

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Lepené spoje a jejich zkoušení v podmínkách dynamického zatěžování

Bc. Petr Šulc

Diplomová práce

2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Šulc**  
Osobní číslo: **D17377**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Lepené spoje a jejich zkoušení v podmínkách dynamického zatěžování**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše aktuálního stavu - aplikace lepení v konstrukci auto-karoserie, současné technologické postupy a materiály lepených spojů v dané aplikaci.
2. Standardizované zkoušky lepených spojů, aktuálně řešené problémy a trendy v oblasti zkoušení lepených spojů, dostupné výsledky hodnocení dynamické pevnosti lepených spojů.
3. Návrh a příprava experimentu pro hodnocení dynamické odezvy lepených spojů při pokojových vs. snížených teplotách.
4. Realizace dynamických zkoušek, rozbor charakteru porušování vzorků po zkouškách.
5. Souhrnné posouzení vlivu snížené teploty na dynamickou odezvu lepených spojů u testovaných technologických variant spojů.
6. Diskuze výsledků z hlediska metodiky zkoušek, návrhy navazujících úprav.

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran textu a přílohy**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] BROCKMANN, W., GEI, P. L., KLINGEN, J., SCHRÖDER, B.: Adhesive bonding - Materials, Applications and Technology. Wiley - VCH Verlag GmH & Co, KgaA, ISBN 978-0-521-32677-3, 2005.

[2] Výběr z norem - hodnocení statické a dynamické pevnosti lepených spojů.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**

Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **15. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2019**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012 Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 20. 5. 2019



Petr Šulc

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Tomáši Schiffmannovi a prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D., za jejich odborné vedení, cenné rady a ochotu, se kterou mi pomohli k vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Přemyslu Hojkovi, za pomoc při provádění experimentů.

## **ANOTACE**

Tato práce je věnována lepeným spojmům používaným v konstrukci automobilových karoserií. Hlavním úkolem této práce je vývoj metodiky pro testování lepených spojmů na substrátech specifických pro automobilový průmysl. Toto testování je prováděno na za vysoké rychlosti deformace a nízké teploty.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

lepidla, lepení karoserií, dynamické testování, povrchové úpravy, nízké teploty

## **TITLE**

Adhesive joints and their testing by dynamic loads

## **ANNOTATION**

This thesis is focused on adhesive bonding used on automotive bodywork. Main objective of this thesis is development of methodology for testing of adhesive joints used on substrates specific to the automotive industry. This testing is performed at high strain rates and low temperatures.

## **KEYWORDS**

adhesives, structural bonding, dynamic testing, surface treatment, low temperatures

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Stavba lepeného spoje.....	15
Obrázek 2 - Mechanická teorie adheze.....	16
Obrázek 3 - Difuzní teorie adheze.....	17
Obrázek 4 - Elevační úhel smáčivosti.....	18
Obrázek 5 - Mezigenerační porovnání spojů na vozidle Škoda Fabia.....	19
Obrázek 6 - Rozložení napětí v lepeném spoji.....	19
Obrázek 7 - Vliv délky přeplátování na mezní sílu ve spoji.....	20
Obrázek 8 - Vliv excentricity zatížení na lepený spoj.....	20
Obrázek 9 - Porovnání průběhu napětí nýtovaného a lepeného spoje.....	21
Obrázek 10 - Použití strukturálních lepidel na automobilové karoserii.....	23
Obrázek 11 - Teplotní závislost modulu pružnosti pro amorfni polymery a semikrystalické polymery.....	25
Obrázek 12 - Povrchové úpravy na karoserii automobilu Škoda Octavia 3. generace.....	26
Obrázek 13 - Al-Si povrchová vrstva.....	27
Obrázek 14 - Schéma linky pro elektrolytické zinkování.....	27
Obrázek 15 - Povrch elektrolyticky pozinkovaného dílu.....	28
Obrázek 16 - Kontinuální proces žárového zinkování plechů.....	28
Obrázek 17 - Povrch žárově pozinkovaného dílu.....	29
Obrázek 18 - Pevnost lepidel při různých koncentracích NIT, zkouška PV12.35.....	30
Obrázek 19 - Rozdíl v otěru po provedení otěrové zkoušky.....	31
Obrázek 20 - Mikrostruktura povrchu ZnMg.....	31
Obrázek 21 - Vliv množství oleje na pevnosti v odlupu epoxidových lepidel.....	33
Obrázek 22 - Typy morfologie povrchů.....	34
Obrázek 23 - Vzorek pro zkoušku PV 12.35 pro testování pevnostních lepidel.....	35
Obrázek 24 - Vzorek pro zkoušku dle ISO 11339.....	35
Obrázek 25 - Vzorek pro zkoušku dle ISO 11343.....	36
Obrázek 26 - Vyhodnocení dle ISO 10365.....	37
Obrázek 27 - Vzorek používaný pro dynamickou zkoušku pevnosti ve smyku.....	38
Obrázek 28 - Zařízení pro ochlazování a ohřívání vzorku.....	39
Obrázek 29 - Vliv teploty na chování spoje, vlevo při kvazi-statickém zatížení a vpravo při dynamickém zatěžování.....	39
Obrázek 30 - Zkušební zařízení.....	40

Obrázek 31 - Chladicí kleštiny .....	41
Obrázek 32 - Měřicí zařízení Micro-Epsilon CTLaser .....	42
Obrázek 33 - Umístění teploměru na zkušebním zařízení .....	43
Obrázek 34 - Umístění měřicí folie na vzorku .....	43
Obrázek 35 - Vzorek 1 po přetržení substrátu .....	44
Obrázek 36 - Vzorek 2 po přetržení.....	44
Obrázek 37 - Vzorky K1, K2, P1, P2 a P3 po přetržení .....	45
Obrázek 38 - Vzorek P1 po přetržení .....	46
Obrázek 39 - Vzorky P2 a P3 po přetržení .....	46
Obrázek 40 - Vzorky K1 a K2 po přetržení substrátu .....	47
Obrázek 41 - Návrh tvaru vzorku .....	48
Obrázek 42 - Vzorky S2-1 až S2-5 po přetržení.....	48
Obrázek 43 - Tvar vzorku pro testování dynamické testování bez zpevnění .....	50
Obrázek 44 - Vzorky bez zpevnění.....	50
Obrázek 45- Vzorky se zpevněním.....	51
Obrázek 46 – Ohyb vzorku v upínacích kleštinách .....	52
Obrázek 47 - Tvar vzorku .....	54
Obrázek 48 - Detail lepeného spoje.....	55
Obrázek 49 - Spektrometrie povrchu PS a PP .....	58
Obrázek 50 - Měřicí přístroj Infralytic NG 2 a aplikační pistole Milwaukee.....	59
Obrázek 51 - Lepené spoje před vytvrzením .....	59
Obrázek 52 - Povrch PS + Lepidlo A, pokojová teplota .....	60
Obrázek 53 - Povrch PS + Lepidlo A, teplota -35 °C.....	60
Obrázek 54 - Povrch PP + Lepidlo A, pokojová teplota .....	61
Obrázek 55 - Povrch PP + Lepidlo A, teplota -35 °C.....	62
Obrázek 56 - Povrch PS + Lepidlo B, pokojová teplota.....	63
Obrázek 57 - Povrch PS + Lepidlo B, teplota -35 °C.....	63
Obrázek 58 - Povrch PP + Lepidlo B, pokojová teplota.....	64
Obrázek 59 - Povrch PP + Lepidlo B, teplota -35 °C.....	65
Obrázek 60 - Místo měření na vzorcích RT5 a NT5 .....	68
Obrázek 61 - Struktura lomové plochy na vzorku RT5 a NT5.....	68



Tabulka 1 - Vyhodnocení vzorku 2 .....	45
Tabulka 2 - Vyhodnocení vzorku P1 .....	46
Tabulka 3 - Maximální síly a napětí ve spoji.....	49
Tabulka 4 - Vyhodnocení vzorků S2-1 až S2-5.....	49
Tabulka 5 - Maximální síly a napětí ve spoji vzorků bez zpevnění .....	51
Tabulka 6 - Vyhodnocení vzorků bez zpevnění .....	51
Tabulka 7 - Maximální síly a napětí ve spoji vzorků se zpevněním.....	52
Tabulka 8- Vyhodnocení vzorků se zpevněním .....	52
Tabulka 9 - Vlastnosti ocele HX180BD od firmy VoestAlpine.....	57
Tabulka 10 - Základní vlastnosti použitých lepidel.....	58
Tabulka 11 - Výsledky vzorků RT1 až RT5 a NT1 až NT5.....	61
Tabulka 12 - Výsledky vzorků s povrchem PS + Lepidlo A.....	61
Tabulka 13 - Výsledky vzorků RT6 až RT10 a NT6 až NT10.....	62
Tabulka 14 - Výsledky vzorků s povrchem PP + Lepidlo A.....	62
Tabulka 15 - Výsledky vzorků RT11 až RT15 a NT11 až NT15.....	63
Tabulka 16 - Výsledky vzorků s povrchem PS + Lepidlo B .....	64
Tabulka 17 - Výsledky vzorků RT16 až RT20 a NT16 až NT20.....	65
Tabulka 18 - Výsledky vzorků s povrchem PP + Lepidlo B .....	65
Tabulka 19 - Celkový výsledek všech zkoušek.....	66
Graf 1 - Záznam dynamické zkoušky vzorků S2-1 a S2-2 .....	49
Graf 2 - Záznam dynamické zkoušky vzorku se zpevněním a bez zpevnění .....	51
Graf 3 - Grafické znázornění maximálního dosaženého napětí.....	66

## SEZNAM ZKRATEK

Al-Si	-povrchová vrstva hliníku a křemíku
EN	-Evropská Norma
$F_{\max}$	-maximální síla v lepeném spoji
KTL	-kataforetické lakování
$\tau_{\max}$	-maximální smykové napětí ve spoji
VVCD	-Výukové a výzkumné centrum v dopravě
ZnMg	-povrchová vrstva zinku a hořčíku
ATP	-Advanced TriboPrimer
AF	-Adhesion Failure
ACPF	-Adhesion and Cohesion Failure
CF	-Cohesion Failure
CSF	-Cohesion Substrate Failure
DF	-Delamination Failure
EBT	-Electron Beam Texturing
EDT	-Electric Discharge Texturing
HDG	-Hot Dip Galvanizing
ISO	-International Organization for Standardization
MAG	-Metal Active Gas
MIG	-Metal Inert Gas
NIT	-New Inorganic Treatment
LT	-Laser Texturing
PLT	-Prime Lube Treatment
SBT	-Shot Blast Texturing
SCF	-Special Cohesion Failure
SF	-Substrate Failure

# OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	7
SEZNAM ZKRATEK .....	10
0 ÚVOD.....	13
1 TEOPRETICKÁ ČÁST .....	15
1.1 Úvod do lepení .....	15
1.1.1 Lepidlo.....	15
1.1.2 Stavba lepeného spoje .....	15
1.1.3 Základní pojmy v lepení .....	15
1.2 Lepení při stavbě karoserií .....	18
1.2.1 Rozložení napětí v lepeném spoji.....	19
1.2.2 Vliv excentricity zatížení.....	20
1.2.3 Porovnání s jinými druhy spojování.....	21
1.2.4 Lepidla používaná při stavbě karoserií.....	22
1.2.5 Vliv teploty na lepidla .....	25
1.3 Povrchové úpravy používané při stavbě karoserií .....	25
1.3.1 Al-Si povlak.....	26
1.3.2 Elektrolytické zinkování.....	27
1.3.3 Žárové zinkování .....	28
1.3.4 Maziva .....	32
1.3.5 Morfologie.....	33
1.4 Způsoby testování pevnosti lepených spojů.....	34
1.4.1 Normalizované způsoby testování.....	34
1.4.2 Nenormalizované způsoby testování.....	37
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	40
2.1 Zařízení .....	40
2.1.1 Zkušební zařízení.....	40
2.1.2 Chladicí zařízení .....	40
2.1.3 Měření teploty .....	41
2.2 Vývoj metodiky pro dynamické testování lepených spojů při -35 °C .....	43
2.3 Úprava tvaru vzorku pro dynamické testování lepených spojů za pokojové teploty.....	50
2.3.1 Výsledky porovnávací zkoušky pro vzorky se zpevněním a bez zpevnění.....	50

2.4	Metodika pro dynamické testování lepených spojů .....	53
2.4.1	Zaměření .....	53
2.4.2	Popis .....	53
2.4.3	Metodika testování .....	53
2.4.4	Testovací zpráva .....	56
2.4.5	Odkazované dokumenty .....	56
2.5	Dynamické zkoušky .....	57
2.5.1	Použité materiály .....	57
2.5.2	Postup přípravy vzorku .....	58
2.5.3	Výsledky zkoušek .....	60
2.5.4	Celkový výsledek všech zkoušek .....	66
2.5.5	Analýza lomové plochy .....	67
2.6	Zhodnocení výsledků .....	68
2.6.1	Posouzení vlivu snížené teploty na dynamickou odezvu lepených spojů .....	69
2.6.2	Zhodnocení metodiky .....	69
2.6.3	Návrh navazujících úprav .....	70
3	ZÁVĚR .....	71
4	POUŽITÁ LITERATURA .....	73
5	PŘÍLOHY .....	74

## 0 ÚVOD

Se zvyšujícími se nároky na bezpečnost silničních vozidel, ale zároveň s požadavky na snižování jejich emisní stopy, je nutné používat moderní materiály, které mají ve srovnání s běžnou konstrukční ocelí lepší mechanické vlastnosti. To umožní použití plechových výlisků s menší tloušťkou, což vede ke snížení hmotnosti vozidla a dále ke snížení emisí vypouštěných vozidlem. Použití moderních materiálů zároveň slouží ke zvýšení pasivní bezpečnosti vozidla. Tyto materiály však kvůli jejich vnitřní krystalové stavbě vyžadují používat metody spojování, které minimalizují, nebo ideálně úplně odstraní, vnesené teplo do materiálu. A to z důvodu, že tyto pevnostní oceli jsou tepelně zpracované a vnášením dodatečného tepla, při klasickém tavném svařování, dochází k porušení jejich vnitřní struktury, což vede ke zhoršení jejich mechanických vlastností. Mezi způsoby spojování, které minimalizují množství vneseného tepla, používané v automobilovém průmyslu, patří například: bodové svařování, šroubové spoje, nýtové spoje, laserové pájení a ve zvětšující se míře lepení.

Lepení v dnešní době zastává mnohem větší roli než v minulosti a s každou novou generací vozu přibývají další metry lepených spojů oproti předchozí generaci. To s sebou však nese zvyšující se nároky na kvalitu provedení a pevnost těchto spojů, jelikož v minulosti se lepené spoje v automobilech používaly spíše jako doplňkový způsob spojování, zatímco v současné době se pomocí lepení spojují i strukturální součásti vozidla. Z tohoto důvodu je nutné dále rozšiřovat znalosti v této oblasti automobilismu, obzvláště když se v současné době stávají dostupnějšími materiály dříve velmi nákladné na výrobu, jako například karbonová vlákna, a lepení by v případě jejich rozšíření i mimo segment supersportovních vozů bylo jedním z nejvhodnějších způsobů spojování. Ať se již jedná o tyto materiály nebo o materiály běžně používané, jednou z největších výhod lepení je, že dokáže spolehlivě spojit jak dva stejné materiály, tak spoje složené z různých materiálů.

Znalost pevnosti lepeného spoje je důležitá nejen při konstrukčním návrhu vozidla, ale i při změně materiálu lepidla či substrátu v průběhu sériové výroby, kde je nutné porovnat vlastnosti nového a již používaného spoje, aby nedošlo ke snížení bezpečnosti vozidla. Vlastností lepeného spoje jsou totiž ovlivněny nejen samotným lepidlem, ale i materiálem, na kterém jsou nalepeny, jelikož na substrátu se v automobilovém průmyslu nachází oleje, které mohou zabránit polymeraci lepidla. Dalším faktorem, snižujícím pevnost lepeného spoje, mohou být látky obsažené v povrchové úpravě, například siričné soli, které slouží ke snížení tření v lisovacím nástroji, ale zároveň snižují adhezi lepidla k podkladu.

Tato diplomová práce se bude zabývat lepenými spoji a jejich zkoušením v podmínkách dynamického zatěžování. Cílem diplomové práce je vytvoření metodiky pro testování dynamické pevnosti lepených spojů za nízkých teplot pro použití v konstrukci karosérií osobních automobilů. Lepené spoje se budou sestávat z tenkých plechů s různou povrchovou úpravou spojených pevnostními lepidly. Metodika by se měla co nejvíce blížit již používaným metodikám pro kvazistatické testování pevnosti lepených spojů, hlavně co se týká přípravy vzorků a rozměrů lepené plochy.

Jelikož automobil není jako spousta jiných zařízení používán pouze v interiéru a za pokojové teploty, je nutné zajistit jeho bezpečnost i v extrémních podmínkách, například při hlubokých mrazech. Extrémní teploty totiž mají vliv nejen na řidiče vozidla, ale i na všechny součásti ve vozidle včetně lepených spojů. Se snižující se teplotou totiž sice dochází u většiny používaných lepidel ke zvyšování jejich vnitřní pevnosti, avšak vnitřní pevnost lepidla není jediným faktorem určující pevnost lepeného spoje jako celku. Se snižující se teplotou totiž zpravidla dochází i ke snižování houževnatosti, což, zejména při dynamickém způsobu zatěžování, přináší riziko nechtěného adhezního porušení.

V neposlední řadě je nutné zmínit důvod, proč je vhodné při zkouškách zatěžovat spoj i dynamickým způsobem. Statická pevnost lepidla je sice důležitý parametr, například pro zajištění tuhosti karoserie nebo pro zabezpečení nosnosti jednotlivých součástí, avšak v případě dopravní nehody nedochází k pomalé deformaci. A je to právě případ nehody, kdy se projeví dynamické vlastnosti lepeného spoje, a právě tyto vlastnosti pak mají velký vliv na zajištění bezpečnosti posádky vozidla. Z tohoto důvodu budou vzorky v této práci zatěžovány deformačními rychlostmi odpovídajícími reálným rychlostem, při kterých může docházet k nehodám silničních vozidel.

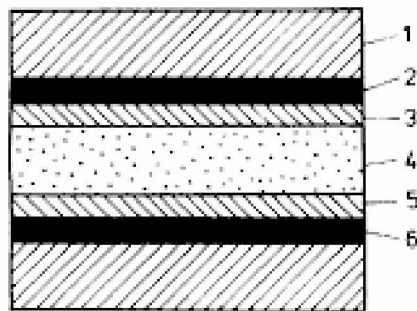
# 1 TEOPRETICKÁ ČÁST

## 1.1 Úvod do lepení

### 1.1.1 Lepidlo

Lepidlo je nekovová látka, která působí adhezí na spojované materiály a kohezí na svou vnitřní strukturu, čímž je zajištěna vnitřní pevnost lepidla. V automobilovém průmyslu se používají pouze lepidla, která vytváří trvalé spojení. [1]

### 1.1.2 Stavba lepeného spoje



Obrázek 1 - Stavba lepeného spoje [2]

1 -Substrát

2 -Adhezní zóna

3 -Přechodová adhezní zóna

4 -Kohezní zóna

5 -Přechodová adhezní zóna

6 -Adhezní zóna

[2]

### 1.1.3 Základní pojmy v lepení

#### 1.1.3.1 Koheze

Koheze je vnitřní soudržnost samotného lepidla. Kohezní síly vznikají vzájemným působením valenčních a mezimolekulárních sil, někdy jsou kohezní síly také označovány jako vnitřní adheze. Velikost energie, potřebná k oddělení jednotlivé částičky lepidla od ostatních, se nazývá kohezní energie. [3]

#### 1.1.3.2 Adheze

Adheze, jinými slovy přilnavost, je přitažlivá síla lepidla k povrchu substrátu. Vlastní způsob adheze je vysvětlován několika teoriemi:

➤ Molekulová teorie

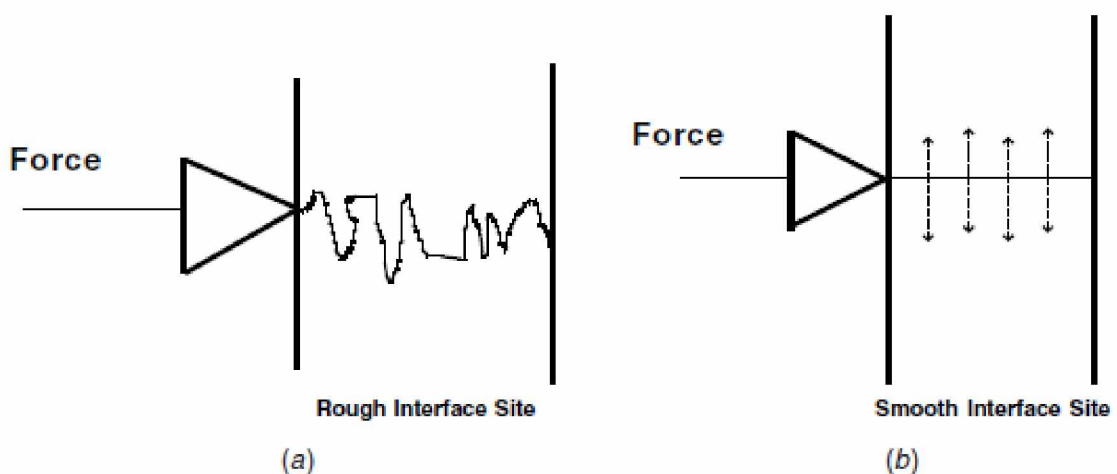
Tato teorie vysvětluje vzájemnou adhezi působením Van der Waalsových sil, které působí mezi molekulami lepidla a substrátu. Pro fungování této teorie je nutné, aby molekuly lepidla a substrátu měly funkční polární skupiny umožňující vzájemné působení. Tato teorie je v současnosti nejvíce přijímána.

➤ Elektrostatická teorie

Její základem je jev konstantní elektrizace. Tento jev nastává při dotyku mezi dielektriky, popř. při dotyku dielektrika a kovu. Spoj podle této teorie utvoří kondenzátor, kdy každá z kontaktních ploch kondenzátoru tvoří jednu desku kondenzátoru a při jejich oddalování vzniká rozdíl potenciálu. Tato teorie je podložena tím, že při odlepování adheziva byly pozorovány elektrické výboje. [1], [4]

➤ Mechanická teorie

Tato teorie je založena na myšlence, že adheze nastává, když dojde k zaplnění mikronerovností na povrchu substrátu, a po vytvrzení je substrát k lepidlu držen mechanicky. Další vliv mechanické teorie se na spoji projeví, pokud má spoj tvar odpovídající obrázku 2(a), což vede k přerušení cesty případné trhliny, které má za následek disipaci energie, a tím i zvýšení pevnosti spoje, na rozdíl od případu na obrázku 2(b), kde se případná trhlina může šířit přímočaře a pevnost spoje je nižší. V současné době se ale tato teorie uvažuje spíše ve specifických případech porézních materiálů nebo například při pogumování textilu. [1], [5]

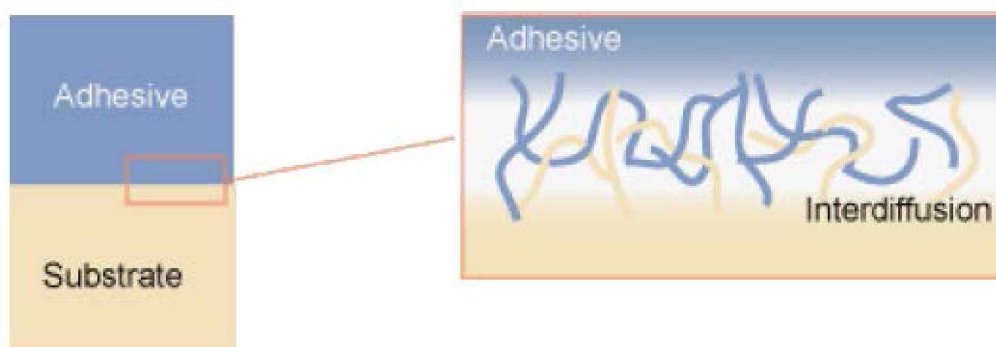


Obrázek 2 - Mechanická teorie adheze [5]



➤ Difuzní teorie

Konceptem difuzní teorie je vznik adheze díky difuzi molekul adheziva a substrátu. Tato teorie je primárně přijímána v případě, že jsou oba spojované materiály polymerní a mají dlouhé molekulární řetězce, viz obrázek 3. Podmínkou platnosti této teorie je chemická kompatibilita a mísitelnost obou spojovaných složek. Proto je tato teorie platná pouze ve specifických případech [1], [5]



Obrázek 3 - Difuzní teorie adheze [4]

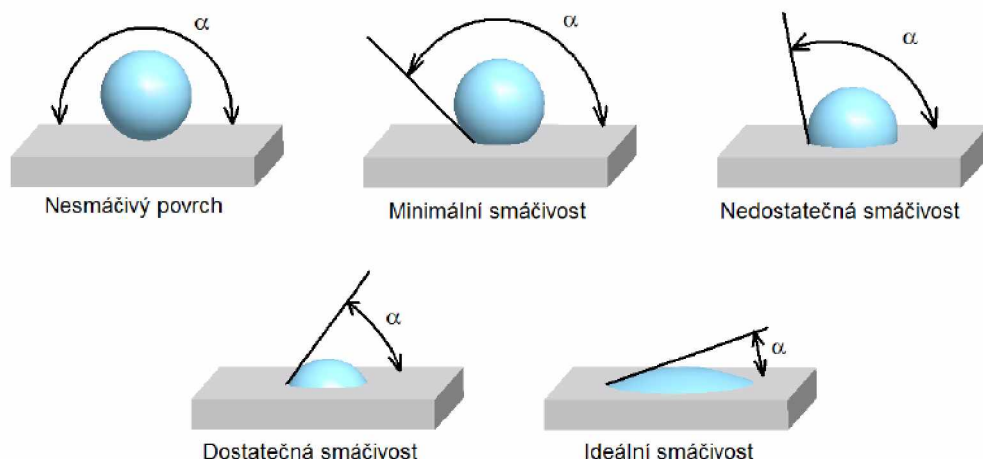
➤ Chemická teorie

Podle této teorie vzniká adheze vytvořením primárních chemických vazeb napříč rozhraním. Pro získání pevného spoje, který nebude vykazovat adhezivní, ale kohezivní lom, je podle této teorie potřebné, aby materiály, které se mají navzájem spojit, reagovaly vytvořením primárních chemických (kovalentních) vazeb napříč rozhraním. Takovéto vazby sice někdy vznikají, všeobecně však lepení probíhá v termodynamických podmínkách, které vznik chemických vazeb neumožňují. [1], [6]

### 1.1.3.3 Smáčivost

Smáčivost je schopnost tekuté látky smáčet povrch látky pevné. Aby mohlo dojít ke smáčení povrchu, musí být povrchová energie pevné látky vyšší, než je povrchová energie kapaliny. Pokud bude povrch znečištěn, může dojít ke snížení smáčivosti.

Ochota kapaliny smáčet povrch se dá vyjádřit pomocí elevačního úhlu, viz obrázek 4. Pokud je smáčivost dobrá, bude elevační úhel menší než  $90^\circ$ . Vhodná smáčivost povrchu je nutným předpokladem pro vznik lepeného spoje. [1]



Obrázek 4 - Elevační úhel smáčivosti [4]

## 1.2 Lepení při stavbě karoserií

Lepení má při stavbě karoserie důležitou úlohu. Počet metrů lepených spojů se s každým novým modelem zvyšuje a lepidla už neplní pouze těsnící funkci jako v minulosti, ale je možné je použít pro pevnostní lepení.

Pevnostní lepení na skeletu karoserie je ve ŠKODA AUTO a.s. nejčastěji provedeno pomocí kombinace bodových svarů a lepeného spoje. Vnější povrchové plechy komponent jsou s vnitřními plechy spojeny pomocí kombinace epoxidového lepidla a lemového spoje na okrajích a na spojení s výztuhou je použito kaučukové lepidlo.

U vozidel, které používají místo oceli alternativní materiály, například hliník nebo uhlíková vlákna, je lepení použito ještě ve větší míře, jelikož používání konvenčních způsobů spojování je pro tyto materiály obtížnější.

Mezi největší výhody lepených spojů patří možnost spojovat různé druhy materiálů, tlumení vibrací, korozní ochrana spoje, elektroizolace spoje, vysoká kvalita vzhledu povrchových dílů, neovlivnění mechanických vlastností základního materiálu a v neposlední řadě také úspora hmotnosti u lepených dílů, oproti jiným způsobům spojování. Lepené spoje mají ale také jisté nevýhody, mezi které patří například nízká odolnost proti vyšším teplotám, nízká odolnost v odlupu a nutnost vytvrzení. [4]

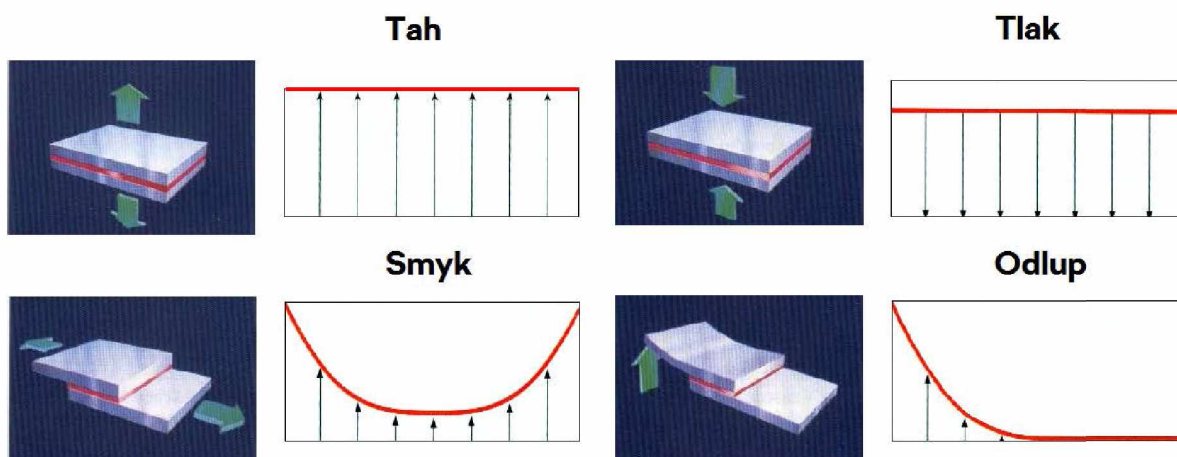


	Fabia II	Fabia III	$\Delta$
Svařovací body [ks]	3 820	3 884	+64
Tavné svary [mm]	3 050	1 658	-1392
Letování [mm]	1 115	903	-212
Laser [mm]	4 398	4 425	+27
Lepidla [mm]	27 657	35 399	+7742

Obrázek 5 - Mezigenerační porovnání spojů na vozidle Škoda Fabia [7]

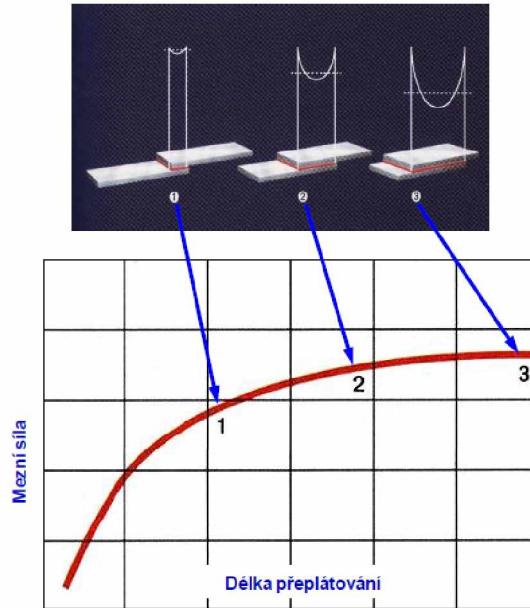
### 1.2.1 Rozložení napětí v lepeném spoji

Zatížení v lepeném spoji není většinou rozloženo rovnoměrně, viz obrázek 6. Jak lze na obrázku vidět, největším problémem lepených spojů je zatížení na odlup. V konstrukci automobilových karoserií se nejčastěji setkáváme s kombinovaným způsobem namáhání a hlavní snahou při konstrukčním návrhu je minimalizovat zatížení na odlup.



Obrázek 6 - Rozložení napětí v lepeném spoji [4]

U překlátovaných spojů je důležitým faktorem délka překlátování. Ač by se na první pohled mohlo zdát, že s větší délkou překlátování bude přímo úměrně růst mezní síla, není tomu tak. Z důvodu koncentrace napětí na okrajích spoje není možné zvětšovat překlátování nekonečně, jelikož větší délky překlátování již nemají takový přínos na výslednou pevnost spoje. Závislost mezní síly na délce překlátování je zobrazena na obrázku 7.



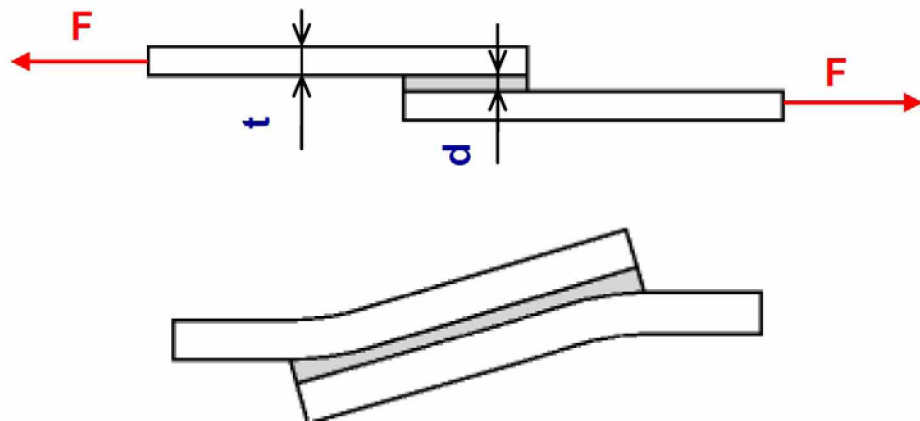
Obrázek 7 - Vliv délky překlátování na mezní sílu ve spoji [4]

### 1.2.2 Vliv excentricity zatížení

Na zatížení v jednoduchém překlátovaném spoji má velký vliv excentricita zatížení. Tato excentricita způsobí ohyb a dodatečné zatížení v odlupu. Na obrázku 8 je možné vidět důsledek excentricity zatížení na lepený spoj. Velikost excentricity je možné vyjádřit dle následujícího vzorce: [4]

$$M = \frac{F \cdot (t + d)}{2}$$

Kde  $M [N \cdot mm]$  je ohybový moment,  $F [N]$  je síla působící na spoj,  $t [mm]$  je tloušťka substrátu a  $d [mm]$  je tloušťka lepidla.

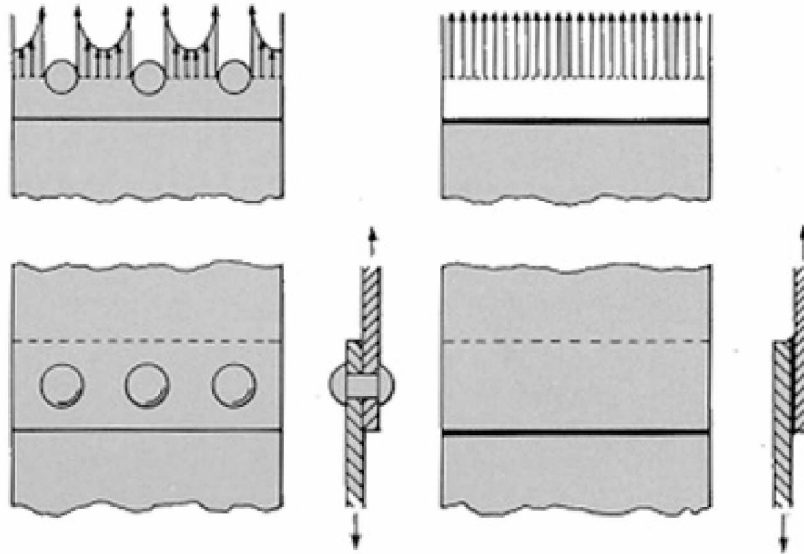


Obrázek 8 - Vliv excentricity zatížení na lepený spoj [4]

### 1.2.3 Porovnání s jinými druhy spojování

- **Šroubování a nýtování**

Při spojování plechů dochází u tohoto druhu spojení ke koncentraci napětí v okolí šroubů a nýtů, viz obrázek 9, což vede ke snížení celkové únosnosti. Použití spojovacích elementů také vede ke zvýšení hmotnosti spoje. Dále tento spoj netěsní, což je zejména pro aplikaci v automobilovém průmyslu, velká nevýhoda. Výhodou těchto spojů oproti lepení jsou nižší požadavky na čistotu spojovaných ploch. U šroubových spojů je výhodou rozebíratelnost.



Obrázek 9 - Porovnání průběhu napětí nýtovaného a lepeného spoje [8]

- **Bodové svařování**

Jedná se o nejpoužívanější způsob spojování při výrobě karoserie. Princip tohoto spoje spočívá v přiložení dvou nebo více plechů k sobě, přitlačení pomocí svařovacích kleští, a poté působením procházejícího proudu dojde k natavení spojovaného materiálu a k prolnutí materiálů jednotlivých plechů. Hlavní důvody pro použití tohoto spoje plynou z jeho jednoduchosti, nízké ceny a dlouhodobě prověřené technologie.

Mezi hlavní nevýhody bodového svařování patří nerovnoměrné rozložení napětí ve spoji a tepelně ovlivněná oblast kolem svařových čoček, což přináší problémy obzvláště, při použití tepelně zpracovaných plechů, u kterých dochází při vnesení dodatečného tepla ke změně mechanických vlastností. Další nevýhodou oproti lepení je nízká pohledová kvalita toho spoje, proto není možné použít tento typ spoje na pohledových částech karoserie. Stejně jako u šroubovaných a nýtovaných spojů nedisponuje tento spoj dostatečnou těsností. Pro použití na lemech dveří je možné použít jednostranné bodové svary, které však slouží pouze k fixaci lemového spoje před vytvrzením lepidla.

- **Tavné svařování**

U tohoto svařování dochází k natavení přídavného materiálu i materiálu podkladu a k jejich prolnutí. V současné době se ve ŠKODA AUTO a.s. používá metoda svařování MIG a MAG, kde dochází k natavování kontinuálně odvíjené elektrody v podobě drátu v plynové ochranné atmosféře.

Tento způsob spojování je v současné době na ústupu, kvůli jeho nesporným nevýhodám, zejména velikost tepelně ovlivněné oblasti, která je mnohem větší než u bodového svařování. K dalším nevýhodám tohoto druhu spojování patří špatná korozní odolnost, nižší vzhledová kvalita a vyšší pracnost.

- **Laserové pájení**

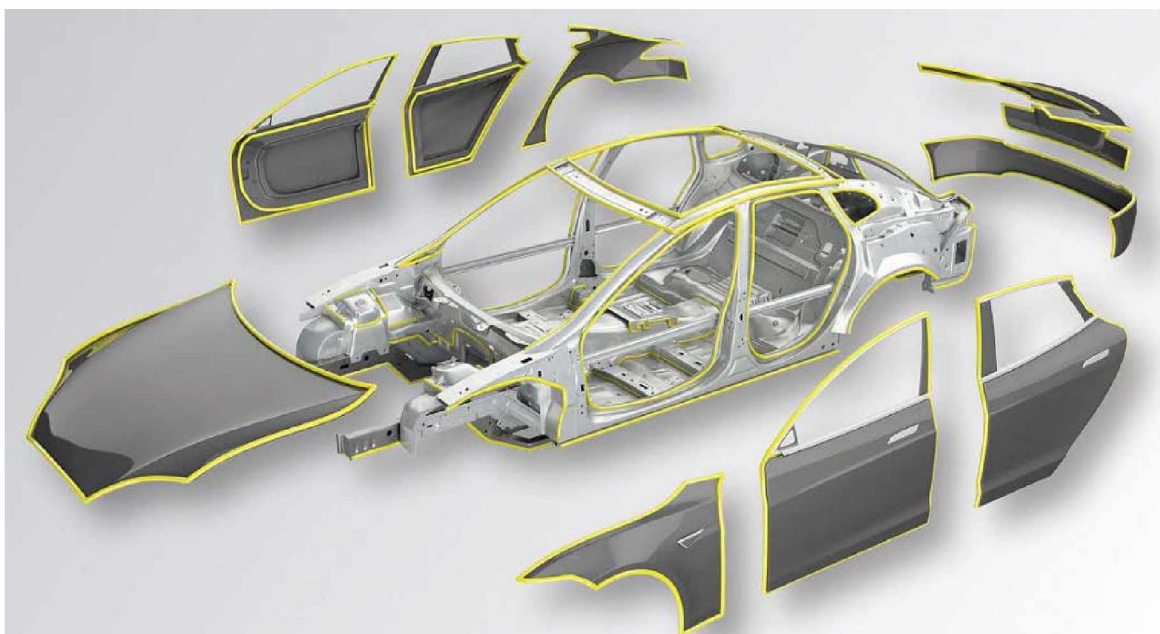
Při laserovém pájení dochází pomocí laserového paprsku k natavování pájky, v případě použití ve ŠKODA AUTO a.s. se používá měděná pájka. Na rozdíl od svařování nedochází k natavování spojovaného materiálu.

Nevýhodou tohoto spoje je zejména nižší pevnost oproti ostatním druhům spojování a vysoké náklady na zařízení. Z těchto důvodů se tyto spoje ve ŠKODA AUTO a.s. používají pouze na pohledových částech karoserie, konkrétně nad místem pro registrační značku na pátých dveřích a na střeše.

#### **1.2.4 Lepidla používaná při stavbě karoserií**

V následující kapitole jsou popsána lepidla, které se v největší míře používají ve svařovně ŠKODA AUTO a.s. pro lepení strukturálních částí karoserie. Mimo svařovenských lepidel jsou na karoseriích používána i tzv. montážní lepidla, která se používají pro lepení dalších částí součástí karoserie, například předního a zadního okna nebo plastových a kompozitních dílů v exteriéru. Na obrázku 10 je možné vidět místa, na kterých se na karoserii automobilu může nacházet strukturální lepidlo.

K vytvrzení lepidel dochází při výrobě automobilových karoserií až v lakovně při sušení kateforetického lakování, proto tato lepidla musí být schopná odolat nejen olejům přítomným na plechu, ale zároveň nesmí docházet k jejich vymývání při předúpravách před procesem lakování. Doba vytvrzení pro tato lepidla je zpravidla 20 minut při 180 °C nebo méně.



Obrázek 10 - Použití strukturálních lepidel na automobilové karoserii [9]

- **Epoxidová lepidla**

Epoxidová lepidla jsou nejspíše nejvšestrannějším druhem lepidel, zejména pro jejich schopnost přilnout k mnoha povrchům. Tato lepidla mají velice dobré smáčecí schopnosti, a proto mají dobrou adhezi k většině povrchů, mimo některých povrchů s nízkou povrchovou energií. Epoxidová lepidla dále vynikají svoji smykovou pevností, ale mají poměrně vysokou citlivost na odlup. Velkou výhodou pro použití těchto lepidel při výrobě karoserií je jejich vysoká tolerance k olejům. U automobilových karoserií totiž nedochází před aplikací lepidla k odmaštění, a proto je nutné vybírat pouze taková lepidla, jejichž vlastnosti nejsou přítomností oleje výrazně ovlivněny. [5]

Epoxidová lepidla se skládají primárně ze dvou složek, z pryskyřice a tvrdidla. Při výrobě karoserií se používají téměř výhradně jednosložková lepidla, to znamená, že pryskyřice i tvrdidlo jsou smíchány u výrobce, avšak k aktivaci tvrdidla dochází až pomocí zvýšené teploty. Výhodou jednosložkových lepidel vytvrditelných za tepla je lepší zasíťování a vyšší teplota skelného přechodu (při této teplotě dochází k prudkému snížení pevnosti a modulu pružnosti, materiál se stává viskózním). Tato lepidla se při výrobě karoserií používají převážně pro pevnostní lepené spoje. Z důvodu přítomnosti tvrdidla v lepidle je doba skladování omezená i u jednosložkových lepidel. Tato doba závisí i na správném skladování a většinou se pohybuje v rozmezí 6-12 měsíců.

Epoxidová lepidla je možné modifikovat a tím docílit velkého množství různých vlastností. Pro použití v automobilových karoseriích je nejdůležitější odstranit křehkost těchto lepidel. Křehkost má negativní vliv na pevnost v odlupu, rázovou houževnatost spoje a pevnost za snížených teplot. Tohoto změkčení lze docílit dvěma způsoby, vnitřním a vnějším změkčováním. Při vnějším změkčování jsou do lepidla přidány molekuly s velkým objemem a vysokým bodem varu. Po vytvrzení pak zůstávají tyto molekuly uzavřené v molekulové síti a při zatížení tlumí působící síly. Tato změkčovadla však nejsou pevně spojená s pryskyřicí, protože s pryskyřicí chemicky nereagují, a proto může docházet k jejich úniku z materiálu v průběhu životnosti. U vnitřního změkčování dochází k oddalování reakčních skupin a tím k prodloužení lineárních částí řetězců, anebo snížení funkčnosti tvrdidla. Toto změkčovadlo už z principu funkce musí reagovat s některou složkou lepidla, a proto nemůže docházet k jeho vylučování. [10]

- **Kaučuková lepidla**

Tato lepidla se vyrábějí rozpouštěním přírodních nebo syntetických kaučuků ve vhodném rozpouštědle. Mají nižší pevnost ve srovnání s epoxidovými lepidly, a proto se používají převážně jako těsnící nebo pro lepení vnějších plechů na karoserii, u kterých není vhodné použít epoxidová lepidla, protože by mohlo docházet k pohledovým deformacím na velkých plochách. Ve ŠKODA AUTO a.s. se, stejně jako v případě epoxidových lepidel, používají kaučuková lepidla vytvrzovaná za tepla.

- **Polyuretanová lepidla**

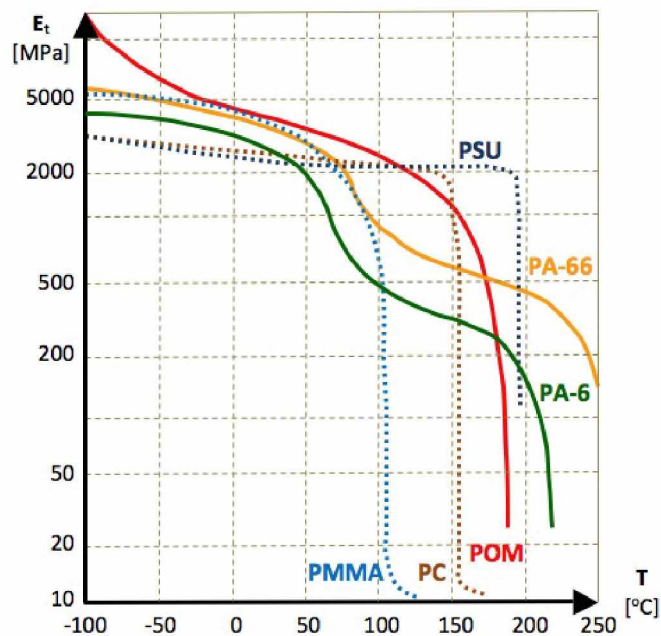
Lepidla s polyuretanovým základem tvoří pevná spojení s vysokou odolností proti odlupu. Oproti ostatním lepidlům mají lepší pevnost za nižších teplot, avšak nejsou odolné vyšším teplotám (nad 250 °C). Z dalších pozitivních vlastností lze zmínit odolnost proti abrazi, tvrdost a pružnost. Díky jejich dobré smáčivosti umí přilnout k velkému spektru povrchů, dokonce i k některým obtížně slepitelným plastům. Pro výrobu automobilových karoserií jsou však čisté polyuretany nevhodné, protože nemají dostatečnou snášenlivost s olejem, proto se v automobilovém průmyslu používají polyuretany modifikované epoxidovou pryskyřicí. Ve ŠKODA AUTO a.s. se tento typ lepidla používá převážně jako těsnící lepidlo, například na předních podélnicích.



### 1.2.5 Vliv teploty na lepidla

Síťované amorfnní polymery (reaktoplasty) se chovají odlišně od amorfnních termoplastů, a to z důvodu, že tyto materiály není možné roztavit. Při zvýšení teploty je možné pozorovat pouze náznak kaučukovité pružnosti typické pro termoplasty. Proto i při teplotách nad  $T_g$  (teplota skleného přechodu) mají síťované amorfnní polymery poměrně vysokou pevnost ve srovnání s termoplasty, a to až do teploty rozkladu, kdy dojde k jejich degradaci. Epoxidová lepidla se řadí mezi síťované amorfnní polymery (reaktoplasty). [11]

Semikrystalické polymery se chovají podobně jako amorfnní termoplasty, avšak snížení pevnosti při překročení teploty skelného přechodu není tak markantní. K výrazné změně vlastností dochází až při překročení teploty tavení  $T_m$ . Rozdíl v chování semikrystalických polymerů a amorfnních polymerů lze pozorovat na obrázku 11. [11]



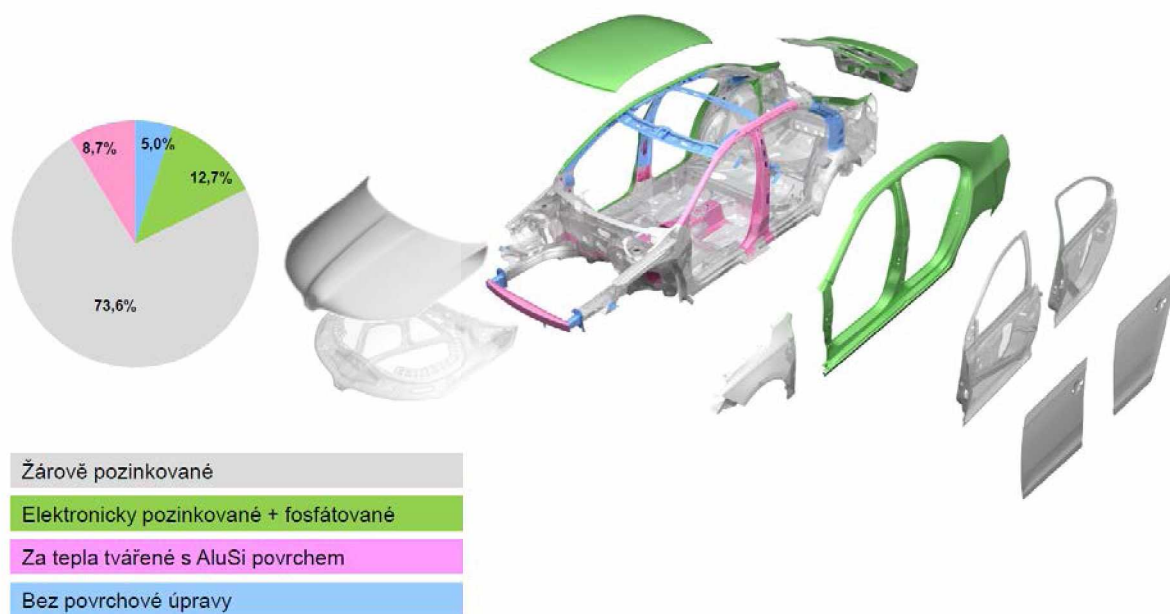
Obrázek 11 - Teplotní závislost modulu pružnosti pro amorfnní polymery (tečkovaná čára) a semikrystalické polymery (plná čára) [11]

### 1.3 Povrchové úpravy používané při stavbě karoserií

Používání ocelí v automobilovém průmyslu přináší nutnost tyto oceli chránit před korozními vlivy. Možností chránit ocel před těmito vlivy je několik, například použitím korozivzdorných ocelí, povrchovými úpravami anorganickými i organickými nebo elektrochemickou ochranou. Ne všechny tyto ochrany jsou však vhodné pro použití na karoserii automobilu. Korozivzdorné oceli jsou příliš drahé a nemají ani vhodné mechanické vlastnosti, použití anodické ochrany není možné z konstrukčního hlediska, stejně jako povlakování plastickými hmotami. Z organických povlaků jsou hojně využívány nátěry, avšak samotný

nátěr není dostatečná ochrana proti korozi a pro vytvoření dlouhodobé ochrany je vhodné použít kombinaci nátěru a dalšího způsobu ochrany povrchu. Tato kombinace je nutná, zejména kvůli tomu, že nátěry na vozidle s časem degradují, převážně vlivem slunečního záření, a také nemají vysokou odolnost proti mechanickému poškození, například od odletujících kamínků. Hlavním úkolem jak nátěru, tak povrchové úpravy, je oddělit ocel od korozního prostředí. Dodatečným způsobem ochrany pomocí organických povlaků je konzervování zinkovaných plechů pro zabránění vzniku oxidů na jejich povrchu.

Mezi anorganické povrchové úpravy používané při stavbě karoserií ve ŠKODA AUTO a.s. patří zejména elektrolytické zinkování, žárové zinkování a Al-Si povlakování, viz obrázek 12. Zinkový povlak zároveň mimo oddělení oceli od korozního prostředí přináší i výhodu v katodické ochraně povrchu v místech porušení celistvosti povlaku. Žárovému zinkování bude v této kapitole věnována největší pozornost, jelikož všechny substráty v této diplomové práci budou mít povrchovou úpravu právě v podobě žárového zinkování.



Obrázek 12 - Povrchové úpravy na karoserii automobilu Škoda Octavia 3. generace [12]

### 1.3.1 Al-Si povlak

Al-Si povlak je žárově nanášený povlak ze slitiny hliníku a křemíku. Tento povlak vytváří se základním materiálem poměrně pevnou kovovou vazbu. Tato vrstva je používána pro oceli, které jsou při lisování tepelně upravovány pro docílení rozdílné vnitřní struktury, a to z důvodu, že u běžných zinkovaných ocelí by při teplotách tepelných úprav (asi 950 °C) došlo k roztavení zinku. Hlavním úkolem této vrstvy je zabránění vysokoteplotní oxidace a tvorbě okujů při cestě mezi pecí a lisem. Tavící teplota této povrchové vrstvy je sice přibližně 600 °C, ale při ohřívání dochází k nasycování vrstvy železem a tvorbě intermetalických fází, které zvýší

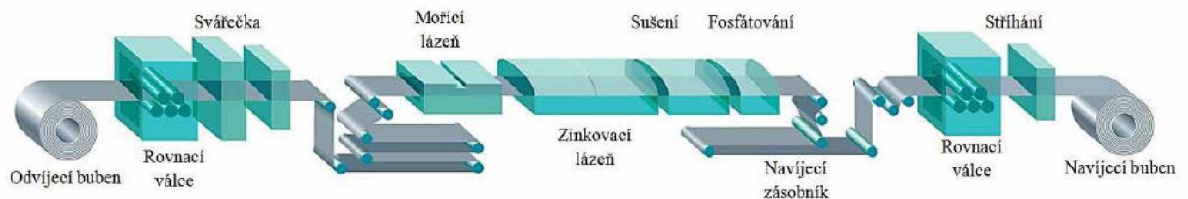
teplotu tání této vrstvy až nad 1100°C. Nevýhodou této vrstvy je vyšší hodnota odporu povrchové vrstvy od základního materiálu, což může přinášet problémy při svařování. [13], [14]



Obrázek 13 - Al-Si povrchová vrstva [14]

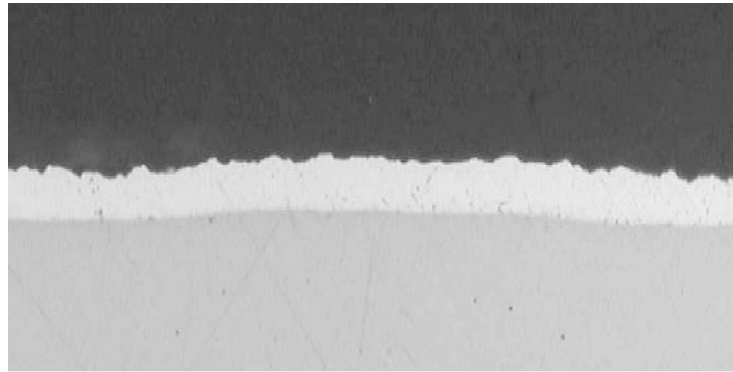
### 1.3.2 Elektrolytické zinkování

Elektrolytické zinkování je vylučování zinku na ocel pomocí elektrochemických procesů. Nejobvyklejší uspořádání je zinkový elektrolyt na bázi sulfátů zinku a anoda z nerozpustného kovu, nejčastěji slitina olova a stříbra. Je možné použít i rozpustné zinkové elektrody. Princip tvorby povlaku spočívá v tom, že pozitivně nabité ionty zinku jsou redukovány na zinek a vyloučeny na katodě.



Obrázek 14 - Schéma linky pro elektrolytické zinkování [4]

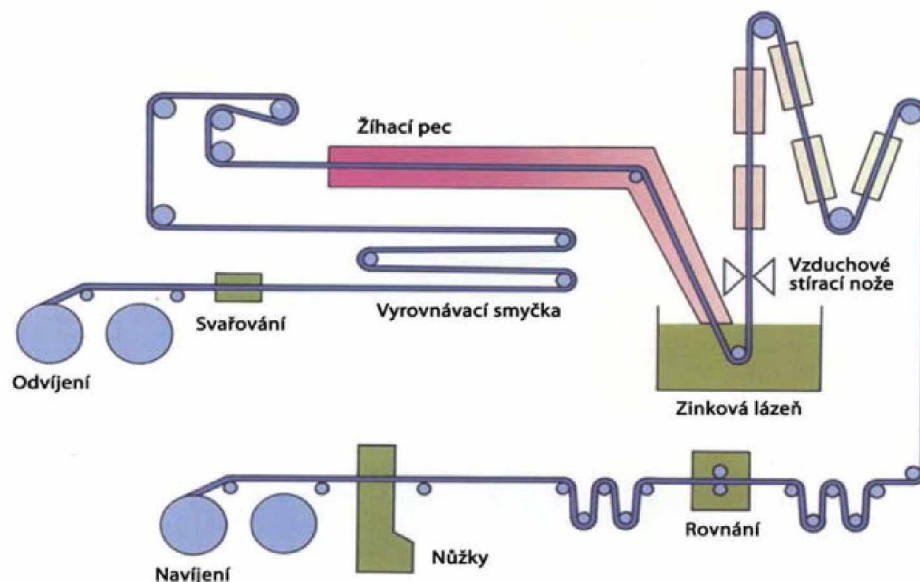
Tento povlak se skládá pouze z čistého zinku a neobsahuje intermetalické fáze, a díky tomu lze dosáhnout velmi tenkých vrstev pro požadovaný stupeň korozní ochrany. Tento způsob zinkování umožňuje i jednostranné zinkování. Povlak je velmi kujný, a i při větším přetvoření nedochází k jeho porušování, což je důležitý aspekt pro následné lisování. V současné době dochází k přechodu z elektrolytického na žárové zinkování z důvodu vysoké energetické náročnosti elektrolytického zinkování. [15]



Obrázek 15 - Povrch elektrolyticky pozinkovaného dílu [16]

### 1.3.3 Žárové zinkování

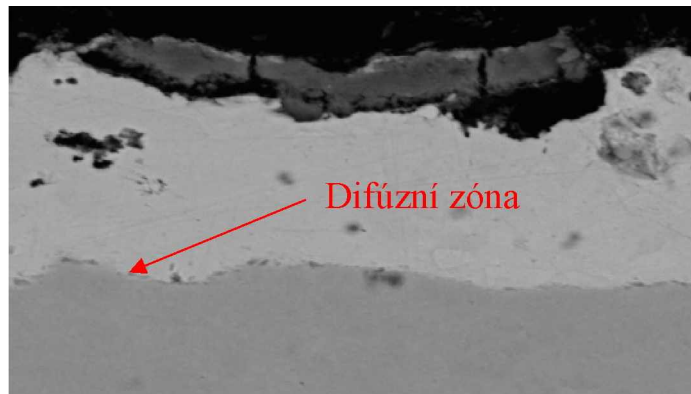
Žárové zinkování spočívá v ponoření očištěných a odmaštěných plechů do roztaveného zinku. Odmaštění je běžně provedeno pomocí alkalických lázní. Poté následuje moření pro odstranění rzi a okují. Před ponořením do roztaveného zinku je potřeba nanést tavidlo, které má za účel zabránit tvorbě oxidů a rozpustit oxidy, které již na povrchu oceli vznikly. Díky tomu je zajištěn přímý styk roztaveného kovu s povrchem oceli. Podle způsobu nanášení tavidla lze zinkování rozdělit na suché a mokré. Rozdíl je v tom, že u suchého zinkování dochází po vyndání výrobku z lázně s tavidlem k osušení, zatímco u mokrého zinkování je hladina zinkovací lázně rozdělena přepážkou. Na hladině jedné části se nachází tavidlo a výrobek při ponoření do lázně prochází přes tavidlo a lázeň opouští částí bez tavidla. [17]



Obrázek 16 - Kontinuální proces žárového zinkování plechů [17]

Žárové zinkování plechů se provádí poněkud odlišným způsobem, jak je možné vidět na obrázku 16. Plech je odvíjen ze svitků, které se moří a dále se provede zbavení oxidů redukcí v žíhací peci při 950 °C, kde je zároveň žihán naměkko. Poté je plech ještě v ochranné atmosféře ponořen do zinkovací lázně. Při výstupu z lázně je nutné řídit tloušťku zinkové vrstvy. To se děje pomocí vzduchových nožů, které proudem vzduchu nebo páry odstraní přebytečnou vrstvu zinku. Tloušťka zinkové vrstvy pro použití v karoseriích automobilů se pohybuje kolem 7μm. Po ochlazení a rovnání je plech navinut na svitky. Navinutí na svitky mohou předcházet dodatečné povrchové úpravy, které budou popsány v dalších odstavcích.

Zinkový povlak není při tomto procesu složen z čistého zinku, ale z důvodu vysokých teplot při noření dochází ke vzniku intermetalických fází. Na obrázku 17 je možné vidět detail této povrchové vrstvy. [17]



Obrázek 17 - Povrch žárově pozinkovaného dílu [4]

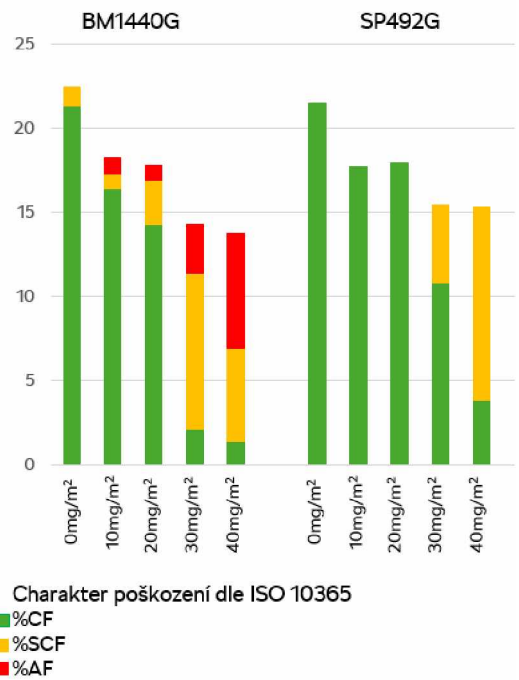
### 1.3.3.1 Pvlaky

Jelikož běžný žárově zinkovaný povrch přináší problémy při lisování, hlavně kvůli nedostatečnému tření a s ním související abrazi, je nutné použít dodatečný povlak. Níže popsané pvlaky pracují na podobném principu, liší se především druhem aplikované soli.

V sériové produkci ve firmě ŠKODA AUTO a.s. je v současné době používán pouze povlak NIT a je proto nejvíce probádán. Ostatní pvlaky jsou momentálně ve fázi vývoje a testování. Testování těchto pvlaků je dlouhotrvající záležitostí, jelikož musí splnit podmínky na otěr v lisovacím nástroji, adhezi k lepidlům, korozní odolnost, adhezi a povrchovou kvalitu k laku vozidla a mnoho dalších parametrů.

- **NIT povlak**

NIT (New Inorganic Treatment) je dodatečný anorganický povlak od firmy ArcelorMittal na bázi  $ZnSO_4$  (Síran zinečnatý). Tato povrchová úprava slouží ke zlepšení tribologických vlastností materiálu. Díky jeho použití nedochází k otěru měkkého zinkového povlaku v lisovacím nástroji během tažení přes ostré designové hrany. Vrstva NIT povlaku se stanovuje v miligramech síry na metr čtvereční. Pro procesy ŠKODA AUTO a.s. je tato hodnota předepsána na  $18 \pm 5$  mg S/m<sup>2</sup> dle QP A005. Tato hodnota je zvolena jako kompromis mezi lisovatelností materiálu a pevností lepeného spoje. Povlak je tedy nutný pro technologii lisování, ale vyšší koncentrace soli na substrátu má negativní vliv na pevnost a přilnavost lepených spojů, dále pak na snížení živostnosti svařovacích elektrod a vede ke zhoršení přilnavosti lakových vrstev. [7]



Obrázek 18 - Pevnost lepidel při různých koncentracích NIT, zkouška PV12.35 [7]

- **Bonderite**

Bonderite je dodatečný anorganický povlak na bázi síry vyvinutý firmami Henkel a ThyssenKrupp. Obsah síry v tomto povlaku je  $17 \pm 5$  mg/m<sup>2</sup> dle QP A005.

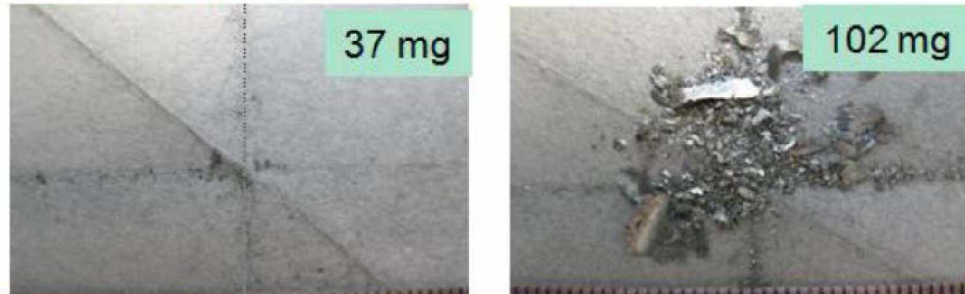
- **ATP**

ATP (Advanced TriboPrimer) je dodatečný anorganický povlak od firmy Salzgitter na bázi fosforu. Normované množství v povlaku není stanoveno, jelikož tento povlak zatím není schválen pro použití v koncernu VW.

- **PLT**

PLT (Prime Lube Treatment) je dodatečný anorganický povlak od firmy Tata Steel. Tento povlak je na bázi fosforu a obsah fosforu v povlaku je  $6 \pm 3$  mg/m<sup>2</sup> dle QP A005. Nanášení povlaku probíhá válečkováním.

Důvodem použití povlaků ATP, PLT a Bonderite je stejně jako u povlaku NIT, snížení otěru v lisovacím nástroji při tažení přes ostré hrany. Odolnost proti otěru je zjišťována pomocí příslušné zkoušky, kde se hodnotí hmotnostní množství otěru a dále i velikost otěrových částic, viz obrázek 19.

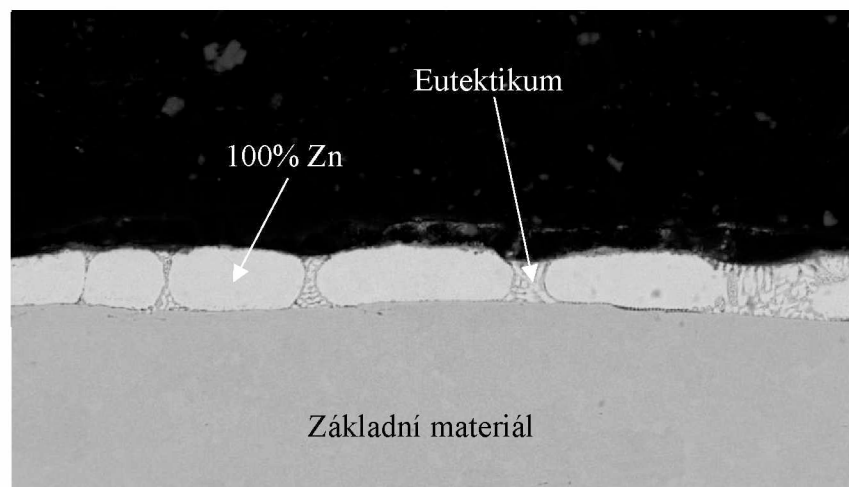


Obrázek 19 - Rozdíl v otěru po provedení otěrové zkoušky, vlevo ATP, vpravo substrát bez dodatečného povlaku [7]

Nevýhodou PLT, ATP i Bonderite je nízká odolnost povlaku proti smývání při procesu praní, kdy dochází k mechanickému čištění povrchu kartáčem, což vede ke snížení tloušťky povlaku.

### 1.3.3.2 ZnMg

Princip tvorby tohoto povlaku je shodný jako u žárového zinkování, ale tento povlak obsahuje ve své struktuře mimo zinku i hořčík a malé množství hliníku. Konkrétně je to 1-2 hm. % hořčíku a 1-3 hm. % hliníku. Výhodou tohoto povlaku jsou dobré kluzné vlastnosti a poměrně vysoký stupeň ochrany proti korozi (vyšší než u klasického žárového nebo elektrolytického zinkování). Díky dobrým kluzným vlastnostem této povrchové úpravy není nutné používat dodatečné povlaky.



Obrázek 20 - Mikrostruktura povrchu ZnMg [7]

### 1.3.4 Maziva

Maziva jsou při stavbě karoserií používána v procesu lisování jednak ke snížení tření mezi lisovacím nástrojem a výliskem, a zároveň jako dodatečná ochrana povrchu. Tření mezi lisovacím nástrojem a výliskem způsobuje mimo jiné nadměrné opotřebení nástroje, a také ulpívání částic zinku na nástroji, což vede ke snižování vrstvy zinku na výlisku. Ochrana povrchu pomocí oleje je důležitá z důvodu tvorby oxidů na odhaleném povrchu, které by měly za následek snížení přilnavosti lepených spojů, kvality laku a zvýšení odporu při bodovém svařování.

- **Prelube**

Tyto oleje jsou nanášeny přímo u výrobce svitků. Slouží ke konzervaci při přepravě a zároveň pro snížení tření při lisování. Tento typ oleje nahradil v minulosti používané konzervační oleje, zejména proto, že konzervační oleje nemají vhodné vlastnosti pro použití při lisování.

- **Prací oleje**

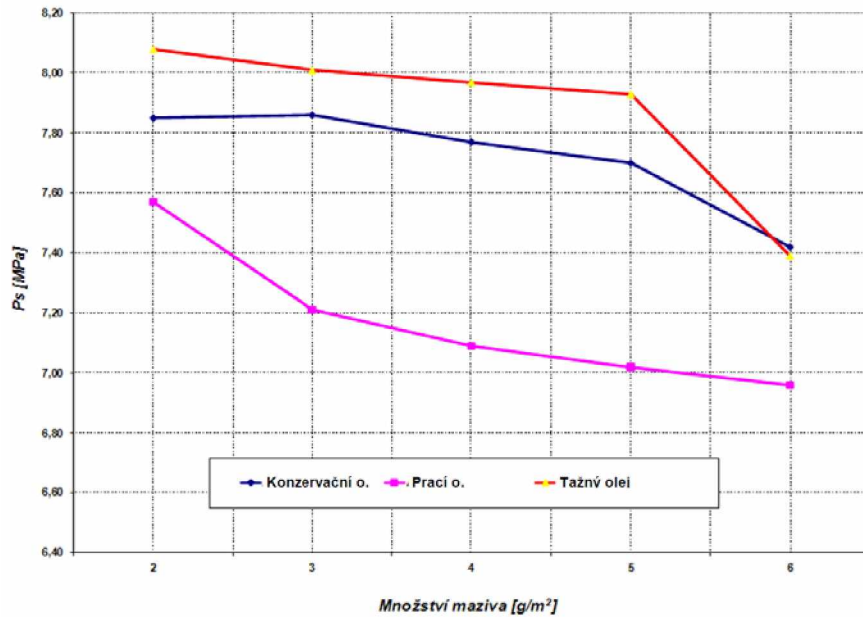
Slouží k očištění svitků od nečistot vzniklých při drezírování a přepravě svitku od výrobce. Při procesu praní tedy prací olej nahradí olej, který byl na svitku od výrobce. Výhodou použití pracích olejů je zajištění homogenní vrstvy oleje na výlisku, jelikož k procesu praní dochází těsně před nástřihem a lisováním.

- **Tažné oleje**

Tyto oleje slouží k přimazávání před samotným lisováním. Nanášejí se na předem určená místa, která jsou při přetvoření vysoce namáhána. Nanášení probíhá dle mazacího plánu.

Před nanášením lepidla při sériové výrobě automobilových karoserií nedochází k odmašťování, proto musí lepidla snášet jisté množství oleje bez toho, aniž by došlo k výrazné změně jejich vlastností nebo ke snížení přilnavosti k podkladu, jelikož adhezní porušení je pro lepený spoj nežádoucí stav. Protože přítomnost oleje snižuje pevnost lepidel, je nutné s tímto faktem počítat a sledovat množství oleje, aby nedošlo k přílišnému snížení pevnosti. Na obrázku 21 je možné vidět vliv množství oleje na pevnosti lepeného spoje pro různé druhy olejů, tyto křivky však platí pouze pro lepidla vyvinutá pro tuto aplikaci a obecně mají lepidla toleranci k olejům menší.





Obrázek 21 - Vliv množství oleje na pevnosti v odlupu epoxidových lepidel [4]

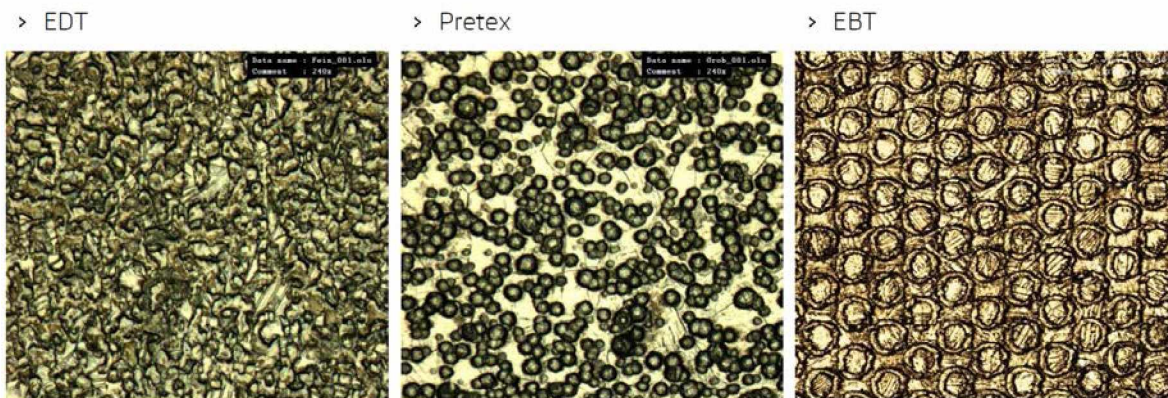
### 1.3.5 Morfologie

Pro zajištění lisovatelnosti a snížení opotřebení lisovacích nástrojů je nutné, aby povrch povlaku splňoval tyto požadavky:

- Schopnost přijímat mazivo
- Schopnost zabránit odtékání maziva
- Během tváření nesmí docházet ke zvyšování plochy oblastí, které jsou v přímém styku
- Nesmí docházet k odtržení filmu vytvořeného na povrchu mazivem

[4]

Aby byly tyto požadavky splněny, je nutné na povrchu plechu vytvořit odpovídající strukturu, viz obrázek 22. Takovéto struktury je dosaženo pomocí úpravy povrchu pracovního válce. Struktura morfologie může být buď stochastická, deterministická anebo kombinace obou. Stochastické struktury lze dosáhnout například metodou SBT, při které dochází k otryskávání válce jemným granulátem, metodou EDT, při které je válec v dielektrickém prostředí lokálně natavován nebo metodou PRETEX, který je založen na vylučování chromu na povrchu válce. Deterministické struktury lze dosáhnout metodou EBT, kde se pomocí elektronového paprsku natavuje ve vakuu povrch válce nebo metodou LT, kde je natavení docíleno pomocí laseru. [18]



Obrázek 22 - Typy morfologie povrchů [7]

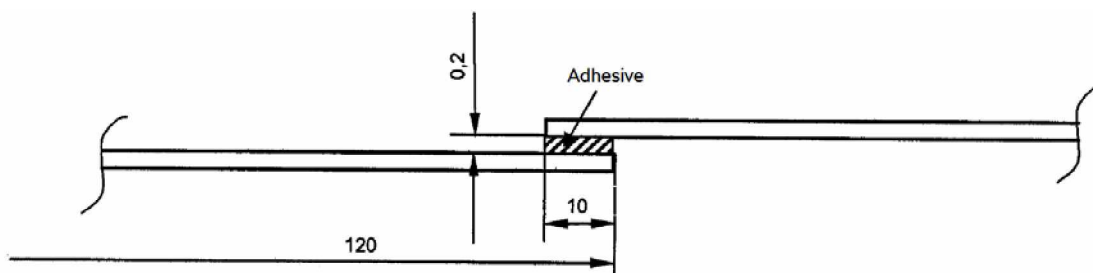
## 1.4 Způsoby testování pevnosti lepených spojů

V této kapitole budou zmíněny druhy testování lepených spojů jak normalizované, tak i experimentální z jiných institucí. Budou zmíněny pouze ty způsoby testování, které jsou vhodné pro použití při testování pevnostních lepidel, u kterých je substrátem tenký plech, jelikož toto použití je poměrně specifické pro automobilový průmysl.

### 1.4.1 Normalizované způsoby testování

#### 1.4.1.1 Testování smykové pevnosti

Pro tento typ zkoušky se používá v koncernu VW interní norma PV 12.35, vycházející z normy EN 1465. Substráty pro tuto zkoušku mají minimální délku 120 mm a šířka je 25 mm. Pro použití při testování pevnostních lepidel musí být substráty zbaveny otřepů. Pro každou zkoušku musí být vyrobeno 5 vzorků. Před nanesením lepidla je třeba substrát vhodným způsobem očistit a odmastit, je možné použít i ultrazvuk. Poté je na substrát nanášeno  $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$  oleje (Anticorit 4107S nebo Anticorit PL 3802-39S). Příprava vzorku odpovídá normě PV 12.30. Po nanesení lepidla je nutné zajistit požadovanou mezeru mezi substráty, toho je docíleno pomocí měděného drátu o průměru 0,2 mm, v případě testování pevnostních lepidel. Přesah lepeného spoje je 10 mm. Po slepení je vzorek zajištěn svorkami proti posunutí. K vytvrzení lepidla dochází při teplotě 180 °C po dobu 20 minut v laboratorní peci. Alternativně mohou být vzorky upevněny na karoserii vozidla a k vytvrzení lepidla dojde v lakovně po nanesení KTL (kataforetického lakování). [7]

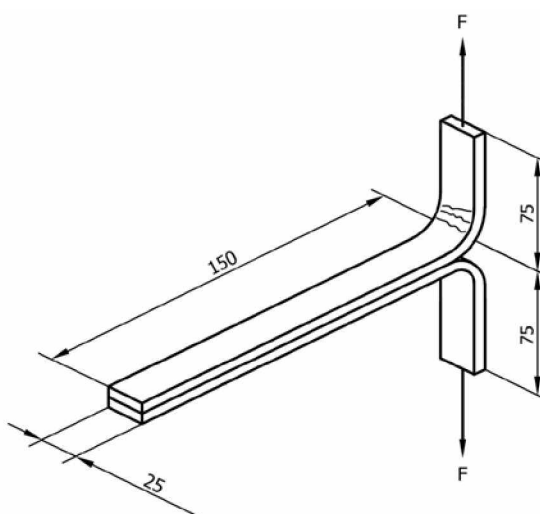


Obrázek 23 - Vzorek pro zkoušku PV 12.35 pro testování pevnostních lepidel [7]

Postup přetržení vzorku vychází z normy EN 1465. Pro zachování kvazistatického charakteru zkoušky je rychlost deformace 10 mm/min. Po zkoušce dojde k vyhodnocení pevnosti a zároveň charakteru poškození dle normy ISO 10365. Pevnostním výstupem je záznam síly v závislosti na čase nebo dráze.

#### 1.4.1.2 Testování pevnosti v odlupu

Pro tento typ zkoušky se v koncernu VW používá norma PV 12.31, vycházející z normy ISO 11339. Rozměry substrátu jsou zobrazeny na obrázku 21. Pro každou zkoušku musí být vyrobeno minimálně 5 vzorků. Všechny vzorky pro jedno měření musí být před změřením temperovány a změřeny při stejné teplotě. Poté je na substrát naneseo  $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$  oleje (Anticorit 4107S nebo Anticorit PL 3802-39S). Příprava vzorku odpovídá normě PV 12.30. Po nanesení lepidla je nutné zajistit požadovanou mezeru mezi substráty, toho je docíleno pomocí měděného drátu o průměru 0,2 mm. Po slepení je vzorek zajištěn svorkami proti posunutí. K vytvrzení lepidla dochází při teplotě 180 °C po dobu 20 minut v laboratorní peci. Alternativně můžou být vzorky upevněny na karoserii vozidla a k vytvrzení lepidla dojde v lakovně po nanesení KTL. [7]

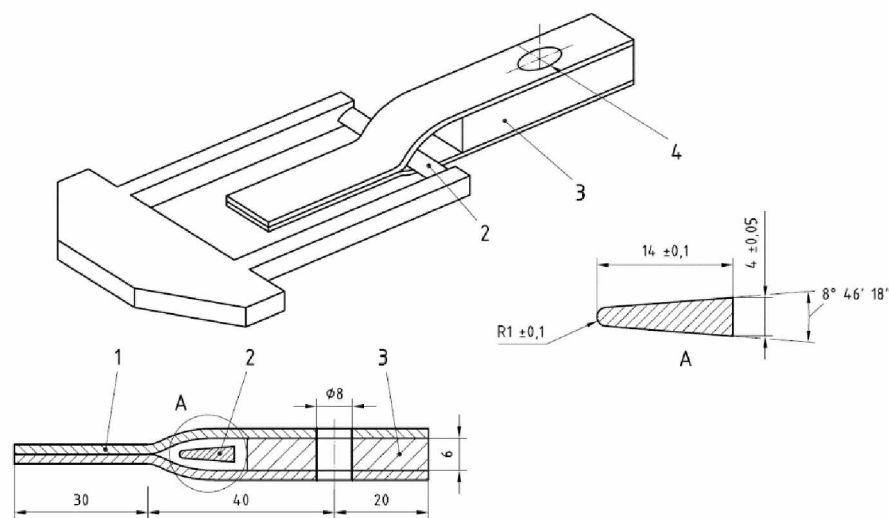


Obrázek 24 - Vzorek pro zkoušku dle ISO 11339 [7]

Postup přetržení vzorku vychází z normy EN 11339. Pro zachování kvazistatického charakteru zkoušky je rychlost deformace 100 mm/min. Po zkoušce dojde k vyhodnocení pevnosti a zároveň charakteru poškození dle normy ISO 10365. Výsledná záznamová křivka musí zaznamenávat minimálně 100 mm odlupu, přičemž 25 mm na začátku i konci vzorku se do zkoušky neuvažuje. Záznam síly na čase nebo dráze je posléze převeden podělením šířkou vzorku, na odolnost v odlupu vyjádřenou v N/mm.

#### 1.4.1.3 Stanovení dynamické odolnosti vysoce pevných slepů vůči štípání rázem







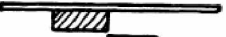


Pro tuto zkoušku lze použít metodu štípání rázem pomocí klínu, zkoušku popisuje norma ISO 11343. Tato zkouška slouží k měření dynamické odolnosti proti odlupu. Pro tuto metodu je nutné vytvořen vzorek dle obrázku 23. Nejprve jsou nastříhány plechy v rozměru 90x20 (alternativně lze upravit šířku spoje), poté je po nanesení lepidla nutné zajistit požadovanou mezeru mezi substráty, toho je docíleno pomocí měděného drátu o průměru 0,2 mm. Po slepení je vzorek zajištěn svorkami proti posunutí. K vytvrzení lepidla dochází při teplotě 180 °C po dobu 20 minut v laboratorní peci. Všechny vzorky pro jedno měření musí být před změřením temperovány a změřeny při stejné teplotě. Příprava vzorku odpovídá normě EN 13887. [19]



Obrázek 25 - Vzorek pro zkoušku dle ISO 11343 [19]

Přetržení vzorku je docíleno pomocí kyvadla, hydraulického impaktoru nebo padajícího závaží. Rychlost deformace by se měla pohybovat mezi 3-5,5 m/s. Záznam síly na čase nebo dráze je posléze převeden, podělením šířkou vzorku, na dynamickou odolnost v odlupu vyjádřenou v N/mm.

### 1.4.1.4 Vyhodnocení typu porušení lepeného spoje

	Typy porušení	Označení		Typy porušení	Označení
Substrát	 Porušení jednoho nebo obou adherendů	SF	Lepidlo	Kohezní porušení  CF Speciální kohezní porušení  SCF  AF	
	 Porušení jednoho adherendu	CSF		Adhezní porušení  AF  AF	
	 Porušení delaminační	DF		Adhezní a kohezní porušení  ACFP	

Obrázek 26 - Vyhodnocení dle ISO 10365

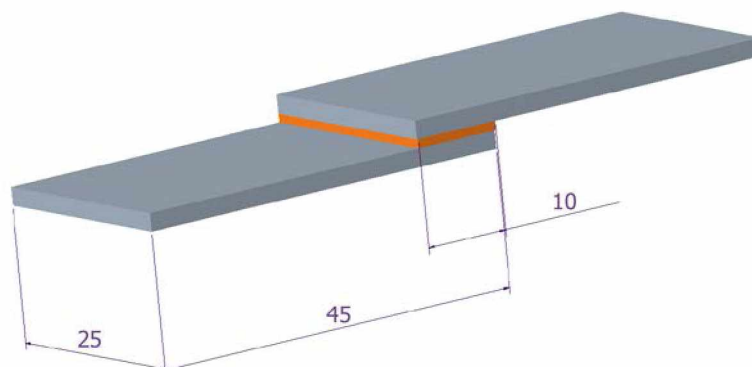
Toto vyhodnocení se provádí dle normy ISO 10365. Vyhodnocení se provádí vizuálně a uvádí se procentuální podíl jednotlivých druhů porušení. U většího množství vzorků se uvádí průměrná hodnota. Toto hodnocení je velice důležité, protože již typ porušení vypovídá o spotřebě energie při deformaci. Na obrázku 26 je možné vidět výtah z normy pro posuzování typu porušení lepeného spoje.

## 1.4.2 Nenormalizované způsoby testování

### 1.4.2.1 Dynamická zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem

Pro tuto zkoušku se ve ŠKODA AUTO a.s. vychází z normy PV 12.35, která je modifikována pro potřeby dynamického testování. Příprava vzorků probíhá identicky jako u výše zmíněné normy, jediným podstatným rozdílem je rozměr substrátů, který je 25x45 mm, přelepená plocha je zachována 10x25 mm, stejně jako tloušťka lepidla 0,2 mm. Pro lepší zajištění v kleštinách je možné nanést na konce vzorku brusnou pastu. Pro tuto zkoušku je možné použít Charpyho kladivo, rychlý hydraulický válec nebo padající závaží. Typ porušení je posuzován dle normy ISO 10365. K vytvrzení lepidla dochází při teplotě 180 °C po dobu 20 minut v laboratorní peci. Alternativně můžou být vzorky upevněny na karoserii vozidla

a k vytvrzení lepidla dojde v lakovně po nanesení KTL. Tato zkouška probíhala doposud při pokojových teplotách, přičemž vývoji metodiky pro testování těchto spojů při negativních teplotách se bude věnovat experimentální část této diplomové práce.

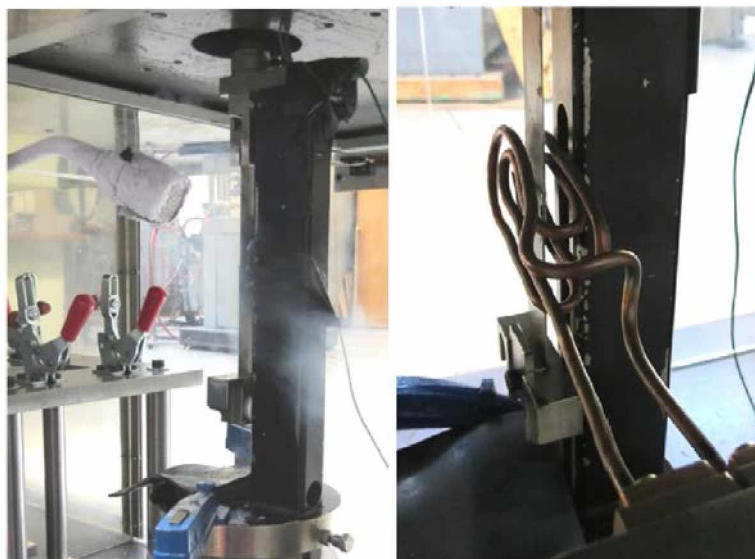


Obrázek 27 - Vzorek používaný pro dynamickou zkoušku pevnosti ve smyku

#### 1.4.2.2 Dynamické zkoušky za různých teplot, University of Porto

Dynamickými zkouškami lepených spojů za nízkých teplot se v současné době, dle volně přístupných zdrojů, věnuje minimum výzkumných ústavů. Jedním z těchto ústavů je University of Porto. V článku z roku 2016 je zde zkoumán vliv rozdílných teplot a rychlostí deformace na jednoduchý přeplátovaný spoj. Materiály použité jako substráty v tomto článku jsou však poměrně rozdílné od materiálů používaných při stavbě silničních vozidel ve velkosériové výrobě. Lepený spoj v článku byl tvořen ze dvou substrátů, první byl z uhlíkových vláken vyztužených polymerem a druhým byl biopolymer, tedy polymer obsahující organické složky, což ho činí biologicky rozložitelným. Použité bylo dvousložkové akrylátové lepidlo DP-8005 od firmy 3M.

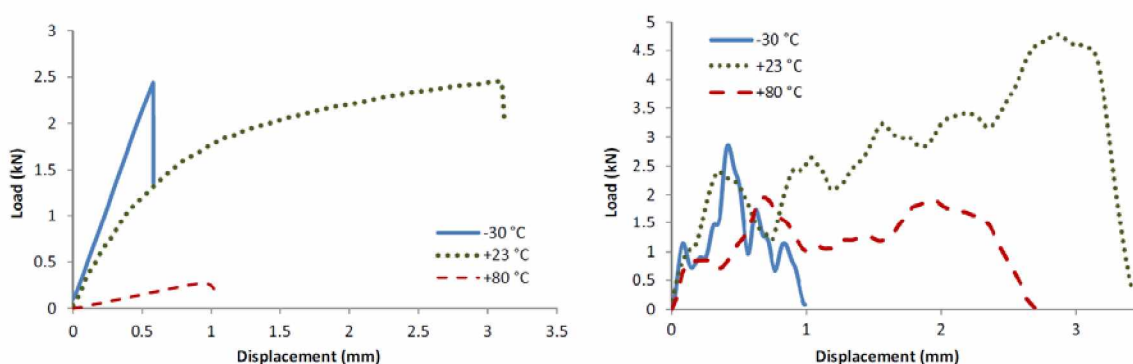
Kvazi-statické testy byly provedeny na stroji INSTRON model 3367 a dynamické testy byly provedeny na stroji s padajícím závažím Rosand Instrumented Falling weight impact tester, typ 5 H, kdy rychlost a energie impulsu je dána výškou pádu a hmotou závaží. Pro zkoušky za teploty  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  bylo použito chlazení nástřikem kapaného dusíku na vzorek, viz obrázek 28 vlevo. Pro zkoušky při teplotě  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  byl použit indukční ohřev, jak je možné vidět na obrázku 28 vpravo.



Obrázek 28 - Zařízení pro ochlazování (vlevo) a ohřívání (vpravo) vzorku [20]

Na obrázku 29 je možné vidět chování lepeného spoje při různém zatěžování, kdy na obrázku vlevo můžeme vidět chování při kvazistatickém zatěžování. Při pokojové i snížené teplotě bylo dosaženo srovnatelných hodnot maximální síly, avšak této síly bylo dosaženo s velmi rozdílným množstvím vložené energie, což bylo zřejmě způsobeno snížením plasticity lepidla při podchlazení. Při zvýšené teplotě došlo k výraznému snížení maximální síly i energie, při této teplotě došlo na rozdíl od předchozích dvou případů ke koheznímu porušení lepidla.

Při vyšší rychlosti deformace bylo nejvyšší pevnosti dosaženo při pokojové teplotě, což je v článku vysvětleno snížením tažnosti lepidla při teplotě  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vedoucímu ke snížené adhezi k biopolymerovému substrátu. Při srovnání s kvazi-statickým zatěžováním došlo ke zvýšení pevnosti při všech teplot. K nejvýraznějšímu relativnímu zvýšení pevnosti došlo při zvýšené teplotě, což je v článku vysvětleno zvýšením tažnosti lepidla i substrátu. [20]



Obrázek 29 - Vliv teploty na chování spoje, vlevo při kvazi-statickém zatížení a vpravo při dynamickém zatěžování [20]

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této diplomové práce je vytvoření metodiky pro dynamické testování lepených spojů za nízkých teplot. Tato metodika by se měla co nejvíce přibližovat současně používaným normám pro testování statické pevnosti ve smyku a doposud používaným způsobům dynamického testování těchto spojů.

### 2.1 Zařízení

#### 2.1.1 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení používané pro tyto účely na Univerzitě Pardubice je rychlý hydraulický válec AH 40-300 vybavený snímačem síly Kistler 9351B. Silový průběh je zaznamenáván se vzorkovací frekvencí 1 MHz. Tento snímač je doplněn Keyence LK-H055, pro možnost převedení záznamu Síla-Čas na záznam Síla-Dráha, který je pro tyto zkoušky vhodnější. Upnutí vzorku do zařízení je provedeno pomocí upínacích kleštín dotažených předepsaným momentem pro eliminaci vlivu upnutí na průběh deformace. Horní upínací kleština je pevně uchycena k rámu přístroje a spodní kleština je přes volnoběžku uchycena k pístnici rychlého hydraulického válce. Zkušební zařízení je možné vidět na obrázku 30.

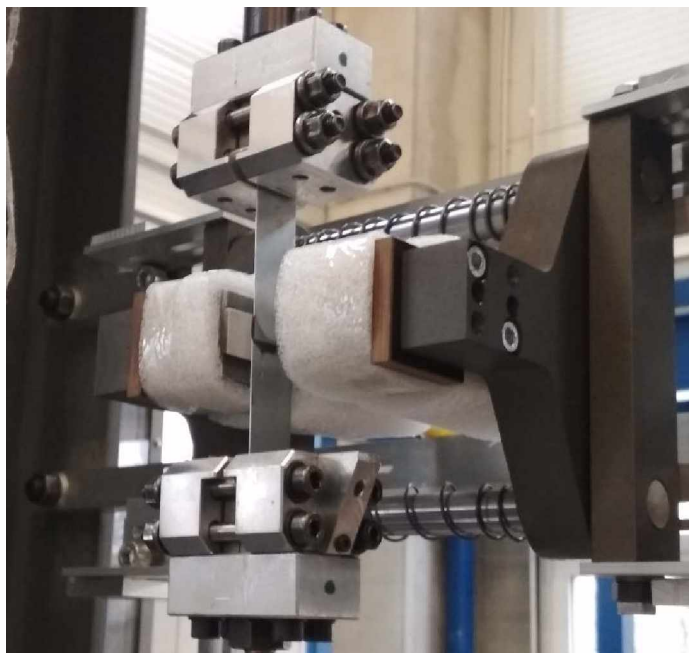


Obrázek 30 - Zkušební zařízení

#### 2.1.2 Chladicí zařízení

Chladicí zařízení na obrázku 31 má tvar svíracích kleštín, kdy pohybem páky na zadní části těchto kleštín dojde k stisknutí vzorku kleštinami, a díky přímému kontaktu kleštín se vzorkem dochází k odvodu tepla ze vzorku do kleštín. Chlazení kleštín je zajištěno dvěma nádobami na chladicí kapalinu. Jako chladicí kapalina je použit líh, do kterého je přisypáván suchý led ve formě peletek nebo odštěpků z ledového bloku. Alternativně by bylo možné použít tekutý dusík, avšak vzhledem k bezpečnosti při manipulaci byl zvolen suchý led. Nečinné plochy chladicích kleštín jsou od okolního prostředí odizolovány pomocí izolační hmoty.





Obrázek 31 -Chladící kleštiny

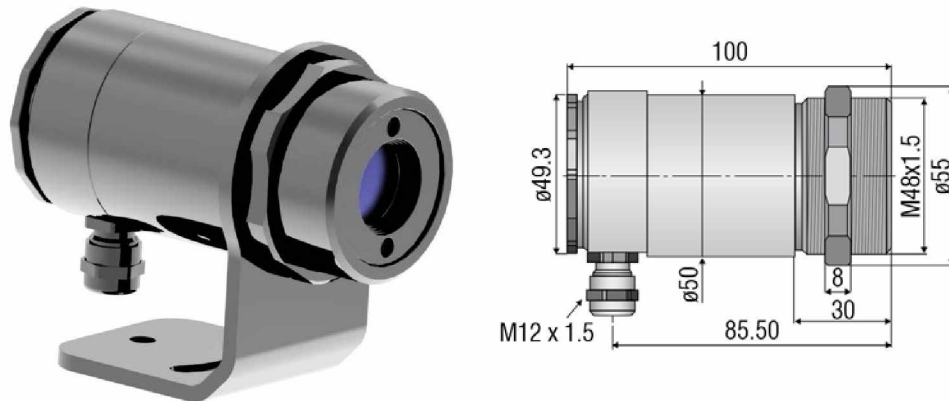
Aby nedocházelo k ovlivnění vzorku sevřením chladících kleštin a aby nemohlo dojít k poškození kleštin, je nutné před provedením samotného měření kleštiny oddálit od vzorku. Z toho důvodu jsou kleštiny podchlazeny na nižší teplotu, než je požadovaná teplota pro provedení zkoušky, a po oddálení kleštin a dosažení požadované teploty, je provedeno přetržení vzorku.

Výhodou těchto kleštin oproti řešení s chladící komorou je nižší pořizovací cena, nižší energetická náročnost, možnost použití stávajícího dynamického válce a neovlivnění komponent dynamického válce působením chladu.

### **2.1.3 Měření teploty**

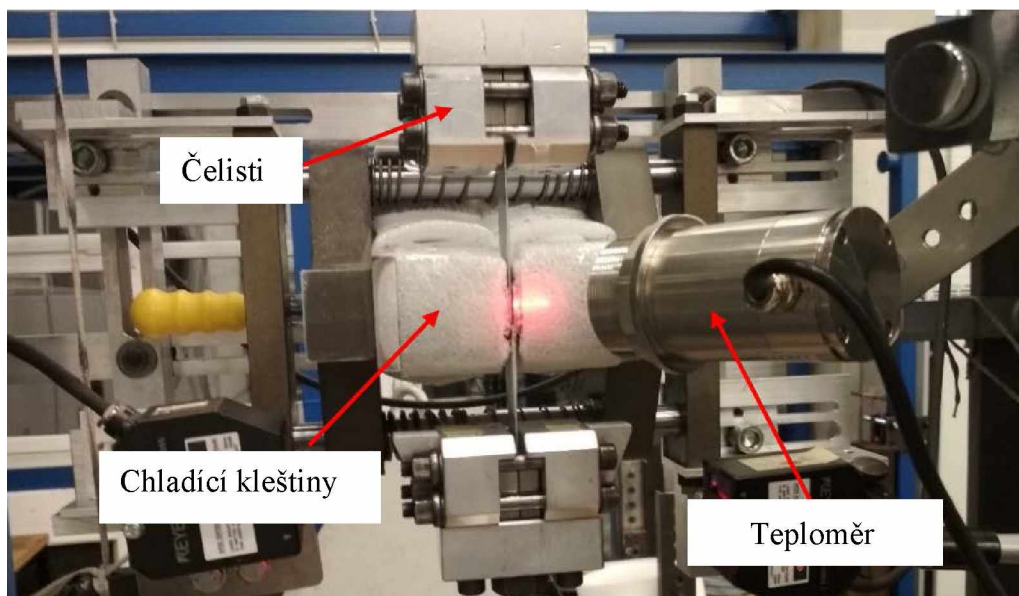
Pro měření teploty bylo jako nejvhodnější způsob vybráno bezdotykové měření. Při dotykovém měření totiž nebylo možné měřící sondu umístit přesně do místa lepeného spoje a její umístění mimo lepený spoj vykazovalo nepřesné výsledky. Dodatečné přiložení teplotní sondy po rozevření kleštin je taktéž nevhodné řešení, a to z několika důvodů. Jednak je rychlost, se kterou narůstá teplota, poměrně vysoká, takže by nebylo možné sondu připevnit dostatečně rychle a dále by hrozilo tepelné ovlivnění spoje při nalepování sondy.

Proto byl pro měření použit teploměr CTLaser od firmy Micro-Epsilon Czech Republic. Tento teploměr využívá k měření infračervený snímač s laserovým zaměřováním pro nastavení správné vzdálenosti od měřeného vzorku. Vzdálenost konce měřícího zařízení od vzorku je dána měřícím kuželem ve snímači, a tudíž je pevně určena konstrukcí zařízení. Pro použitou čočku CF1 je vzdálenost od vzorku 70 mm při průměru měřené plochy 0,9 mm. Tento infračervený teploměr umožňuje měření teplot v rozsahu od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $975\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 1\%$  nebo  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a odezvou 120 ms. Teploměr je možné vidět na obrázku 32.



Obrázek 32 - Měřící zařízení Micro-Epsilon CTLaser [21]

Kvůli tvaru chladících kleštín nebylo možné měřit teplotu kolmo na povrch vzorku, a proto muselo být měření provedeno pod úhlem přibližně  $30^{\circ}$ , což sebou přineslo problém. Z důvodu vysoké odrazivosti zinkového povrchu docházelo při měření k velkému zkreslení. Po provedení laboratorního testu s nádobou naplněnou lihem a suchým ledem, byla zjištěna nutnost použít při měření teplovodivou samolepící folii dodanou výrobcem měřícího zařízení. Emisivita této folie je dle výrobce 0,95 a tato hodnota byla nastavena na optickém teploměru pro dosažení maximální přesnosti měření. Na obrázku 33 je možné vidět umístění teploměru na zkušebním zařízení.



Obrázek 33 – Umístění teploměru na zkušebním zařízení

Na obrázku 34 je možné vidět umístění měřicí folie na vzorku při měření. Folie byla umístěna na vzorek v místě lepeného spoje, jelikož z důvodu geometrie chladících kleštín dochází k přímému ochlazování pouze lepeného spoje a jeho blízkého okolí. V těch částech vzorku, které se nachází ve větší vzdálenosti od chladícího zařízení, již dochází k ohřevu vzorku vlivem okolního prostředí, a proto by měření v tomto místě bylo nevhodné.



Obrázek 34 - Umístění měřicí folie na vzorku

## 2.2 Vývoj metodiky pro dynamické testování lepených spojů při -35 °C

Jako základ pro vývoj této metodiky byl použit dosavadní výzkum dynamického testování lepených spojů prováděný ŠKODA AUTO a.s. (viz diplomová práce Ing. Petr Matějka, 2017). Prvotním záměrem bylo použít identické rozměry vzorku používaných při dynamickém testování lepených spojů za pokojové teploty, viz obrázek 27 a kapitola 1.4.2.1.

Pro toto testování bylo vyrobeno 20 ks vzorků této velikosti pro prvotní testy. Tato velikost se však ukázala nevhodná vzhledem ke konstrukci chladících kleštin používaných pro snížení teploty vzorku na požadovanou teplotu. Takto krátké vzorky by nemohly být v kleštinách upnuty po celé délce, tudíž by mohlo dojít k jejich vysmeknutí, a navíc by docházelo k nadměrnému zatěžování upínacích kleštin.

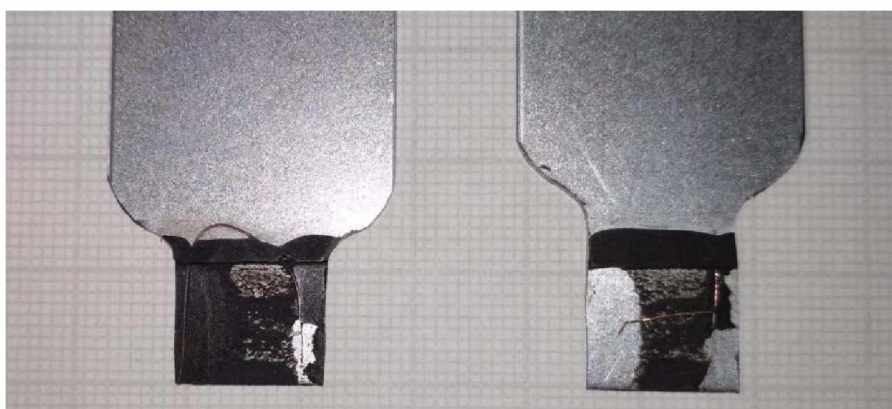
Proto byly vzorky prodlouženy na rozměr dle obrázku 35, přičemž ostatní parametry byly zachovány a byla vyrobena další série vzorků, bylo použito lepidlo A a povrch HDG (žárově zinkovaný povrch) bez dodatečné úpravy. Podrobný popis výroby vzorku bude popsán v pozdějších kapitolách.

Dne 12. 12. 2019 proběhly ve VVCD Univerzity Pardubice první zkoušky dynamické pevnosti při teplotě  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rychlostí deformace  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při první zkoušce došlo ke dvojitému zaškrncení a k přetržení substrátu v blízkosti uchycení k měřicímu zařízení, viz obrázek 35.



Obrázek 35 - Vzorek 1 po přetržení substrátu

S ohledem na výsledek prvního pokusu byl pro druhý pokus původní vzorek upraven vybroušením jedné čtvrtiny šířky vzorku z každé strany, viz obrázek 36. Při této zkoušce již došlo k požadovanému porušení vzorku v místě lepeného spoje. Charakter poškození dle ISO 10365 se nachází v Tabulce 1.



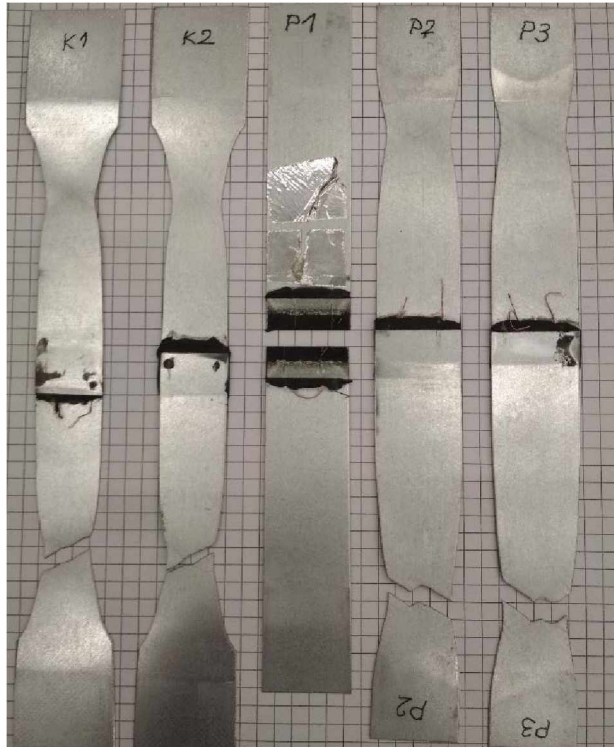
Obrázek 36 - Vzorek 2 po přetržení

Tabulka 1 - Vyhodnocení vzorku 2

Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: sériové					
Množství maziva: $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG	-35	40	0	60	-

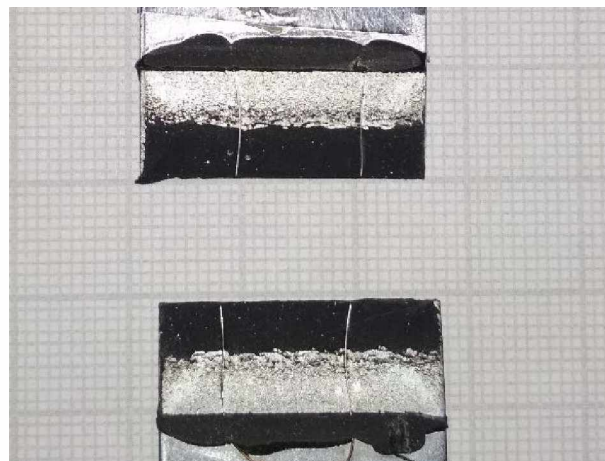
Tvar Vzorku 2 byl však shledán jako nevhodný zejména z důvodu nedodržení stejného rozměru lepené plochy dle normy PV 12.35 a předpokládaného ovlivnění výsledků zkoušky vybrušováním lepeného spoje, jak důsledkem zvýšené teploty, tak důsledkem mechanického namáhání spoje při broušení.

V další sérii byly použity znovu tři vzorky shodné se Vzorkem 1, za stejných podmínek, pro ověření, zda dochází k přetržení substrátu u všech vzorků, nebo se jedná pouze o nahodilý stav. Další dva vzorky měly tvar tzv. kosti, který je používán pro testování pevnosti svarů. Tento tvar slouží k eliminaci vlivu upnutí. Vzorky po přetržení je možné vidět na obrázku 37.



Obrázek 37 - Vzorky K1, K2, P1, P2 a P3 po přetržení

U vzorku P1 došlo k porušení v lepeném spoji s charakterem poškození odpovídajícím předpokladům z přechozích statických zkoušek, jak je možné vidět na obrázku 38. Charakter poškození je popsán v Tabulce 2. Pevnost nebyla při této zkoušce hodnocena, zkouška sloužila pouze k ověření tvaru.

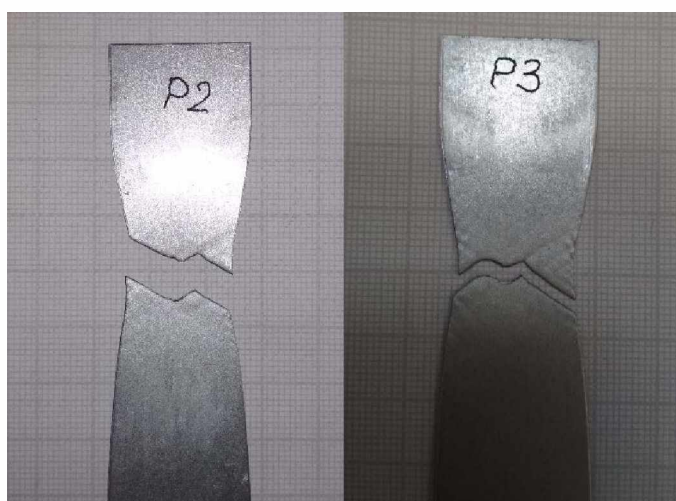


Obrázek 38 - Vzorek P1 po přetržení

Tabulka 2 - Vyhodnocení vzorku P1

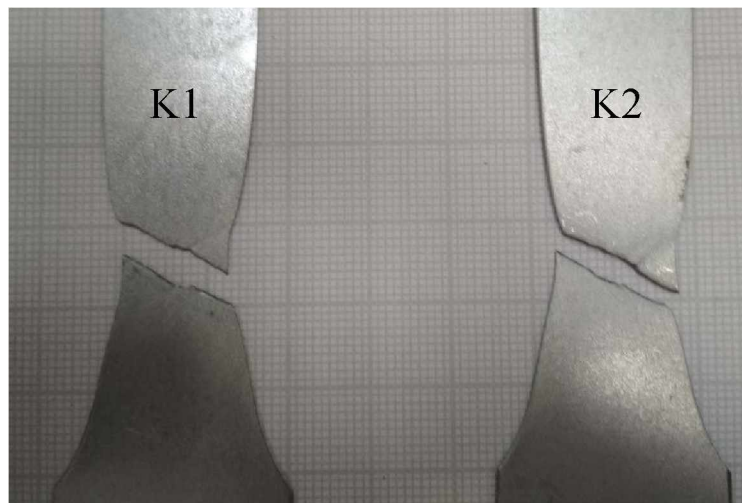
Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: sériové					
Množství maziva: $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG	-35	40	60	0	-

U vzorků P2 a P3 došlo k přetržení substrátu identicky jako u pokusu na obrázku 35, kdy došlo k zaškrcení obou spojovaných plechů a následné destrukci. Tímto byl potvrzen předešlý předpoklad, že současný tvar vzorku je nevhodný a bude nutná jeho úprava. Tvar přetržení vzorků P2 a P3 je možné vidět na obrázku 39.



Obrázek 39 - Vzorky P2 a P3 po přetržení

Pro vyloučení vlivu upínání na destrukci vzorku byly vytvořeny vzorky ve tvaru tzv. kostí. Tento tvar vzorku se používá pro posouzení pevnosti svarových spojů a po vhodné úpravě bylo možné ho použít pro posouzení pevnosti lepeného spoje. Pro zachování stejné plochy přelátování jako u předešlých vzorků, bylo přelátování spoje zvětšeno na 12.5 mm, jelikož šířka polotovaru v místě lepeného spoje pro tuto zkoušku je 20 mm a tento rozměr nelze upravit, jelikož je daný tvarem raznice. Výsledkem zkoušky bylo u obou vyrobených vzorků znovu zaškrčení a následné přetržení substrátu. Toto vedlo k závěru, že upínací kleštiny nemají na destrukci materiálu vliv a bude nutné zpevnit substrát vzorku. Na obrázku 40 je možné vidět vzorky K1 a K2 po provedení zkoušky.

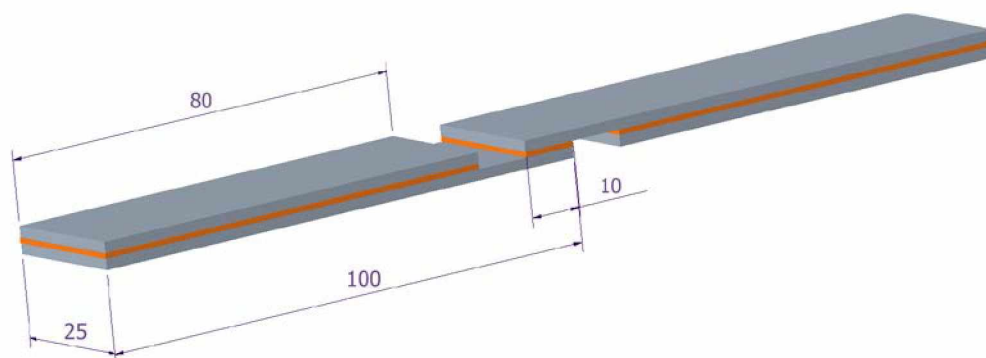


Obrázek 40 - Vzorky K1 a K2 po přetržení substrátu

Po zhodnocení předchozích výsledků bylo možné vyřešit problém několika způsoby. Buď použít silnější plech, zmenšit plochu slepu nebo použít zesílení v místě mimo lepený spoj. Po konzultaci ve ŠKODA AUTO a.s. bylo rozhodnuto, že bude použita poslední zmíněná varianta.

Důvod pro toto rozhodnutí je, že použití silnějšího plechu by neodpovídalo reálnému spoji, který se bude na vozidle nacházet, a nejednalo by se tak o testování lepeného spoje jako celku, ale o testování pouze lepidla, na což je možné použít jiné vhodné metody. Změna lepené plochy se taktéž nejevila jako vhodné řešení, jelikož plocha 25x10 mm je používána v dosavadních normách pro statické zatěžování a vychází z předešlých výzkumů. To je důvod, proč byla jako nejvhodnější cesta zvolena možnost zesílení substrátu v místech mimo lepený spoj.

Na obrázku 41 je možné vidět první návrh zpevnění, které sestává ze dvou plechů o velikosti 100x25 mm s přeplátováním 10 mm, stejně jako u prvního vzorku. Zpevnění je docíleno pomocí dodatečných dvou plechů o velikosti 80x25 mm přilepených ke vzorku, tak aby konec toho vyztužení byl zarovnaný s koncem vzorku, který bude posléze upnut do upínacích kleštin.



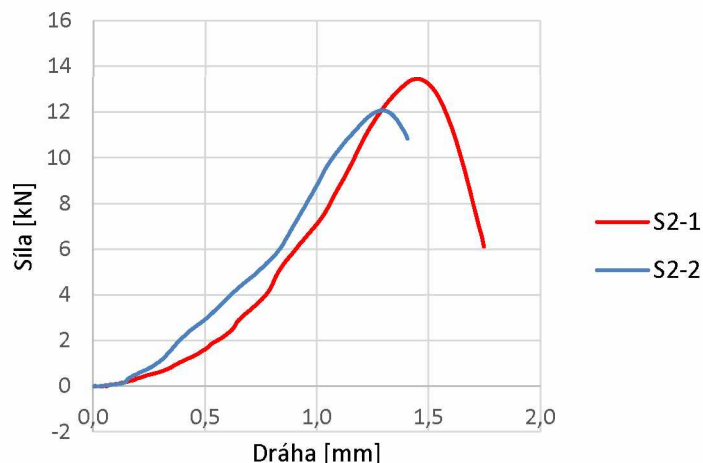
Obrázek 41 - Návrh tvaru vzorku

Další testy proběhly na pěti vzorcích, dle návrhu na obrázku 41. U tohoto tvaru vzorku se již neopakovaly problémy z předchozích zkoušek a k přetržení v lepidle došlo u 100 % vzorků s poměrně konzistentními výsledky z měření maximální síly ve spoji a zároveň z charakteru lomové plochy. Na vzorcích byl použit sériový olej v množství dodávaném výrobcem plechu ( $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$ ). Výsledky zkoušky je možné vidět na obrázku 42, v tabulce 3 a 4, a v grafu 1.



Obrázek 42 - Vzorky S2-1 až S2-5 po přetržení





Graf 1 - Záznam dynamické zkoušky vzorků S2-1 a S2-2

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{S}$$

Kde  $F_{max}$  [kN] je maximální dosažená síla,  $\tau_{max}$  [MPa] je maximální dosažené smykové napětí ve spoji a plocha je  $S$  [mm<sup>2</sup>].

Tabulka 3 - Maximální síly a napětí ve spoji

	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5
$F_{max}$ [kN]	13,45	12,1	11,1	11,3	11,9
$\tau_{max}$ [MPa]	53,8	48,4	44,4	45,2	47,7

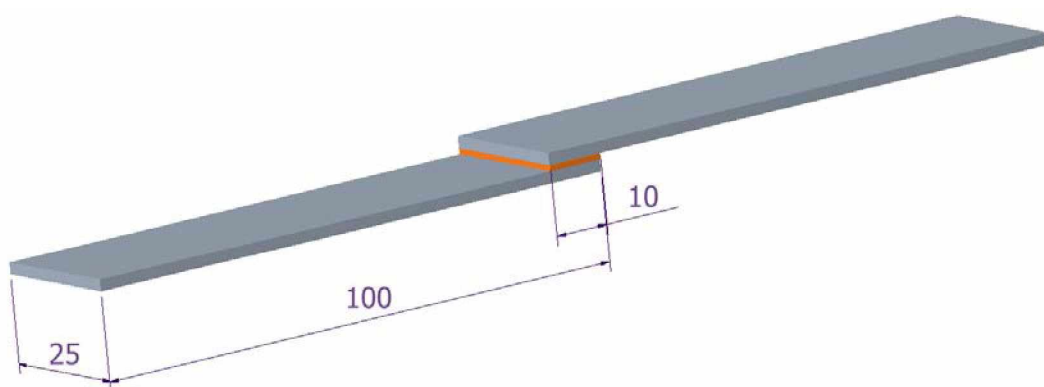
Tabulka 4- Vyhodnocení vzorků S2-1 až S2-5

Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: sériové					
Množství maziva: 3±0,5 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG	-35	20	80	0	47,9±3,7

Lomová plocha u všech vzorků vykazovala převážně speciální kohezní lom, jak je možné vidět na obrázku 42. Výsledky této zkoušky byly velice uspokojivé, a proto bylo rozhodnuto, že tento tvar vzorku bude použit pro dynamické testování lepených spojí. U všech vzorků je možné pozorovat speciální kohezní porušení a průměrná pevnost dosahovala přibližně 48 MPa. Záznam dynamické zkoušky vzorků S2-1 a S2-2 je možné vidět na Grafu 1.

## 2.3 Úprava tvaru vzorku pro dynamické testování lepených spojů za pokojové teploty

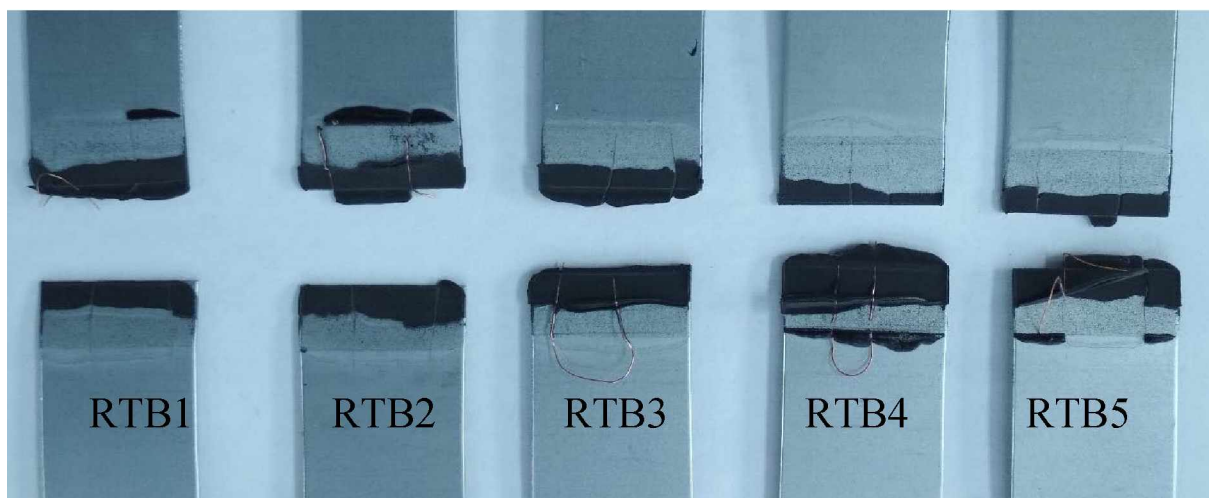
S ohledem na použitý tvar vzorku pro testování za nízkých teplot bylo nutné upravit i tvar vzorku pro testování za pokojových teplot, aby byly výsledky z obou typů zkoušek porovnatelné. Avšak s ohledem na zjednodušení výroby vzorků zde vznikl požadavek na použití vzorků se stejnou délkou jako u vzorků pro testování za nízkých teplot, avšak bez zpevnění. Proto byly vyrobeny dvě série vzorků jedna se zpevněním a druhá bez zpevnění. U obou sérií bylo použito stejné lepidlo, a to lepidlo A, stejné množství a druh oleje a stejný typ povrchu s povrchovou úpravou PS. Mazivo a příprava vzorku odpovídala normě PV 12.30. Na obrázku 43 je možné vidět návrh tvaru vzorků bez zpevnění.



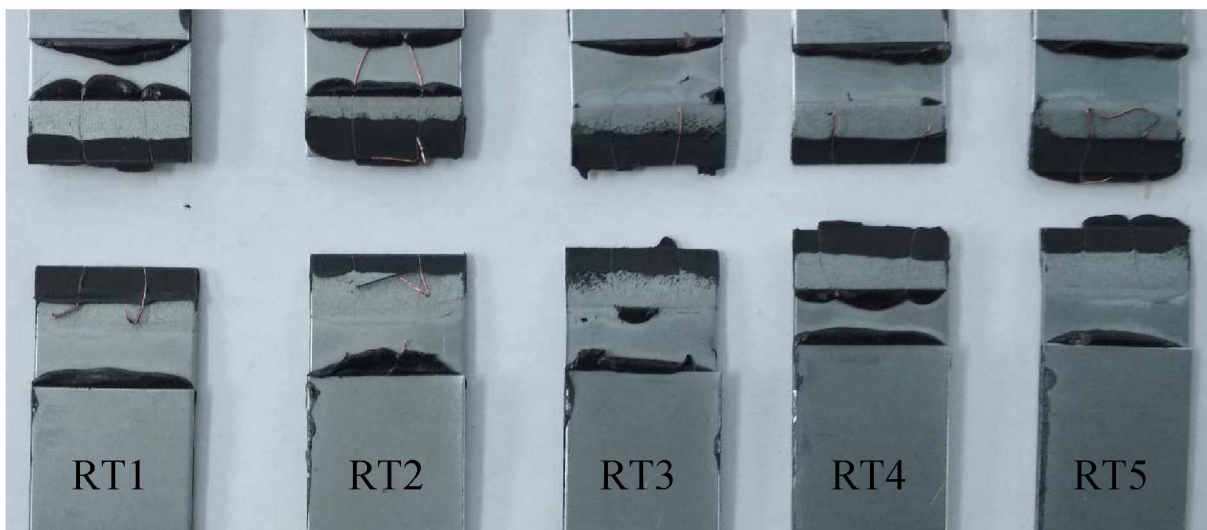
Obrázek 43 - Tvar vzorku pro testování dynamické testování bez zpevnění

### 2.3.1 Výsledky porovnávací zkoušky pro vzorky se zpevněním a bez zpevnění

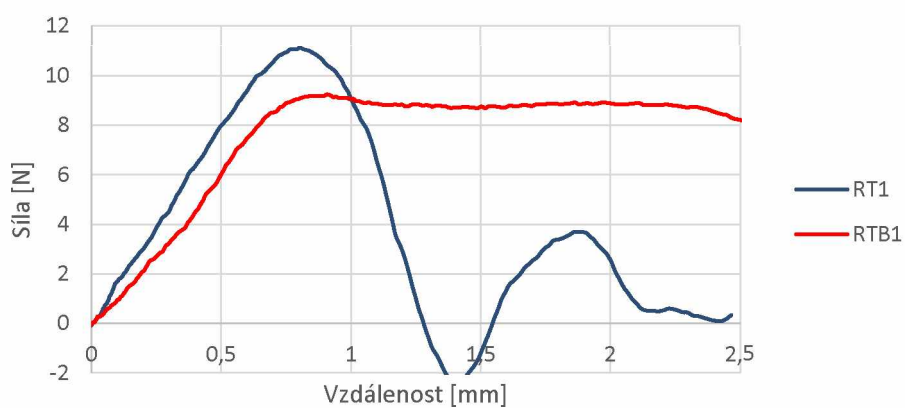
Na obrázku 44 je možné vidět vzorky bez zpevnění po destrukci. V tabulce 5 a 6 je možné vidět výsledky vzorků bez zpevnění. Na obrázku 45 je možné vidět vzorky se zpevněním po destrukci a v tabulce 7 a 8 jsou výsledky vzorků se zpevněním. Graf 2 popisuje rozdíl průběhu deformace u vzorků bez zpevnění a se zpevněním.



Obrázek 44 - Vzorky bez zpevnění



Obrázek 45- Vzorky se zpevněním



Graf 2 - Záznam dynamické zkoušky vzorku se zpevněním a bez zpevnění

Tabulka 5 - Maximální síly a napětí ve spoji vzorků bez zpevnění

	RTB1	RTB2	RTB3	RTB4	RTB5
$F_{\max}$ [kN]	9,3	9,3	9,2	9,1	9,3
$\tau_{\max}$ [MPa]	37,3	37,1	37,0	36,6	37,0

Tabulka 6 - Vyhodnocení vzorků bez zpevnění

Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PS	RT	0	100	0	37,0±0,3

Tabulka 7 - Maximální síly a napětí ve spoji vzorků se zpevněním

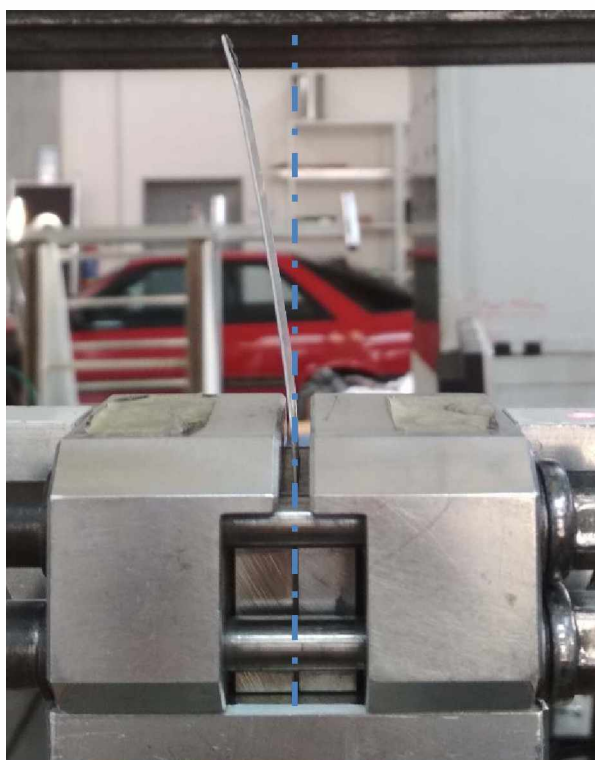
	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5
$F_{\max}$ [kN]	11,1	10,2	11,2	10,9	10,3
$\tau_{\max}$ [MPa]	44,5	40,8	44,7	43,7	41,2

Tabulka 8- Vyhodnocení vzorků se zpevněním

Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PS	RT	0	100	0	43±1,8

Jak je možné vidět z předešlých výsledků, vzorky se zpevněním a bez zpevnění se poměrně podstatně liší (v průměru o více než 15 %), a proto bylo rozhodnuto, že je nutné používat vzorky se zpevněním i pro testování za pokojové teploty.

U obou sad vzorků došlo k speciálnímu koheznímu porušení v celé lepené ploše, jak je možné vidět na obrázku 44 a 45. U vzorků bez zpevnění však došlo k výraznému ohybu a zaškrčení už od místa upnutí, což mělo zřejmě za následek zvýšení podílu namáhání na odlup, a proto je výsledná síla pro přetržení u těchto vzorků nižší. Ohyb vzorků lze pozorovat na obrázku 46. Na Grafu 2 je možné vidět, že u vzorku se zpevněním došlo po dosažení maximální síly k výraznému poklesu síly, zatímco u vzorků bez zpevnění došlo po dosažení maximální síly k velmi pozvolnému poklesu, což potvrzuje domněnku, že u tohoto tvaru vzorku dochází jednak k nadměrnému zatěžování na odlup, ale zároveň na tento pozvolný pokles síly má zřejmě velký vliv i plastická deformace substrátu.



Obrázek 46 – Ohyb vzorku v upínacích kleštinách

## **2.4 Metodika pro dynamické testování lepených spojů**

V této kapitole je zařazena metodika pro dynamické testování lepených spojů na substrátech z tenkých plechů. Tato metodika byla vytvořena na základě požadavků ŠKODA AUTO a.s. Metodika byla vypracována na základě provedených experimentů.

Formální struktura metodiky vychází z vnitřních standardů koncernu VW a navazuje na doposud užívané normy pro testování statické únosnosti lepených spojů.

### **2.4.1 Zaměření**

Tento standard popisuje metodiku dynamického testování smykové pevnosti pevnostních lepidel použitých na karoserii automobilu. Tento standard vychází z normy PV 12.35 pro testování smykové pevnosti lepených spojů za podmínek kvazistatické deformace. Standard popisuje jak zkoušku za pokojové teploty, tak zkoušku za teploty  $-35^{\circ}\text{C}$ .

### **2.4.2 Popis**

Dynamická zkouška pevnosti ve smyku

### **2.4.3 Metodika testování**

#### **2.4.3.1 Testovací zařízení a zařízení potřebné k přípravě vzorků**

Zkušební zařízení schopné vyvinout rychlost deformace 15 m/s, vybavené čelistmi pro uchycení vzorku. Mezi čelistí a vzorkem je silový styk a čelisti musí být dostatečně dimenzovány, aby nedocházelo k usmyknutí vzorku. Zařízení musí být vybaveno záznamovým zařízením schopným vytvořit záznam závislosti síly na posuvu.

Měděný drát o průměru 0,2 m, jako vymežovací podložka

Nástroj pro odstranění otřepů

Kartáč nebo utěrka nevylučující volná vlákna

Špachtle

Svorky

Vhodné odmašťovadlo

Vhodné rozpouštědlo

Pec s nuceným oběhem vzduchu

Olej Anticorit PL 3802-39S

Aplikační pistole na lepidlo

Pro testování za nízkých teplot:

Teploměr pro bezkontaktní měření

Folie z teplo vodivého materiálu se specifikovanou reflexivitou

Vhodné chladicí zařízení nebo chladicí komora

## 2.4.3.2 Postup

### 2.4.3.2.1 Použité ocelové plechy

Ocelové plechy musí přesně odpovídat budoucímu použití v sériové výrobě, včetně jejich povrchu (pozinkování, povlaky pro snížení tření apod.)

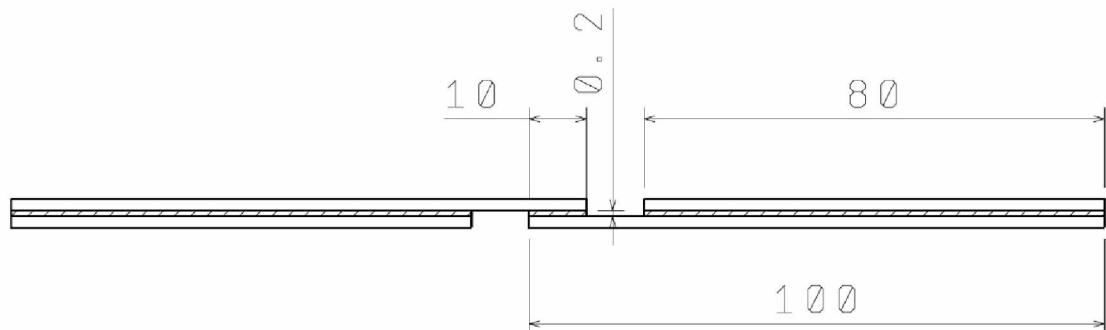
Substráty musí být odmaštěny a naolejovány množstvím  $3 \pm 0,5$  g/m<sup>2</sup> oleje Anticorit PL 3802-39S dle PV 12.30.

### 2.4.3.2.2 Příprava vzorků

Pro každou zkoušku je nutné připravit minimálně 5 vzorků.

Vzorky pro každý test musí být ze stejného materiálu, se stejnou povrchovou úpravou a stejnou kvalitou povrchu.

Délka substrátu pro tuto zkoušku je 100 mm a šířka 25 mm. Tloušťka by měla být minimálně 0,65 mm. Substráty pro zpevnění mají délku 80 mm a šířku 25 mm (viz obrázek 47).



Obrázek 47 - Tvar vzorku

Pokud budou vzorky lakovány, musí na nich být umístěna díra o průměru 4 mm.

Před lepením je nutné odstranit otřepy.

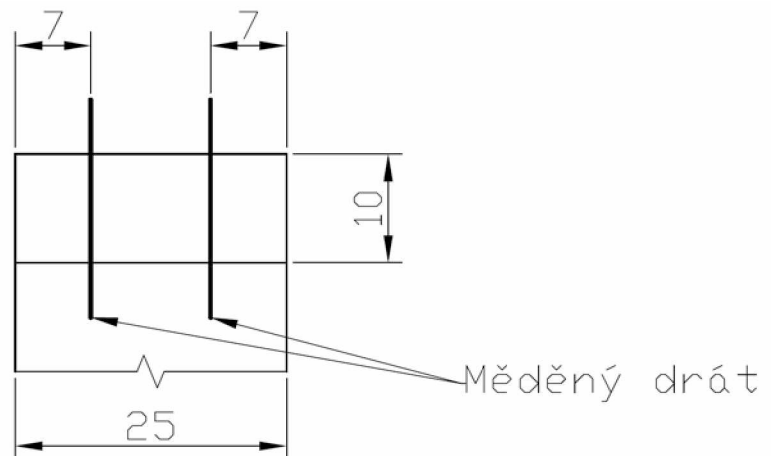
Každý vzorek musí být označen vhodným způsobem.

Parametry mající vliv na zkoušku, jako substrát, lepidlo, povrchová úprava apod. musí být zaznamenány.

Odmaštěné a naolejované substráty se umístí na čistou podložku. Pomocí špachtle se nanese vhodné množství lepidla na lepený povrch.

Pro pevnostní lepidla je předepsána velikost mezery 0,2 mm a rozměr lepené plochy je 25 x 10 mm.

Pro získání rovnoměrné mezery je mezi substráty vložena podložka ve formě měděného drátu o průměru 0,2 mm, a to i u lepidel obsahujících skleněné kuličky pro zajištění mezery. Umístění vymežovacích drátů dle obrázku 48.



Obrázek 48 - Detail lepeného spoje

Poté se přiloží druhý substrát. Lepený spoj je zajištěn pomocí svorek.

Po zajištění lepeného spoje se nanese lepidlo na substráty pro zpevnění. Substráty pro zpevnění se poté přiloží k lepenému spoji dle obrázku 47 a zajistí se pomocí svorek.

Přebytečné lepidlo po stranách se odstraní pomocí špachtle.

#### 2.4.3.2.3 Vytvrzení lepidla

Vytvrzení v laboratoři:

Vytvrzení 180°C/20min. Variabilně možné zkoušky při vytvrzení 155°C/15min a 200°C/40min.

Vytvrzení standardním procesem:

Vzorky jsou navěšeny na drát nebo upevněny na speciální přípravek pro kataforetické lakování. Je nutné zajistit, aby se vzorky nemohly vzájemně dotýkat. Vzorky pak podstoupí předúpravy a proces lakování na skidu, popř. uvnitř karoserie. Je nutné zajistit dokonalé vodivé spojení mezi vzorky a nosičem. Náhodným změřením je třeba zkontrolovat tloušťku kataforetického lakování (tloušťka by měla být 20 μm, viz TL 218: 2002-08, Tabulka 3). Neobvyklé teploty při procesu vytvrzování je nutné zaznamenat do testovací zprávy.

#### 2.4.3.2.4 Stárnutí

Stárnutí vzorků je možné provádět dle PV 12.36.

#### 2.4.3.2.5 Test dynamické únosnosti ve smyku

Volná délka mezi upnutím je 135 mm. Vzorek je nutné upnout tak, aby jeho osa byla paralelní se směrem posouvání měřícího zařízení. Rychlost deformace by měla být 15 m/s, pokud je rychlost jiná, je nutné tuto skutečnost zaznamenat do zprávy z měření. Plocha slepu je dopočítána ze skutečné šířky a délky přeplátování. Pokud nemůže být délka přeplátování přesně změřena, z důvodu přetoků, změří se plocha přeplátování po provedení zkoušky.

Pro testy za teploty  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  navíc platí:

Pro měření teploty se použije bezkontaktní teploměr, namířený přímo na lepený spoj. Je nutné použít teplovodivou měřicí folii a na její emisivitu nastavit teploměr. Po započetí chlazení vzorku je nutné vzorek nechat 5 minut temperovat. V případě použití chladicí komory při požadované teplotě, v případě použití chladícího zařízení, které je před zkouškou odepnuto od vzorku, na teplotě nižší. Je však nutné zajistit, aby teplota spoje v momentě přetržení dosahovala požadované hodnoty. Spoj by neměl být podchlazen o více než  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 2.4.4 Testovací zpráva

V testovací zprávě by měla být uvedena maximální únosnost ve smyku  $\tau_{\max}$  a maximální dráha v momentě přetržení  $s_{\tau\max}$ , popřípadě další hodnoty a diagramy, individuálně dohodnuté se zadavatelem zkoušky. U všech průměrných hodnot by měla být uvedena směrodatná odchylka.

Typ porušení lepeného spoje musí být posouzen dle normy ISO 10365. V případě, že spoj vykazuje několik typů porušení, jsou jednotlivé typy porušení zapsány v inkrementech po 5 %.

Materiál, povrchová úprava, množství a typ použitého oleje a jakékoliv odchylky od standardu musí být taktéž uvedeny.

#### 2.4.5 Odkazované dokumenty

Následující dokumenty jsou nezbytné pro tento standard.

PV 12.30	Adhesives; Compatibility with Oils and Dry-Film Lubricants (Hot Melt)
PV 12.35	Testing of Tensile Shear Strength
PV 12.36	Adhesives; Test Conditions for Aging of Specimens
ISO 10365	Adhesives - Designation of main failure Patterns



## 2.5 Dynamické zkoušky

V této kapitole jsou popsány výsledky ze zkoušek dynamické pevnosti ve smyku. Zkoušky byly provedeny dle metodiky z kapitoly 2.4.

### 2.5.1 Použité materiály

#### 2.5.1.1 Substrát

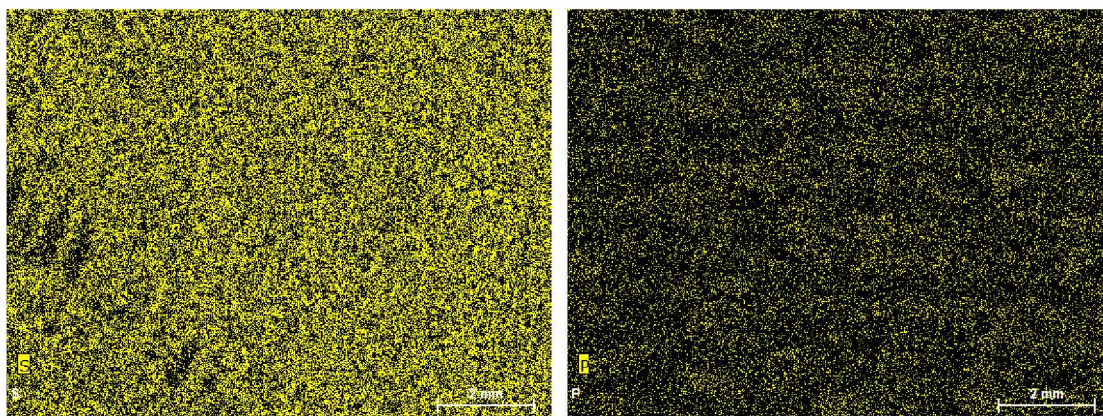
Pro tuto zkoušku byl použit materiál substrátu HX180BD. Tento ocelový plech vyvinutý pro automobilový průmysl má schopnost zpevnění při tepelném zatížení (přibližně 170 °C po 20 minut). Této teploty a času se dosahuje v peci při procesu vytvrzování kataforetického lakování, proto je tento typ substrátu velmi velice vhodným, jelikož má při lisování nižší mez kluzu, což umožní nižší lisovací síly a po vytvrzení má vyšší pevnost, což je výhodné z hlediska bezpečnosti vozidla. Tento typ materiálu je ve ŠKODA AUTO a.s. použit v sériové výrobě téměř na všech vnějších a některých vnitřních plechů karoserie. Vlastnosti materiálu je možné vidět v Tabulce 9.

Tabulka 9 - Vlastnosti ocele HX180BD od firmy VoestAlpine [22]

R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	BH <sub>2</sub> min [MPa]
180-240	290-360	34	30

#### 2.5.1.2 Povrch vzorku

Na vzorcích byl použit žárově pozinkovaný povrch s povrchovou úpravou ke snížení tření. Byly použity dva typy povrchových úprav PS a PP. Povrch PS funguje na bázi síry a povrch PP na bázi fosforu. Z důvodu zachování obchodního tajemství není možné zveřejnit typ a výrobce povrchu. Povrch použitý na vzorku je vždy uveden ve výsledné tabulce u konkrétního měření. Na Fakultě chemicko-technologické Univerzity Pardubice bylo provedeno měření koncentrace síry u povrchu PS a fosforu u povrchu PP. Na povrchu PS bylo naměřeno 17,6 mg/m<sup>2</sup>, což odpovídá toleranci 18±5 mg/m<sup>2</sup> a u povrchu PP bylo naměřeno 3,5 mg/m<sup>2</sup>, což odpovídá toleranci 6±3 mg/m<sup>2</sup>. Na obrázku 49 je možné vidět spektrometrický záznam povrchu.



Obrázek 49 - Spektrometrie povrchu PS (vlevo) a PP (vpravo)

### 2.5.1.3 Lepidlo

Byly použity dva druhy lepidel od dvou výrobců, a to Lepidlo A a Lepidlo B, výrobce a typ lepidel není možné z důvodu zachování obchodního tajemství zveřejnit. Obě lepidla jsou pevnostní epoxidová lepidla. Lepidlo A se používá v sériové výrobě na několika místech karoserie, např. v lemových spojích a na mnoha místech na rámu vozidla. Lepidlo B je lepidlo, o jehož zařazení do sériové výroby se v současné době uvažuje. Nejpodstatnější parametry pro obě lepidla jsou vyznačené v Tabulce 10.

Tabulka 10 - Základní vlastnosti použitých lepidel

Lepidlo	Lepidlo A	Lepidlo B
Pevnost v tahu	30MPa	33 MPa
Pevnost ve smyku	20 MPa	19,4 MPa
Pevnost v odlupu	9 N/mm	8,7 N/mm
Dynamická pevnost v odlupu	30 N/mm	26 N/mm
Youngův modul pružnosti	1700 MPa	2020 MPa
Barva	Černá	Oranžová

### 2.5.2 Postup přípravy vzorku

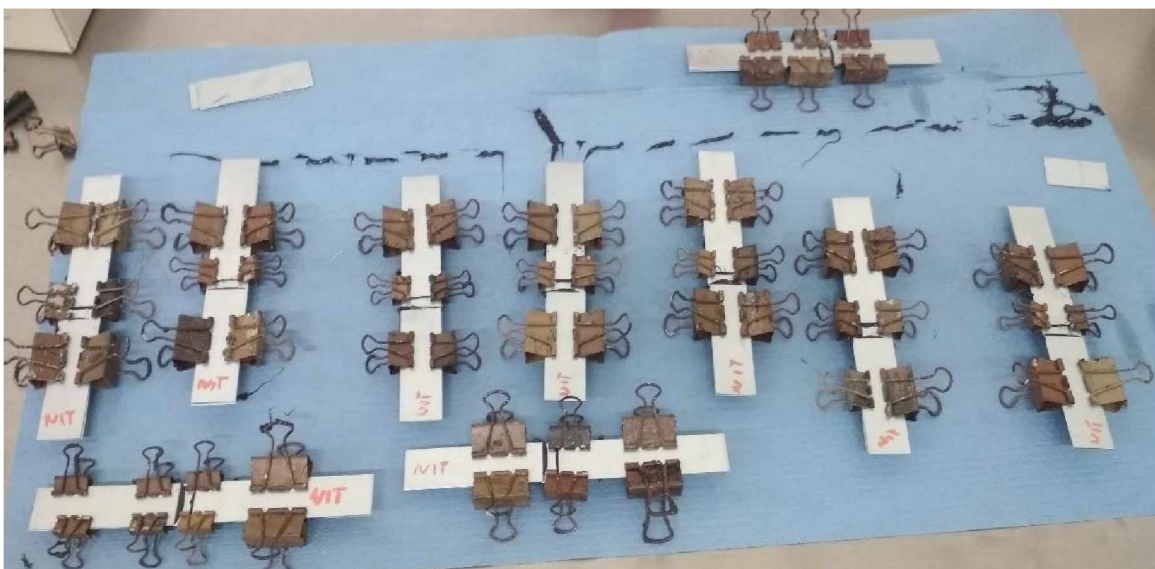
Nejprve byly vybrány nástřihy ocelových plechů s vybranou povrchovou úpravou a tloušťkou 0,65 mm. V případě povrchu PS byl použit nástřih ze sériové výroby, v případě povrchu PP byl použit nástřih ze zkušební série. Pomocí hydraulických tabulových nůžek byly plechy nástřihány na rozměry 100x25 mm a 80x25 mm. Poté byly plechy zbaveny otřepů. Pro odmaštění byl použit aceton napuštěný do ultrazvukové čističky Elmasonic S 60/H.

Po odmaštění byly plechy položeny na podložku a byl na ně nanesen olej Anticorit PL 3802-39S v množství  $3 \pm 0,5 \text{ g/m}^2$ . Množství oleje bylo zkontrolováno pomocí přístroje

Infralytic NG 2, viz obrázek 50. Pomocí pistole na lepidlo bylo na plechy naneseno dostatečné množství lepidla z kartuše. Nejprve bylo lepidlo naneseno na samotný lepený spoj (dle obrázku 47) a byly přiloženy měděné drátky o průměru 0,2 mm na vymezení mezery mezi plechy, viz obrázek 48. Poté byl přiložen druhý plech a lepený spoj byl zajištěn pomocí svorek, přebytečné lepidlo bylo odstraněno pomocí stěrky. Po zabezpečení samotného lepeného spoje bylo naneseno lepidlo na místa pro zpevnění, následně byly přiloženy plechy pro zpevnění a zpevnění bylo zajištěno pomocí svorek, viz obrázek 51. Příprava vzorků odpovídala normě PV 12.30.



Obrázek 50 - Měřicí přístroj Infralytic NG 2 (vlevo) a aplikační pistole Milwaukee (vpravo)



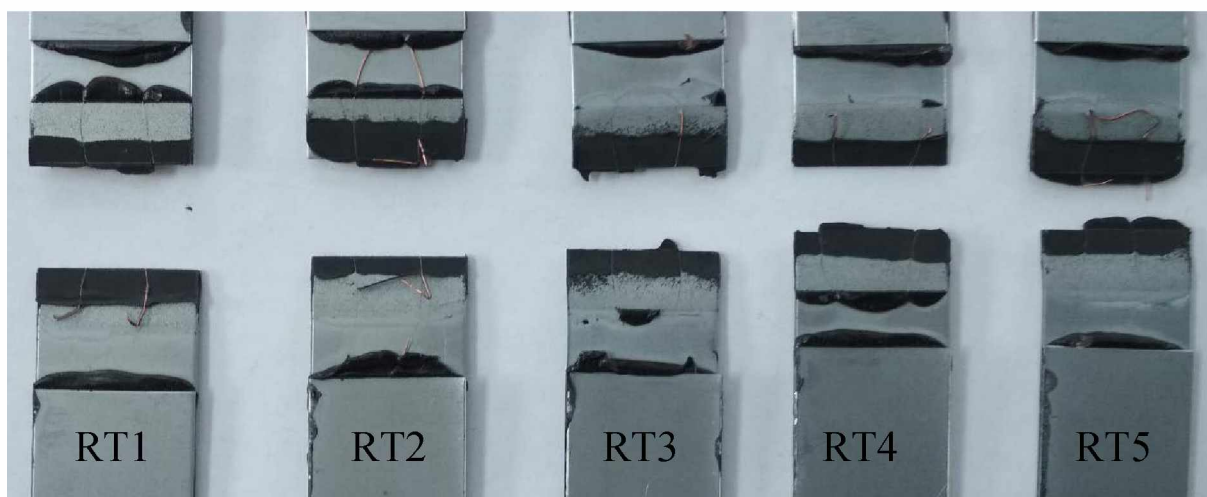
Obrázek 51 - Lepené spoje před vytvrzením

Po slepení následoval proces vytvrzení vzorků. Vzorky byly vytvrzeny laboratorním způsobem v peci s nuceným oběhem. Pec byla předehřata na 180 °C, a poté byly vzorky vloženy do pece. Doba vytvrzování byla 20 minut. Tato teplota a doba vytvrzování byla zvolena, jelikož takovéto podmínky odpovídají vytvrzování v sušičce laku po KTL při standardním procesu lakování.

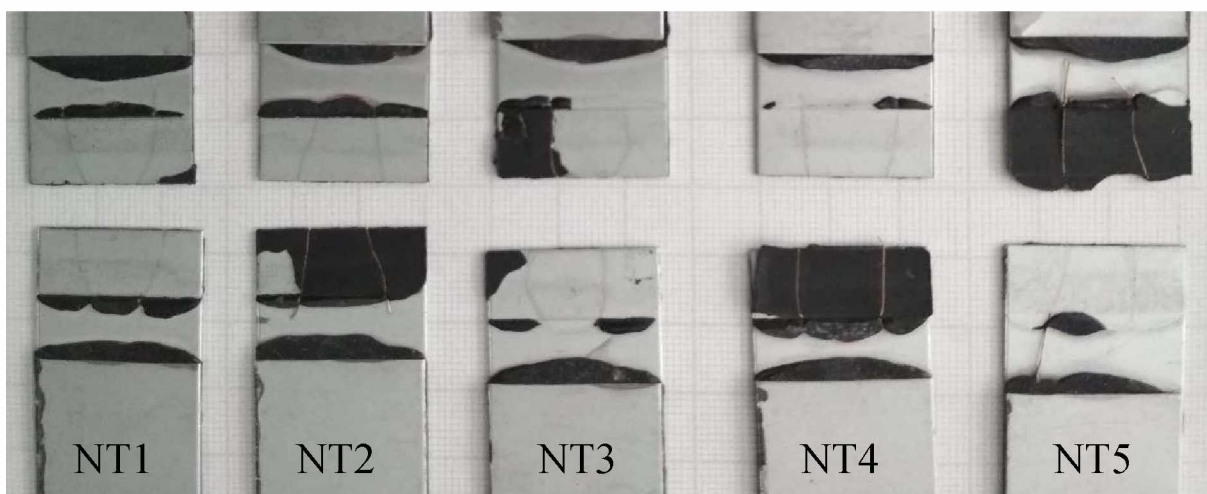
### 2.5.3 Výsledky zkoušek

#### 2.5.3.1 Povrch PS + Lepidlo A

Výsledky dynamických zkoušek za kombinace povrchu PS a lepidla A jsou dále uvedeny v tabulce 11 a 12, charakter porušení po zkoušce za pokojové teploty je dokumentován na obrázku 52, charakter porušení po zkoušce za snížené teploty je dokumentován na obrázku 53. Komplexní vyhodnocení výsledků viz kapitola 2.6.



Obrázek 52 - Povrch PS + Lepidlo A, pokojová teplota



Obrázek 53 - Povrch PS + Lepidlo A, teplota -35 °C

Tabulka 11 - Výsledky vzorků RT1 až RT5 a NT1 až NT5

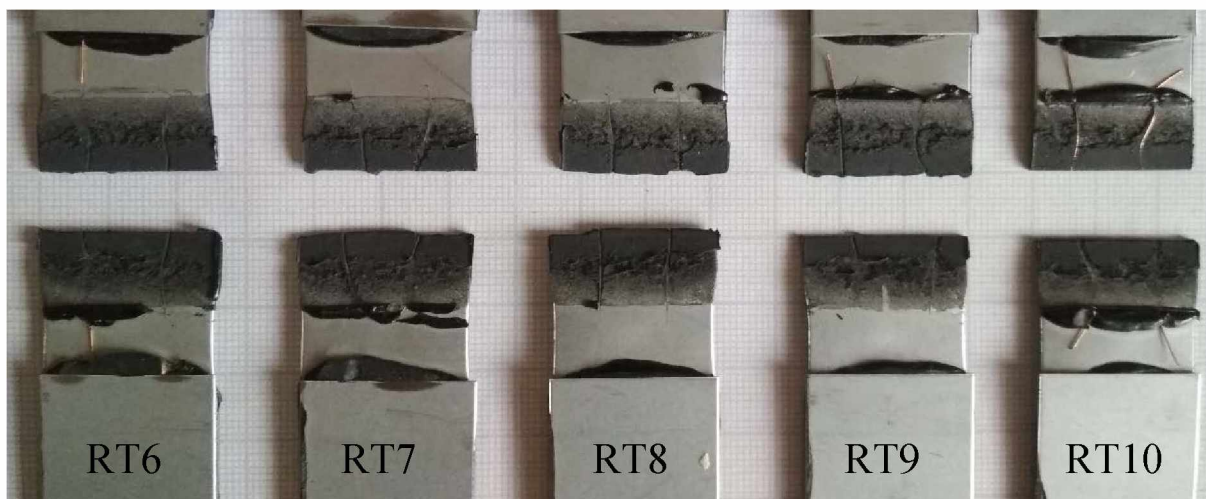
	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5
$F_{\max}$ [kN]	11,1	10,2	11,2	10,9	10,3	11,1	10,2	11,2	10,9	10,3
$\tau_{\max}$ [MPa]	44,5	40,8	44,7	43,7	41,2	44,5	40,8	44,7	43,7	41,2

Tabulka 12 - Výsledky vzorků s povrchem PS + Lepidlo A

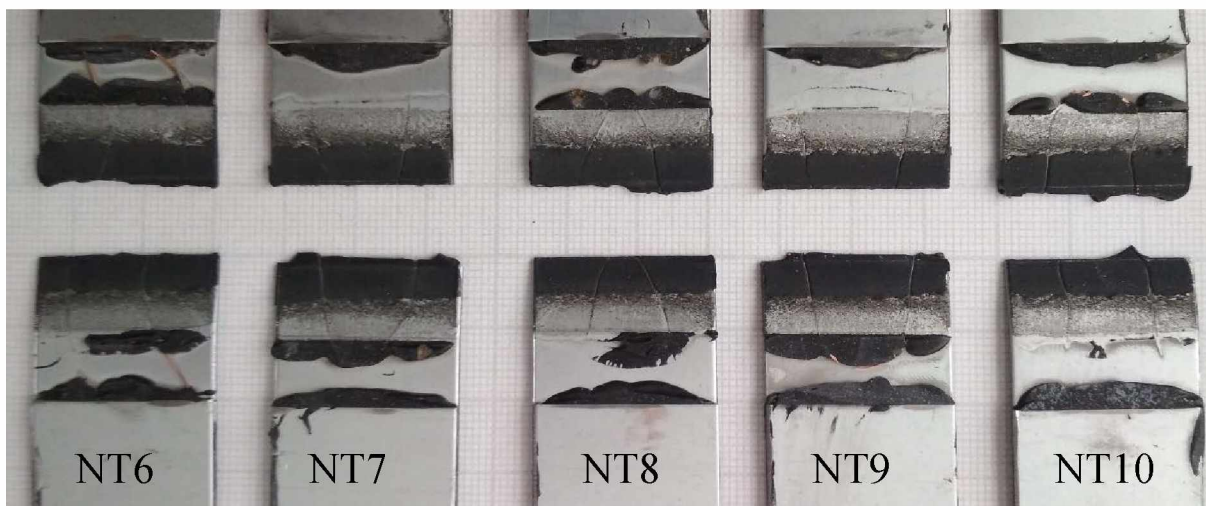
Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PS	RT	10	90	0	43,0±1,8
HDG+PS	-35	0	100	0	40,1±1,5

### 2.5.3.2 Povrch PP + Lepidlo A

Výsledky dynamických zkoušek za kombinace povrchu PP a lepidla A jsou dále uvedeny v tabulce 13 a 14, charakter porušení po zkoušce za pokojové teploty je dokumentován na obrázku 54, charakter porušení po zkoušce za snížené teploty je dokumentován na obrázku 55. Komplexní vyhodnocení výsledků viz kapitola 2.6.



Obrázek 54 - Povrch PP + Lepidlo A, pokojová teplota



Obrázek 55 - Povrch PP + Lepidlo A, teplota -35 °C

Tabulka 13 - Výsledky vzorků RT6 až RT10 a NT6 až NT10

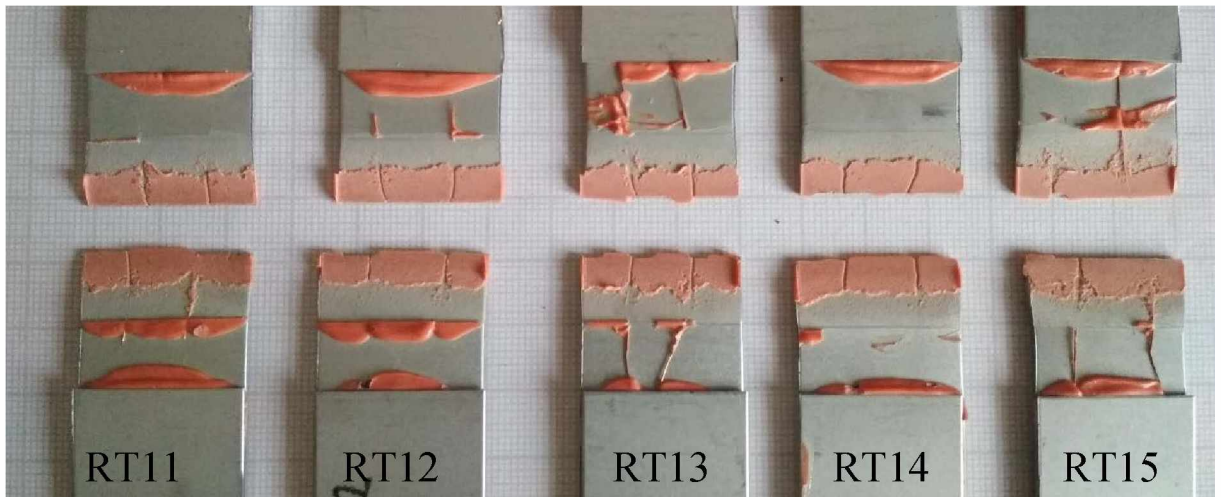
	RT6	RT7	RT8	RT9	RT10	NT6	NT7	NT8	NT9	NT10
$F_{\max}$ [kN]	13,9	13,2	13,1	13,2	12,6	13,6	13,4	14,2	14,3	13,8
$\tau_{\max}$ [MPa]	55,4	52,7	52,4	52,7	50,6	54,5	53,4	56,9	57,2	55,2

Tabulka 14 - Výsledky vzorků s povrchem PP + Lepidlo A

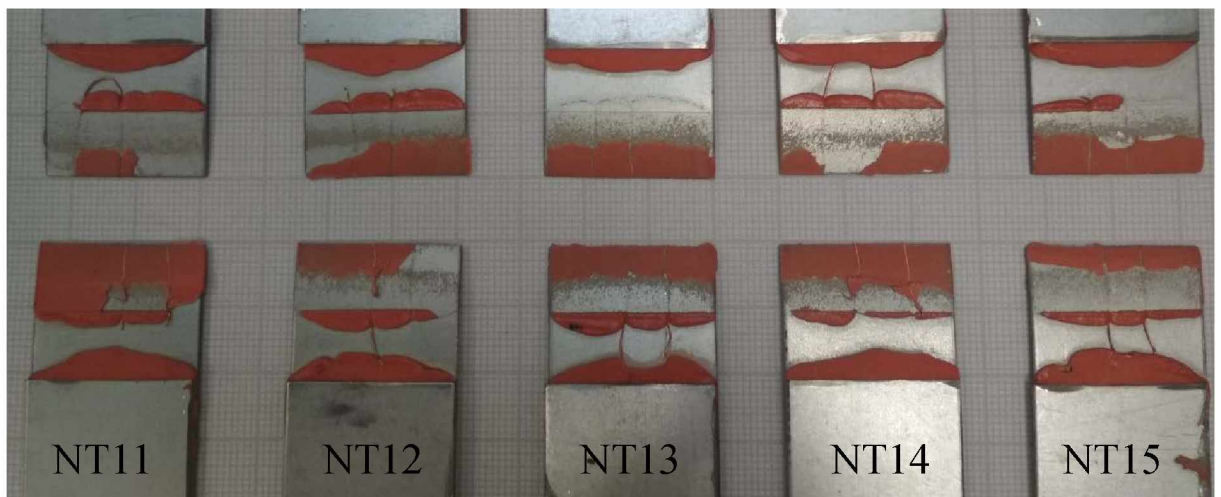
Použité lepidlo: Lepidlo A					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PP	RT	100	0	0	52,7±1,7
HDG+PP	-35	95	5	0	55,43±1,6

### 2.5.3.3 Povrch PS + Lepidlo B

Výsledky dynamických zkoušek za kombinace povrchu PS a lepidla B jsou dále uvedeny v tabulce 15 a 16, charakter porušení po zkoušce za pokojové teploty je dokumentován na obrázku 56, charakter porušení po zkoušce za snížené teploty je dokumentován na obrázku 57. Komplexní vyhodnocení výsledků viz kapitola 2.6.



Obrázek 56 - Povrch PS + Lepidlo B, pokojová teplota



Obrázek 57 - Povrch PS + Lepidlo B, teplota -35 °C

Tabulka 15 - Výsledky vzorků RT11 až RT15 a NT11 až NT15

	RT11	RT12	RT13	RT14	RT15	NT11	NT12	NT13	NT14	NT15
$F_{\max}$ [kN]	10,6	10,8	10,8	11,2	12,2	10,3*	12,9	14,6	13,5	13,9
$\tau_{\max}$ [MPa]	42,5	43,2	43,1	44,9	48,9	41,1*	51,4	58,3	53,9	55,4

\*vzorek NT11 byl vyřazen z výpočtu průměrné pevnosti, jelikož u něho došlo ke špatnému provedení lepeného spoje.

Tabulka 16 - Výsledky vzorků s povrchem PS + Lepidlo B

Použité lepidlo: Lepidlo B					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PS	RT	90	10	0	44,5±2,6
HDG+PS	-35	70	30	0	54,8±2,9

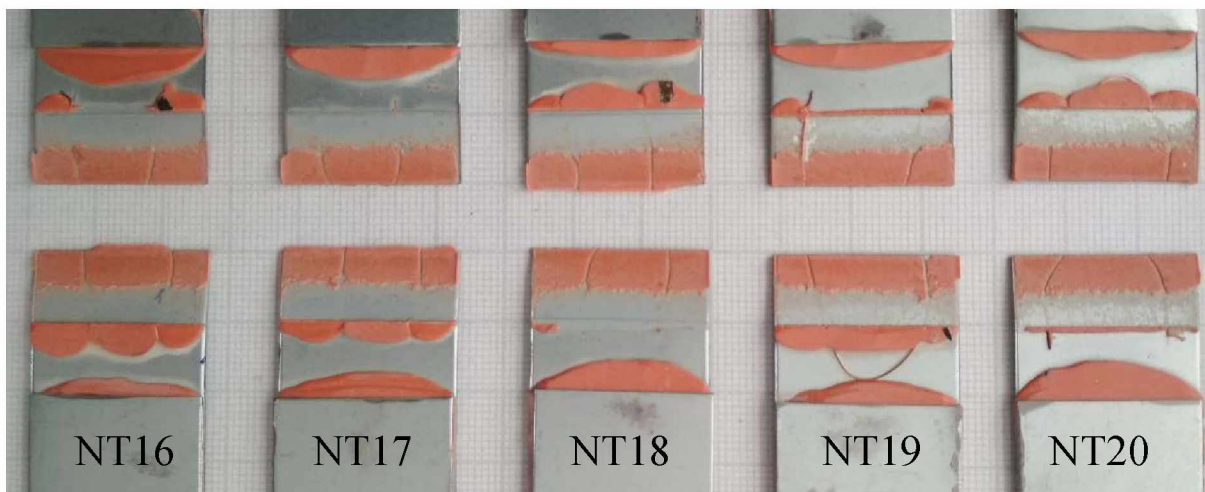
#### 2.5.3.4 Povrch PP + Lepidlo B

Výsledky dynamických zkoušek za kombinace povrchu PP a lepidla B jsou dále uvedeny v tabulce 17 a 18, charakter porušení po zkoušce za pokojové teploty je dokumentován na obrázku 58, charakter porušení po zkoušce za snížené teploty je dokumentován na obrázku 59. Komplexní vyhodnocení výsledků viz kapitola 2.6.



Obrázek 58 - Povrch PP + Lepidlo B, pokojová teplota





Obrázek 59 - Povrch PP + Lepidlo B, teplota -35 °C

Tabulka 17 - Výsledky vzorků RT16 až RT20 a NT16 až NT20

	RT16	RT17	RT18	RT19	RT20	NT16	NT17	NT18	NT19	NT20
$F_{\max}$ [kN]	13,2	13,4	13,3	13,2	12,9	15,7	14,2	15,1	15,1	14,6
$\tau_{\max}$ [MPa]	52,9	53,6	53,3	53,0	51,5	62,7	56,8	60,4	60,5	58,4

Tabulka 18 - Výsledky vzorků s povrchem PP + Lepidlo B

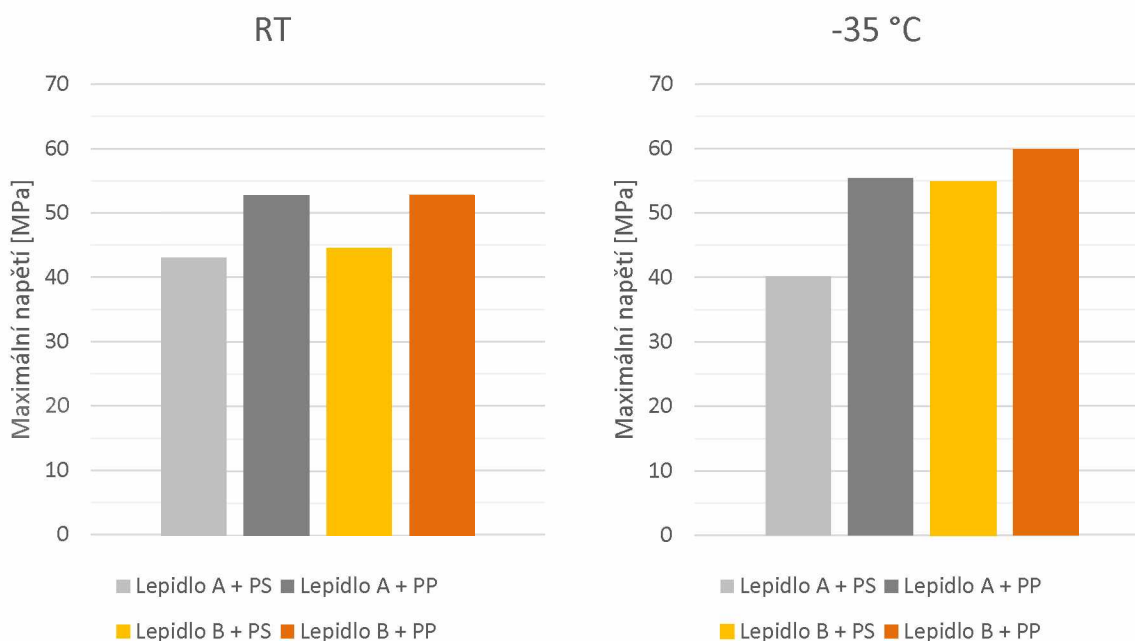
Použité lepidlo: Lepidlo B					
Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Povrch substrátu	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
HDG+PP	RT	100	0	0	52,8±0,3
HDG+PP	-35	70	30	0	59,8±2,4

## 2.5.4 Celkový výsledek všech zkoušek

V následující tabulce je uveden souhrnný výsledek všech provedených zkoušek. Pro lepší grafickou reprezentaci je maximální dosažené napětí, pro jednotlivé kombinace lepidla a povrchu, zobrazeno v grafu 3. V levé části grafu se nachází výsledky pro testy za pokojové teploty a v pravé části grafu se nachází výsledky pro testy za snížené teploty.

Tabulka 19 - Celkový výsledek všech zkoušek

Rychlost deformace: 15 m/s					
Použité mazivo: Anticorit PL3802-39S					
Množství maziva: 3 g/m <sup>2</sup>					
Lepidlo + Povrch	Teplota	Způsob porušení [%]			Pevnost
	[°C]	CF	SCF	AF	[MPa]
Lepidlo A + PS	RT	10	90	0	43,0±1,8
Lepidlo A + PP	RT	100	0	0	52,7±1,7
Lepidlo B + PS	RT	90	10	0	44,5±2,6
Lepidlo B + PP	RT	100	0	0	52,8±0,3
Lepidlo A + PS	-35	0	100	0	40,1±1,5
Lepidlo A + PP	-35	90	10	0	55,4±1,6
Lepidlo B + PS	-35	70	30	0	54,8±2,9
Lepidlo B + PP	-35	75	25	0	59,8±2,4



Graf 3 - Grafické znázornění maximálního dosaženého napětí

### 2.5.5 Analýza lomové plochy

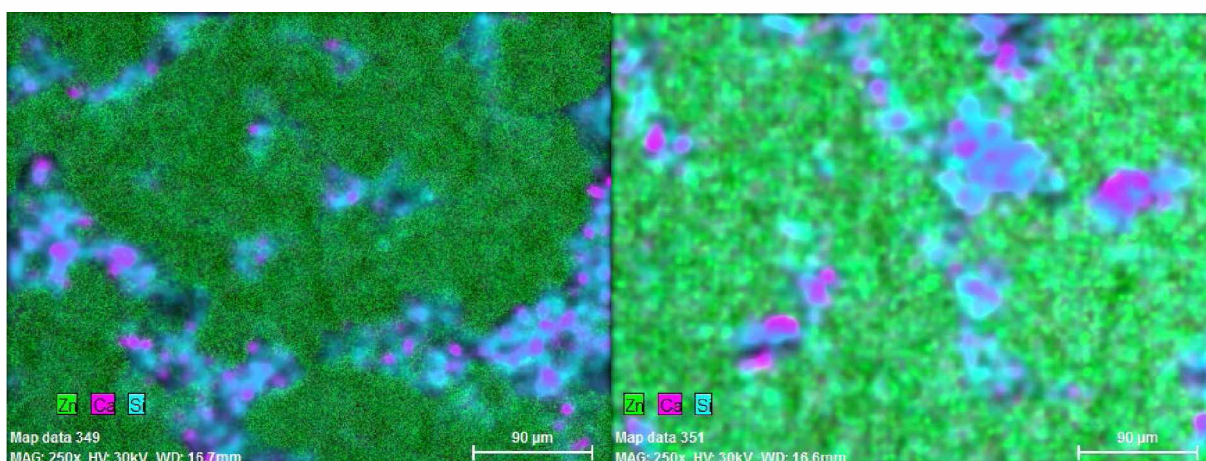
Pro přesnější analýzu lomové plochy je možné použít chemické mikroanalýzy povrchu po destrukci lepeného spoje. Ze znalosti prvků nacházejících se na povrchu substrátu a prvků obsažených v lepidle je pak možné ve sporných případech posoudit, zda se jedná o adhezni nebo speciální kohezní lom. V případě adhezního lomu by totiž došlo k čistému oddělení lepidla od substrátu a na substrátu by neulpěly žádné zbytky lepidla. Dále jsou uvedeny výsledky plošného mapování povrchu metodou energiové elektronové mikroanalýzy. Tato metoda umožňuje získávání informací o koncentracích jednotlivých prvků na základě vyhodnocení intenzit jejich spektrálních čar v rentgenové oblasti. Svazek primárních elektronů, kterým je rentgenové záření buzeno je velmi úzký (1-2  $\mu\text{m}$ ), proto lze složení studované látky detekovat jen ve velmi malém objemu. Použit byl mikroanalyzátor EDX Bruker Quantanox 200 v kombinaci s rastrovacím elektronovým mikroskopem TESCAN VEGA 5130SB.

K této analýze byly vybrány dva vzorky ze sady s povrchovou úpravou HDG+PS a lepidlem A. V tomto případě totiž došlo u všech vzorků testovaných za nízkých teplot k poškození, které silně připomínalo adhezni lom, a na rozdíl od všech ostatních vzorků nedošlo k přeskočení trhliny od plochy jednoho substrátu k ploše druhého substrátu přibližně v polovině délky lepeného spoje, ale došlo k oddělení lepidla od obou ploch. Navíc i maximální dosažená síla byla nižší než u vzorku testovaného za pokojové teploty.

Byl vybrán jeden referenční vzorek ze sady testované při pokojové teplotě a jeden vzorek ze sady testované při teplotě  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na obrázku 60 je možné vidět znázornění místa lomové plochy, ve kterém byla provedena analýza pomocí elektronového mikroskopu, vybraný výsledek analýzy je zobrazeny na obrázku 61, kompletní výsledky analýzy se nacházejí v příloze A a v příloze B. Zelenou barvou je vyznačen zinek a modrou a růžovou barvou je vyznačen vápník a křemík. Zinek značí místa s odkrytým povrchem a vápník s křemíkem značí místa, kde se nachází lepidlo, jelikož vápník je součástí plnidla používaného v lepidle a křemík je obsažen ve skleněných kuličkách určených k zajištění požadované mezery mezi lepenými substráty. Samotné lepidlo se skládá z uhlovodíkových řetězců, které je použitou metodou chemických mikroanalýz obtížné identifikovat.



Obrázek 60 - Místo měření na vzorcích RT5 (vlevo) a NT5 (vpravo)



Obrázek 61 - Struktura lomové plochy na vzorku RT5 (vlevo) a NT5 (vpravo)

Jak je z výsledného snímku na obrázku 61 vidět, tak jak na vzorcích zkoušených za pokojové teploty, tak i na vzorcích zkoušených za teploty  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  se nacházejí zbytky lepidla. Ač je množství lepidla na vzorku měřeném za nižší teploty menší, zřejmě z důvodu snížení pružnosti lepidla za nízké teploty, je tento typ lomu stále možné označit jako speciální kohezní lom.

## 2.6 Zhodnocení výsledků

Z obou testovaných lepidel vykazovalo lepší výsledky lepidlo B, za pokojových teplot byly rozdíly mezi oběma lepidly poměrně malé, avšak větší rozdíl nastal u vzorků testovaných za teploty  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy na povrchu PS dosahovalo lepidlo o přibližně 35 % lepších výsledků a na povrchu PP o přibližně 10 % lepších výsledků, co se týče maximální dosažené síly. Proto je možné toto lepidlo z pohledu dynamické únosnosti doporučit jako vhodnější alternativu k lepidlu A, a to i přesto, že lepidlo B je lepidlo původně vyvinuté pro použití na povrchu ZnMg.

Co se týče povrchů, výrazně lepší výsledky vykazoval povrch PP. Rozdíl povrchu PS a PP v kombinaci s lepidlem B se v případě zkoušek za pokojových teplot pohyboval kolem 20 % a v případě zkoušek za nízkých teplot byl rozdíl přibližně 10 %. Avšak v kombinaci s lepidlem A za teploty  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  byl rozdíl téměř 40 %. Tento vysoký rozdíl je možné pozorovat i na charakteru lomové plochy, kdy v případě lepidla B došlo k typickému lomu, kdy se trhlina v jedné polovině lepeného spoje nachází u jednoho povrchu substrátu a v druhé polovině délky lepeného spoje u druhého povrchu, zatímco u lepidla A došlo k oddělení lepidla od obou substrátů. Je také vhodné zmínit, že, jak dokládá měření z kapitoly 2.5.1.2, v případě povrchu PS bylo množství síry na povrchu uprostřed požadované tolerance ( $17,8\text{ mg S/m}^2$ , při požadované hodnotě  $18\pm 5\text{ mg S/m}^2$ ), zatímco u povrchu PP bylo množství fosforu blíže spodní hranici tolerančního pole ( $3,5\text{ mg P/m}^2$ , při požadované hodnotě  $6\pm 3\text{ mg P/m}^2$ ).

### **2.6.1 Posouzení vlivu snížené teploty na dynamickou odezvu lepených spojů**

Jak je možné z výsledků měření pozorovat, snížená teplota má na lepený spoj vliv, jak bylo možné předpokládat z chování reaktoplastů při změně teploty popsaném v kapitole 1.2.5. Při statických zkouškách za snížené teploty obvykle dochází ke zvýšení pevnosti lepeného spoje. Z tohoto důvodu se dalo předpokládat, že v případě dynamického testování bude vliv podobný. Ke zvýšení pevnosti skutečně u většiny vzorků došlo, a to podobně jako v případě statických zkoušek o 5-20 %. Jedinou výjimku tvořila kombinace povrchu PS s lepidlem A, kdy došlo ke snížení přibližně o 10 %. Toto snížení odpovídá i lomové ploše, kdy na rozdíl od všech ostatních zkoušek došlo k oddělení lepidla od obou lepených ploch. Tento jev byl s největší pravděpodobností způsoben tím, že při zvýšení pevnosti lepidla došlo zároveň ke snížení tažnosti, čímž byla snížena odolnost lepidla proti odlupu, a jelikož u jednoduše přeplátovaných spojů vždy vzniká přídatný moment daný excentricitou zatížení (viz kapitola 1.2.2), byla tím i snížena pevnost lepeného spoje jako celku.

### **2.6.2 Zhodnocení metodiky**

Metodika umožňuje dobře porovnávat vliv snížené teploty a zvýšené rychlosti deformace na lepený spoj z různých substrátů a lepidel, což je vhodné pro použití v automobilovém průmyslu, kde je nutné kvůli neustálému vývoji měnit jak materiály, tak použitá lepidla. Dále by mohla být tato metodika použitelná například pro doplnění současných metod testování v leteckém průmyslu, kde se lepení používá v ještě možná větší míře než v automobilovém průmyslu, a změny teplot při provozu letadla jsou ještě markantnější než při provozu automobilu, jelikož ve výškách, ve kterých letadla létají, se teploty běžně pohybují mezi  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dalším možným místem použití by mohla být výroba železničních

vozidel, kde se, stejně jako v dalších odvětvích dopravy, začínají čím dál víc rozšiřovat moderní technologie a materiály.

Použití mimo tyto zmíněné obory by bylo spíš okrajové, neboť tato metodika je poměrně specifická pro použití na tenkých substrátech, protože je navržena tak, aby zohledňovala vliv ohybu substrátu na pevnost lepeného spoje. Použití pro silnější substráty (řádově několik milimetrů) by zajisté možné bylo, avšak pokud by již nedocházelo k ohybu substrátu, nebylo by nutné používat zpevňující plechy. Tato norma je však navržena pro použití v automobilovém průmyslu, proto s takovým případem nepočítá.

### **2.6.3 Návrh navazujících úprav**

Bylo by vhodné, kdyby další výzkum v této oblasti umožnil doplnění normy o možnost testování za vyšších teplot. V současné době je totiž v koncernu VW prováděno pouze kvazi-statické testování za teplot  $+80\text{ °C}$ . Ale jelikož takto vysokých teplot je v extrémním případě možné dosáhnout, například v oblasti motorového prostoru, ale i na jiných součástech vozidla, například v případě provozu vozidla v rovníkové oblasti, a je nutné zajistit bezpečnost vozidla i za těchto podmínek, a proto by bylo vhodné, aby bylo možné i takovéto testování.

Dalším vhodným doplněním by byl návrh efektivního způsobu zavěšení vzorku na zařízení pro vytvrzování vzorků standardním procesem pro KTL. V současné podobě by totiž hrozilo při vypékání lepidla jeho přetečení v oblasti otvoru pro zavěšení, což by mohlo způsobit komplikace při sundávání vzorku a nutnost čistit zařízení od přetoků lepidla. Alternativně lze v současné době použít zavěšení na drát.

### 3 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvořit metodiku pro testování dynamické pevnosti lepených spojů za nízkých teplot pro použití v konstrukci osobních automobilů. Tento cíl byl splněn a metodika pro toto testování je popsána v kapitole 2.4. Metodika byla odeslána na Úřad průmyslového vlastnictví, kde v současné době dochází k projednání o přidělení patentu. Sestavená metodika umožňuje testovat lepené spoje na substrátech specifických pro automobilový průmysl, lepených pomocí pevnostních lepidel. Metodika by mohla být použita i mimo automobilový průmysl, například při návrhu letadel či drážních vozidel. Tato metodika může dále posloužit jako základ pro další výzkum v oblasti dynamického testování lepených spojů, konkrétně pro dynamické testování lepených spojů za zvýšených teplot.

K chlazení za nízkých teplot byly použity chladicí kleštiny vyvinuté speciálně pro tento účel na Univerzitě Pardubice. Jako chladicí médium byl použit suchý led, který byl přisypáván do nádobek s technickým lihem. Tento způsob se ukázal jako nejvhodnější způsob pro toto testování, jak z ekonomického, tak z bezpečnostního hlediska. Při použití tekutého dusíku jako chladicího média totiž hrozí větší riziko omrzlin, například potřísněním při manipulaci. Další možná alternativa by byla nahradit chladicí kleštiny klimatickou komorou. To by však přineslo jednak vyšší náklady na prvotní investici do zařízení, dále pak problémy s chodem zkušebního zařízení při tak nízkých teplotách, a v neposlední řadě i vyšší náklady na provedení jednotlivých zkoušek.

Příprava metodiky s sebou nesla prvotní problémy. Prvotní tvar vzorku pro dynamické testování totiž vycházel z předešlého výzkumu pro dynamické testování lepených spojů prováděných ve ŠKODA AUTO a.s. a bylo zjištěno, že tyto vzorky byly příliš krátké a nebylo možné je bezpečně upnout do chladících kleštín. Proto byly vyrobeny nové vzorky, které svou délkou odpovídaly vzorkům pro testování statické smykové pevnosti lepených spojů. U těchto vzorků však docházelo k porušení v substrátu, nikoliv v lepeném spoji, proto bylo nutné zpevnit materiál substrátu. Z několika návrhů bylo nakonec zvoleno zpevnění pomocí přilepení dodatečného substrátu ve formě plechu, který byl o 20 mm kratší než substrát tvořící lepený spoj. Tím došlo k výraznému zpevnění substrátu v oblasti mimo lepený spoj. Toto zpevnění se ukázalo jako dostatečné a při dalších testovacích sériích již docházelo k porušení v lepeném spoji.

Aby byly výsledky porovnatelné s měřením za pokojových teplot, bylo nutné upravit metodiku pro toto měření. Jelikož lepidla nedosahují při pokojových teplotách takových

pevností jako při nízkých teplotách, byla v rámci snížení pracnosti výroby vzorku vyrobena série vzorků bez zpevnění a stejná série vzorků i se zpevněním. U série bez zpevnění však docházelo k nadměrnému ohybu substrátu, což mělo vliv na průběh deformace lepeného spoje, proto bylo rozhodnuto, že pro měření za pokojové i snížené teploty bude použit stejný tvar vzorku.

Pro ověření funkčnosti metodiky bylo vytvořeno 40 vzorků z kombinace dvou substrátů a dvou lepidel. Vzorky byly testovány při dvou teplotách, pokojové a snížené. Zkoušky probíhaly dle metodiky vyvinuté v této práci. Lepší výsledky ve všech zkouškách podalo lepidlo B, které v současné době není použito v sériové produkci, avšak na základě provedených zkoušek bylo z hlediska dynamické pevnosti toto lepidlo doporučeno pro budoucí použití v sériové produkci. V případě povrchů dosáhl lepších výsledků povrch PP, který ve všech provedených zkouškách dopadl lépe než povrch PS, a to jak z pohledu dosažených maximálních sil, tak z pohledu charakteristiky lomové plochy.



## 4 POUŽITÁ LITERATURA

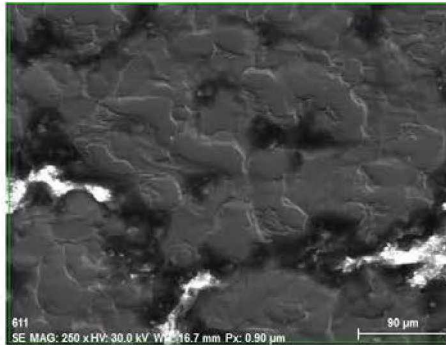
- [1] BROCKMANN, W. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 9783527318988.
- [2] GREGOR, Miroslav. Lepidla.cz. *Lepidla.cz* [online]. 2016 [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [3] L, Kovačič. *Lepenie kovov a plastov*. Bratislava: Nakladatelství ALFA, 1984.
- [4] DOUBEK, Pavel a Michaela KOLNEROVÁ. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [5] PETRIE, Edward. *Handbook of adhesives and sealants*. 1. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 9780070498884.
- [6] HRÁDEK, Zbyněk. Metodika modelování lepených spojů v automobilovém průmyslu. *Technická univerzita Liberec*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, .
- [7] ŠKODA AUTO A.S. *Interní dokumentace*. 2019.
- [8] KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, . Průběh napětí u nýtovaného a lepeného spoje. *Technická univerzita v Liberci* [online]. 2019 [cit. 2019]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12-doplnekove%20technologie/14-prubeh%20napeti.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12-doplnekove%20technologie/14-prubeh%20napeti.jpg)
- [9] TURNER, Adam. With Electric Vehicles, Adhesive Makers Can't Stick to Their Old Ways. *Direct Industry e-mag* [online]. 2018 [cit. 2019]. Dostupné z: <http://emag.directindustry.com/adhesives-and-the-automotive-industry/>
- [10] SCHIFFMANN, Tomáš. *Studium vlivu chemického složení povrchu substrátu na vlastnosti epoxidových lepidel u autokaroserií*. Pardubice, 2014. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, .
- [11] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [12] JIŘÍ TVRZNÍK A KOL. *Škoda Octavia III – Lehké konstrukce v sériové technologii*. Lázně Bělohrad, 2013.
- [13] D. BAUER, . Inovativní technologie v automobilovém průmyslu. *MMSpektrum.com* [online]. 2007 [cit. 2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/inovativni-technologie-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [14] MATĚJKA, Petr. *Hodnocení kombinovaných lepených spojů*. Pardubice, 2017. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní Fakulta Jana Pernera, .

- [15] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, . Zinc coatings. *American Galvanizers Association* [online]. 2011 [cit. 2019]. Dostupné z: [https://galvanizeit.org/uploads/publications/Zinc\\_Coatings.pdf](https://galvanizeit.org/uploads/publications/Zinc_Coatings.pdf)
- [16] ARCELORMITTAL, . Electrogalvanized sheet coated on one or both sides. *ArcelorMittal* [online]. 2019 [cit. 2019]. Dostupné z: <https://automotive.arcelormittal.com/europe/products/coatings/electrogalvanized/EN>
- [17] ASOCIACE ČESKÝCH A SLOVENSKÝCH ZINKOVEN, . *Příručka žárového zinkování*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2011. ISBN 978-80-260-3324-0.
- [18] BROZOVÁ, Veronika. *Vliv nových typů povrchových úprav plechů na kvalitu lepených spojů při stavbě karoserie osobních automobilů*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojí, .
- [19] ISO 11343:2003 *Adhesives - Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact conditions - Wedge impact method*. Druhé. Ženeva, Švýcarsko: ISO copyright office, 2003.
- [20] AVENDAÑO, R., R.J.C. CARBAS, E.A.S. MARQUES, L.F.M. DA SILVA a A.A. FERNANDES. *Effect of temperature and strain rate on single lap joints with dissimilar lightweight adherends bonded with an acrylic adhesive*. Volume 152. 2016.
- [21] MICRO-EPSILON, . Infra teploměry s laserovým zaměřovačem. *Micro-Epsilon* [online]. 2019 [cit. 2019]. Dostupné z: [https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/thermoMETER\\_CT\\_laser/](https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/thermoMETER_CT_laser/)
- [22] VOESTALPINE STAHL GMBH, . Bake-hardening steels. *Voestalpine* [online]. 2018 [cit. 2019]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKewjfzaPxrevhAhXHZVAKHUKUB5sQFjACegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.voestalpine.com%2Fstahl%2Fen%2Fcontent%2Fdownload%2F4679%2Ffile%2FBake-hardening-steels-voestalpine-EN-28092018.pdf%3Fi>

## 5 PŘÍLOHY

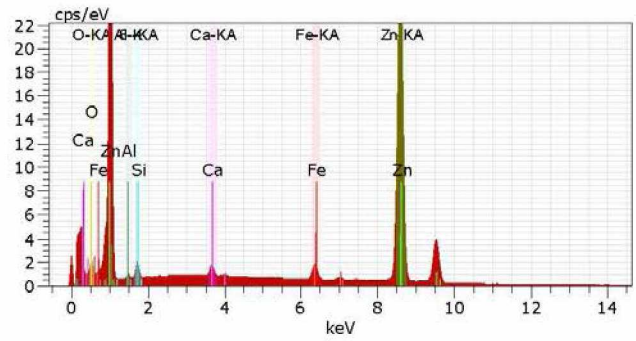
Příloha A -	<i>Výsledky chemické mikroanalýzy povrchu vzorku RT5</i> .....	74
Příloha B -	<i>Výsledky chemické mikroanalýzy povrchu vzorku NT5</i> .....	76

## RT5-map2

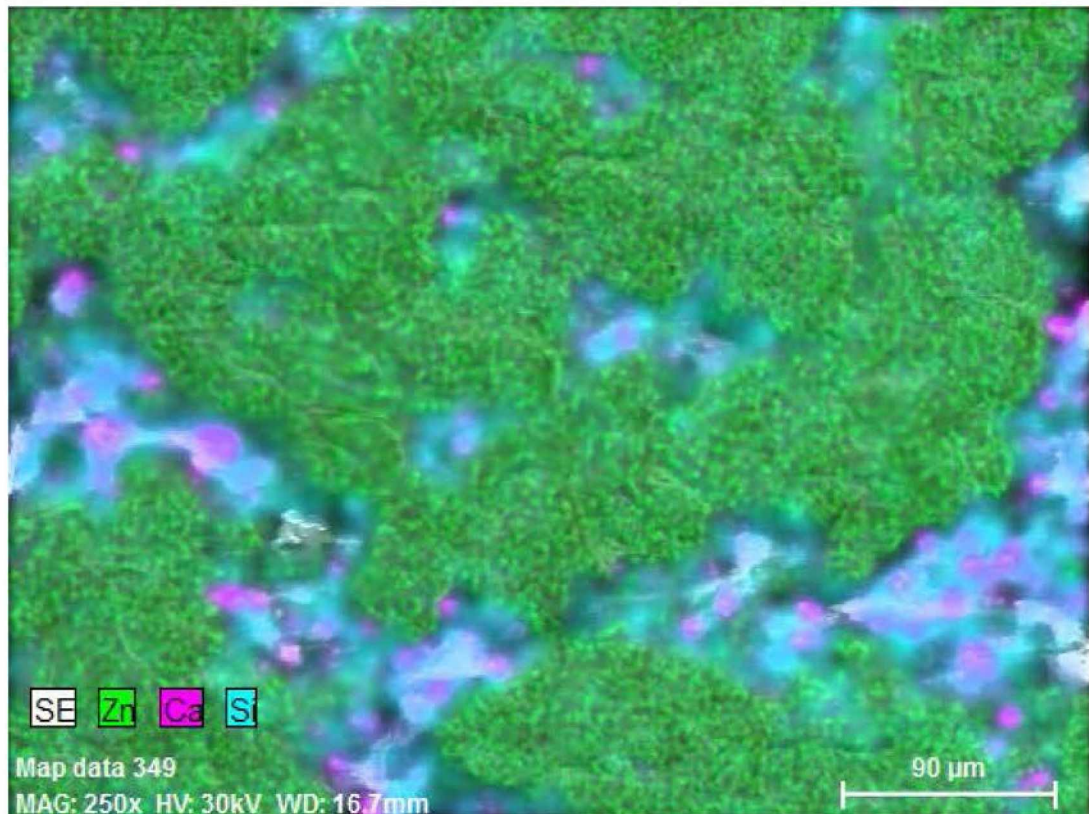


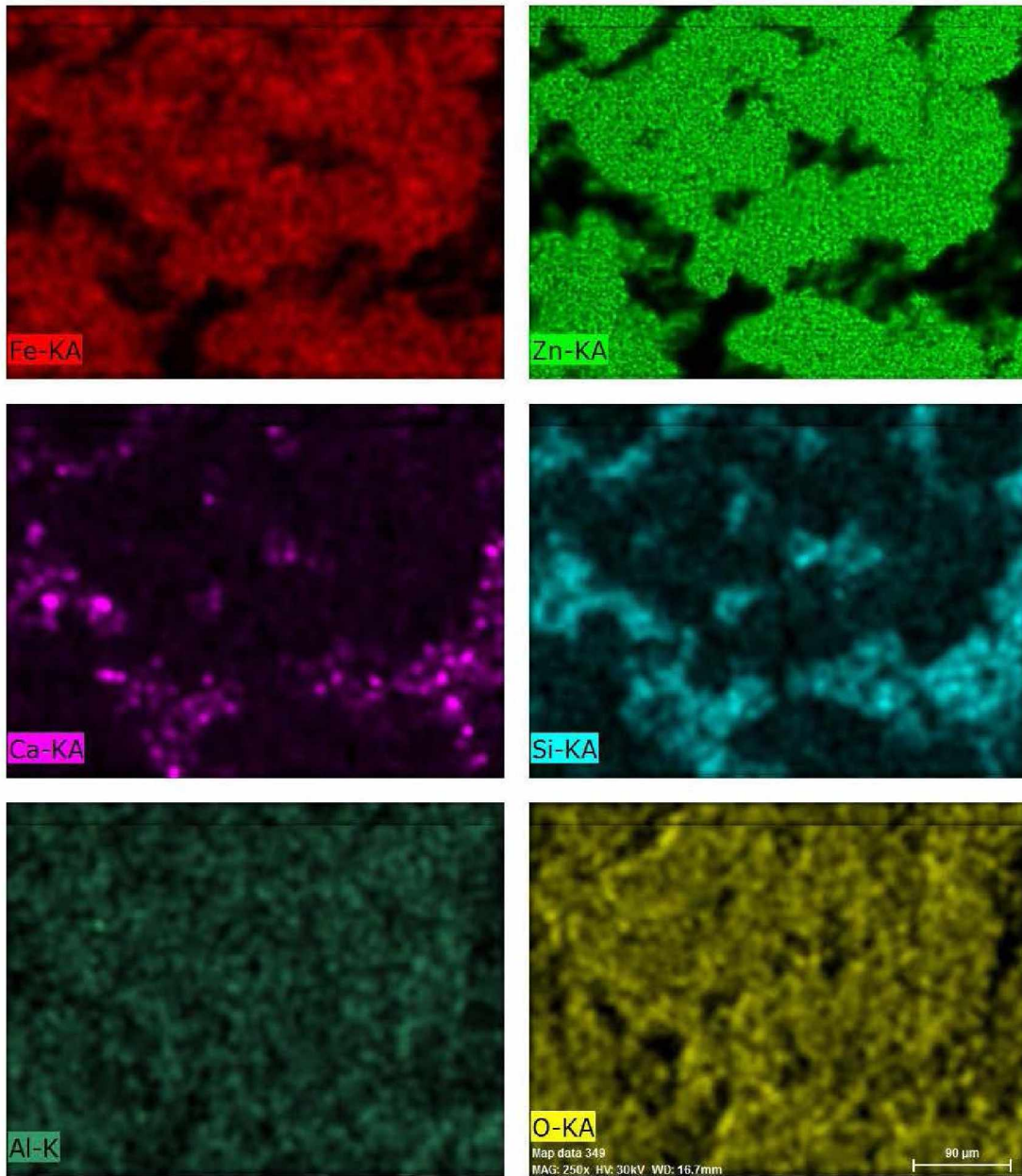
611 Date: 5/9/2019 2:22:27 PM Image size: 512 x 384 Mag: 250.010361395474x HV: 30.0kV

Map data 349 Date: 5/9/2019 2:19:43 PM Image size: 509 x 382 Mag: 250.010361395474x HV: 30.0kV



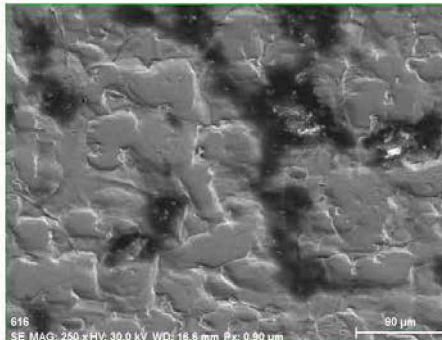
Map Date: 5/9/2019 2:19:41 PM HV: 30.0kV Puls th.: 19.39kcps





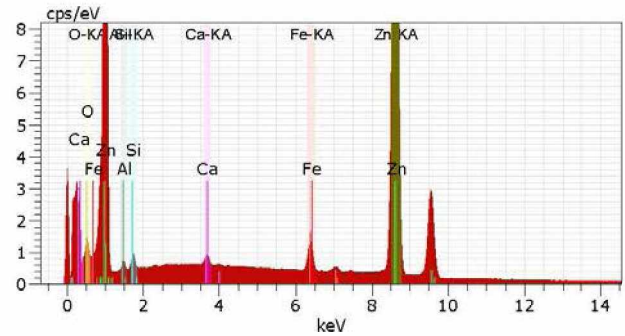
Fe-KA, Zn-KA, Ca-KA, Si-KA, Al-K, O-KA Date: 5/9/2019 2:22:27 PM  
Image size: 509 x 382  
Mag: 250.010361395474x  
HV: 30.0kV

## NT5-map2

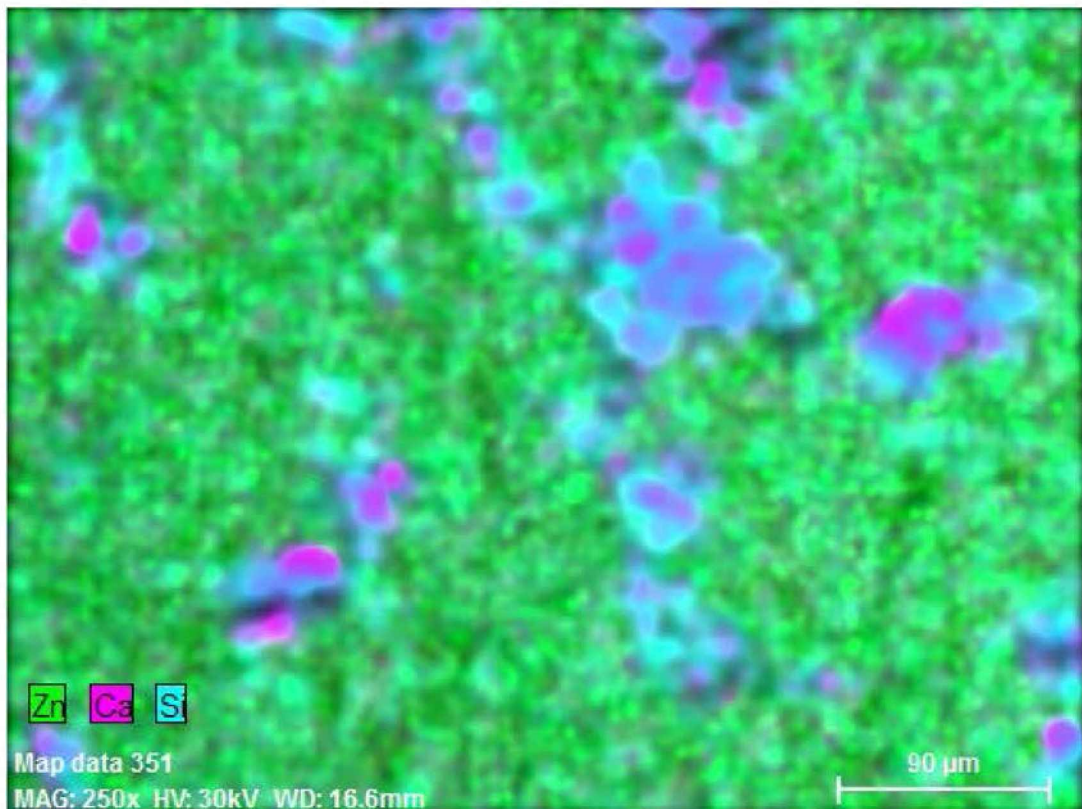


616  
SE MAG: 250x HV: 30.0 kV WD: 16.6 mm P: x: 0.90 μm  
616Date:5/9/2019 2:46:23 PMImage  
size:512 x  
384Mag:250.010361395474xHV:30.0kV

Map data 351Date:5/9/2019 2:44:07 PMImage size:510 x  
382Mag:250.010361395474xHV:30.0kV

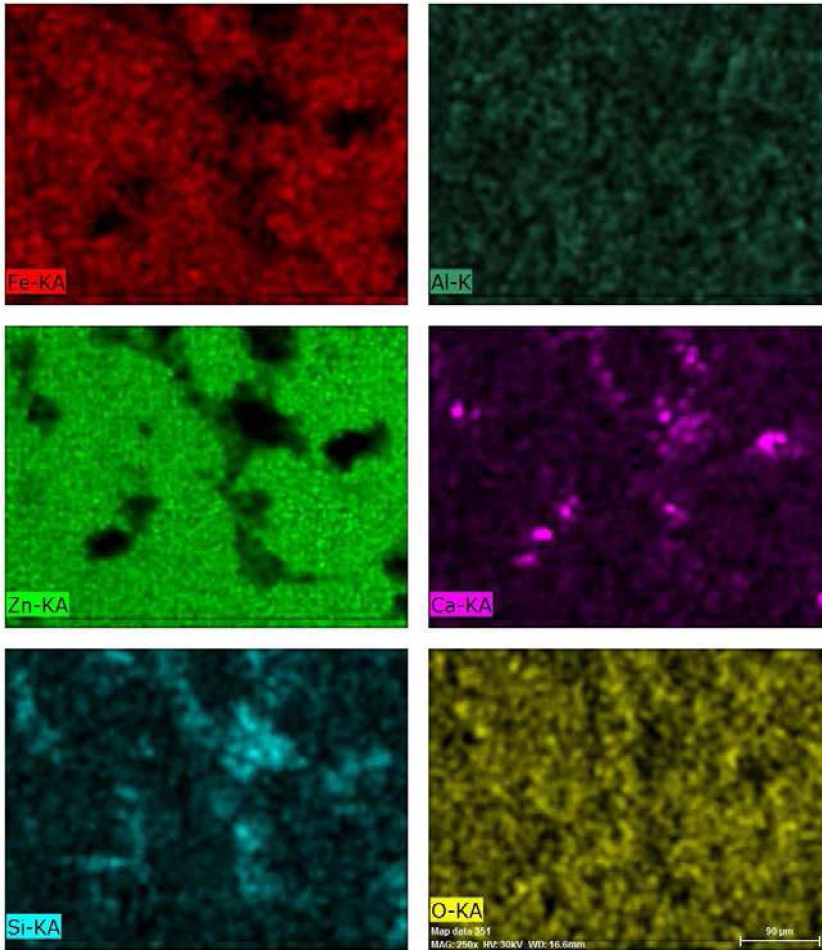


Map Date:5/9/2019 2:44:05 PM HV:30.0kV  
Puls th.:14.15kcps



Zn Ca Si

Map data 351  
MAG: 250x HV: 30kV WD: 16.6mm



Fe-KA, Al-K, Zn-KA, Ca-KA, Si-KA, O-KA Date: 5/9/2019 2:46:23 PM  
Image size: 510 x 382  
Mag: 250.010361395474x  
HV: 30.0kV