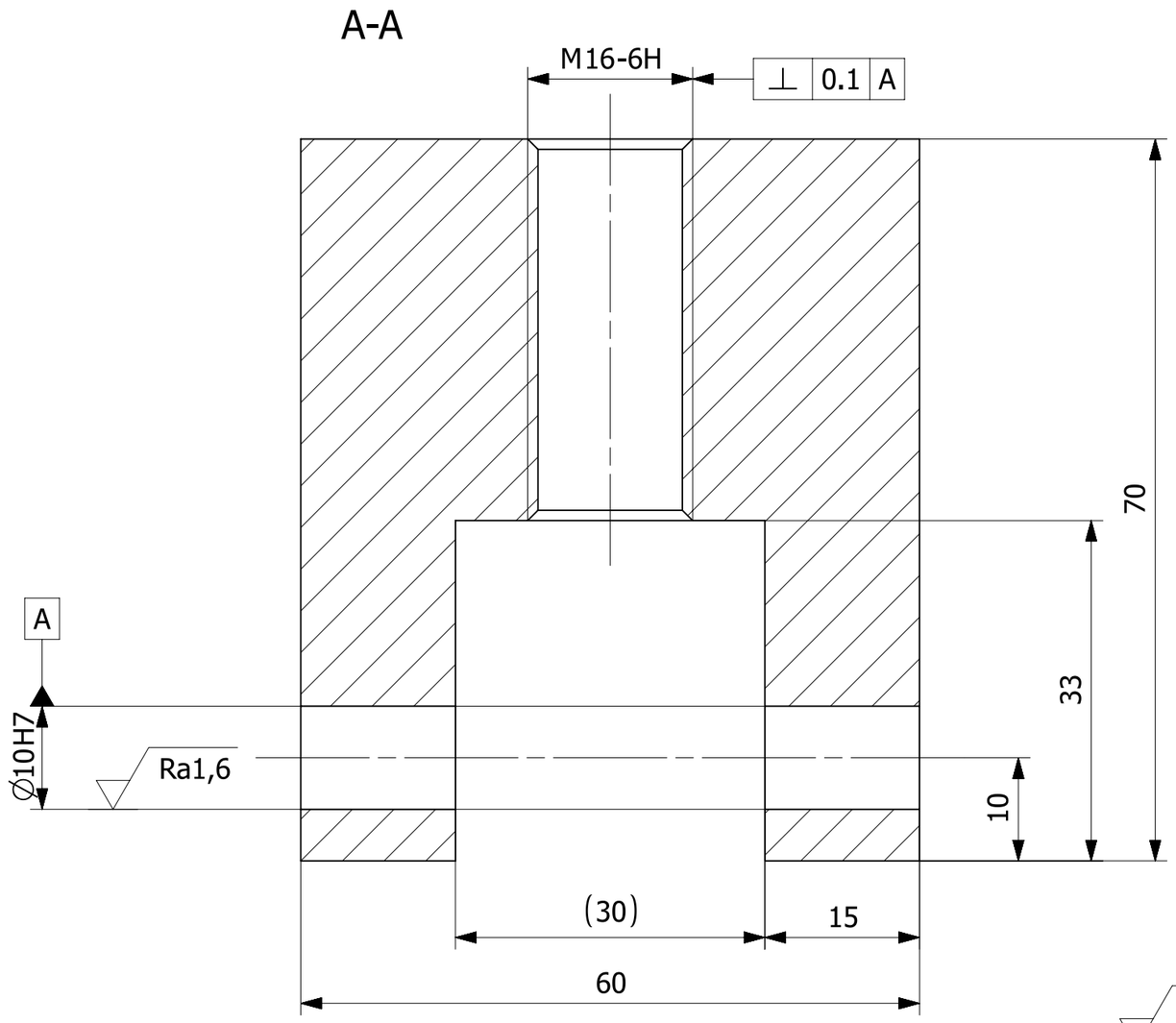
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP-S00

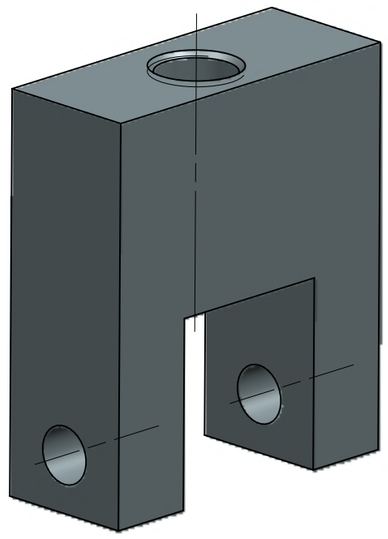
Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1





Ra 6,3 (Ra 1,6)



Nekótovaná sražení 0,5x45°.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

2	25x60x70	30x65x75	S235JRG2 EN 10277-2		0,56kg	0,96kg	DP-UP-S00	1
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	23.1.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 8015
ISO 2768mK
ISO 128

Soubor-model / ASM-file: Pripravek_uchyceni_DCB_VIDLICE_DRW

Soubor-vykres / DRW-file: Pripravek_uchyceni_DCB_VIDLICE_DRW

Projekt / Project: UPNUTÍ - DCB

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 2:1

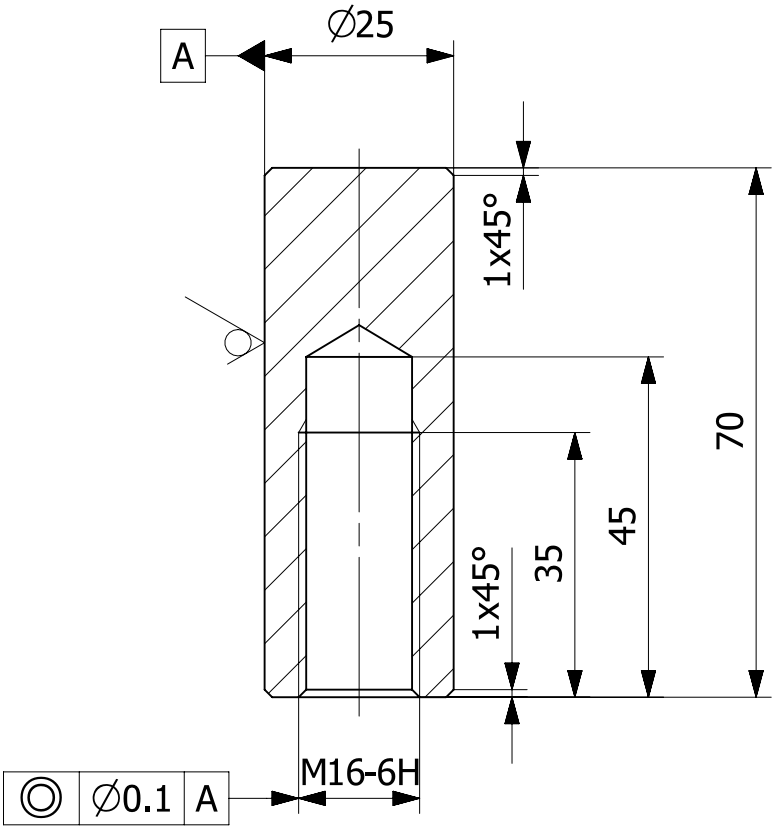
Nazev / Title: UPNUTÍ DCB - VIDLICE

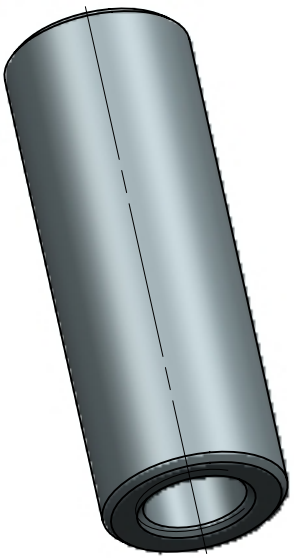
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP-D01

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1





Ra6,3

Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

2	∅ 25-70	∅ 25h9-100	S235JR EN 10277-2		0,22kg	0,55kg	DP-UP-S00	2
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	23.1.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: Pripravek_uchyceni_DCB_TYC_DRW

Soubor-vykres / DRW-file: Pripravek_uchyceni_DCB_TYC_DRW

Projekt / Project: UPNUTÍ - DCB

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:1

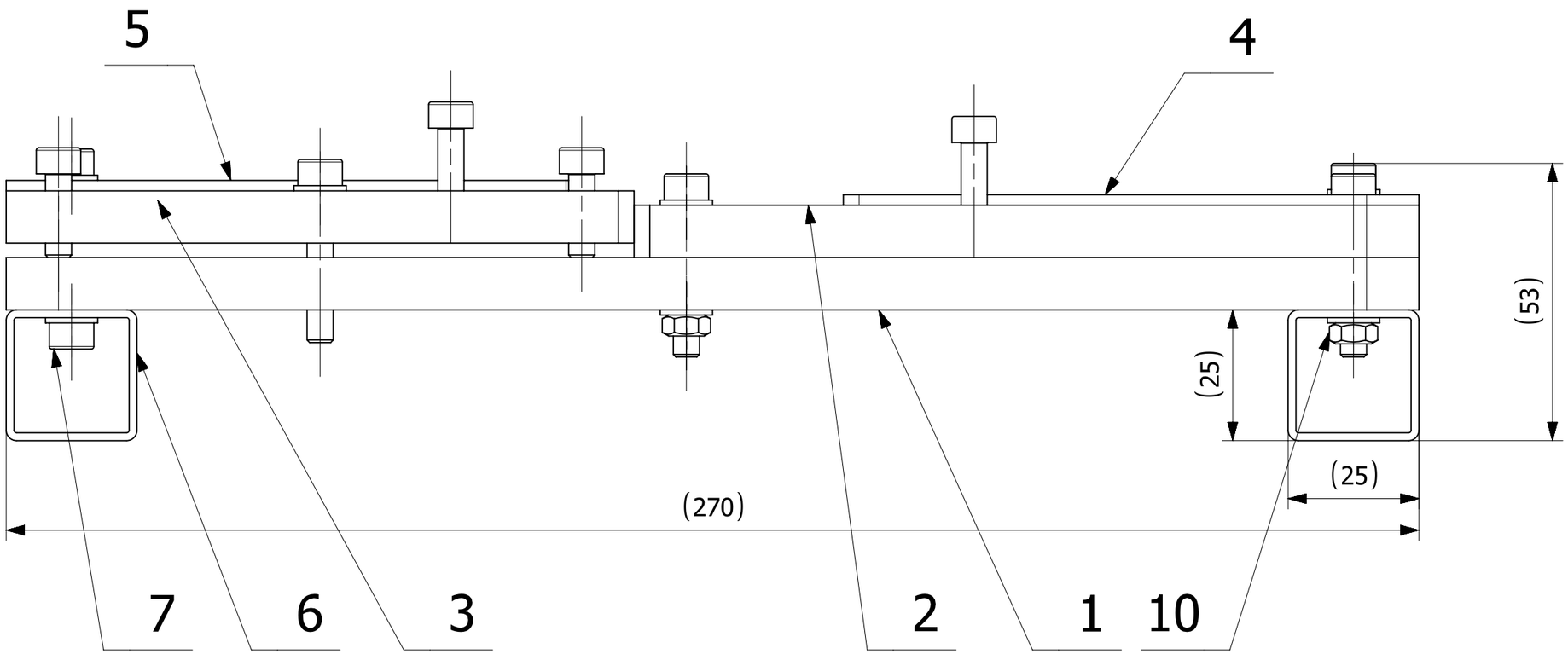
Nazev / Title: UPNUTÍ DCB - TYČ

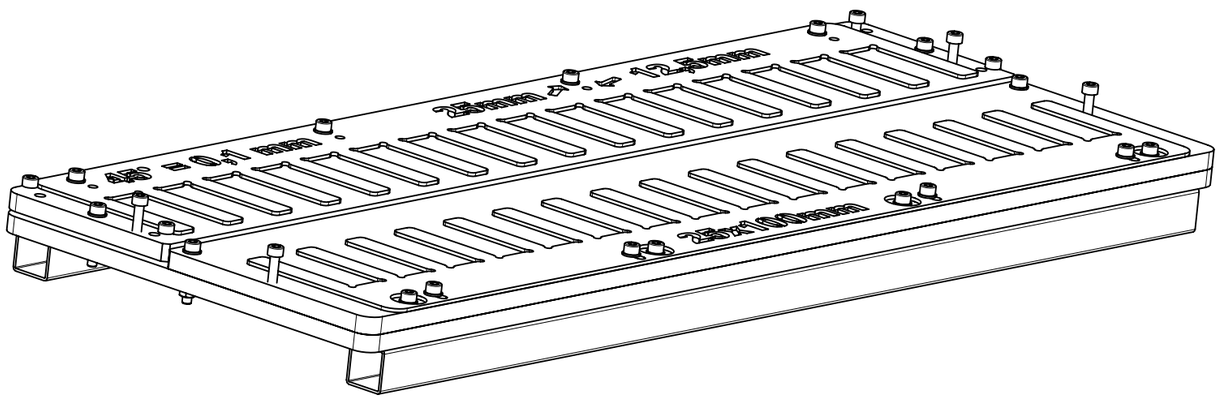
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP-D02

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

Format: A4





10	MATICE M5		8.8 Pozink	DIN 934			8
9	ŠROUB M5x30		8.8 Pozink	DIN 912			8
8	ŠROUB M5x16		8.8 Pozink	DIN 912			8
7	ŠROUB M5x10		8.8 Pozink	DIN 912			12
6	PODSTAVA	4HR TR 25x25x1,5	S235JRH	EN 10219-1	0,7kg	DP-LEP-D06	2
5	PLECH - POMOCNÝ - HORNÍ	2-110X655	S235JRC+N	EN 10025-2	0,7kg	DP-LEP-D05	1
4	PLECH - POMOCNÝ - DOLNÍ	2-110X655	S235JRC+N	EN 10025-2	0,7kg	DP-LEP-D04	1
3	DESKA-HORNÍ	10-120X695	S235JRC+N	EN 10025-2	6,5kg	DP-LEP-D03	1
2	DESKA-DOLNÍ	10-150X695	S235JRC+N	EN 10025-2	8,1kg	DP-LEP-D02	1
1	ZÁKLADNÍ DESKA	10-270x695	S235JRC+N	EN 10025-2	10,5kg	DP-LEP-D01	1
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	Norma	C.hmot.	Cislo výkresu	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	Material	Norm	Weight	Drawing No.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	12.5.2017	KALINA Tomáš		
Prezkousel / Checked by				
Schvalil / Approved by				
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 8015
ISO 2768mK
ISO 128

Soubor-model / ASM-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT

C.sestavy / Assembly No.

C.hmot.sestavy

Meritko / Scale: 1:1

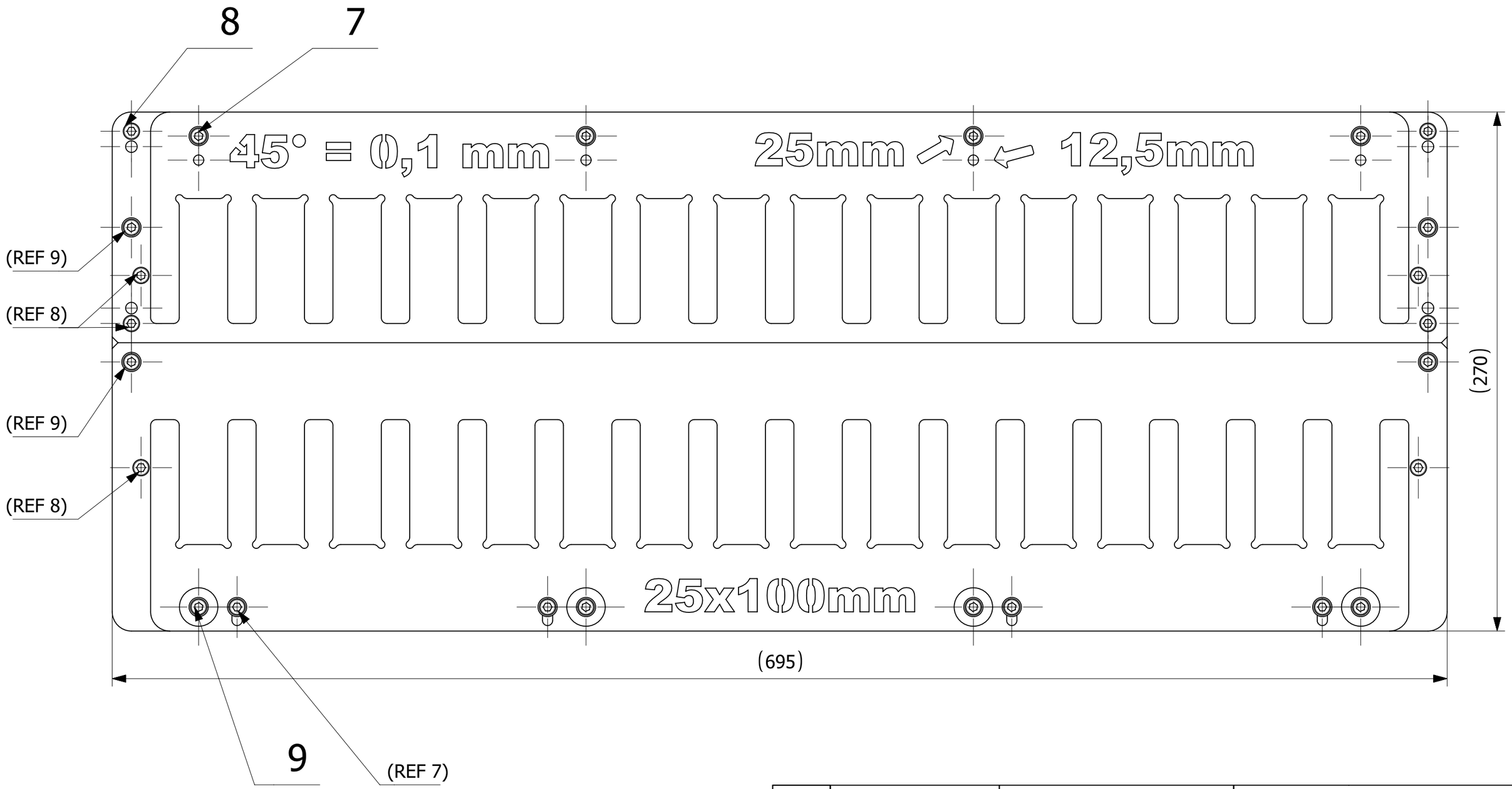
Nazev / Title: MONTÁŽNÍ SESTAVA

Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-S00

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 2



CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	12.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT

C.sestavy / Assembly No.

C.hmot.sestavy

Meritko / Scale: 1:2

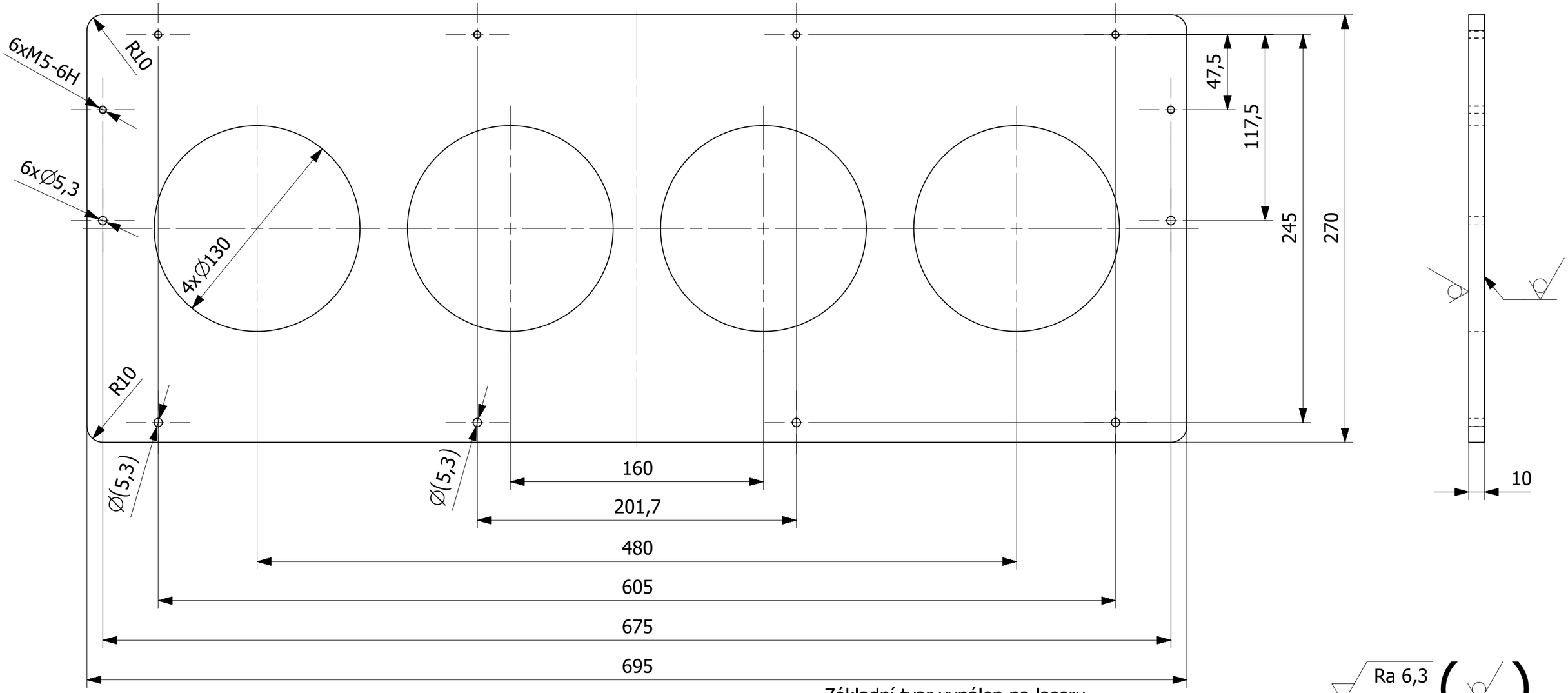
Nazev / Title: MONTÁŽNÍ SESTAVA

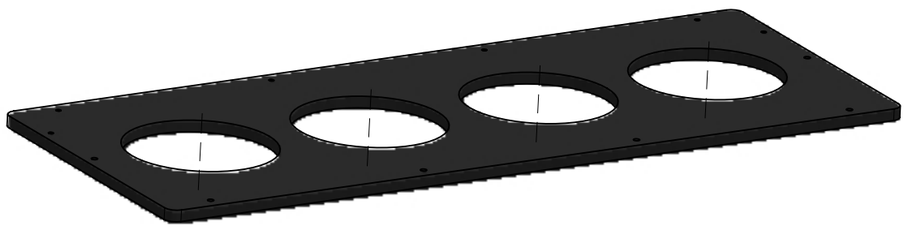
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-S00

List / sheet no. 2 Pocet listu / sheets 2

Format: A3





Ra 6,3

Základní tvar vypálen na laseru.
Všechny otvory jsou průchozí. Díry se závity - závit po celé hloubce.
Pro závitové díry M5 nepředpalovat díry, pouze křížkem naznačit polohu pro ruční vrtání.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.
1	Plech T10-270x695		S235JRC+N EN 10025-2		10,51kg		DP-LEP-S00	1

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	8.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D01-deska-zakladni_DWG
Soubor-vykres / DRW-file: D01-deska-zakladni_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT
C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

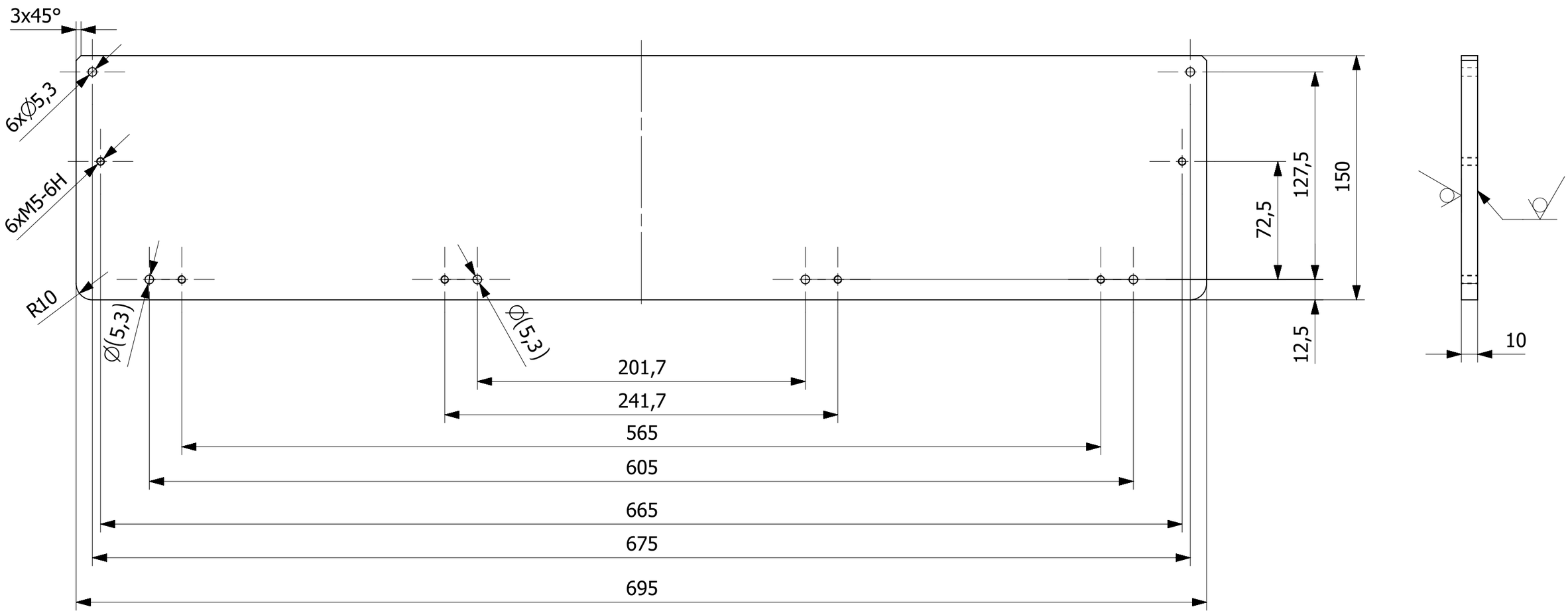
Nazev / Title: ZÁKLADNÍ DESKA

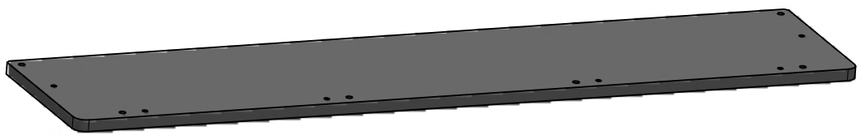
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D01

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1





Základní tvar vypálen na laseru.
Všechny otvory jsou průchozí. Díry se závity - závit po celé hloubce.
Pro závitové díry M5 nepředpalovat díry, pouze křížkem naznačit polohu pro ruční vrtání.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

Ra 6,3

1	Plech T10-150x695		S235JRC+N EN 10025-2		8,14kg		DP-LEP-S00	2
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	8.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 8015
ISO 2768mK
ISO 128

Soubor-model / ASM-file: D02-deska-dolni_DWG
Soubor-vykres / DRW-file: D02-deska-dolni_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT
C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

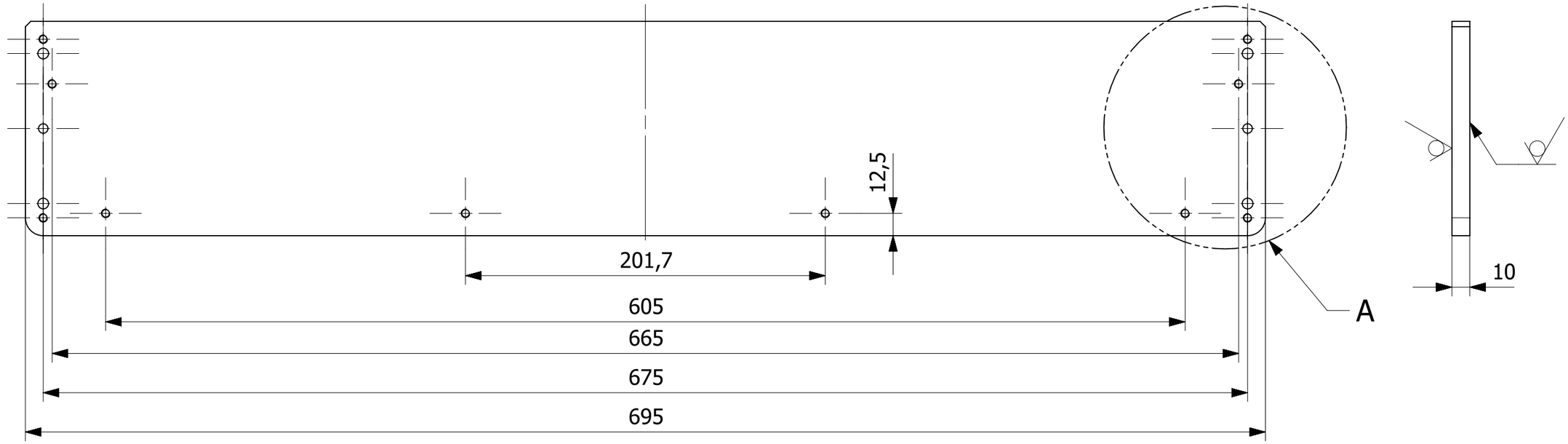
Nazev / Title: DESKA - DOLNÍ

Rev.: 0

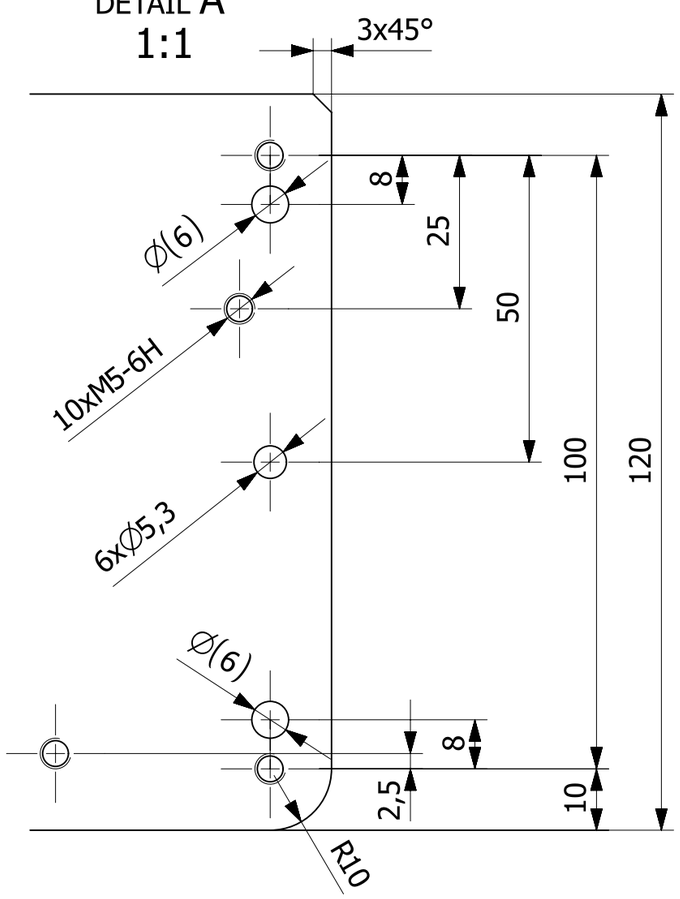
Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D02

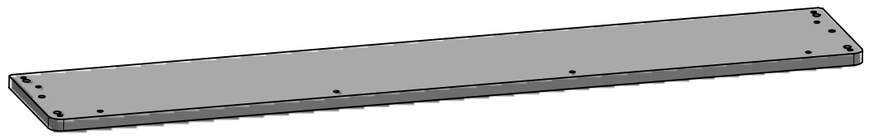
List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

Format: A3



DETAIL A
1:1





Ra 6,3

Základní tvar vypálen na laseru.
Všechny otvory jsou průchozí. Díry se závity - závit po celé hloubce.
Pro závitové díry M5 nepředpalovat díry, pouze křížkem naznačit polohu pro ruční vrtání.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1	Plech T10-120x695		S235JRC+N EN 10025-2		6,50kg		DP-LEP-S00	3
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	8.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D03-deska-horni_DWG
Soubor-vykres / DRW-file: D03-deska-horni_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT
C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

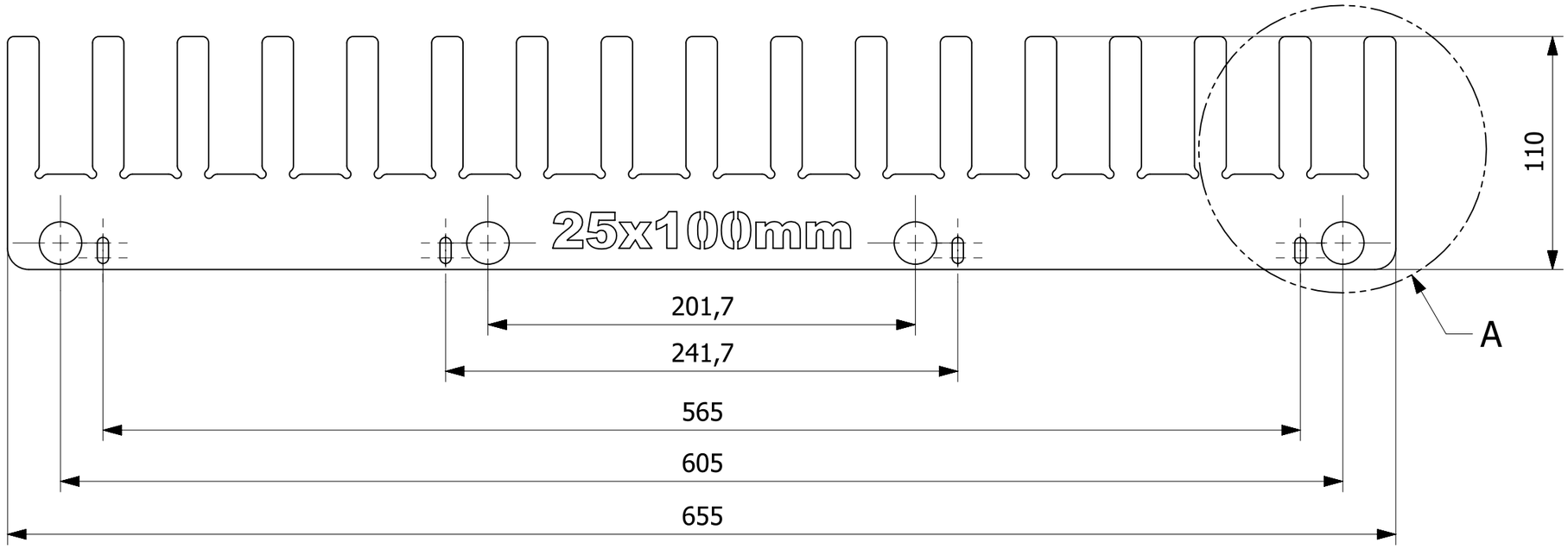
Nazev / Title: DESKA - HORNÍ

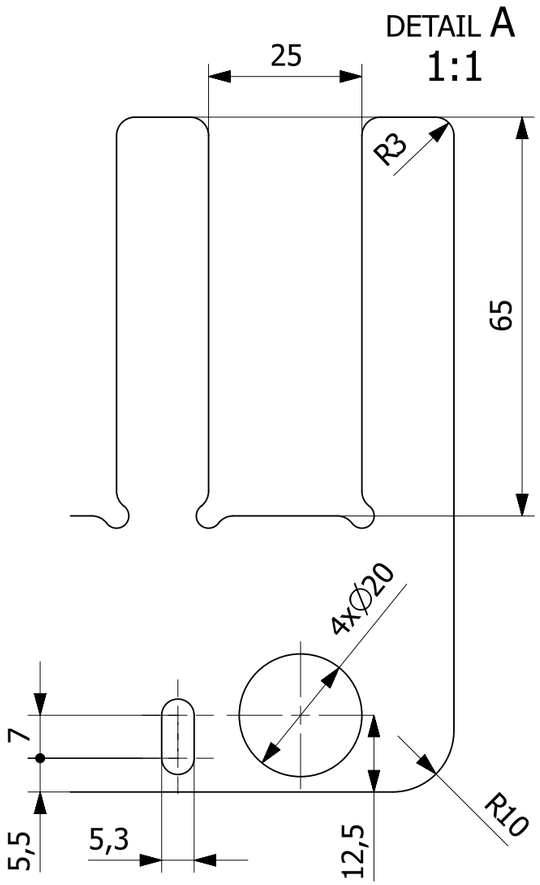
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D03

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1





Ra 6,3 ( )

Základní tvar vypálen na laseru.
Všechny otvory jsou průchozí.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1	Plech T2-110x655		S235JRC+N EN 10025-2		0,67kg		DP-LEP-S00	4
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	8.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D04-plech-pomocny-dolni_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D04-plech-pomocny-dolni_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

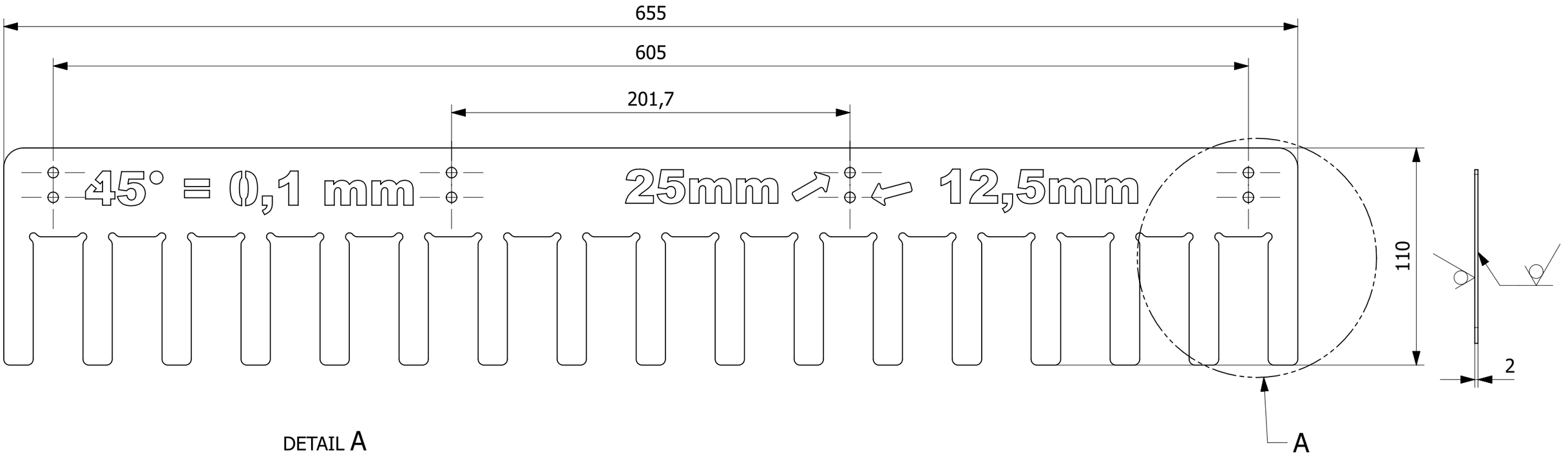
Nazev / Title: PLECH - POMOCNY-DOLNÍ

Rev.: 0

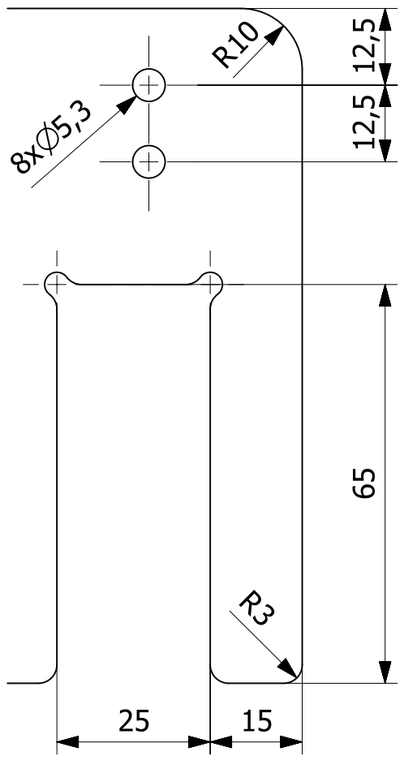
Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D04

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1



DETAIL A
1:1



Ra 6,3

Základní tvar vypálen na laseru.
Všechny otvory jsou průchozí.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1	Plech T2-110x655		S235JRC+N EN 10025-2		0,67kg		DP-LEP-S00	5
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	10.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D05-plech-pomocny-horni_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D05-plech-pomocny-horni_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

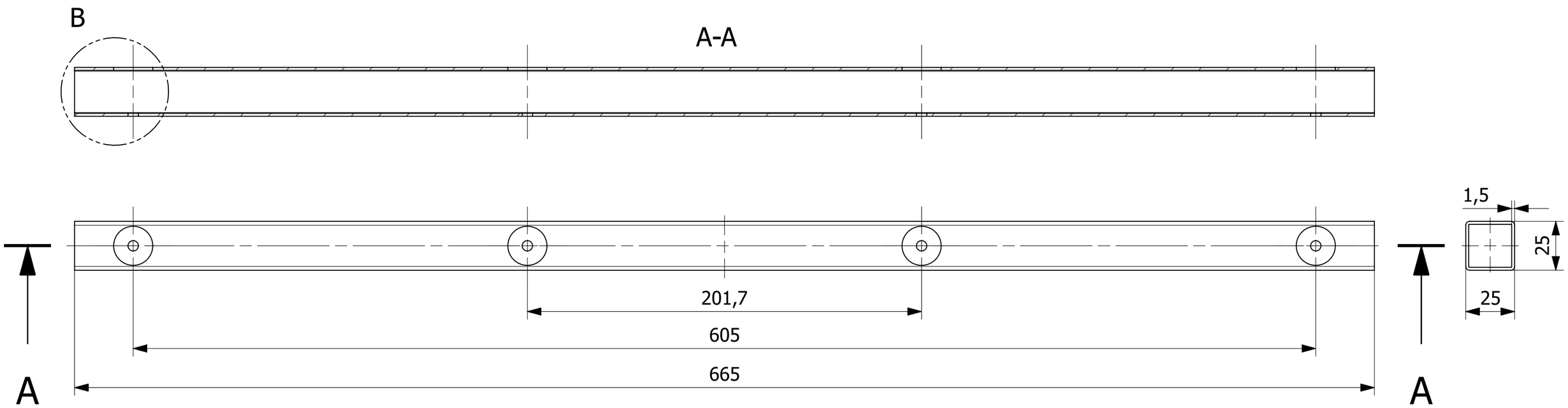
Nazev / Title: PLECH - POMOCNY-HORNÍ

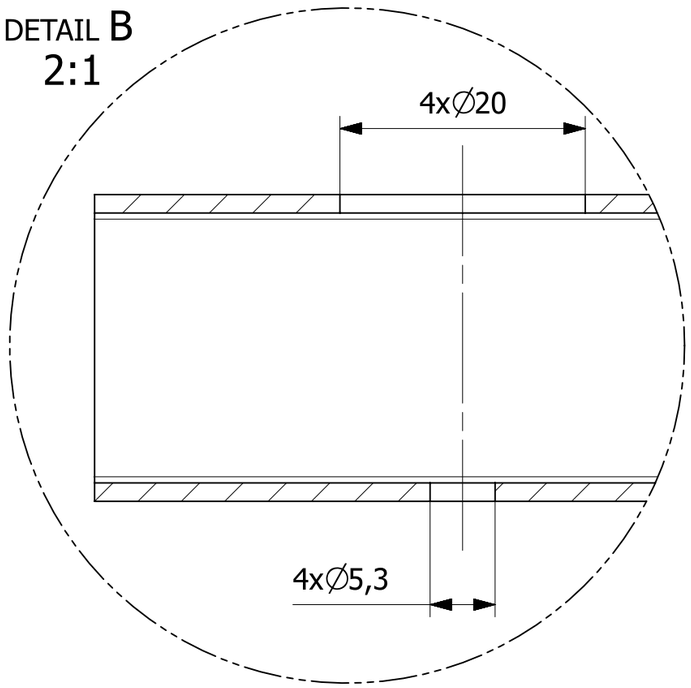
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D05

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

Format: A3





Ra 6,3

Vypáleno na profilovém laseru.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

2		4HR TR 25x25x1,5-665	S235JRH EN 10219-1		0,70kg		DP-LEP-S00	6
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	10.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D06-podstava_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D06-podstava_DWG

Projekt / Project: LEPENÍ LAP-JOINT

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

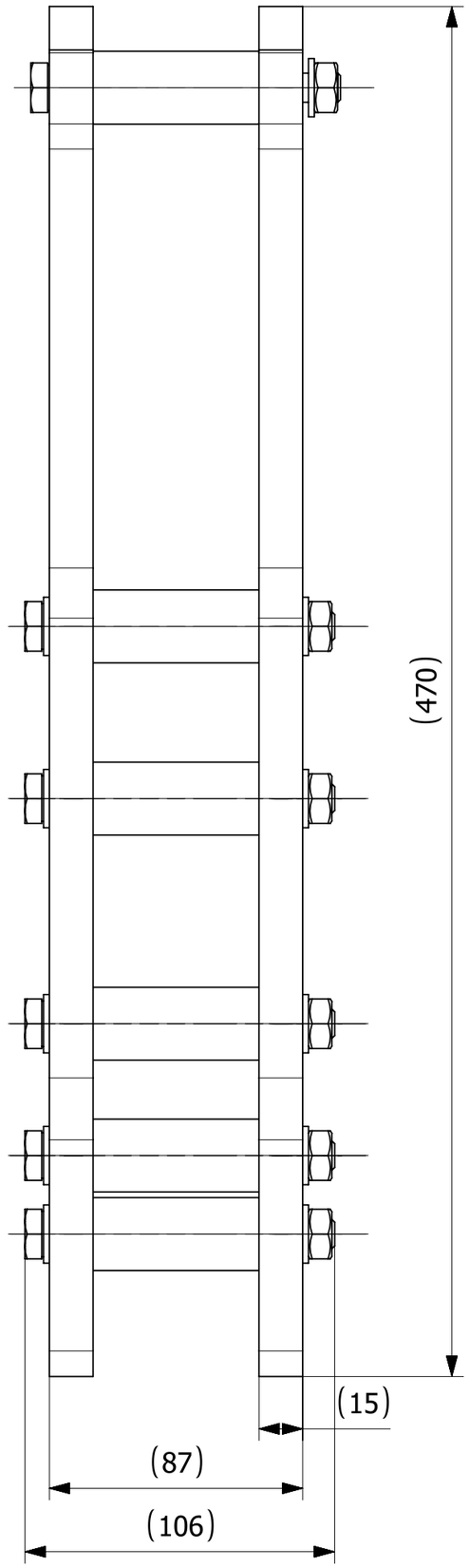
Nazev / Title: PODSTAVA

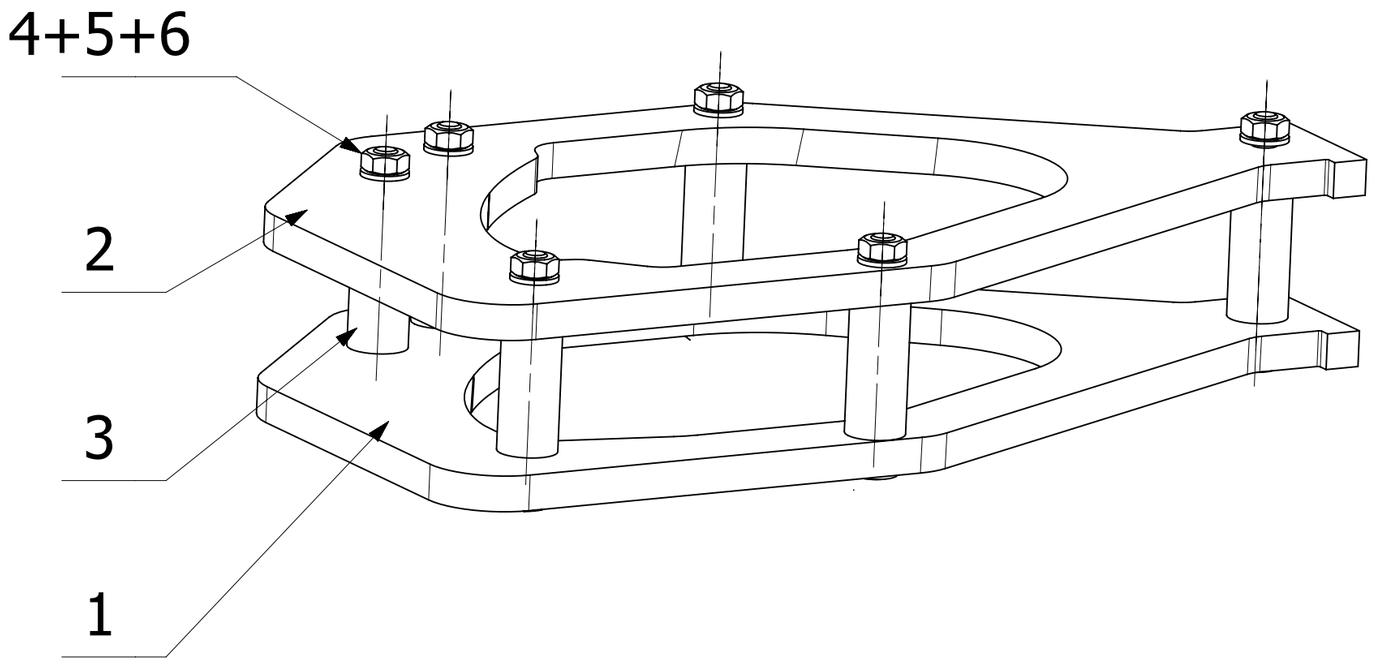
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-LEP-D06

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1





6	MATICE M10		8.8 Pozink	DIN 934			6
5	PODLOŽKA 10		200HV Pozink	DIN 125			6
4	ŠROUB M10x100		8.8 Pozink	DIN 931			6
3	TRUBKA	TR PR 25x2-57	S235JRH	EN 10219-1	0,06kg	DP-UP2-D03	1
2	BRÁNA 2	15-269x470	S235JRC+N	EN 10025-2	6,1kg	DP-UP2-D02	1
1	BRÁNA 1	15-269x470	S235JRC+N	EN 10025-2	6,1kg	DP-UP2-D01	1
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	Norma	C.hmot.	Cislo výkresu	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	Material	Norm	Weight	Drawing No.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	12.5.2017	KALINA Tomáš		
Prezkousel / Checked by				
Schvalil / Approved by				
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: S00-ASSEMBLY_DWG

Projekt / Project: UPNUTÍ KŘÍDLA

C.sestavy / Assembly No.

C.hmot.sestavy

Meritko / Scale: 1:2

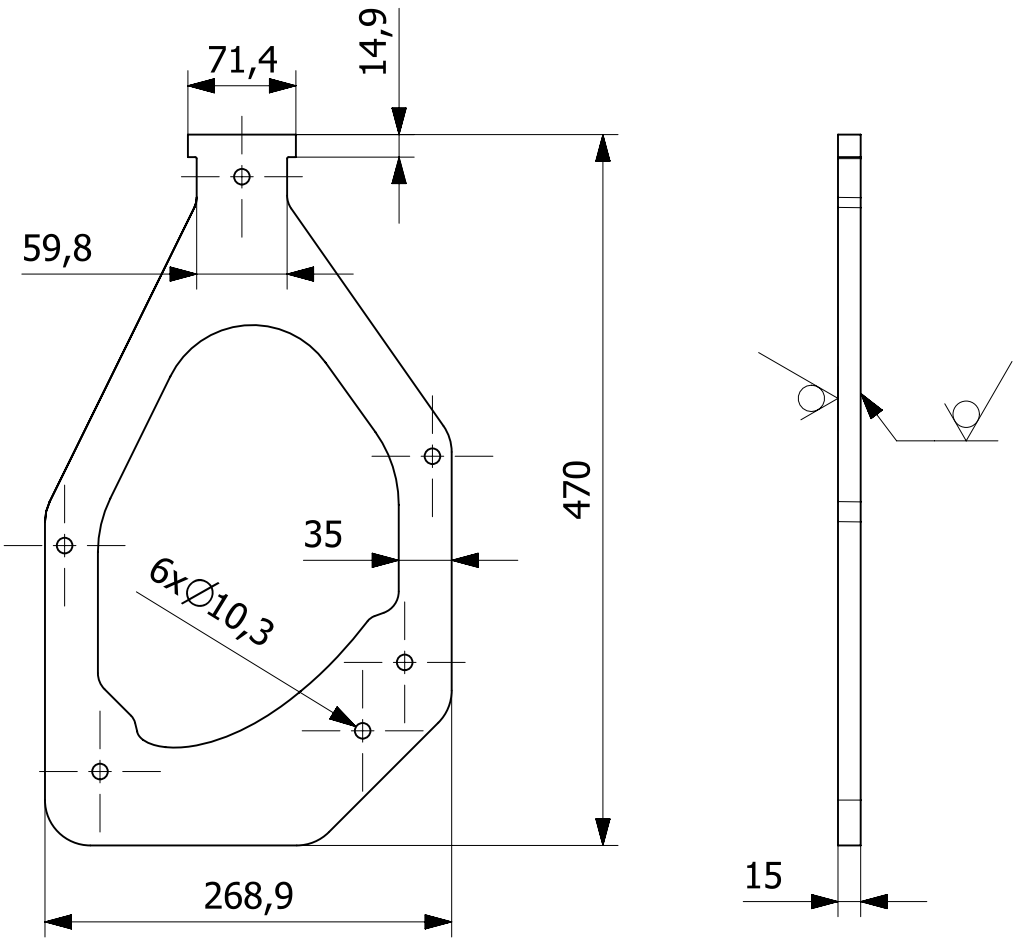
Nazev / Title: MONTÁŽNÍ SESTAVA

Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP2-S00

Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1



Ra 12,5

Všechny otvory jsou průchozí.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1	Plech T15-269x470		S235JRC+N EN 10025-2		6,1kg		DP-UP2-S00	1
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	12.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D01-Upnuti_kridla-Brana_1_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D01-Upnuti_kridla-Brana_1_DWG

Projekt / Project: UPNUTÍ KŘÍDLA

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:5

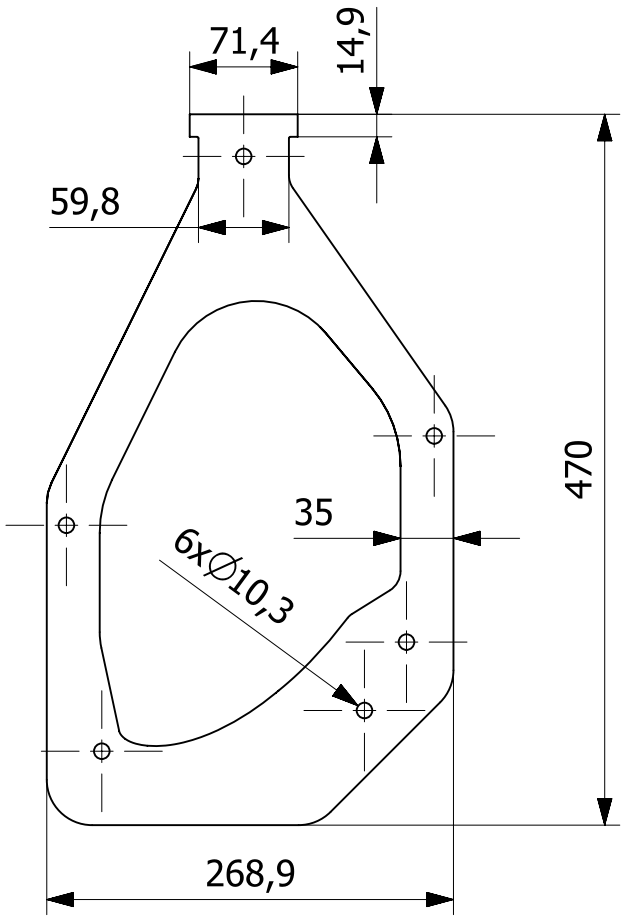
Nazev / Title: Upnutí křídla - Brána 1

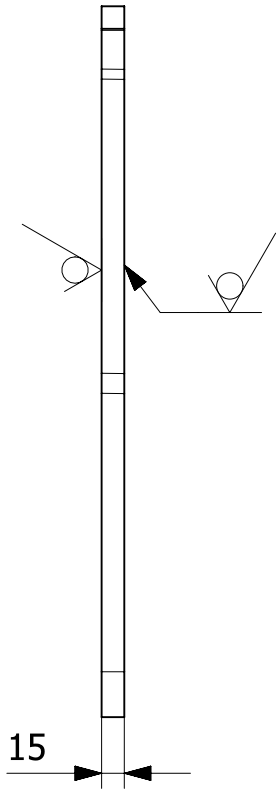
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP2-D01

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

Format: A4





Ra 12,5 ( )

Všechny otvory jsou průchozí.
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1	Plech T15-269x470		S235JRC+N EN 10025-2		6,1kg		DP-UP2-S00	2
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	13.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D02-Upnuti_kridla-Brana_2_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D02-Upnuti_kridla-Brana_2_DWG

Projekt / Project: UPNUTÍ KŘÍDLA

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:5

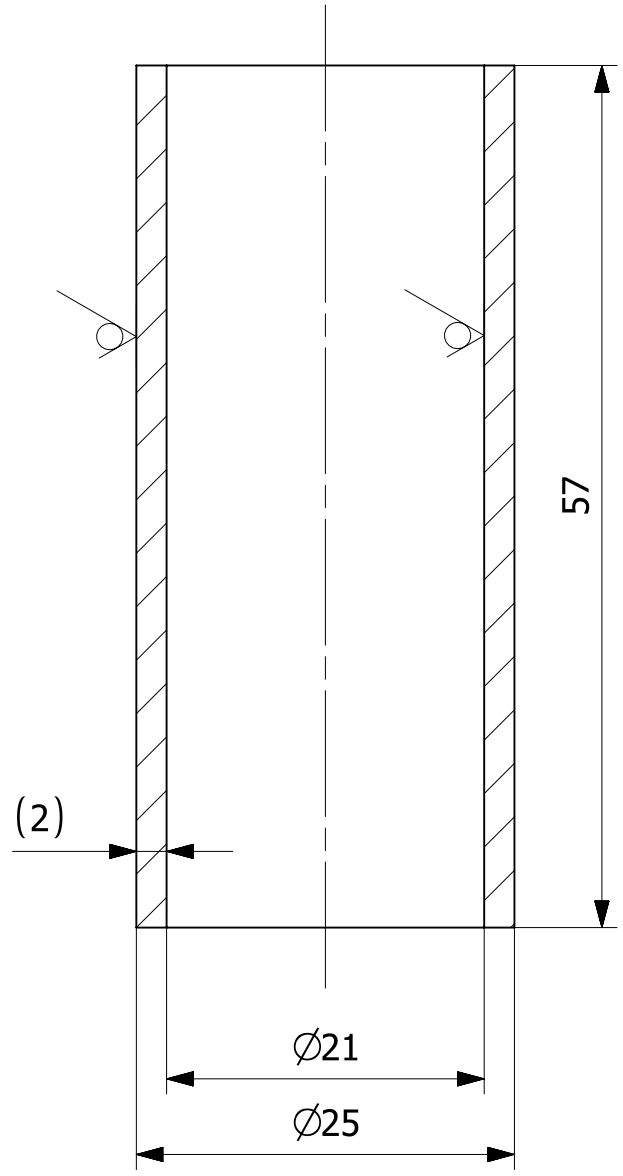
Nazev / Title: Upnutí křídla - Brána 2

Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP2-D02

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

Format: A4



Ra 6,3

Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
6		TR ∅ 25x2-57	S235JRH EN 10219-1		0,06kg		DP-UP2-S00	3
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	13.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: D03-Upnuti_kridla-Trubka_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: D03-Upnuti_kridla-Trubka_DWG

Projekt / Project: UPNUTÍ KŘÍDLA

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 2:1

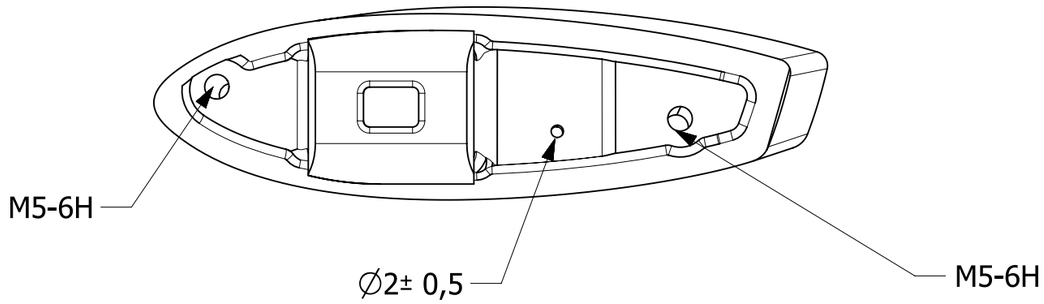
Nazev / Title: Upnutí křídla - Trubka

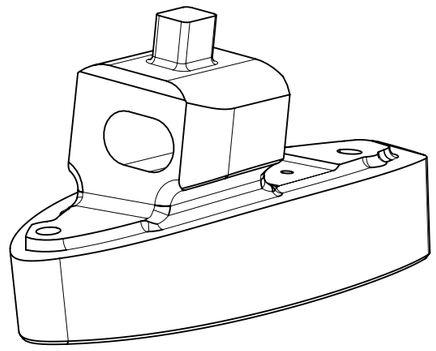
Rev.: 0

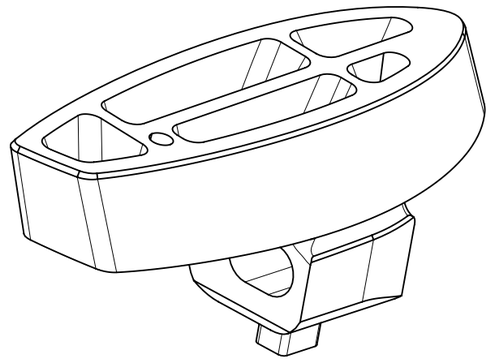
Cislo vykresu / Drawing No.: DP-UP2-D03

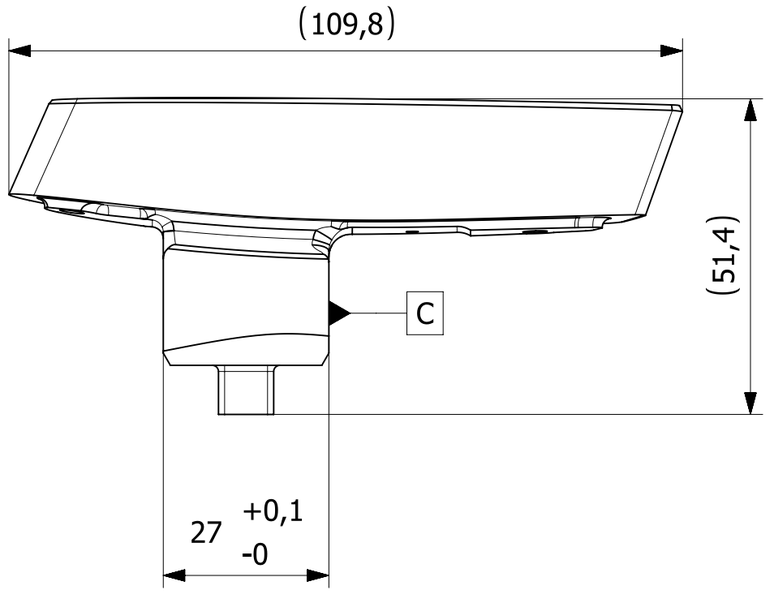
List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

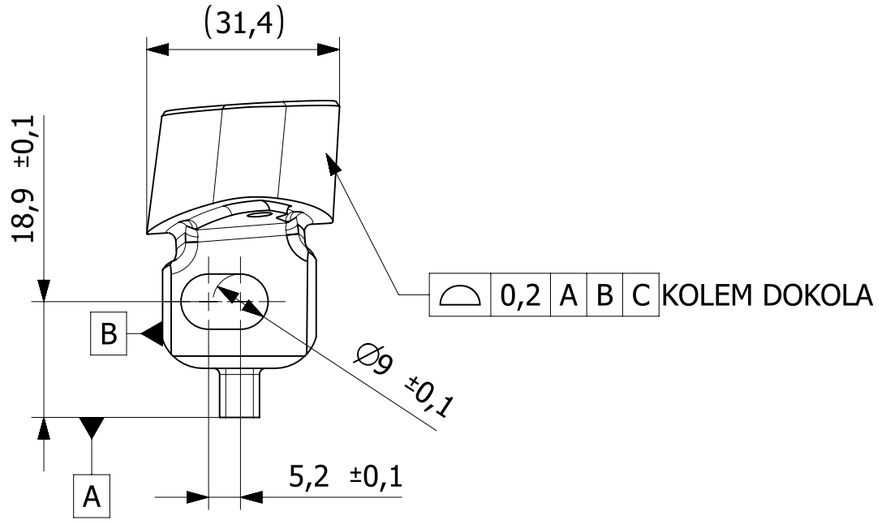
Format: A4











Ra 1,6

KTL - Kataforeticky lakováno (VW 13750 TL260 Ofl-x630)
Neoznačené rozměry určeny elektronicky. / Non specified dimensions done by PC data.

1		33x53x112	EN AW 7075-T6		0,136kg		DP-INS-S00	1
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	30.5.2017	KALINA Tomáš
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: DP-INS-D01-insert_optimalizovany_DWG

Soubor-vykres / DRW-file: DP-INS-D01-insert_optimalizovany_DWG

Projekt / Project: AUD_R8D_002_02A

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:2

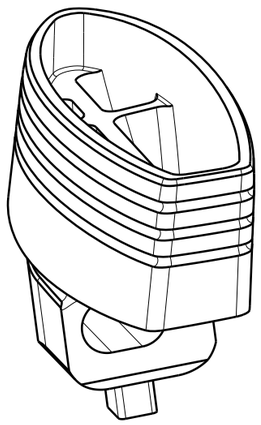
Nazev / Title: INSERT - OPTIMALIZOVANÝ

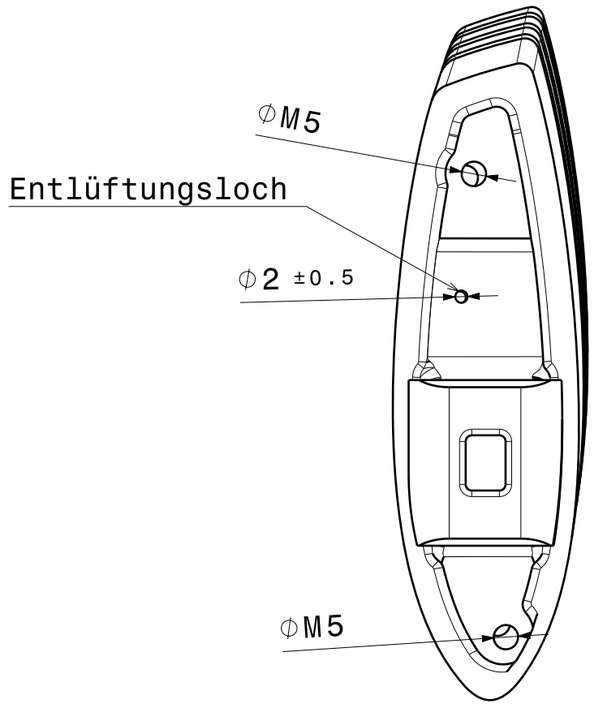
Rev.: 0

Cislo vykresu / Drawing No.: DP-INS-D01

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

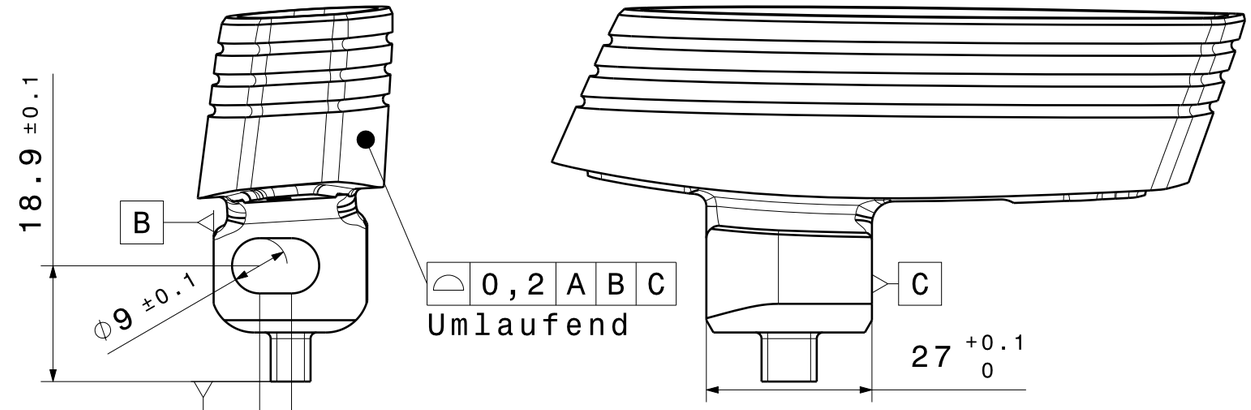
Format: A3





Index	Feld Section	Datum Date	Beschreibung der Änderung Revision Record	gez. von signed
A		10.07.14	Teil entworfen	K.Raunela
		6.8.2014	Geometrieupdate: Gefräst vom Block statt Gegossen	K.Raunela

Teil-Nr. Kunde Part-No.Customer	AUD_R8D_002_02A wie gezeichnet / AS DRAWN AUD_R8D_002_52A spiegelbildlich / SYMMETRICAL



Allgemeine Prüfvorschriften: http://carbon.at/pdf/pruefvorgaben-umfang-zukaufteile.pdf
GENERAL MEASURING REGULATION: http://carbon.at/pdf/pruefvorgaben-umfang-zukaufteile.pdf
Vorgabe für Vermessung von Werkzeugen: http://www.carbotech.at/pdf/vorgaben-fuer-die-vermessung-von-werkzeugen.pdf
TOOL MEASURING GUIDELINE: http://www.carbotech.at/pdf/vorgaben-fuer-die-vermessung-von-werkzeugen.pdf
Definition des Farbcodes: http://www.carbon.at/pdf/farbcodes-de.pdf
COLORCODE DEFINITION: http://www.carbon.at/pdf/farbcodes-de.pdf
Fehlende Maße und Angaben sind dem CAD-Datensatz zu entnehmen.
MISSING MEASUREMENT AND DECLARATION TO BE EXTRACTED FROM 3D-DATASET

Mit jeder Lieferung des Bauteils ist vom Lieferanten
- an CarboTech zu übergeben:
  Werkstoffprüfzeugnis (3.1B) ☒

Mit jeder Lieferung des Bauteiles ist vom Lieferanten
- an CarboTech zu übergeben:
  Sicherheitsdatenblätter ☐
  Materialdatenblätter ☐
  Werkstoffprüfzeugnisse bei Erstbauteil bzw. Änderung ☒
  Erstmusterprüfbericht nach VDA Schrift 2 Ziffer 4 ☐
- ein IMDS-Eintrag vorzunehmen ☐
  Carbotech ID :36225
  Carbotech DUNS-Nummer:30-348-4356

Teileidentifizierung nach Oberflaechenbehandlung

Beschriftungsart	Beschriftungsmethode
☒ Zeichnungsnummer	☐ graviert / gelasert
☒ INFOR Nummer	☐ gestempelt mit oelfester Farbe
☐ Kundennummer	☐ eingegossen
☐ Chargennummer	☐ Metalltypenschild/Aufkleber
Schrift Höhe/Tiefe: 5mm / 0,5mm	☒ Beschriftung auf Verpackung

Oberfläche KTL beschichtet nach
VW 13750, TL260 Ofl-x630, Schwarz

Allgemeintoleranz nach: ISO 2768 m H	CAD-System: Catia V5 R19	Allg. Rauhigkeit an nicht speziell gekennzeichn. Stellen: -	Maßstab/Scale: 1:1
CARBO TECH Eugen-Müller-Straße 16 5020 Salzburg Tel.: +43-662-2414-0		Benennung/Part-Name: AUD_R8D Heckfluegel Stuetze Lh	Werkstueckkanten nach DIN ISO 13715: +0.3 / -0.3
Projektverantw.: Strobl F.	Tel. -267	Zeichnungsnummer/Drawing-Number: AUD_R8D_002_02A	Format Size: A3
gezeichnet: raunelak	am: 17.09.2014		
geprüft: aadriani	am: 17.09.2014	INFOR_Nr: 120009602	Blatt/Sheet: 1
Werkstoff/Material: EN AW 7075 T6	Gewicht/Weight: 0.000 kg	Projekt/Project: P2002093	von/of: 1