

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



**Nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných  
v automobilovém průmyslu**

Diplomová práce

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Autor práce: Bc. Martin Němec

PRAHA 2018

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Němec

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných v automobilovém průmyslu**

Název anglicky

**Low-cycle fatigue of structural bonds used in automotive industry**

---

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je výzkum nízkocyklové únavy lepených spojů využívaných v konstrukci automobilů.

Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice. Vlastní experimentální část bude věnována výzkumu zejména v prostorách laboratoří katedry. Aplikace technologie lepení je limitována cyklickým namáháním lepeného spoje.

Cílem experimentů je objasnit únavové chování (nízkocyklové zkoušky únavy) konstrukčních lepidel.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

**Doporučený rozsah práce**

cca 60 stran

**Klíčová slova**

Lomová plocha, mechanické testy, pevnost, SEM, technologie lepení

---

**Doporučené zdroje informací**

- ADAMS, R. D., COMYN, J., WAKE, W. C.: Structural adhesive joints in engineering. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997.
- BROCKMANN, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley – VCH, 2009.
- Časopis: International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Strojírenská technologie, Manufacturing technology atd.
- DAVIES, G.: Materials for automobile bodies. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2003.
- EBNESAJJAD, S.: Adhesives technology handbook. Norwich: William Andrew, 2008.
- HABENICHT, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. Berlin: Springer 2002.
- LOCTITE: Der Loctite. Worldwide Design Handbook. München: Loctite European Group, 1998.
- MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004.
- MITTAL, K. L.: Contact angel, wettability and adhesion. Boston: Brill Academic Publisher, 2003.
- PACKHAM, D. E.: Handbook of adhesion. Chichester: John Wiley and Sons, 2005.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 4. 1. 2017

**doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 06. 03. 2018

---

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných v automobilovém průmyslu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 2. 4. 2018

.....  
Bc. Martin Němec

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl především poděkovat mému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a velmi vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat Anně Rudawské, Ph.D., D.Sc., ENg., Associate Profesor za možnost provedení výzkumu v partnerské univerzitě v Lublinu. Velký dík patří také distribuční firmě karosářských dílů ACI za poskytnutí lepidel pro zpracování experimentální části diplomové práce. A nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během celého studia.

# Nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných v automobilovém průmyslu

## Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na téma nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných v automobilovém průmyslu. V úvodu teoretické části je popsána obecně technologie lepení spolu s výhodami a nevýhodami této technologie spojování. Podrobněji jsou zde popsány povrchové úpravy. Dále jsou v této kapitole uvedeny činitelé, které ovlivňují pevnost lepených spojů. Další kapitola se zabývala lepením v automobilovém průmyslu. Kde jsou popsány používaná lepidla při výrobě karoserie, způsoby aplikace lepidel a typy povrchů při výrobě karoserie. Závěr teoretické části je věnován hodnocení lepených spojů a únavovému chování materiálu.

Praktická část diplomové práce se zabývala posouzením vlivu nízkocyklového namáhání a rychlosti zatížení. Dále je také zjišťován vliv povrchové úpravy na vlastnosti lepených spojů. Zkouškám byl podroben jednosložkový polyuretanový tmel. V rámci výzkumu bylo zjištěno, že s navyšující se zatěžovací rychlostí narůstá pevnost lepených spojů. Naopak deformace s narůstající rychlostí u některých vzorků klesá. Dále bylo také zjištěno že s navyšujícím počtem cyklů se pevnost lepených spojů nemění, ale deformace narůstá. Z výsledků zkoušek byla prokázána důležitost mechanické úpravy povrchu tryskaní. Chemická úprava povrchu odmaštěním zde nemá význam, naopak odmaštěné spoje vykazují nižší pevnost než neodmaštěné.

## Klíčová slova

Lomová plocha, mechanické testy, pevnost, SEM, technologie lepení

# **Low – cycle fatigue of structural bonds used in automotive industry**

## **Summary**

The diploma thesis is focused on low cycle fatigue of structural joints used in automotive industry. At the beginning of the theoretical part, the technique of bonding is described, together with the advantages and disadvantages of this bonding technology. Surface treatments are described in more detail here. In this chapter, factors that influence the strength of bonded joints are mentioned. Another chapter deals with bonding in the automotive industry. Where the used adhesives for bodywork are used, how to apply adhesives and surface types in bodywork. The conclusion of the theoretical part is devoted to evaluation of bonded joints and fatigue behavior of the material.

The practical part of the diploma thesis deals with the assessment of the influence of low cycle load and load velocity. Furthermore, the influence of the surface treatment on the properties of bonded joints is also investigated. Testing was subjected to one-component polyurethane sealant. Research has shown that the strength of bonded joints increases with increasing load velocity. On the other hand, deformation with increasing velocity in some samples decreases. Furthermore, it has been found that with the increasing number of cycles, the strength of the bonded joints does not change but the deformation increases. The results of the tests showed the importance of mechanical treatment of blasting surface. The chemical treatment of the surface by degreasing here is of no importance, on the contrary degreased joints show lower strength than non-grease

## **Keywords**

Fracture area, mechanical tests, strength, SEM, adhesive technology

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b> .....	3
<b>3</b>	<b>Technologie lepení</b> .....	4
3.1	Teorie lepených spojů.....	5
3.1.1	Molekulová teorie (adsorpční).....	6
3.1.2	Elektrostatická teorie.....	6
3.1.3	Difuzní teorie .....	6
3.1.4	Mechanická teorie .....	7
3.1.5	Chemická teorie .....	7
3.2	Výhody a nevýhody lepených spojů.....	7
3.3	Příprava povrchu adherendu .....	8
3.3.1	Fyzikální operace .....	9
3.3.2	Chemické operace .....	10
3.4	Činitelé ovlivňující pevnost lepených spojů.....	11
3.4.1	Konstrukce lepených spojů.....	11
3.4.2	Vliv teploty na pevnost lepených spojů.....	13
3.4.3	Vliv drsnosti na pevnost lepených spojů.....	13
3.4.4	Vliv tloušťky lepené vrstvy.....	14
3.4.5	Vliv vlhkosti.....	14
<b>4</b>	<b>Lepení v automobilovém průmyslu</b> .....	15
4.1	Lepidla používaná při výrobě karoserie.....	17
4.1.1	Polyuretanová lepidla.....	17
4.1.2	Kaučuková lepidla.....	18
4.1.3	Epoxidová lepidla .....	19
4.2	Způsoby aplikace lepidel .....	21
4.3	Typy povrchů při výrobě karoserie.....	22
4.3.1	Ocelové plechy s povlaky .....	22
<b>5</b>	<b>Hodnocení lepených spojů</b> .....	24
<b>6</b>	<b>Obecná teorie únavy kovových materiálů</b> .....	26
6.1	Stadia únavového procesu .....	26
6.1.1	Stadium změn mechanických vlastností .....	26
6.1.2	Stadium nukleace únavových trhlin.....	27
6.1.3	Stádium šíření trhlin.....	28
<b>7</b>	<b>Metodika a cíle experimentálního programu</b> .....	29
7.1	Charakteristika použitého lepidla .....	29
7.1.1	RPS 45 polyuretanový těsnicí tmel ROBERLO .....	29
7.2	Použité vybavení.....	30
7.2.1	Tabulové nůžky NTC 2500/4.....	30
7.2.2	Tryskací kabina ITB – 65.....	30



7.2.3	Zkušební stroj Zwick/Roell Z150 .....	31
7.2.4	Zkušební stroj Labortech MPTest 5.050 .....	31
7.2.5	Elektronový mikroskop Tescan MIRA 3 .....	32
7.2.6	Rozprašovač Quorum Q150R ES .....	33
7.3	Příprava vzorků .....	33
7.3.1	Příprava vzorků pro statickou a kvazistatickou zkoušku ve smyku .....	33
7.3.2	Příprava vzorku pro SEM analýzu lomové plochy .....	34
7.4	Použité normy .....	35
7.4.1	ČSN EN 1465 - zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem .....	35
7.4.2	ČSN EN ISO 9664 - zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem .....	36
7.4.3	ČSN ISO 10365 - Vyhodnocení porušení lepeného spoje .....	36
7.5	Provedení zkoušek .....	37
7.5.1	Statická zkouška ve smyku .....	37
7.5.2	Kvazistatická zkouška ve smyku .....	37
7.5.3	Vyhodnocení porušení lepeného spoje .....	38
7.6	Výpočtové vztahy naměřených hodnot .....	38
<b>8</b>	<b>Vyhodnocení experimentu .....</b>	<b>40</b>
8.1	Statická zkouška ve smyku .....	40
8.1.1	Vliv rychlosti zatížení na pevnost lepeného spoje .....	40
8.1.2	Vliv rychlosti zatížení na deformaci lepeného spoje .....	43
8.2	Kvazistatická zkouška ve smyku .....	46
8.2.1	Vliv cyklického namáhání na pevnost lepeného spoje .....	47
8.2.2	Vliv cyklického namáhání na deformaci lepeného spoje .....	49
8.3	Vyhodnocení porušení lepeného spoje .....	52
8.3.1	Analýza lomové plochy pomocí SEM .....	53
<b>9</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>55</b>
9.1	Statická zkouška ve smyku .....	55
9.2	Kvazistatická zkouška ve smyku .....	55
<b>10</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
<b>12</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>62</b>
<b>13</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>63</b>
<b>14</b>	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>63</b>
<b>15</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>i</b>

# 1 Úvod

Technologie lepení je považována za moderní technologii, ale její historie sahá již do doby kamenné. Archeologicky je lepení doloženo již před 6000 lety v Babylonu, kde babylonané využívali kliš k lepení očí soch. Velkým mezníkem v historii lepení je objevení nitrace celulózy v letech 1845 až 1846. Dalším významným mezníkem v historii lepení byl objev fenolformaldehydové pryskyřice, která byla využita ve Velké Británii v roce 1943 k sériové výrobě letounu typu DH – 103 Hornet. Konstrukce letounu byla kombinace dřeva a kovu.

Technologie lepení je dnes velmi progresivní a čím dál více uplatňovaná technologie, která se vyznačuje řadou konstrukčních výhod oproti ostatním spojovacím technologiím. Hlavní předností lepených spojů je jejich nízká hmotnost, která právě vedla k rozvoji lepených spojů v průmyslu, především v automobilovém průmyslu. Technologie lepení byla dříve považována za doplňkovou k ostatním spojovacím technologiím. V současné době se průmyslová výroba a průmysl obecně bez této technologie neobejde. Dnes je lepení využíváno prakticky ve všech odvětvích průmyslu, od jemné elektroniky až po konstrukce vyžadující velkou únosnost.

Základem pro úspěšné použití lepidel v praxi je důležité mít celkové znalosti o technologii lepení a o technologických vlastnostech daných lepidel, protože ve většině případech selhání lepeného spoje, není hlavní příčinou pevnost lepidla, ale nevhodná nebo nedostatečná příprava lepených povrchů, volba nevhodného druhu lepidla či špatná konstrukce lepeného spoje.

Tématem diplomové práce je nízkocyklová únava konstrukčních spojů v automobilovém průmyslu. V teoretické části je nejdříve obecně popsána technologie lepení spolu s výhodami a nevýhodami této technologie. Podrobněji jsou v této kapitole popsány povrchové úpravy lepených spojů. V této kapitole jsou také popsány jednotlivé faktory, které ovlivňují pevnost lepených spojů. Další kapitola je věnována lepení v automobilovém průmyslu, zde jsou zmíněny lepidla používaná při výrobě karoserie, způsoby aplikace lepidel a typy povrchů při výrobě karoserie. Závěr teoretické části je věnován hodnocení lepených spojů a únavovému chování materiálů.

Pro výzkum byl využit těsnicí tmel ROBERLO RPS 45. Výzkum je rozdělen na dvě části. První část výzkumu je zaměřena na stanovení vlivu rychlosti zatížení na vlastnosti lepeného spoje. Tato část výzkumu byla provedena ve spolupráci s Polytechnickou univerzitou v Lublinu fakultou strojní v rámci programu Erasmus. Druhá část výzkumu se uskutečnila v laboratorních prostorách Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze a byla zaměřena na objasnění únavového chování konstrukčních lepidel. U obou částí výzkumu je zároveň sledován vliv jednotlivých povrchových úprav na vlastnosti lepeného spoje. Diplomová práce byla podpořena grantem IGA Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze.

## **2 Cíl práce**

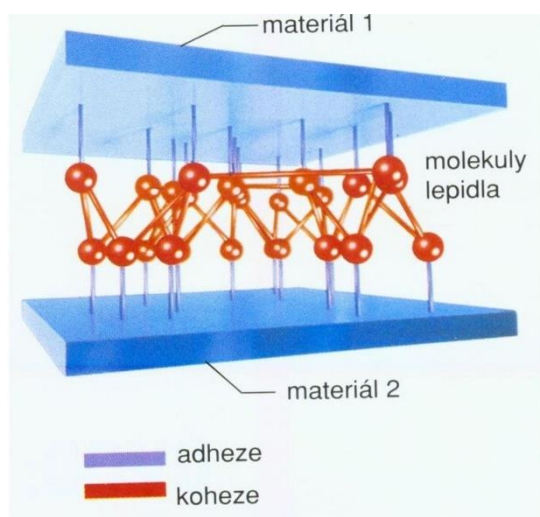
Hlavním cílem diplomové práce je výzkum nízkocyklové únavy lepených spojů využívaných v konstrukci automobilů. Dílčím cílem práce je stanovení vlivu rychlosti zatížení na vlastnosti lepených spojů. Dále je také zjišťován vliv povrchové úpravy na statické a únavové vlastnosti lepených spojů

### 3 Technologie lepení

V dnešní době je technologie lepení jednou ze základních technologií spojování kovů plastů i kombinovaných systémů materiálů prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Na rozdíl od ostatních technologií (svařování, pájení apod.) není při technologii lepení ovlivněn základní materiál lepeného spoje (mimo chemické účinky). [1]

Základním úkolem konstruktéra v oblasti technologie lepení je výběr vhodného typu lepidla pro spojení konkrétního materiálu, nebo naopak pro daný typ lepidla zvolit vhodný druh aplikace. Zároveň s tímto je potřeba zohlednit další aspekty této technologie (návrh konstrukce spoje, úprava povrchu, dodržování předepsaného postupu při lepení, chování lepidla během procesu lepení apod.) [1]

Pevnost lepeného spoje je závislá hlavně na dvou základních činitelích adhezi a kohezi.



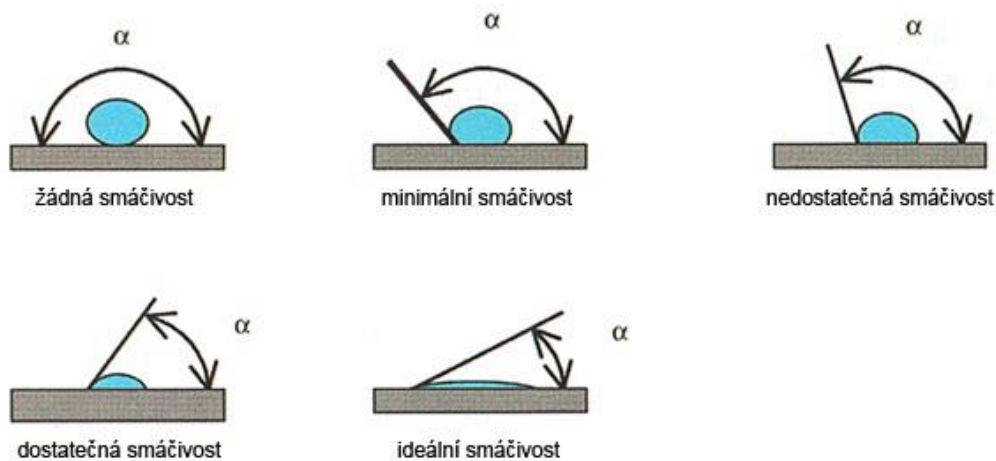
Obrázek 1 Lepený spoj [2]

**Adheze:** (přilnavost) Je definována jako schopnost lepidla přilnout k povrchu lepeného materiálu neboli je to schopnost přenosu tečných sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu. Existují dva teoretické modely vazby mezi lepidlem a lepeným povrchem, mechanická vazba a chemická vazba. Mechanická vazba se uplatňuje jen u porézních a členitých povrchů. Lepidlo zatéká do pórů a po jeho ztuhnutí se vytváří pevný zámek mezi lepidlem a lepeným materiálem. Chemická vazba se uplatňuje jak u porézních povrchů, tak i u hladkých povrchů. Tato teorie je založena na působení slabých van der Waalsových přitažlivých sil mezi lepidlem a lepeným materiálem. [3]

**Koheze:** (soudržnost) Je definována jako vlastní pevnost vrstvy lepidla. Velikost koheze je dána tzv. kohezní energií. Kohezní energie vyjadřuje velikost energie, která je potřebná k odtržení jedné částice od ostatních. Pokud se lepený spoj roztrhne ve vrstvě lepidla, tak z toho vyplývá, že adheze je vyšší než koheze. Kohezní pevnost je závislá na charakteru lepidla a na tepelném namáhání. [3] [4]

**Smáčivost:** Charakterizuje povrchové napětí lepidla. Je to schopnost kapaliny udržovat kontakt s povrchem, který vyplývá z mezimolekulární interakce. Stupeň smáčení je dán projevem adhezních a kohezních sil. Pokud má lepidlo smáčet povrch lepeného materiálu, tak musí být jeho hodnota povrchového napětí menší než hodnota povrchového napětí lepeného materiálu. Jeli hodnota povrchového napětí vyšší, tak nedochází ke smáčení povrchu lepeného materiálu a lepidlo se neudrží na povrchu lepeného materiálu. [5]

Pro vyhodnocení, zda lepidlo vhodně smáčí lepený povrch slouží takzvaná kapková zkouška. Na obrázku 2 lze vidět, že čím je menší krajový (elevační) úhel  $\alpha$  mezi kapkou a materiálem, tím je smáčivost lepší a v opačném případě, čím je elevační úhel  $\alpha$  větší, tím je smáčivost horší. [5]



Obrázek 2 Smáčivost lepidel [6]

### 3.1 Teorie lepených spojů

Teorie lepení je založena na vztazích molekul a jejich vzájemném působení. Adheze souvisí s molekulovou strukturou, proto jsou uplatňovány fyzikální a mezimolekulární síly a chemické vazby.

Dnes se nejvíce uplatňují následující teorie adheze:

- Molekulová teorie
- Elektrostatická teorie
- Mechanická teorie
- Difúzní teorie
- Chemická teorie

### **3.1.1 Molekulová teorie (adsorpční)**

V současnosti je nejvíce přijímaná adsorpční teorie adheze, která je dána analogií jevu smáčení, adsorpce a adheze. Základní princip adheze je vzájemné působení molekul lepeného materiálu (adherendu) a lepidla (adheziva), proto je nezbytné, aby oba druhy molekul měly polární funkční skupiny, které jsou schopné vzájemného působení. Vznik adhezního spoje lze rozdělit na dvě fáze. První fáze je transport molekul adheziva k povrchu adherendu. Druhá fáze je vzájemné působení mezimolekulárních sil (van der Waalsovy) po přiblížení molekul adheziva na vzdálenost menší než 0,5 nm, což trvá až do dosažení adsorpční rovnováhy. Malá pevnost adhezního spoje je způsobena především ve špatném kontaktu adherendu a adheziva, což je dáno smáčením povrchu adherendu adhezivem. [7] [1]

### **3.1.2 Elektrostatická teorie**

Elektrostatická teorie předpokládá dvojitou vrstvu vytvořenou dotykem dvou různých látek ve spoji jako základ pro vznik adheze. Spoj je tedy kondenzátorem, jehož rozdílně nabitě desky se přitahují. V okamžiku kdy je oddělíme, vzniklý potenciálový rozdíl se musí vybit. Vzájemný vztah mezi velikostí povrchového elektrostatického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení nebyl prokázán. [7] [1]

### **3.1.3 Difúzní teorie**

Tato teorie vychází z představy, že pevnost spoje vzniká vzájemnou difuzí polymerů napříč rozhraním. Podstatou tohoto tvrzení je, že některé látky navzájem difundují. Průběh této difuze závisí hlavně na čase, teplotě, viskozitě, kompatibilitě adherendu a adheziva, relativní molekulové hmotnosti polymerů a má vliv na pevnost spoje. Difúzní teorie nevysvětluje možnost spojení materiálů vzájemně nedifundujících, které se však úspěšně lepí (např. kov - sklo) [7] [1]

### 3.1.4 Mechanická teorie

Podle této teorie dochází po proniknutí adheziva do trhlin a pórů lepeného povrchu a po zatuhnutí adheziva k jeho „zaklínění“ v povrchu lepeného materiálu. V současné době jsou mechanické teorie adheze využívány pouze ve specifických případech, jako je např. výroba překližek, přilnavost pryžových směsí k textilním vláknům. [7] [1]

### 3.1.5 Chemická teorie

Tato teorie udává, že pro získání pevného spoje, který bude vykazovat kohezní nikoli adhezivní lom, je nezbytné, aby materiály, které mají být spojeny, vytvořily primární chemické vazby napříč rozhraním. Chemické vazby občas vznikají, ale lepení probíhá v termodynamických podmínkách a tyto podmínky neumožňují vznik těchto vazeb. Nelze jednoznačně tvrdit že vznik těchto vazeb vedl ke zvýšení pevnosti spoje, protože případy zavádění do adheziv a adherendů reakce schopné funkční skupiny, mnohokrát nevykazovali zlepšení vlastností adhezního spoje. [7] [1]

## 3.2 Výhody a nevýhody lepených spojů

Hlavním podnětem pro rozvoj technologie lepení je možnost použití této technologie na spoje, které nelze jinými technologiemi spojování spojit např. spojení různých materiálů. Každá technologie nabízí své výhody, ale také nevýhody, stejně tomu je také u technologie lepení. Proto je důležité zvážit při výběru typu technologie spojování ekonomické hledisko, ale také technické výhody a nevýhody v porovnání s ostatními technologiemi spojování. [8]

Výhody:

- mohou být spojovány různé materiály bez ohledu na jejich tloušťku
- minimální tepelné namáhání materiálu
- nedochází k ovlivnění struktury spojovaných materiálů
- není narušena celistvost, profil a vzhled lepeného souboru
- rovnoměrné rozdělení zatížení
- vodotěsnost spojů
- dobré tlumící vlastnosti
- lepením se téměř nezvyšuje hmotnost konstrukce
- spojení materiálů které nelze svařovat



- vyznačují se vysokou pevností ve smyku a v tahu
- spoje mohou být barevně přizpůsobené
- bez vnitřních pnutí
- možnost spojovat velké plochy
- možnost miniaturizace
- lze vyrobit spoje s dobrou elektrickou, tepelnou a zvukovou vodivostí, nebo také spoje s dobrou elektrickou vodivostí
- velmi dobrá kvalita vzhledu povrchu lepených dílů v místě styku

Nevýhody:

- vysoké požadavky na rovnost a čistotu lepených částí
- pevnost spoje je často nižší ve srovnání s ostatními spojovacími technologiemi
- citlivá vůči namáhání v odlupování a kroucení
- maximální pevnost spoje je dosažena až po určité době
- dlouhé vytvrzovací doby
- stárnutí
- většinou nevhodná pro spoje s proměnlivým zatížením
- nižší odolnost vůči vysokým teplotám

### 3.3 Příprava povrchu adherendu

Pro dosažení vysoké pevnosti lepeného spoje je nezbytné upravit povrch lepeného materiálu tak, aby byla zajištěna dokonalá přilnavost mezi lepeným materiálem a lepidlem. Závisí zde hlavně na smáčivosti. Podstatou veškerých úprav povrchu spojovaného materiálu je dosáhnout co nejvyšší smáčivosti povrchu lepidlem. Tím vznikají podmínky pro vznik adhezivních vazeb. S rostoucí plochou lepeného spoje a rostoucím počtem těchto vazeb roste i pevnost lepeného spoje. Je velmi důležité, aby během úpravy povrchu nezůstaly na lepeném materiálu žádné nečistoty. Mezi základní úpravy povrchu se řadí fyzikální a chemické operace.

[7] [9]

### 3.3.1 Fyzikální operace

Mezi základní fyzikální operace patří broušení, tryskání, kartáčování, obrábění, lapování, leštění apod. Mezi speciální fyzické operace patří ozařování, čištění ultrazvukem, polarizace přesušování apod.

#### Otryskávání

Otryskávání se provádí za pomoci abrazivních materiálů (např. Korundu) a vzduchu. Stupeň změny povrchu a deformace způsobené nárazem částic je určen formou a tvrdostí média, aplikovaným tlakem a vzdáleností trysky od povrchu. V okamžiku kdy medium dopadá na povrch, vznikají vysoké koncentrace energie. Předpokládá se tedy, že během krátkého času se v oblasti nárazu vytvoří plazmový stav. [9]

Dva nejčastěji používané tryskací systémy jsou:

- Procesy suchého tryskání, jako je odstředivé otryskávání, otryskávání pískem a vakuové tryskání.
- Tryskání s využitím kapalin, jako je tryskání vodou, tryskání horkou vodou a parou.

#### Broušení

Broušení slouží k jemnému odebrání materiálu a k odstranění hrubých nerovností povrchu. Adhezní vlastnosti broušených povrchů jsou horší než u tryskaných povrchů. Před broušením musí být povrch pečlivě odmaštěn, protože jakmile nejsou odstraněny veškeré nečistoty, tak se rovnoměrně rozloží po celém povrchu a nedosáhne se zlepšení kvality spojů. Obvykle se pro tento typ metody přípravy povrchu používají pásové brusky, úhlové brusky a orbitální brusky. [9] [10]

#### Kartáčování

Kartáčování se používá pro odstranění hrubých nečistot nebo také pro odstranění oxidační vrstvy po předchozím broušení. Provádí se také před leštěním pro zjemnění povrchu. Kartáčování je zvláštní typ přípravy abrazivního povrchu. U dané velikosti zrna je drsnost povrchu získaná kartáčováním menší, než je dosaženo při broušení, protože kartáče jsou relativně pružné. Opět je nezbytné, aby povrchy byly očištěny před kartáčováním (stejně jako při broušení). [9] [10]

### 3.3.2 Chemické operace

Chemické úpravy lze rozdělit do dvou skupin:

- Úpravy, které slouží k odstranění hrubých nečistot
  - Odmašťování
- Úpravy, které zvyšují adhezi:
  - Moření
  - Fosfátování
  - Anodická oxidace

#### **Odmašťování**

Odmašťováním se odstraňují veškeré nečistoty, které ulpívají na povrchu adherendu a jsou k němu vázány. Cílem odmašťování je tedy uvolnění všech nečistot z povrchu a převedení do roztoku nebo emulze, čímž se dosáhne chemicky čistého povrchu. Odmašťování je uskutečňováno třemi skupinami odmašťovacích činidel:

- nechlorovaná organická rozpouštědla (aceton, metyletylketon, etylacetát, benzen, benzín, étery, alkoholy atd.)
- chlorované organická rozpouštědla (trichlorethylen, tetrachlorethylen, metylenchlorid, chloroform atd.)
- ve vodě rozpustná alkalická odmašťovadla a jejich směsi: vídeňské vápno, alkony, soda, hydroxid sodný [9] [7]

#### **Moření**

Během moření dochází k hmotnostním a rozměrovým změnám a ke změnám mikroskopické struktury povrchu. Při moření se vytváří určitá vrstva, která zvyšuje povrchovou energii. Moření patří k nejdůležitějším způsobům úpravy povrchu adherendu, které jsou zaměřené na zvýšení adheze. Mořením dochází k odstranění mastnot, k odstranění oxidační vrstvy a k velmi jemnému zdrsnění povrchu. Podle složení mořidla se na povrchu adherendu vytvoří vrstvička s dobrými adhezivními vlastnostmi k danému lepidlu. Tyto vrstvičky mají často velmi krátkou životnost, proto je nutné lepit ihned po moření, opláchnutí a vysušení. Mořící roztoky mohou být alkalické nebo kyselé. K moření se používá kyselina sírová

(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), kyselina chlorovodíková (HCl), kyselina dusičná (HNO<sub>3</sub>) a kyselina fosforečná (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). [9] [7]

### **Fosfátování**

Význam fosfátování je v prodloužení životnosti lepeného spoje, který je velmi odolný proti korozi. Podstatou fosfátování je vytvoření tenké vrstvy nerozpustných fosfátů. Působením roztoků, které obsahují Dihydrogenfosforečnan zinečnatý Zn(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> a kyselinu fosforečnou, dochází k vytvoření tenké pórovité vrstvy nerozpustných fosfátů na povrchu kovu. Pro urychlení reakce se přidává do fosfátové koupele kyselina dusičná. Ke zkvalitnění vrstvy a ke zvýšení odolnosti proti korozi se na závěr fosfátování provádí ještě chromatování. [9] [7]

### **Anodická oxidace**

Přivedením elektrického proudu na adherent dochází ke zvětšení chemické reakce. Části které, mají být ošetřeny se obecně používají jako anoda, proto se tento proces nazývá "anodizace". Přichází v úvahu pouze pro kovy, hlavně pro hliník. Podle určených pracovních podmínek jako je napětí, proudová hustota, teplota, složení elektrolytu dochází k rozpuštění oxidů, k elektrolytickému leštění a ke vzniku nových oxidových vrstev. Tyto vrstvy vykazují filigránové a nanomorfologické struktury s velmi dobrými adhezními vlastnostmi. [9] [7]

## **3.4 Činitelé ovlivňující pevnost lepených spojů**

Výsledná pevnost lepeného spoje je ovlivněna mnoha faktory. Již při návrhu lepeného spoje je důležité vhodně zvolit konstrukci spoje a optimální lepidlo. Další faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje jsou drsnost lepeného spoje, tloušťka vrstvy lepidla, ale také tvar a velikost lepené plochy. Lepené spoje jsou vystavovány různým teplotám a klimatickým podmínkám, což má také výrazný vliv na pevnost lepených spojů. [11]

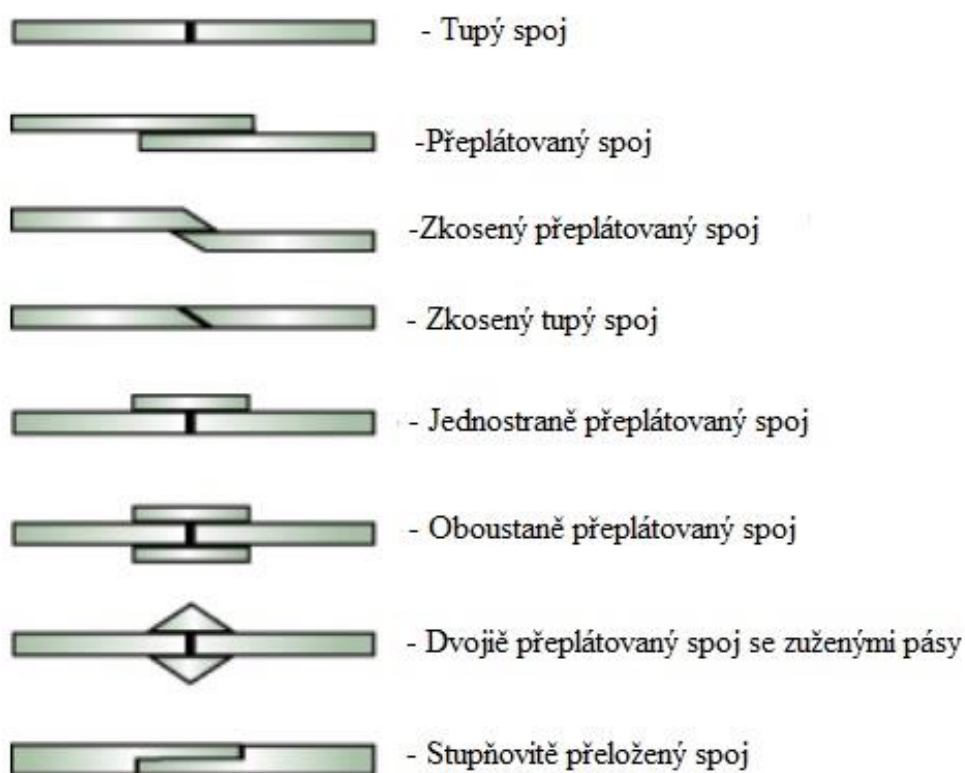
### **3.4.1 Konstrukce lepených spojů**

Lepenou konstrukci je nutné rozčlenit na části, které nejsou složité a jsou vhodné pro lepení. Je nezbytné se vyhnout dvojitému lepení. Většina lepených spojů má velmi dobrou pevnost ve smyku, ale jsou citlivá vůči namáhání v odlupování, proto je potřeba při

navrhování konstrukce lepeného spoje těmto namáháním předcházet nebo je co nejvíce minimalizovat. Základní typy lepených spojů jsou uvedeny na obrázku 3. [11] [7]

Návrh konstrukce spoje by měl splňovat pro dosažení požadované pevnosti a spolehlivosti lepeného spoje tyto podmínky:

- je důležité, aby mechanické namáhání bylo rozvrženo rovnoměrně a nebylo soustředěno pouze v místě spoje
- největší pevnost spoje musí být ve směru maximálního namáhání
- plocha lepeného spoje musí být dostatečně velká a napětí rovnoměrně rozdělené v celém spoji
- namáhání spoje musí být především ve smyku a v tahu a v odlupování by mělo být minimální
- lepicí vrstva by měla být rovnoměrná, souvislá a co možno nejtenčí
- koeficienty roztažnosti lepených materiálů by měli být stejné nebo alespoň podobné [11] [7]



Obrázek 3 Konstrukce lepených spojů [36]

### 3.4.2 Vliv teploty na pevnost lepených spojů

U většiny lepidel dochází již během krátkodobého zahřátí na teplotu 700 až 900 °C k tepelnému rozkladu. Při dlouhodobém vystavení lepidel nízkým teplotám (100 až 300 °C) dochází k takzvané termooxidační destrukci. Během teplotních změn může dojít v lepidle k fázové přeměně a ke změně jeho struktury. Důležité je také neopomenout teplotní roztažnost lepeného materiálu a lepidla. Teplotní roztažnost je jev, během kterého dané těleso se změnou teploty mění své rozměry. [12]

- Při teplotách v rozmezí od 20 °C do 40 až 50 °C pevnost ve smyku u některých lepidel ze začátku stoupá a poté až začíná klesat. Kritický pokles lepidel bývá převážně u všech lepidel při teplotách od 60 do 100 °C.
- Pevnost v odlupování s rostoucí teplotou zpočátku stoupá. V opačném případě pod teplotou 20 °C může dojít ke snižování pevnosti.
- Maximální rázová pevnost epoxidových a fenolformaldehydových lepidel bývá často v rozmezí teplot od 20 do 40 °C a u mekrylátových lepidel obvykle při teplotě 80 °C. K výraznému poklesu rázové pevnosti u většiny lepidel dochází při teplotách od +20 do -10 °C.
- Při nízkých hodnotách zatížení rychlost creepu lepených spojů za zvýšených teplot se po dané době snižuje. Při dlouhodobém zatížení lepených spojů pevnost ve smyku klesá, příčinou je působení vlhkosti. [3]

### 3.4.3 Vliv drsnosti na pevnost lepených spojů

Drsnost lepených povrchů se také často používá jako konstrukční parametr pro lepené spoje. Vzájemný vztah mezi nerovností a přilnavostí není příliš jednoduchý. Optimální profil povrchu se liší od jednoho lepidla k druhému, a především také závisí na druhu namáhání. Jeden z pozitivních účinků drsnosti povrchu je, že vede ke zvětšení povrchové plochy a tím i ke zvýšení počtu intermolekulárních vazeb a z toho odvozená vyšší pevnost. Současně ale platí, že ne při každém zdrsnění povrchu dochází ke zvýšení pevnosti spoje. Základem je zvýšit účinný povrch, který bude smáčen lepidlem. [3] [13]

Při dosažení molekulární rovinnosti povrchu dochází k samovolné adhezi bez potřeby lepidla. Z toho vyplývá, že povrch nemusí být pro lepení zdrsňován. Ale ve skutečnosti tomu tak není,

protože lepené plochy nikdy nedosahují dokonalé hladkosti. Nerovnosti se nacházejí i u leštěných povrchů.

#### **3.4.4 Vliv tloušťky lepené vrstvy**

Tloušťka lepidla má výrazný vliv na pevnost lepeného spoje. Ve skutečnosti neexistuje žádná ideální tloušťka lepené vrstvy, která by byla vhodná pro všechna lepidla. Optimální tloušťka vrstvy je jiná pro každou kombinaci lepidlo – povrchová úprava lepeného materiálu.

#### **3.4.5 Vliv vlhkosti**

Je-li lepený spoj ponořený ve vodě, tak lze vliv vody pokládat za difuzní proces. Po určité době nastane nasycení lepidla a ustavení rovnováhy. Doba, než dojde k tomuto stavu je závislá na poměru plochy a délky obnažené hrany.

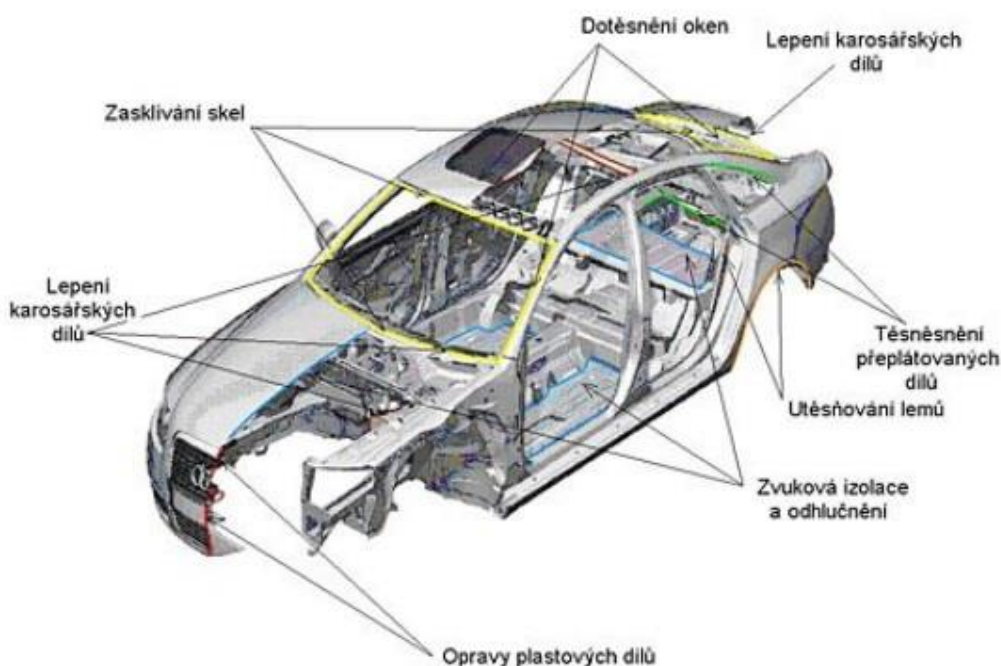
Při difuzním pronikání vody do lepeného spoje dochází k porušení mezimolekulárních a chemických vazeb uvnitř lepidla a dochází ke snížení koheze, což má za následek snížení pevnosti lepeného spoje. Tato změna je nevratná.

Vlivem působení nepříznivých podmínek často dochází ke korozi spojovaného materiálu a vlhkost proniká do mezifázového rozhraní lepidlo – spojovaný materiál. V této situaci nastává adhezní lom lepeného spoje.

Ať už porucha spoje nastává vlivem difusního pronikání vody do vrstvy lepidla, nebo vlivem podkorodování této vrstvy, je délka obnažené hrany zřetelná. Dopad vlhkosti na pevnost lepeného spoje je v dlouhodobém horizontu značný. [3]

## 4 Lepení v automobilovém průmyslu

Lepení patří k nejvíce se rozvíjejícím technologiím spojování materiálu. Rozvoj lepení v automobilovém průmyslu je dán souhrnem požadavků na karoserii, vývojem nových materiálů, vývojem nových povrchových úprav a také zvyšujícími se nároky na užité vlastnosti skeletu vozu. Celá konstrukce moderních automobilů je tvořena řadou kovových i nekovových materiálů a plastů, které je nutné upevnit a u nichž tradiční technologie spojování již nedostačují. Příklady využití lepidel v osobním automobilu je uveden na obrázku. 4. [14]



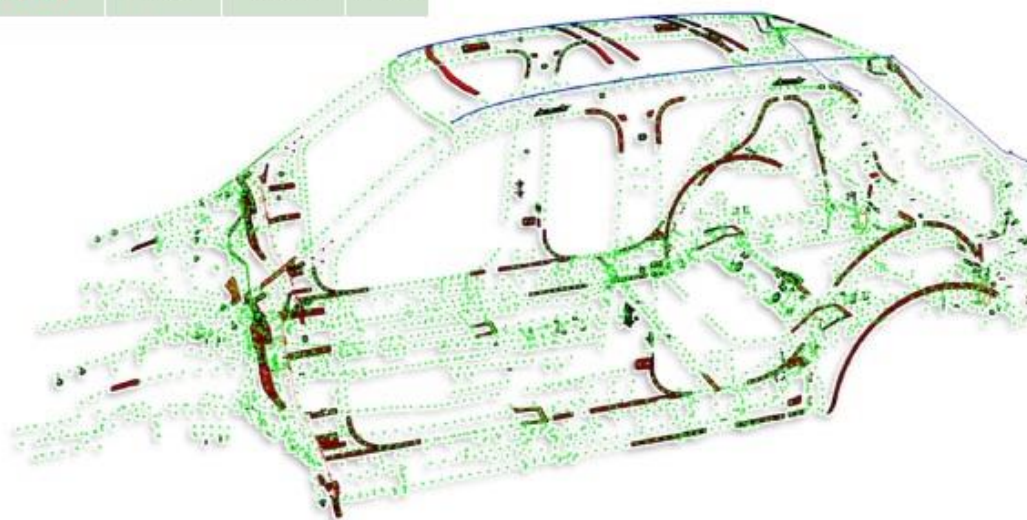
Obrázek 4 Lepidla ve výrobě karoserie [15]

Hlavním úkolem světových výrobců automobilů je snižovat celkovou hmotnost automobilů, což přináší riziko snižování bezpečnosti karoserie. Zvýšení bezpečnosti karoserie se dosahuje použitím vysokopevnostních ocelových plechů nebo strukturních lepidel, které mají velkou výhodu v tom, že jsou mnohonásobně lehčí než ocelové výztuhy. V posledních letech našly uplatnění ve stavbě osobních automobilů konstrukční materiály jako jsou např. slitiny na bázi hořčíku a hliníku, polymerní materiály, kompozity vyztužené uhlíkovými nebo kevlarovými vlákny. Zatím však žádný návrh výroby automobilové karoserie se neobejde bez použití technologie lepení. [15]



V současné době tvoří karoserie až 30 % celkové hmotnosti automobilu. Na materiálové složení karoserie jsou kladeny vysoké požadavky, které souvisí s technologickou zpracovatelností, funkčností, životností a kvalitou dílů. Této vývojové tendence se musí také držet používaná lepidla. Lepidla už nejsou využívána pouze k doplňkovým funkcím, ale výrazně se také podílejí na zvýšení tuhosti, pevnosti a bezpečnosti. Poslední dobou dochází ke vzrůstu množství lepidel při výrobě karoserie. Na obrázku 5 lze vidět vývoj používání jednotlivých spojovacích technologií na vozidle Škoda Fabia. [15]

	Fabia II	Fabia III	$\Delta$
Svařovací body [ks]	3 820	3 884	+64
Tavné sváry [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 Jednotlivé spojovací technologie ve výrobě karoserie vozu Škoda Fabia [16]

Použitím technologie lepení při výrobě karoserie automobilu je obecně dosahováno zvýšení pevnosti, zvýšení bezpečnosti při nehodě, snížení výrobních nákladů, těsnosti spojů, úspory hmotnosti snížením tloušťky plechů, zvýšení odolnosti karoserie vůči korozi a zvýšení zvukové izolace. [15]

## 4.1 Lepidla používaná při výrobě karoserie

Dnes je na trhu celá řada renomovaných výrobců lepidel. K hlavním světovým výrobcům patří např. SIKA Schweiz AG, 3M, Henkel KG a A, Dow Automotive AG aj. Stále se vyvíjí nové typy lepidel s ohledem na specifické požadavky. Součet nabídky lepidel tří největších evropských výrobců lepidel je přes 50 druhů lepidel využívaných pro automobilový průmysl. V tomto výsledku nejsou započítány vývojové varianty. [15]

Při výrobě karoserie se využívají kaučuková lepidla, lepidla na bázi epoxidových pryskyřic, a také lepidla polyuretanová.

### 4.1.1 Polyuretanová lepidla

Polyuretan nebo ve zkratce PU někdy také PUR je polymer složený z jednotek organických řetězců spojených uretanovými nebo karbamátovými vazbami. Polyuretanové polymery jsou tvořeny reakcí isokyanátu a polyolu. Polyuretanová lepidla jsou také známy jako elastická lepidla, protože mají mimořádnou elasticitu a prodloužení před porušením. A také jako epoxidová lepidla existují tuhá polyuretanová lepidla, které mají vysokou pevnost kolem 25 MPa. Existují 3 různé typy polyuretanových lepidel [17]:

- dvoukomponentní polyuretanová lepidla
- jednokomponentní polyuretanová lepidla vytvrzující teplem– pevná
- jednokomponentní polyuretanová lepidla vytvrzující vlhkostí– elastická

U Jednokomponentních polyuretanových lepidel vytvrzujících vlhkostí závisí především na koncentraci vlhkosti, vytvrzování může být urychleno použitím “ booster“, což je přípravek, který obsahuje převážně vodu a je smíchán s lepidlem v míchací trysce. Typickou vlastností tohoto lepidla je vysoká elasticita. Pro zajištění adheze je nutné použít primery a aktivátory. [17]

U Jednokomponentních lepidel vytvrzujících teplem je nutné vystavit lepidlo teplotám 100 až 200 °C, aby se uvolnila isokyanátová skupina nezbytná pro vytvoření polyuretanu. Přínos tepelné energie způsobuje nižší stupeň vytvrzování ve srovnání s jednokomponentním polyuretanovým lepidlem vytvrzující vlhkostí, přičemž vytváří silně zesíťované polymerní struktury nebo vlastnosti termosetického materiálu. To je důvod, proč jsou tyto lepidla

považovány za tuhá lepidla, protože mají vysokou odolnost vůči zatěžování díky struktuře termosetů hlavních polymerů. Hlavními přednostmi tohoto lepidla jsou vysoká pevnost a vysoká odolnost proti únavě. [17]

Dvoukomponentní polyuretanová lepidla mohou být elastická nebo tuhá, v závislosti na struktuře hlavních polymerů, která je elastomerní nebo termosetová. Základní složky tohoto lepidla jsou pryskyřice (polyoly s nízkou molekulovou hmotností) a tužidlo (nízkomolekulární prepolymery s izokyanátovými povrchy). Polyreakce probíhá polyadicí, což vede k mřížkové struktuře termosetového polymeru nebo elastomerového polymeru, čímž vzniká tuhé polyuretanové lepidlo pro první případ a elastické polyuretanové lepidlo pro druhý případ. [17]

Polyuretanová lepidla mají schopnost přilnout k mastným povrchům, což je ve výrobě karoserie nezbytné. Zpočátku byla tato schopnost nedostatečná, ale v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí, bylo dosaženo značného zlepšení přilnavosti k mastným povrchům. Polyuretanové lepidlo se také používá jako montážní nebo výplňové lepidlo. Polyuretanové lepidlo samo o sobě se jako konstrukční používá výjimečně. Je používáno pro lepení předních a zadních oken automobilů, autobusů a letadel. Dále se také používá k lepení doplňkových dílů na karosérie. Polyuretanová lepidla mají dobré tlumící a těsnící vlastnosti. [18]

#### **4.1.2 Kaučuková lepidla**

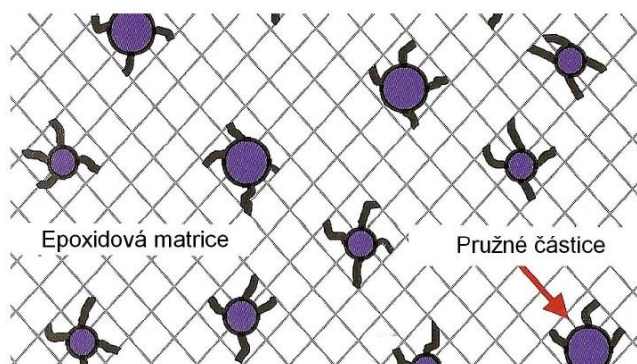
Kaučuková lepidla velmi dobře snášejí olej, protože mají nízké teploty zesílení. Aby bylo dosaženo vyššího modulu pružnosti, musí dojít k silnému chemickému zesílení. Tím že se zvýší hustota zesílení, dochází tak ke zvýšení teploty skelného přechodu. A takto se získá vysoce pevné kaučukové lepidlo. Dříve byly kaučuky využívány pouze jako tmely nebo výplňová lepidla, popřípadě se přidávaly do epoxidové pryskyřice, což už ale neplatí. Dnes bývá smyková pevnost kaučukových lepidel kolem 12 MPa. [18]

Kaučuková lepidla slouží pro spojení a utěsnění povrchů plechů. Typické použití kaučuků je spojení vnitřních výztuh kapoty nebo střechy, kde je využíváno tlumících a antivibračních vlastností kaučukových lepidel. Dále se kaučuková lepidla aplikují na korozně exponovaná místa, jako jsou například řezové hrany plechů apod. [14]

### 4.1.3 Epoxidová lepidla

Epoxidová pryskyřice je sama o sobě velmi křehká, ale existuje několik způsobů, jak zvýšit její houževnatost. Mezi tyto způsoby patří např. chemické modifikování hlavního řetězce, zvyšování molekulární váhy, snižování hustoty vazeb mezi řetězci matrice, rozptýlení houževnaté fáze v matici polymeru a přidání organických plničů do čisté pryskyřice. Z těchto postupů byl nejefektivnější způsob rozptýlení houževnaté fáze v matici. Přísady jsou reaktivní nebo nereaktivní kaučuk. Přidáním kaučukových plnidel sice vzroste houževnatost, ale ostatní mechanické vlastnosti klesají. Nový postup pro zvýšení houževnatosti epoxidové pryskyřice je začlenění nanoplavidel v systému lepidla. Epoxidová lepidla pro svoje dobré vlastnosti jako jsou vysoká pevnost, dobrá přilnavost k mastnotám na lepeném dílu, dlouhá doba skladovatelnosti jsou první volbou mezi kategoriemi strukturních lepidel. Nejdříve ale musel být vyvinut nový modifikační systém, který by zvýšil houževnatost spoje. Houževnatost platí ve velmi širokém rozsahu teplot. [18]

Kategorie těchto lepidel je progresivní při vyšších teplotách skelného přechodu. Modifikace pro optimální rázovou vlnu. Už před 20 lety byla k tomu používána směs houževnatého kaučuku, což vedlo k zřejmému zlepšení rázové houževnatosti epoxidového lepidla. Toto lepidlo bylo nedostačující pro použití v oblastech vozidla, kde mohlo dojít k deformaci nárazem. Dále byl vyvinut dvoukomponentní systém s modifikací rázové houževnatosti, u kterého bylo dosaženo lepších vlastností (Obrázek 6). [18]

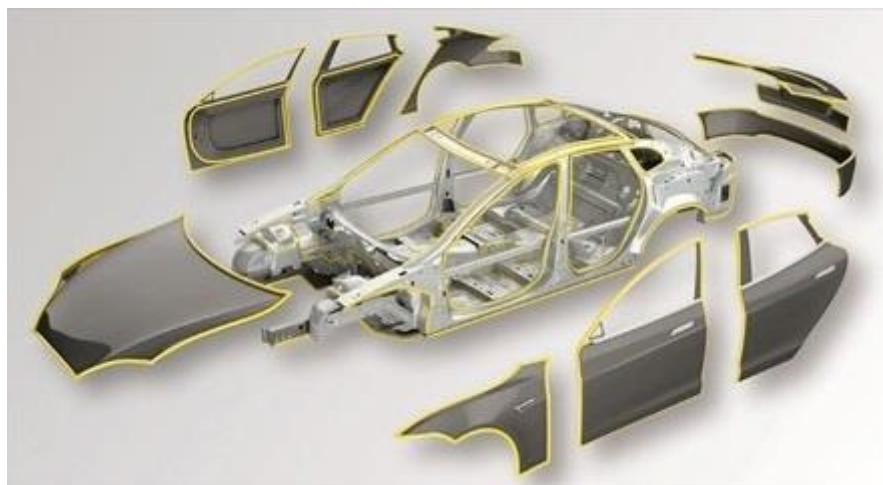


Obrázek 6 Modifikovaná epoxidová pryskyřice [18]

Reaktivní epoxidová matrice je sloučena s tvárnými oblastmi, které mají velikost zhruba od 500 do 2000 nm. Tyto tvárné oblasti jsou výsledkem reakce isokyanátu, polyolu a pryskyřice. Ostatní reakční produkty plní funkci flexibilizátorů. Tato kombinace při rázovém

zatížení a při místní vysoké špičce napětí, snižuje koncentrace energie, a tak zabraňuje rozšiřování trhlin a absorbuje deformační energii. [18]

Epoxidová lepidla díky svým pevnostem navyšují celkovou tuhost konstrukce automobilu. Typickými aplikacemi epoxidů jsou lemové spoje panelových dílů (dveře, kapoty a páté dveře) nebo oblasti v podlahových částech karoserie. Epoxidová lepidla mají řadu výhod, mezi které patří vysoká pevnost, dobrá přilnavost, vysoká teplota skelného přechodu, stabilita a jsou aplikovatelná na mastné povrchy. Na obrázku 7 jsou znázorněny případy použití epoxidových pryskyřic v konstrukci karoserie. [14] [19]



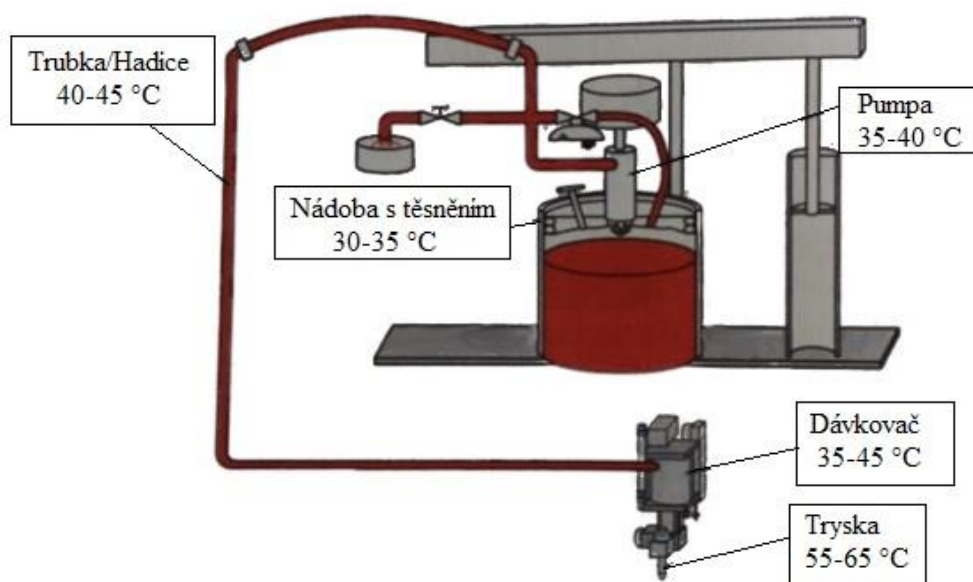
*Obrázek 7 Použití epoxidových lepidel v konstrukci karoserie [14]*

Převážná část svařovenských lepidel je na bázi jednokomponentních materiálů. To znamená, že je tvrdidlo promícháno a rozpuštěno v pryskyřici. Svařovská lepidla se používají při výrobě karoserie v oblasti svařovny, to je předtím, než projde celá karoserie kataforézou. Kataforéza je technologie nanášení barviva, při které se lakované součásti namáčejí ve vodou ředitelné pigmentové barvě za přítomnosti chemikálií potřebných pro předúpravu lakovaných součástí. Aktivace tvrdidla se odehrává za zvýšených teplot při kataforetickém lakování a jeho vypalování. Je třeba aby karoserie dosáhla teploty 180 °C po dobu alespoň 15 minut. V této fázi dochází k aktivaci lepidla a vytvoření pevných adhezních a kohézních vazeb. U dvoukomponentních lepidel je tvrdidlo odděleno od pryskyřice a k jejich vzájemné chemické reakci dochází až po smíchání. Dvoukomponentní lepidla se ve výrobě karoserie používají ojediněle. [15] [14]

Montážní lepidla se využívají pro montáž ostatních dílů na karoserii. Tyto lepidla vytvrzují působením vzdušné vlhkosti. [15]

## 4.2 Způsoby aplikace lepidel

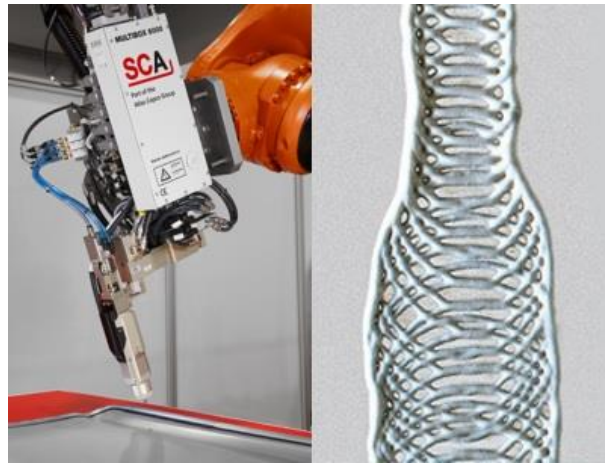
V automobilovém průmyslu se pro aplikaci lepidel využívají moderní dávkovací a nanášecí zařízení, tyto jednotky spolu vzájemně spolupracují. Nanášecí systém pomocí trysky aplikuje lepidlo přímo na povrch. Velikost a pohyb trysky při aplikaci lepidla rozhoduje o velikosti housenky. Lepidlo je nanášeno pod vysokým tlakem a popřípadě je navíc ještě rozstříkáváno pomocí tlakového vzduchu. Systém tlakového vzduchu v současnosti ustupuje, tento systém výrazně znečišťuje pracoviště a je ztrátový. Lepidlo je dopravováno dávkovacím systémem pod určitým tlakem a při určité teplotě. Pumpy dopravují lepidlo k nanášecím tryskám přímo z balení dodávaných výrobcem (většinou ze sudů). Schéma nanášecího pracoviště je znázorněno na obrázku 8. [15]



Obrázek 8 Schéma nanášecího systému [15]

Robotická pracoviště umožňují velmi přesné nastavení nanášecích parametrů. Lepidlo může být aplikováno ve formě jemných kapek volně rozptýlených po povrchu až po dlouhé několikacentimetrové housenky. V současnosti se také aplikují housenky ve formě šroubovice. Rotace housenky je docíleno pomocí stlačeného vzduchu nebo pomocí elektrostatického pole. Systém, který využívá elektrostatické pole se nazývá E-Swirl. Tento systém umožňuje lépe regulovat přetoky lepidel, je ekonomický a rychlý. Na velké plochy se používají trysky, které lepidlo rozprašují na povrch jako vysoce viskózní kapalinu. Pro kruhové plochy se používají

rotační trysky. Na obrázku 9 je příklad aplikace lepidla pomocí rotační trysky, tzv. E-Swirl technologie. [15] [14]



Obrázek 9 E-Swirl technologie [37]

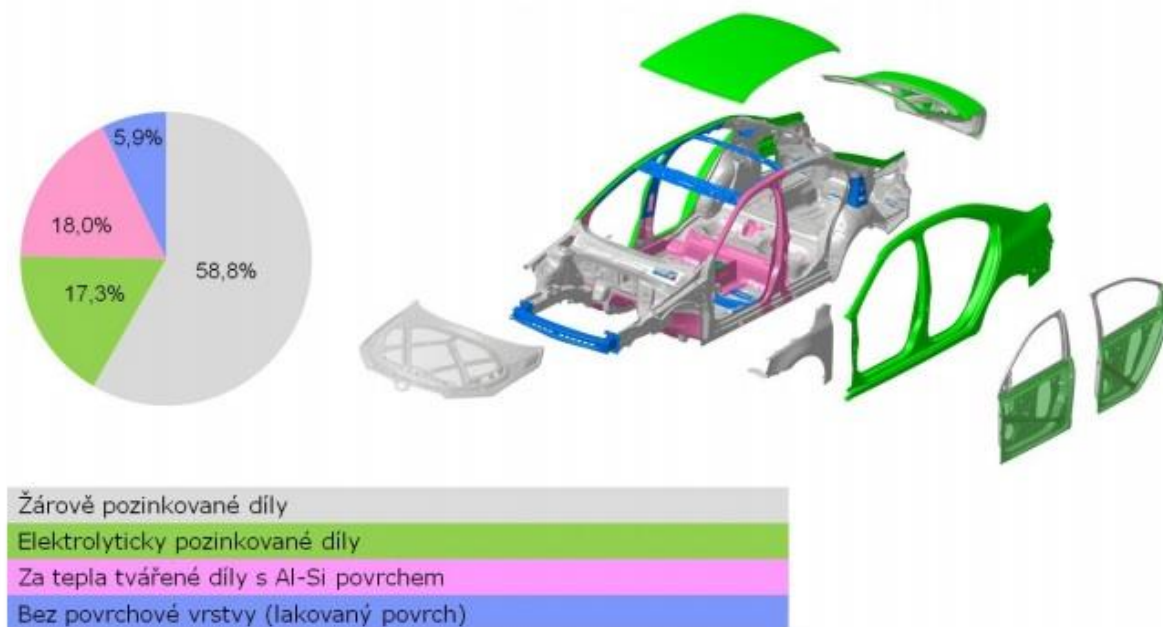
### 4.3 Typy povrchů při výrobě karoserie

Poslední dobou se někteří výrobci kvůli úspoře hmotnosti snaží prosadit co nejvyšší podíl hliníkových plechů. Ale ty zatím nejsou z ekonomického hlediska vhodné pro sériovou výrobu. I proto jsou ocelové plechy stále nejpoužívanějším materiálem pro výrobu karoserií. Různý druh, tloušťka používaných plechů a v první řadě typ jejich povrchové úpravy jsou hlavními činiteli, kteří ovlivňují adhezi lepidel k povrchu. [15]

#### 4.3.1 Ocelové plechy s povlaky

V posledních letech velmi vzrůstají požadavky na kvalitu protikorozní ochrany automobilových karoserií, protože životnost automobilu je z určité části ovlivněna životností ocelové karoserie. Životnost povlaků je především závislá na dokonalé vazbě mezi povlakem a základním materiálem, dále závisí také na tvařitelnosti povrchové vrstvy. Problémem při použití povlakových plechů je, že během lisování dochází k zadírání nebo stírání povlaku. [20]

V automobilovém průmyslu jsou nejvíce využívány plechy s povlaky na bázi zinku. Zinek vyniká především výbornou korozní ochranou, nízkou cenou a svými elektrochemickými vlastnostmi. U ocelí, které jsou tvářeny za vysokých teplot, se používá ochranný povlak slitiny hliníku a křemíku. Na obrázku 10 jsou znázorněny ochranné povlaky na voze Škoda Octavia III.



Obrázek 10 Ochranné povlaky Škoda Octavia III [38]

V praxi se uplatňují hlavně tyto postupy vytváření ochranných povlaků:

**Al-Si povrchová vrstva** – Vysokopevnostní ocele tvářené za tepla jsou dodávány z oceláren zákaznickovy již s povrchovou vrstvou Al-Si. Povrchová vrstva Al-Si je na ocelové plechy nanášena žárově a její složení je přibližně 90 % hliníku a 10 % křemíku. Bez této vrstvy by docházelo k vysokoteplotní oxidaci a k tvorbě okují při přepravě do lisu.

**Technologie žárového zinkování** – Tato technologie spočívá v namáčení ocelových plechů do tekutého zinku o teplotě cca 450 °C, přičemž dochází mezi železem a zinkem k metalické reakci. Při žárovém zinkování mívá dosažená vrstva zinkového povlaku tloušťku 7 až 200 μm.

**Technologie galvanického (elektrolytického) zinkování** – Při této metodě nedochází na rozdíl od žárového zinkování ke změnám mechanických vlastností (hlubokotažnost), zinkový povlak společně s konverzní vrstvou zajišťuje bezproblémovou přilnavost organického povlaku. Touto technologií lze připravit velmi tenké vrstvy až 3 μm.



**Nanášení organických povlaků** – Nátěrové hmoty, které mají sami o sobě dobrou korozní odolnost [21] [22]

**Vytváření nosných povlaků pro mazivo fosfátováním** – Použití vhodného maziva je jeden z hlavních předpokladů pro bezproblémové lisování. Vytvořením vhodného mazacího filmu mezi materiálem a nástrojem, lze snížit tření natolik, aby nedocházelo k opotřebením nástrojů a zadírání materiálu. Fosfátováním se vytváří na čistém kovovém povrchu souvislá vrstva nerozpustných fosforečnanů železa, zinku nebo manganu. Tato vrstva slouží jako dočasná ochrana proti korozi s dobrou adhezní vrstvou pro barevný povlak. Fosfatizační vrstva není dokonalá krystalická vrstva, ale mezi jednotlivými krystaly jsou póry. Tyto póry zpřechňují dobré ulpívání maziva na kov. Množství maziva na povrchu ocelového plechu se pohybuje v rozmezí 3-5 g/m<sup>2</sup> podle typu maziva a požadavků zadavatele. [23]

Při lepení karosářských výlisků se mazivo z plechového dílu neodstraňuje, jelikož by touto operací došlo výrazně ke zvýšení ekonomiky provozu montážních linek. Proto je potřeba používat lepidla, která jsou schopna vytvořit pevný spoj i přes tento negativní jev.

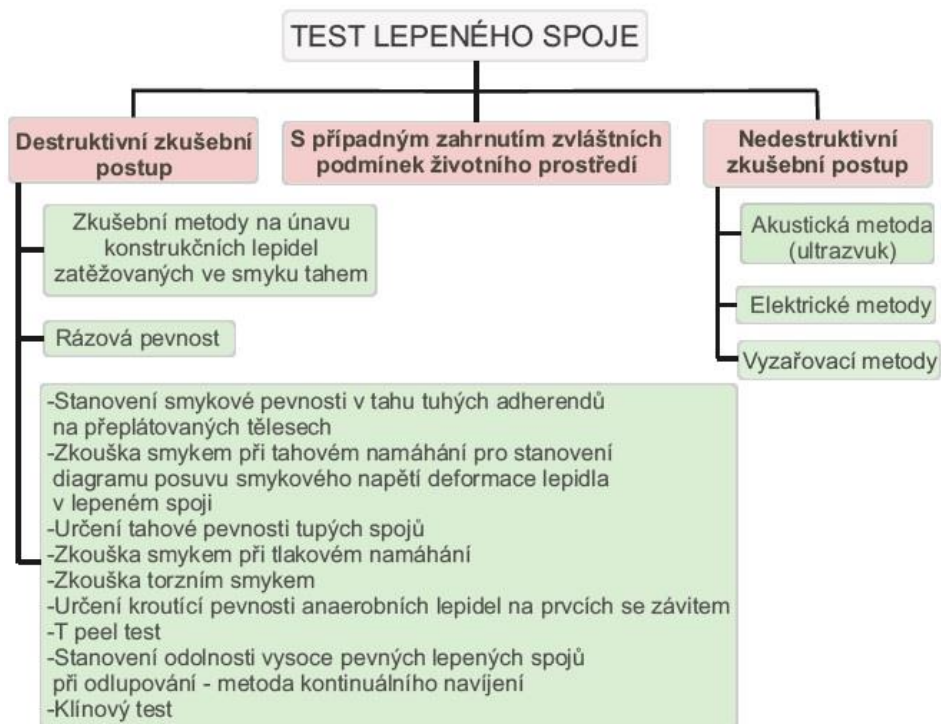
## 5 Hodnocení lepených spojů

V dnešní době je možné hodnotit nejzákladnější charakteristiky lepidel pomocí zkoušek, které jsou stanoveny příslušnými normami. Jsou to zkoušky hodnotící všeobecné vlastnosti lepidel (např. barva, transparentnost aj.) a zkoušky hodnotící chemické vlastnosti lepidel (např. reaktivitu atd.) Tyto zkoušky si výrobci lepidel provádějí sami a udávají je v technickém nebo bezpečnostním listu lepidla.

Po zhotovení lepeného spoje hodnotíme především pevnost a ostatní mechanické vlastnosti spoje. Pevnost a mechanické vlastnosti spoje závisí hlavně na použitém lepidle, na konstrukci spoje, tvaru spoje, způsobu namáhání a typu lepeného materiálu. Zkoušky mechanických vlastností lepených spojů se rozlišují na dvě hlavní skupiny: [7]

- destruktivní
- nedestruktivní

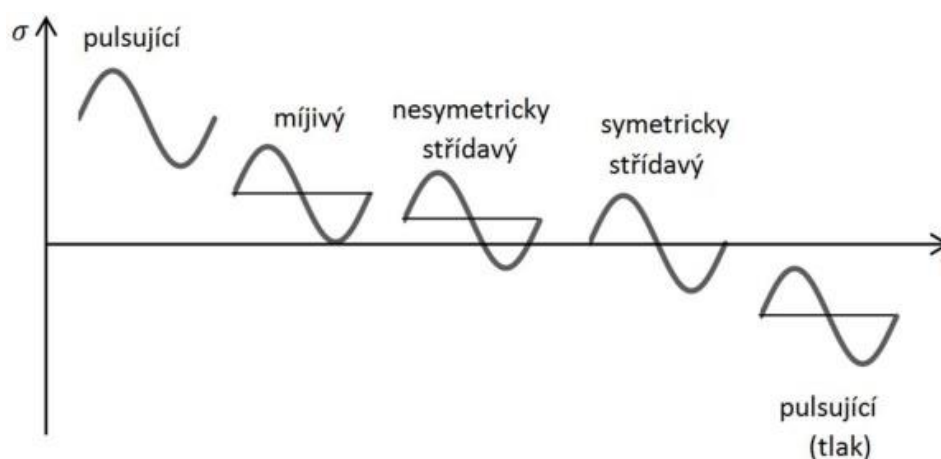
Základní rozdělení zkušebních metod je schematicky znázorněno na obrázku 11



Obrázek 11 Rozdělení zkoušek lepených spojů [vlastní zpracování]

## 6 Obecná teorie únavy kovových materiálů

Je-li strojní součást podrobena časově proměnlivému působení vnějších sil, dochází po určité době k jejímu lomu. Únavový lom je výsledkem mikroskopických pochodů probíhajících ve struktuře materiálu. I když velikost těchto vnějších sil je tak malá, že kov při jejich statickém působení nevykazuje známky porušení. Postupné rozrušování materiálu při proměnlivém zatěžování je nevratný proces, který se v závěru tohoto procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomu. Únava se dělí na únava vysokocyklovou (počet cyklů do lomu je řádu  $10^5$  a výše) a nízkocyklovou (počet cyklů do lomu je řádu  $10^4$  a méně) Proměnlivé zatížení je rozděleno do několika druhů dle vzájemného vztahu nejvyššího a nejnižšího napětí v cyklu. Jednotlivé typy jsou znázorněny na obrázku 12. [24] [25]



Obrázek 12 Charakter cyklu [40]

### 6.1 Stádia únavového procesu

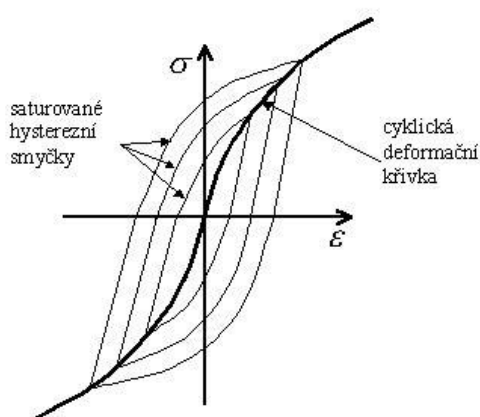
Podle typů nevratných změn, které jsou způsobeny cyklickou plastickou deformací, lze únavový proces rozdělit na tři stádia. Jsou to stádia změn mechanických vlastností, nukleace trhlín a šíření trhlín. [24] [25]

#### 6.1.1 Stádium změn mechanických vlastností

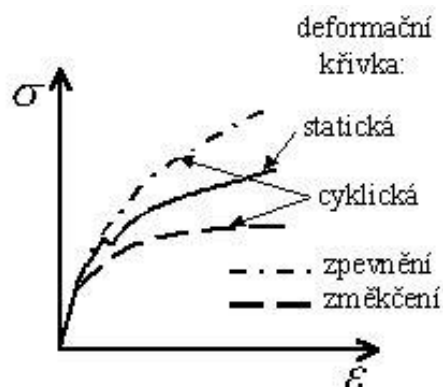
Cyklické namáhání materiálu vede ke změnám jejich struktury, a tím také ke změnám jejich fyzikálních vlastností. Všechny tyto změny jsou zpravidla saturačního charakteru, to znamená, že jsou nejvýraznější na začátku cyklického namáhání. S narůstajícím počtem cyklů dochází k poklesu intenzity těchto změn a po určitém čase je dosaženo určitého stavu nasycení. Nejzávažnější změny jsou změny mechanických vlastností, především odpor materiálu proti

deformaci. Tento odpor materiálu proti cyklické deformaci může v průběhu únavového procesu vykazovat rostoucí nebo klesající tendenci. Nejvýstižnější charakteristikou mechanických změn je hysterezní smyčka. [24] [25]

Po skončení cyklického zpevnění nebo změkčení se vytvoří saturovaná hysterezní smyčka. Jednotlivými vrcholovými body hysterezních smyček proložíme křivku a tím dostaneme závislost mezi amplitudou napětí a amplitudou deformace v ustáleném stavu. Tato křivka je označována jako cyklická křivka napětí – deformace (obrázek 13). Porovnání této křivky s tahovým diagramem, zjistíme, zda se materiál cyklicky zpevňuje nebo změkčuje. Na obrázku 14 je znázorněno cyklické změkčení a zpevnění materiálu. [24] [25]



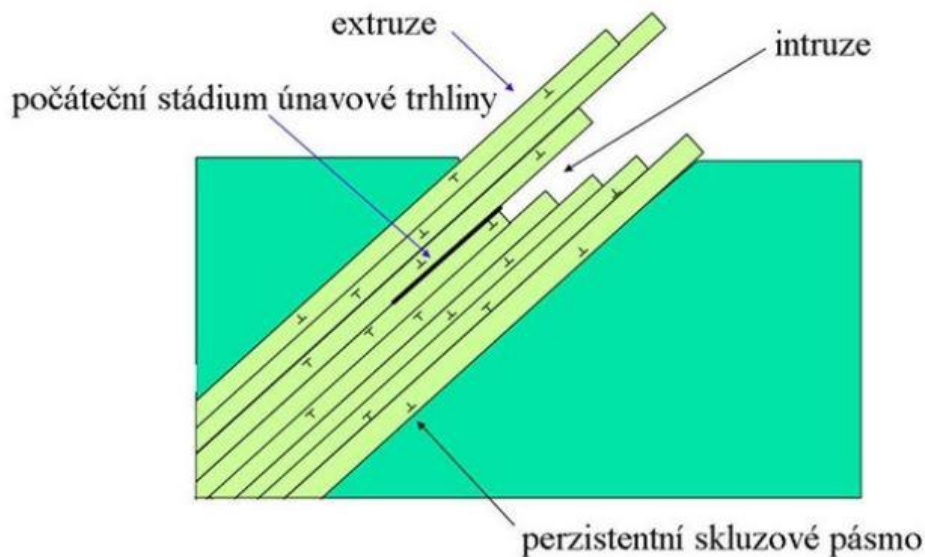
Obrázek 13 Cyklická křivka [42]



Obrázek 14 cyklické změkčení a zpevnění [42]

### 6.1.2 Stádium nukleace únavových trhlin

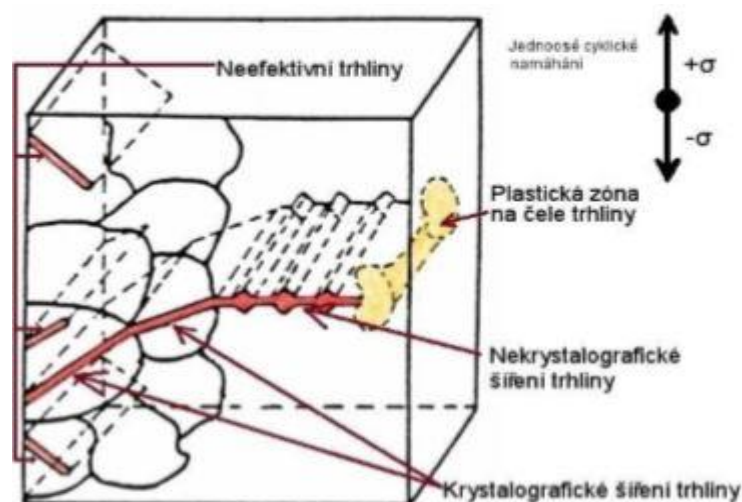
Nukleace trhlin vznikají vždy na volném povrchu. Často stav povrchu rozhoduje o únavové pevnosti. Nukleace probíhá v únavových skluzových pásech, na hranicích materiálových zrn a na rozhraní mezi inkluzemi a maticí. Nejčastěji se uplatňuje nukleace v únavových skluzových pásmech. Nukleace v únavových pásmech předchází nukleaci na hranicích zrn či na rozhraní mezi inkluzí a maticí. V těchto místech se koncentruje cyklická plastická deformace a v místech kde vyúsťují na povrch vznikají perzistentní skluzové stopy. Tyto stopy jsou charakterizovány jako extruze a intruze. Extruze a intruze jsou koncentrátoři napětí jsou zdroji únavového poškození. Na obrázku 15 je zobrazena iniciace únavové trhliny. [24] [25]



Obrázek 15 Iniclace únavové trhliny [41]

### 6.1.3 Stádium šíření trhlin

Nukleační stádium končí právě tehdy když se začínají vytvářet povrchové mikrotrhliny. Mikrotrhliny leží podél skluzových rovin, ve kterých je největší smykové napětí. V průběhu času se tyto trhliny propojují a prohlubují podél skluzových rovin. Tato etapa je nazývána jako první stádium krystalografického šíření. S postupným prohlubováním se trhliny začínají vychylovat z aktivní skluzové roviny do směru kolmého k hlavnímu tahovému napětí. Tato fáze je označována jako druhá etapa šíření únavové trhliny a jedná se o nekystalografické šíření trhlin. Šíření trhlin v druhé etapě končí náhlým lomem. [24] [25]



Obrázek 16 Šíření únavové trhliny [41]

## 7 Metodika experimentálního programu

V této kapitole budou popsány jak použité přístroje, materiály tak i příprava testovaných vzorků a popsání provedených zkoušek. V rámci výzkumu byla využita jednosložková polyuretanová hmota, která se využívá na spoje plechů. Zkouškám byli podrobeny vzorky se čtyřmi povrchovými úpravami.

Zkoušky jsou rozděleny na dvě části, první část zkoušek je zaměřena na stanovení vlivu rychlosti zatěžování na vlastnosti lepeného spoje. Tato část zkoušek byla provedena ve spolupráci s Polytechnickou univerzitou v Lublinu fakultou strojní v rámci programu Erasmus. Druhá část zkoušek se uskutečnila v laboratorních prostorách Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze a byla zaměřena na objasnění únavového chování konstrukčních lepidel. U obou částí zkoušek je zároveň sledován vliv jednotlivých povrchových úprav na vlastnosti lepeného spoje.

### 7.1 Charakteristika použitého lepidla

Pro výzkum byl využit polyuretanový tmel, který bude v této kapitole detailně popsán.

#### 7.1.1 RPS 45 polyuretanový těsnící tmel ROBERLO

RPS 45 se používá pro utěsnění, spojování a lepení různých materiálů používaných v automobilovém průmyslu. Jedná se o snadno aplikovatelný produkt, který nabízí vynikající přilnavost k základovým nátěrům, lakovaným povrchům, kovům a lakovaným plastům. Je přelakovatelný všemi běžnými druhy laků. RPS45 má vysokou rychlost vytvrzování díky atmosférické vlhkosti. Po zaschnutí se vyznačuje dobrou odolností vůči vodě, vlhkosti, kyselinám, zásadám, změnám teploty nebo vibracím. [26]

Technické údaje:

Báze:	Polyuretan
Barva:	Bílá
Specifická váha:	1,3 kg/l při 20 °C
Rychlost tuhnutí:	4 mm každých 24 h při 23 °C a 65 % R.H. (R.H.=relativní vlhkosti vzduchu)
Pracovní teplota:	od +5 °C do +40 °C
Odolnost teplotám:	-40 °C do +90 °C



Obrázek 17 Roberlo RPS 45 [26]

## 7.2 Použité vybavení

Pro provedení výzkumu bylo využito několik přístrojů, nejdůležitější z nich jsou zde popsány.

### 7.2.1 Tabulové nůžky NTC 2500/4

Tabulové nůžky NTC 2500/4 jsou poháněny elektromotorem o výkonu 5,5 kW. Umožňují stříhat plechy pevnosti 500 MPa o maximální tloušťce 4 mm. Maximální délka stříhu je 2550 mm. Počet zdvihů stříhací traverzy je 60/min

### 7.2.2 Tryskací kabina ITB – 65

Tryskací kabina (Obrázek 18) je v injektorovém provedení, což je vhodné zvláště pro povrchové zušlechťování, matování skla apod. Regulace výkonu u tohoto systému je velmi snadná. Lze použít širokou škálu abraziv. Ke tryskací kabině je připojen odsávač, který slouží k odvedení prachu a vzduchu přiváděného tryskou. Bez připojení odsavače by unikl prach z kabiny. Dále je mezi tryskací kabinou a odsavačem zařazen cyklon, který separuje dále použitelné abrazivo od jemného prachu. [27]



*Obrázek 18 Tryskací kabina ITB - 65[vlastní zpracování]*

Vnitřní rozměr tryskací kabiny je 650 x 500 x 500 a je povrchově upraven odolným práškovým plastem. Zadní stěna je pogumovaná. Kabina je vybavena dvěma zářivkami a dvojitým sklem. Vnitřní sklo je snadno vyměnitelné a chrání vnější sklo před poškozením odraženým abrazivem. Manipulaci uvnitř kabiny umožňují gumové rukavice, které jsou navlečeny na válcovou část průchodů. ITB-65 je vybavena dvěma utěsněnými dveřmi na bocích

kabiny. Pistole je osazena wolframkarbidovou tryskou, která je vysoce odolná proti otěru. Proces tryskání je ovládán pomocí pneumatického pedálu. [27]

### 7.2.3 Zkušební stroj Zwick/Roell Z150

Zkušební stroj řady Allround-Line Zwick Roell Z150 (Obrázek 19) je vhodný pro zkoušky tahem plochých a válcových tyčí, tlakem třibodovým ohybem a lomovou houževnatost s maximálním zatížením 150 kN. Zwick Roell Z150 může také modelovat cyklické namáhání. Stroj má dva zkušebními prostory, což umožňuje provádět dvě různé zkušební operace. Trhací stroj je vybaven silovým snímačem Xforce, který se vyznačuje velkou přesností a vysokou odolností vůči přetížení. Data jsou zpracovány a analyzovány pomocí softwaru testXpert. [28]

Tabulka 1 Základní technické parametry Zwick/Roell Z150

Zwick/Roell Z150	
Maximální zkušební síla	150 kN
Výška pracovního prostoru	1539 mm
Šířka pracovního prostoru	640 mm
Minimální zkušební rychlost	0,0005 mm/min
Maximální zkušební rychlost	900 mm/min
Rozlišení polohy příčnicku	0,0123 $\mu\text{m}$
Opakovatelnost změny polohy	2 $\mu\text{m}$
Přesnost řízení rychlosti	0,005%
Hmotnost zkušebního zařízení	750 kg
Rozměry stroje výška x šířka x hloubka	2161 x 960 x 766 mm

Zdroj: [28]



Obrázek 19 Zwick/Roell Z150 [39]

### 7.2.4 Zkušební stroj Labortech MPTest 5.050

Zkušební stroj MPTest 5.050 (Obrázek 20) je vhodný pro mechanické zkoušky v tahu a tlaku do 50 kN. Výška pracovního prostoru je 1000 mm a šířka 450 mm. Maximální zkušební rychlost je 1000 mm/min. Zařízení splňuje třídu přesnosti 0,1 dle normy EN 7500-1. [29]

Zařízení je osazeno siloměrem KAF-S pro maximální provozní sílu 5 kN. Stroj je řízen pomocí softwaru Test&Motion, který umožňuje testování materiálu v tahu, tlaku, ohybu stříhu cyklickém zatěžování. Součástí programu je přenos dat, tabulka naměřených hodnot a grafický záznam o provedené zkoušce. [29]

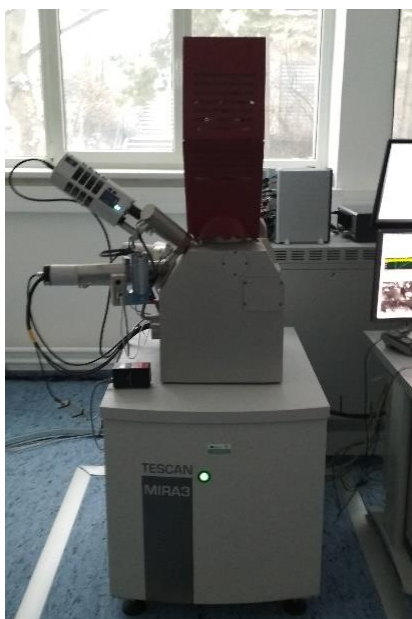




*Obrázek 20 Zkušební stroj Labortech MPTest 5.050 [vlastní zpracování]*

### **7.2.5 Elektronový mikroskop Tescan MIRA 3**

Mira 3 je velice výkonný skenovací elektronový mikroskop (SEM), který je vybaven vysoce citlivým Schotkyho emitorem pro vysoké rozlišení a nízkošumové zobrazování. MIRA 3 nabízí řadu výhod, které přicházejí s novými technologiemi a vývojem v SEM. MIRA 3 poskytuje rychlé pořizování snímků, technologii zpomalování paprsků (BDT) pro perfektní rozlišení při nízkých energiích elektronového paprsku, výborné zobrazení na krátkých vzdálenostech, plně automatizovanou elektronovou optiku, měření nevodivých vzorků, 3D zobrazení a mnoho dalších funkcí. [30]



*Obrázek 21 Elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3 [vlastní zpracování]*

## 7.2.6 Rozprašovač Quorum Q150R ES

Q150R ES je kompaktní rotační systém vhodný pro rozprašování neoxidujících kovů (např. Au, Pt, Ag a Pd) a také pro vytváření povlaků z uhlíkových vláken. Lze přesně nastavit tloušťku naneseného filmu. [31]



Obrázek 22 Rozprašovač Quorum Q150R ES [vlastní zpracování] [31]

## 7.3 Příprava vzorků

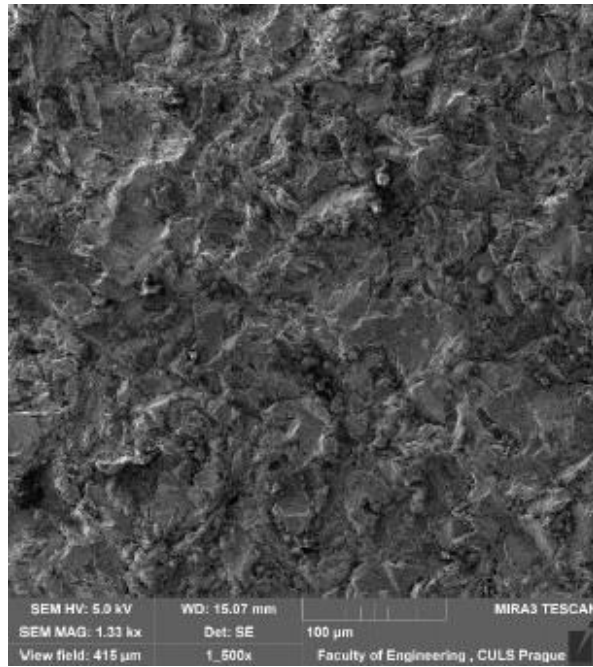
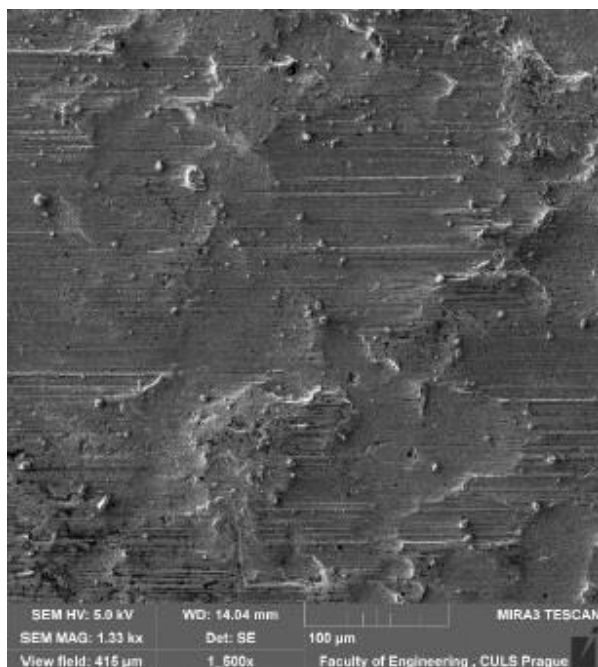
V této kapitole je popsána příprava vzorku pro statickou a kvazistatickou zkoušku ve smyku. Pro obě tyto zkoušky byla příprava vzorků totožná. Je zde také popsána příprava vzorků pro SEM analýzu

### 7.3.1 Příprava vzorků pro statickou a kvazistatickou zkoušku ve smyku

Vzorky byly nastříhány z tabule plechu o rozměrech 1500 x 2000 x 1,5 mm pomocí tabulových nůžek NTC 2500/4. Rozměry vzorků byly dodrženy v souladu s normou ČSN EN 1465 viz kapitola 2.4.1. Materiál plechu je konstrukční ocel S235J0. Pro zkoušky byly zvoleny vzorky se čtyřmi typy úpravy povrchu. U prvního typu povrchové úpravy jsou vzorky tryskány a následně odmaštěny, u druhého typu pouze tryskány, u třetího typu pouze odmaštěny a čtvrtý typ vzorků je bez úpravy povrchu.

Tryskání vzorků se uskutečňovalo v tryskací kabině ITB-65. Jako abrazivo byl použit granát MESH 80. Vzorky byly tryskány pouze z jedné strany, a to do vzdálenosti cca 20 mm aby bylo zaručeno, že lepená plocha bude celá otryskaná. K odmaštění vzorků byl použit aceton.

Na obrázku 23 je zobrazen povrch bez mechanické úpravy. U tohoto povrchu jsou drsnosti následující  $R_a = 1,19 \pm 0,17 \mu\text{m}$  a  $R_z = 6,55 \pm 0,90 \mu\text{m}$ . Na obrázku 24 je vidět tryskaný povrch. Drsnosti tohoto povrchu jsou  $R_a = 2,54 \pm 0,20 \mu\text{m}$  a  $R_z = 15,86 \pm 1,39 \mu\text{m}$ .



*Obrázek 23 Povrch bez mechanické úpravy [43]*

*Obrázek 24 Otryskaný povrch [43]*

Před lepením byly vzorky popsány, aby nedošlo k jejich záměně. Pro každý typ povrchové úpravy bylo zhotoveno 48 zkušebních vzorků, celkem bylo tedy zhotoveno 192 zkušebních vzorků.

Polyuretanové lepidlo Roberlo RPS45 se nejdříve nanoslo pomocí ruční pistole do misky a poté se aplikovalo pomocí dřevěné stěrky na lepené plochy. Po slepení se vzorky zatížily pomocí závaží o hmotnosti 300 g a nechaly vytvrdnout po dobu 24 hodin. Lepení probíhalo za pokojové teploty  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### **7.3.2 Příprava vzorku pro SEM analýzu lomové plochy**

Z lomové plochy zkušebních těles byly vyříznuty vzorky o rozměrech 10 x 10 mm pro každý typ povrchové úpravy. Poté byly vzorky očištěny v izopropylalkoholu. Pro zvýšení povrchové vodivosti byla pomocí rozprašovače Quorum Q150R SE nanosena na vzorky tenká vrstva zlata (5 nm). Na obrázku 25 jsou vzorky umyté v isopropylalkoholu a připravené na pozlacení. Na obrázku 26 jsou už vzorky pozlacené.



Obrázek 25 Vzorky umyté v izopropylalkoholu

Zdroj: [vlastní zpracování]



Obrázek 26 Pozlacené vzorky

Zdroj: [vlastní zpracování]

## 7.4 Použité normy

Aby výsledky experimentu mohly být mezi sebou vzájemně porovnávány, je nutné zkoušky provádět za určitých podmínek. Tyto podmínky udávají normy. V této práci byly použity následující normy ČSN EN 1465, ČSN EN ISO 9664 a ČSN ISO 103 65.

### 7.4.1 ČSN EN 1465 - zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem

Základem této zkoušky je namáhání lepeného spoje ve smyku statickým tahem v podélném směru až do porušení vzorku. Zkouška se provádí na standartních zkušebních tělesech podle předepsaných podmínek a průběhu zkoušení. Rozměry zkušebních vzorků jsou  $100 \pm 0,25 \times 25 \pm 0,25 \times 1,6 \pm 0,1$  mm. Doporučená velikost přeplátování je  $12,5 \pm 0,25$  mm. Zkušební vzorek je znázorněn na obrázku 27. [32]



Obrázek 27 Vzorek pro zkoušku ČSN EN 1465[vlastní zpracování]

Vzorek musí být symetricky umístěn do čelistí. Vzdálenost čelistí od vzorku je  $50 \pm 1$  mm. K poruše spoje má dojít v čase  $65 \pm 20$  s, podle toho se musí zvolit zatěžovací rychlost. Během zkoušky se zaznamenává nejvyšší dosažená síla, což je síla potřebná k přetržení zkušebního vzorku. [32]

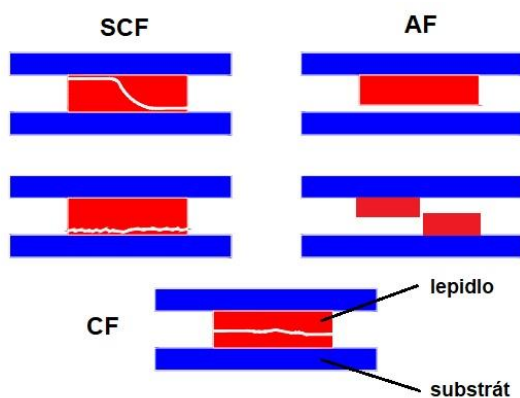
## 7.4.2 ČSN EN ISO 9664 - zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem

Cílem je zjistit charakteristiku konstrukčních lepidel na daném kovovém adherendu s určenou povrchovou úpravou. Hlavním principem zkoušky je cyklické namáhání zkušebního vzorku pulzujícím napětím. Počet cyklů při porušení se určí při dané amplitudě a středním napětí kmitu. Pomocí těchto hodnot se sestrojí únavové křivky, z čehož lze odhadnout oblasti spolehlivosti, vztahující se k odolnosti lepeného spoje. [33]

Zkušební přístroj musí být konstruován tak, aby byl schopen vyvíjet sinusoidní napětí a maximální zatížení se pohybovalo mezi 10 a 80 % rozsahu stupnice. Aby nedocházelo k nadměrnému zahřátí slepeného spoje, musí být frekvence 30 Hz a maximální frekvence 60 Hz. Přesnost měření je dána počtem zkušebních vzorků, minimum jsou čtyři zkušební vzorky. Jsou hodnoceny při třech různých hodnotách pulsujícího napětí tak, aby k porušení lepeného spoje došlo v rozmezí  $10^4$ - $10^6$  cyklů. Zkouška musí probíhat při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $50 \pm 5$  %.

## 7.4.3 ČSN ISO 10365 - Vyhodnocení porušení lepeného spoje

Podle normy ČSN ISO 10365 se vyhodnocují jednotlivé typy porušení. Tato norma stanovuje základní typy porušení, které mohou nastat při porušení lepeného spoje, a to bez ohledu na to o jaký typ použité mechanické zkoušky se jedná. Používá se pro kvalitní posouzení výsledků mechanických zkoušek adheze lepených spojů. Základní typy porušení lepených spojů jsou znázorněny na obrázku 28. V praxi se při lepení kovových materiálů nejvíce vyskytuje kohezní lom (CF), adhezní lom (AF) nebo speciální kohezní lom (SCF) [34]



Obrázek 28 Typy porušení lepeného spoje [vlastní zpracování]

## **7.5 Provedení zkoušek**

V této kapitole jsou podrobně popsány mechanické zkoušky a vyhodnocení porušení lepeného spoje. Za mechanické zkoušky v této práci byly zvoleny statická zkouška ve smyku a kvazistatická zkouška ve smyku.

### **7.5.1 Statická zkouška ve smyku**

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN 1465. Pro tuto zkoušku byl použit zkušební stroj Zwick/Roell Z150. Zkoušky byly provedeny při konstantních rychlostech 2, 50 a 100 mm/min. Pro každý typ povrchové úpravy, byly tedy odzkoušeny tři série zkušebních vzorků po osmy kusech. Dílčím úkolem této zkoušky bylo také získat referenční hodnoty maximální síly pro jednotlivé typy povrchové úpravy, ze kterých se dále určily dolní a horní meze maximální síly pro zkoušku kvazistatické pevnosti v tahu.

### **7.5.2 Kvazistatická zkouška ve smyku.**

Pro kvazistatickou zkoušku ve smyku byl použit zkušební stroj Labortech MPTest 5.050. Zkušební vzorky byly namáhány cyklicky, tak že zatěžovací síla pulzovala mezi 5 a 30 % referenční hodnoty maximální síly. Referenční hodnoty maximální síly pro jednotlivé povrchové úpravy se získaly statickou zkouškou ve smyku. Rychlost zatěžování byla nastavena 2 mm/min. Počet cyklů, při kterých byly zkušební vzorky zkoušeny jsou 200, 500 a 1000 cyklů. Při této zkoušce byly tedy také odzkoušeny pro každý typ povrchové úpravy tři série zkušebních vzorků po osmy kusech. Cyklování se po daném počtu cyklů automaticky ukončí a zkušební stroj začne vyvíjet konstantně se zvyšující sílu. Takto byla zjišťována pevnost.

Během obou zkoušek byly zkušební vzorky upnuty do čelistí zkušebního stroje a to tak, aby se podélná osa zkušebního vzorku shodovala s osou zkušebního stroje. Čelisti byly dostatečně utaženy, aby nedocházelo k prokluzu zkušebního vzorku, což by znehodnotilo výsledky měření. Pomocí ovládacího programu byla zkouška spuštěna a probíhala vždy až do porušení lepeného spoje. Během zkoušky se zaznamenávaly tyto parametry síla, čas a prodloužení. U každého zkušebního vzorku byla změřena délka a šířka lepeného spoje pomocí posuvného měřítka.

### 7.5.3 Vyhodnocení porušení lepeného spoje

Porušení lepených spojů bylo nejdříve vyhodnocováno vizuálně. Vyhodnocení bylo založeno na rozhodnutí, zda se jedná o adhezní lom nebo kohezní lom. Poté byla provedena analýza lomových ploch pomocí elektronového mikroskopu Tescan MIRA 3. Pro zobrazení vzorků byl použit detektor sekundárních elektronů (SE). Mikroskop měl během měření nastavené urychlovací napětí na (HV) 5,0 kV.

### 7.6 Výpočtové vztahy naměřených hodnot

Nejprve je nutné přepočítat naměřenou sílu na pevnost ve smyku, protože při manuálním lepením nelze dodržet stejné rozměry přeplátování lepeného spoje. Pro naměřené parametry byl dále vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient.

**Smyková pevnost v tahu:**

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kde  $\tau$  je smyková pevnost v tahu [MPa],  $F$  je síla [N] a  $S$  je plocha přeplátování lepeného spoje [mm<sup>2</sup>].

**Deformace:**

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Kde  $\varepsilon$  je deformace lepeného spoje [%],  $\Delta l$  je prodloužení lepeného spoje [mm] a  $l$  je délka lepeného spoje [mm].

**Aritmetický průměr:**

$$\bar{x} = \frac{(x_1+x_2...x_n)}{n} \quad (3)$$

Kde  $\bar{x}$  je aritmetický průměr,  $x_n$  jsou naměřené hodnoty a  $n$  je počet hodnot.

### **Směrodatná odchylka:**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

Kde  $\sigma$  je směrodatná odchylka,  $\bar{x}$  je aritmetický průměr,  $x_i$  jsou naměřené hodnoty a  $n$  je počet hodnot.

### **Variační koeficient:**

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (5)$$

Kde  $v$  je variační koeficient [%],  $\sigma$  je směrodatná odchylka a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr.

Naměřené hodnoty byly také statisticky vyhodnoceny pomocí vícefaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) a Scheffeho testu.

## **ANOVA**

ANOVA je metoda, která umožňuje provádět vícenásobné porovnání středních hodnot. Princip této metody je založen na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných souborů. Hlavním úkolem ANOVY je posouzení vlivů jednotlivých faktorů na závisle proměnou kvantitativního typu. [35]

### **Scheffeho test**

Scheffeho test patří mezi metody mnohonásobného porovnání, někdy je také nazýván jako test násobných kontrastů. Scheffeho test umožňuje porovnat rozdíly mezi středními hodnotami jak u vyváženého třídění, tak u nevyváženého třídění. [35]

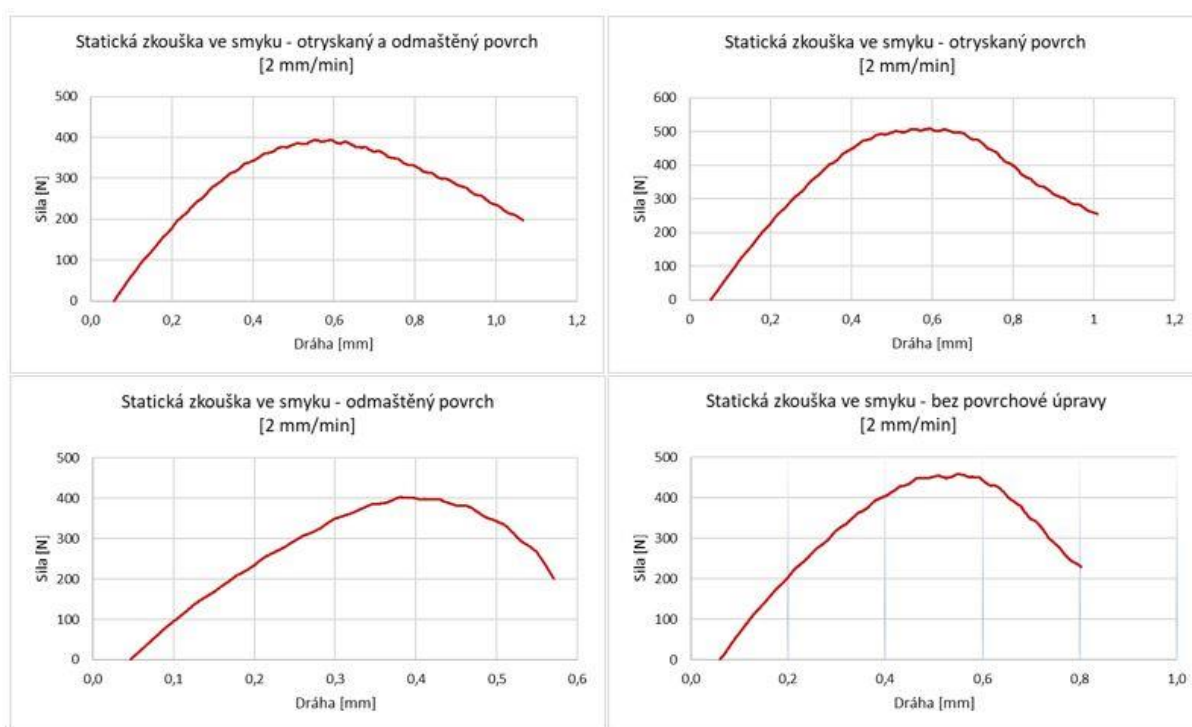


## 8 Vyhodnocení experimentu

Naměřené hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Excel a programu STATISTICA. Pomocí těchto programů byli vypočítány ostatní údaje a vypracovány grafy pro přehlednější představení výsledků.

### 8.1 Statická zkouška ve smyku

Graf 1 Průběh statických zkoušek ve smyku pro jednotlivé úpravy povrchu – 2 mm/min



Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 1 zobrazuje průběh statických zkoušek ve smyku u vzorků s jednotlivými povrchovými úpravami při rychlosti zatížení 2 mm/min. Z grafu lze vidět dosažení maximálních sil a prodloužení.

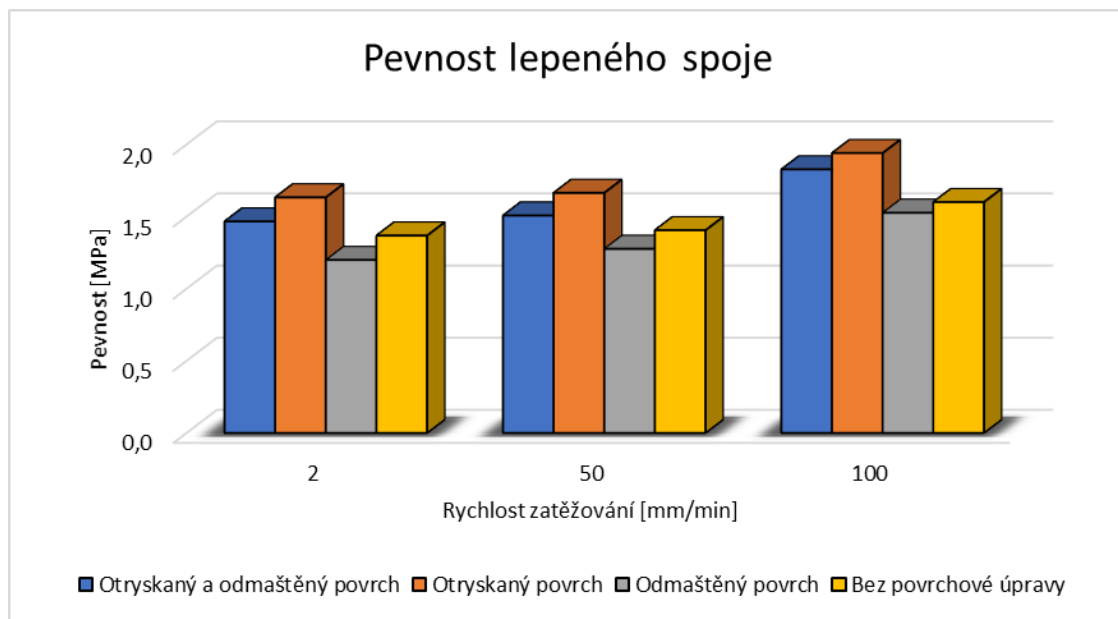
#### 8.1.1 Vliv rychlosti zatížení na pevnost lepeného spoje

Tabulka 2 výsledky pevnosti ze statické zkoušky ve smyku

Povrchová úprava	Rychlost zatížení [mm/min]								
	2			50			100		
	Pevnost								
	$\bar{x}$ [Mpa]	$\sigma$ [Mpa]	$\nu$ [%]	$\bar{x}$ [Mpa]	$\sigma$ [Mpa]	$\nu$ [%]	$\bar{x}$ [Mpa]	$\sigma$ [Mpa]	$\nu$ [%]
Otryskaný a odmaštěný povrch	1,466	0,106	7,23	1,507	0,180	11,93	1,940	0,139	7,160
Otryskaný povrch	1,633	0,158	9,68	1,664	0,172	10,33	1,827	0,228	12,47
Odmaštěný povrch	1,199	0,082	6,54	1,276	0,139	10,89	1,526	0,258	16,91
Bez povrchové úpravy	1,368	0,126	9,21	1,405	0,175	12,45	1,60	0,116	7,25

Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 2 Výsledky pevnosti ze statické zkoušky ve smyku



Zdroj: [vlastní zpracování]

Z uvedené tabulky 2 a grafu 2 je zřejmé, že při rychlosti zatěžování 2 mm/min vykazovali nejvyšší pevnost vzorky s otryskaným povrchem 1,63 MPa. O 0,17 MPa nižší pevnost vykazovali vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem. Zkušební tělesa bez povrchové úpravy měli o 0,26 MPa menší pevnost než zkušební tělesa s otryskaným povrchem. Nejnižší pevnost 1,2 MPa vykazovali lepené spoje s odmaštěným povrchem. Stejně pořadí pevností daných povrchů je i při dalších rychlostech zatížení.

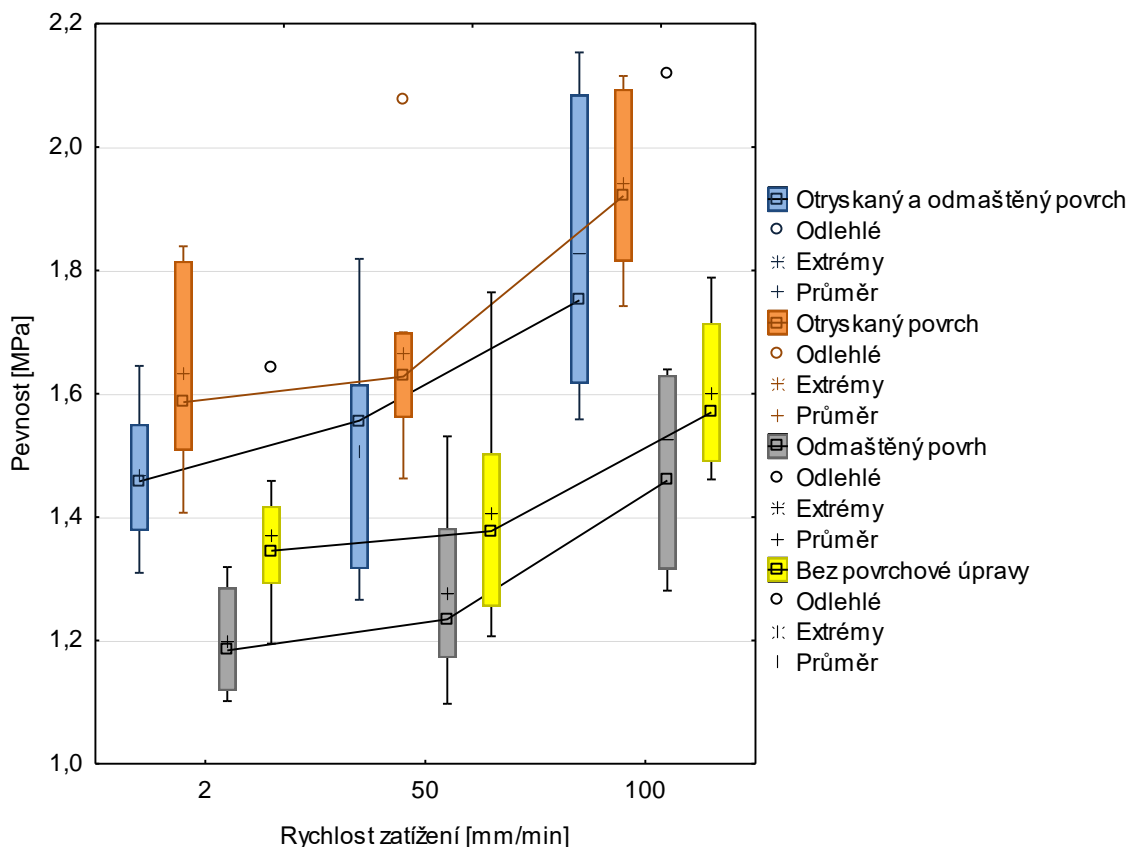
Současně lze také říci, že rychlost zatížení má určitý vliv na pevnost lepeného spoje. U otryskaných vzorků byla dosažena nejvyšší pevnost 1,94 MPa při rychlosti 100 mm/min, ale dále s klesající rychlostí zatěžování vykazují zkušební vzorky postupný úbytek pevnosti, který u rychlosti 50 mm/min dosáhl 0,28 MPa a u rychlosti 2 mm/min nebyl úbytek tak výrazný pouze 0,31 MPa oproti rychlosti 2 mm/min. Obdobný průběh je i u ostatních povrchových úprav. Rozdíl v pevnosti mezi zatěžovací rychlostí 2 mm/min a 50 mm/min není u všech povrchových úprav lepených spojů téměř znatelný.

### Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení naměřených hodnot byla použita vícefaktorová ANOVA. Za nulovou hypotézu je považován stav, kdy mezi jednotlivými středními hodnotami datových souborů není významný statistický rozdíl  $p > 0.05$ .

Lze tedy říci, že se jedná o statisticky nehomogenní skupiny, kdy je rozdíl mezi variantami experimentu. Hypotéza  $H_0$  nebyla prokázána, je tedy staticky významného rozdílu mezi jednotlivými variantami. Hodnota  $p$  je pro všechny varianty experimentu 0,000. Byl tedy prokázán rozdíl mezi povrchovými úpravami. Obdobné chování je také u různých rychlostí zatížení, což je zřejmé z grafu 3.

Graf 3 Statistické vyhodnocení vlivu rychlosti zatížení a povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje



Zdroj: [vlastní zpracování]

Dále byl proveden Scheffeho test pro zobrazení statických rozdílů průměrů mezi jednotlivými skupinami zkušebních vzorků. Červeně jsou zvýrazněny varianty, mezi kterými je statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05.

Tabulka 3 Scheffeho test (rychlost zatížení)

Pevnost ve smyku				
	Rychlost zatěžování [mm/min]	1	2	3
1	2		0,5734,19	0,000000
2	50	0,5734,19		0,000000
3	100	0,000000	0,000000	

Zdroj: [vlastní zpracování]

Tabulka 3 zobrazuje statisticky významný rozdíl mezi 1. a 3. skupinou, tj. mezi zkušebními tělesy, která byla zkoušena při zatěžovacích rychlostech 2 mm/min a 100 mm/min. Dále je také významný rozdíl mezi zatěžovacími rychlostmi 50 mm/min a 100 mm/min. Tyto rozdíly jsou statisticky významné na hladině 0,05. Zatímco zkušební tělesa zkoušena při rychlostech 2 mm/min a 50 mm/min se od sebe nijak významně neliší.

Tabulka 4 Scheffeho test (povrchová úprava)

Pevnost ve smyku					
	Povrchová úprava	1	2	3	4
1	Otryskaný a odmaštěný povrch		0,047732	0,000024	0,054732
2	Otryskaný povrch	0,047732		0,000000	0,000005
3	Odmaštěný povrch	0,000024	0,000000		0,119483
4	Bez povrchové úpravy	0,054732	0,000005	0,119483	

Zdroj: [vlastní zpracování]

V tabulce 4 jsou zobrazeny statisticky významné rozdíly mezi skupinami lepených spojů s jednotlivými povrchovými úpravami lepeného spoje. Statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05 je téměř mezi všemi zmíněnými povrchovými úpravami. Kromě vzorků s otryskaným a odmaštěným povrchem, které se od vzorků bez povrchové úpravy významně neliší. A také mezi vzorky s odmaštěným povrchem a vzorky bez povrchové úpravy není žádný významný rozdíl.

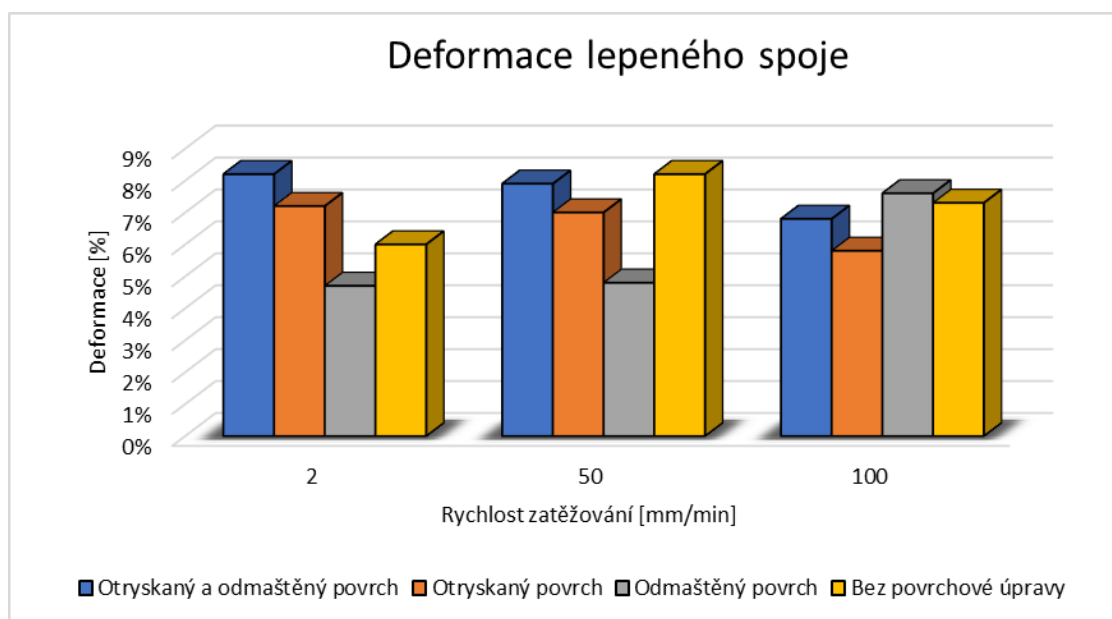
### 8.1.2 Vliv rychlosti zatížení na deformaci lepeného spoje

Tabulka 5 Výsledky deformace ze statické zkoušky ve smyku

Povrchová úprava	Rychlost zatížení [mm/min]								
	2			50			100		
	Deformace [%]								
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$
Otryskaný a odmaštěný povrch	8,2	1,3	15,9	7,9	1,9	24,1	6,8	1,7	25,0
Otryskaný povrch	7,2	0,5	6,9	7,0	1,9	27,1	5,8	1,1	19,0
Odmaštěný povrch	4,7	1,1	16,7	4,8	1,3	27,1	7,6	1,3	17,1
Bez povrchové úpravy	6,0	0,5	10,6	8,2	3,5	42,7	7,3	1,5	20,5

Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 4 Výsledky deformace ze statické zkoušky ve smyku



Zdroj: [vlastní zpracování]

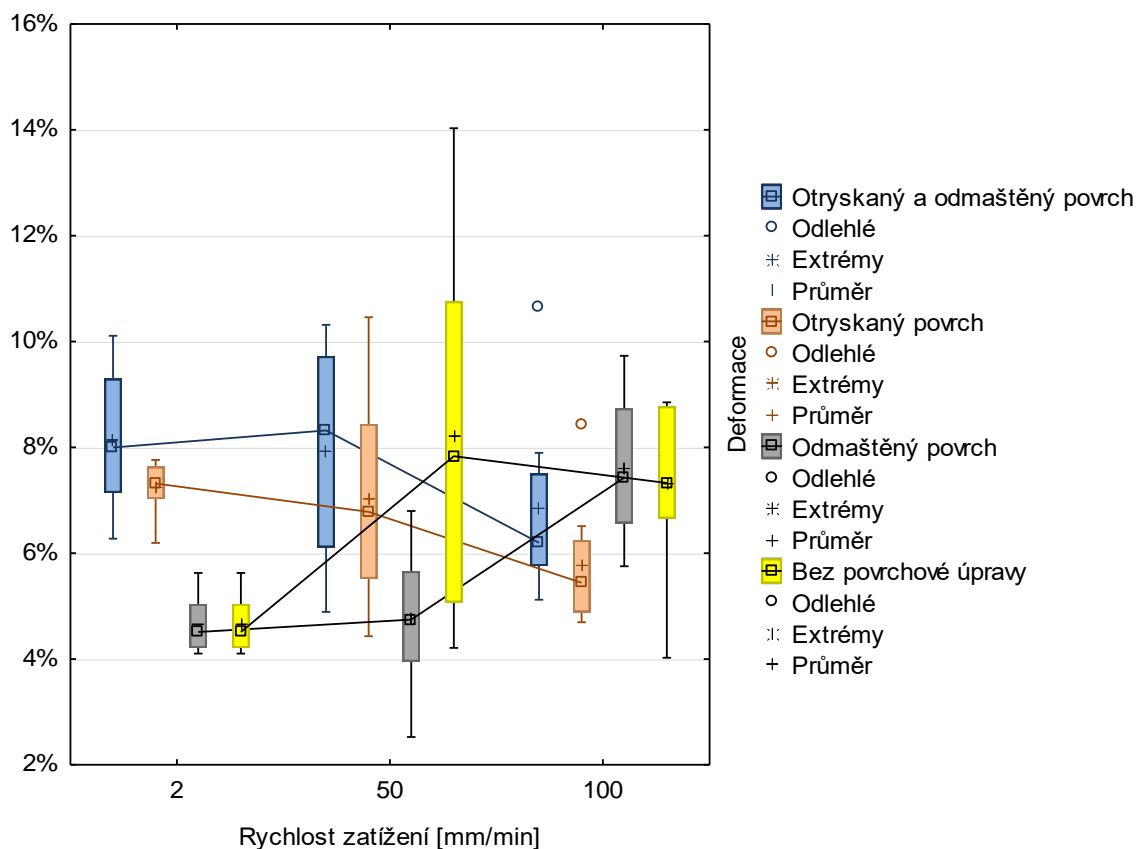
Z grafu 4 je patrné, že deformace u otryskaných a současně odmaštěných zkušebních vzorků je při rychlosti zatížení 2 mm/min velmi podobná jako při rychlosti 50 mm/min. Taktéž je i u zkušebních těles s otryskaným povrchem a u těles s odmaštěným povrchem. Rozdílné deformace mají při zatěžovací rychlosti 100 mm/min, kdy u otryskaných vzorků dochází k nepatrnému poklesu deformace o 1,4 % vůči rychlosti zatížení 2 mm/min. Obdobný průběh vykazují vzorky s otryskaným a zároveň odmaštěným povrchem, kde je deformace také o 1,4 % nižší. Naopak u zkušebních těles s odmaštěným povrchem při rychlosti zatížení 100 mm/min dochází k nárůstu deformace o 2,9 % vůči rychlosti 2 mm/min. Zcela jiný průběh vykazují zkušební tělesa bez povrchové úpravy, kde deformace vykazuje nejvyšší hodnoty při rychlosti zatížení 50 mm/min a to 8,2 %. Nejnižší deformace u tohoto povrchu je při rychlosti zatížení 2 mm/min.

### Statistické vyhodnocení

Z hlediska statistického vyhodnocení vlivu různé zatěžovací rychlosti na deformaci, nebyl prokázán statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05, což je patrné z grafu 5 a tabulky 6. Z hlediska vlivu různé úpravy povrchu je rozdíl mezi jednotlivými varianty experimentu. Z grafu 5 je také patrný vliv interakce zatěžovací rychlosti a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje. Z čehož vyplývá, že každá kombinace těchto faktorů může mít

vlastní unikátní hladinu. Dále lze z grafu vidět, že největší rozptyl vykazují vzorky zkoušené při rychlosti 50 mm/min, především vzorky s odmaštěným povrchem.

Graf 5 Statistické vyhodnocení interakce vlivu rychlosti zatížení a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje



Zdroj: [vlastní zpracování]

Zde byl také proveden Sheffeho test pro zobrazení statisticky významných rozdílů mezi jednotlivými variantami experimentu.

Tabulka 6 Scheffého test (rychlost zatížení)

Deformace				
	Rychlost zatěžování [mm/min]	1	2	3
1	2		0,179811	0,268116
2	50	0,179811		0,972495
3	100	0,268116	0,972495	

Zdroj: [vlastní zpracování]

Z Tabulky 6 je zřejmé, že deformace při jednotlivých rychlostech zatížení se vzájemně od sebe nijak významně neliší.

Tabulka 7 Sheffeho test (povrchová úprava)

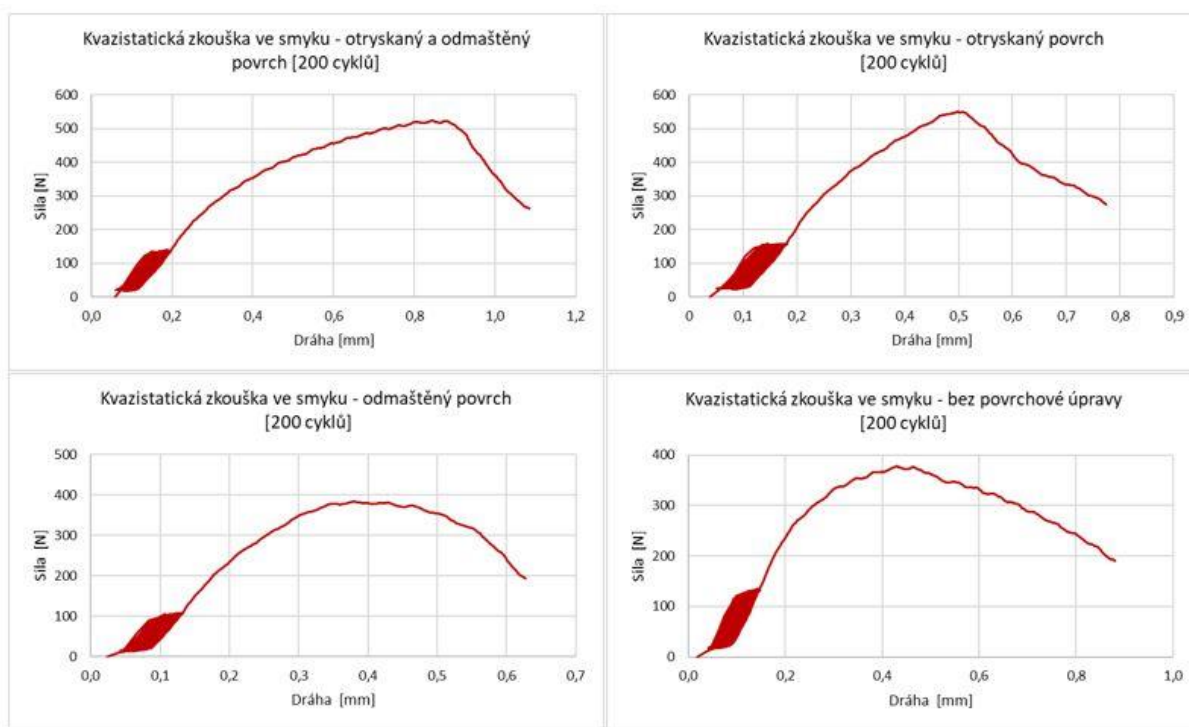
Deformace					
	Povrchová úprava	1	2	3	4
1	Otryskaný a odmaštěný povrch		0,306679	0,999951	0,258503
2	Otryskaný povrch	0,306679		0,333497	0,002491
3	Odmaštěný povrch	0,999951	0,333497		0,235557
4	Bez povrchové úpravy	0,258550	0,002491	0,235557	

zdroj: [vlastní zpracování]

V tabulce 7 je patrný statisticky významný rozdíl pouze mezi zkušebními vzorky s otryskaným povrchem a vzorky bez povrchové úpravy. Ostatní vzorky se od sebe významně neliší.

## 8.2 Kvazistatická zkouška ve smyku

Graf 10 Průběh kvazistatických zkoušek ve smyku pro jednotlivé povrchy – 200 cyklů



Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 6 znázorňuje průběh kvazistatických zkoušek ve smyku, ze kterých lze vidět dosažení maximálních sil a prodloužení u vzorků s jednotlivými povrchovými úpravami.

Jak již bylo zmíněno dolní mez je 5 % a horní mez je 30 % z referenčních hodnot maximálních sil, které byly zjištěny pomocí statické zkoušky ve smyku při rychlosti zatížení 2 mm/min. Hodnoty mezí pro jednotlivé povrchové úpravy jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Dolní a horní meze sil

Povrchová úprava	F <sub>max</sub> (2mm/min) [N]	5 % F <sub>max</sub> [N]	30 % F <sub>max</sub> [N]
Otryskaný a odmaštěný povrch	464,961	23,248	139,488
Otryskaný povrch	532,009	26,6	159,603
Odmaštěný povrch	367,558	18,378	110,267
Bez povrchové úpravy	447,385	22,369	134,216

Zdroj: [vlastní zpracování]

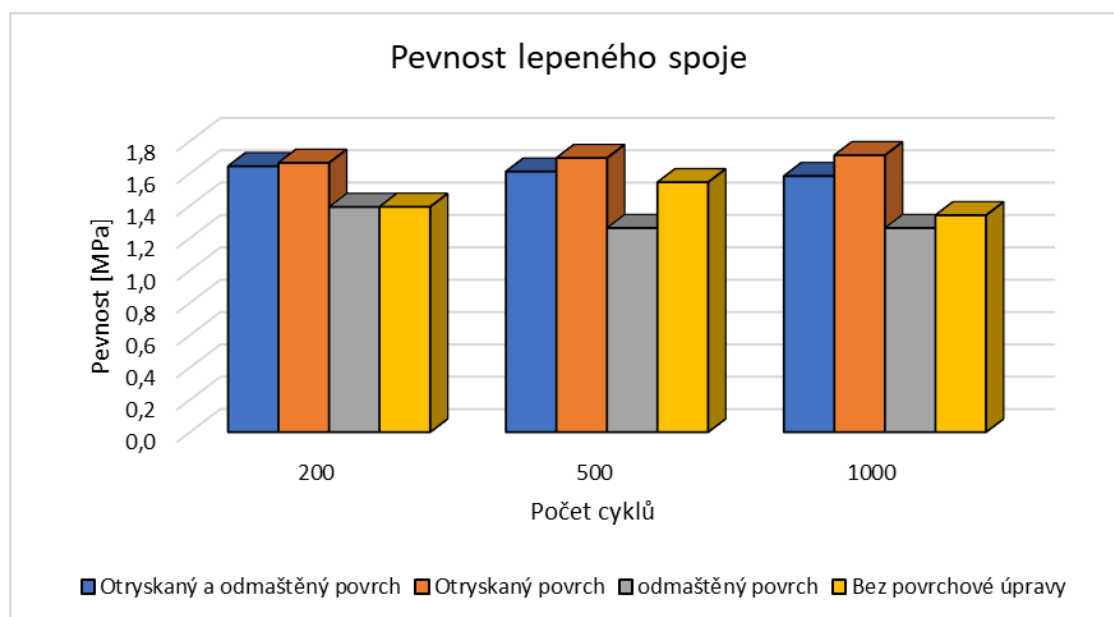
### 8.2.1 Vliv cyklického namáhání na pevnost lepeného spoje

Tabulka 9 Výsledky pevnosti z kvazistatické zkoušky ve smyku

Povrchová úprava	Počet cyklů								
	200			500			1000		
	Pevnost								
	$\bar{x}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\nu$ [%]	$\bar{x}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\nu$ [%]	$\bar{x}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\nu$ [%]
Otryskaný a odmaštěný povrch	1,644	0,164	9,85	1,611	0,176	10,92	1,583	0,129	8,15
Otryskaný povrch	1,665	0,138	8,39	1,695	0,149	8,79	1,712	0,220	12,85
Odmaštěný povrch	1,392	0,130	9,34	1,262	0,131	10,38	1,262	0,135	10,70
Bez povrchové úpravy	1,393	0,141	10,12	1,545	0,168	10,87	1,341	0,143	10,66

Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 7 Výsledky pevnosti z kvazistatické zkoušky ve smyku



Zdroj: [vlastní zpracování]



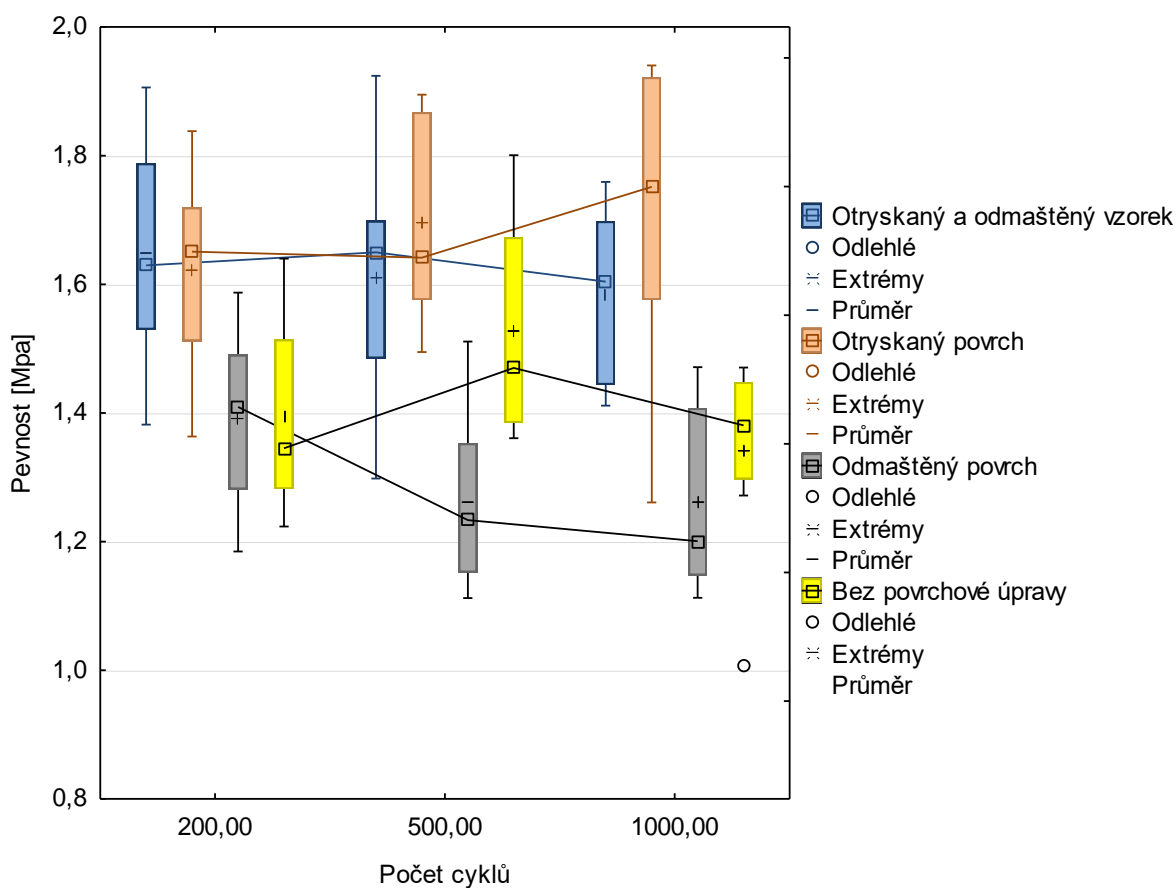
Z výše uvedené tabulky a grafu vidíme, že při 200 cyklech je pevnost otryskaného a současně odmaštěného povrchu (1,67MPa) téměř totožná s pevností otryskaného povrchu (1,64 MPa). Shodné pevnosti při 200 cyklech dosáhly také vzorky s odmaštěným povrchem a vzorky bez povrchové úpravy.

U 500 cyklů mají nejvyšší pevnost (1,7 MPa) zkušební tělesa s otryskaným povrchem. O něco nižší pevnost vykazují zkušební tělesa s otryskaným a odmaštěným povrchem a to o 0,08 MPa. Dále následují zkušební tělesa bez povrchové úpravy, která dosáhli pevnosti 1,55 MPa. A nejnižší pevnosti dosáhli zkušební tělesa s odmaštěným povrchem.

Prakticky shodný průběh mají vzorky při 1000 cyklech. Otryskané vzorky dosáhli pevnosti 1,71 MPa. Menší pevnost mají otryskané a odmaštěné vzorky a to o 0,24 MPa. U vzorků bez povrchové úpravy je pevnost 1,34 MPa. Nejnižší pevnost (1,26 MPa) vykazují vzorky s odmaštěným povrchem.

### Statistické vyhodnocení

Graf 8 Statistické vyhodnocení vlivu nízkocyklického namáhání a povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje



Zdroj: [vlastní zpracování]

Tabulka 10 Scheffeho test (počet cyklů)

Pevnost ve smyku				
	Počet cyklů	1	2	3
1	200		0,967740	0,642922
2	500	0,967740		0,490571
3	1000	0,642922	0,490571	

Zdroj: [vlastní zpracování]

Z tabulky 10 a grafu 8 lze utvořit závěr, že zvyšování počtu cyklů nijak významně neovlivňuje pevnost lepeného spoje.

Tabulka 11 Scheffeho test (povrchová úprava)

Pevnost ve smyku					
	Povrchová úprava	1	2	3	4
1	Otryskaný a odmaštěný povrch		0,636585	0,000007	0,001627
2	Otryskaný povrch	0,636585		0,002966	0,000015
3	Odmaštěný povrch	0,000000	0,000000		0,126177
4	Bez povrchové úpravy	0,001627	0,000015	0,126177	

Zdroj: [vlastní zpracování]

Tabulka 11 zobrazuje statistickou významnost pro všechny páry skupin vzorků s jednotlivými povrchovými úpravami. Statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0.05 není mezi vzorky s otryskaným a současně odmaštěným povrchem a vzorky s pouze otryskaným povrchem. Dále není také významný statistický rozdíl mezi vzorky s odmaštěným povrchem a vzorky bez povrchové úpravy.

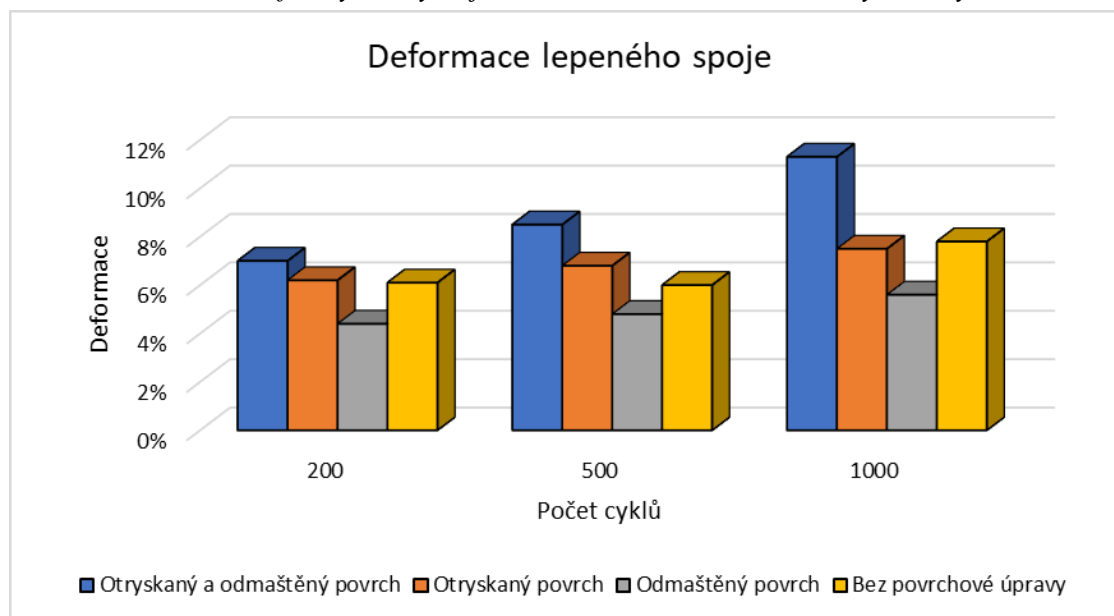
## 8.2.2 Vliv cyklického namáhání na deformaci lepeného spoje

Tabulka 12 Výsledky deformace z kvazistatické zkoušky ve smyku

Povrchová úprava	Počet cyklů								
	200			500			1000		
	Deformace [%]								
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\nu$
Otryskaný a odmaštěný povrch	7,0	0,7	10,0	8,5	0,9	10,6	11,3	1,1	9,7
Otryskaný povrch	6,2	0,7	11,3	6,8	0,8	11,8	7,5	0,9	12,0
Odmaštěný povrch	4,4	0,5	11,4	4,8	0,8	16,7	5,6	0,8	14,3
Bez povrchové úpravy	6,1	1	16,4	6,0	0,7	11,7	7,8	0,8	10,3

Zdroj: [vlastní zpracování]

Graf 9 Výsledky deformace z kvazistatické zkoušky ve smyku



Zdroj: [vlastní zpracování]

Jak lze odvodit z výše uvedené tabulky 12 a grafu 9, největší deformaci vykazovaly zkušební tělesa s otryskaným a současně odmaštěným povrchem (11,3 %) při 1000 cyklech. Při tomto počtu cyklů dosáhli zkušební tělesa s otryskaným povrchem velmi podobné deformace jako tělesa bez povrchové úpravy. Nejmenší deformaci při 1000 cyklech mají vzorky s odmaštěným povrchem.

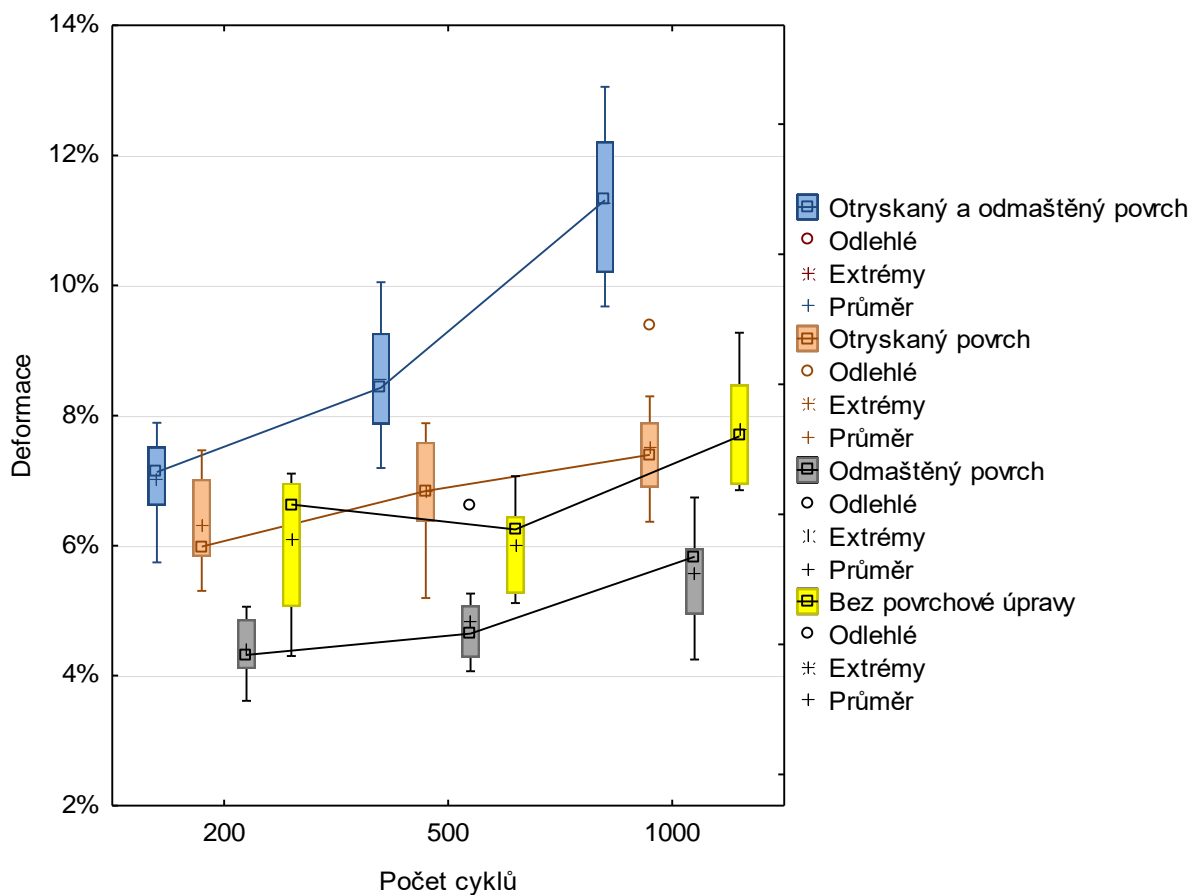
U 500 cyklů vykazují vzorky se všemi uvedenými povrchovými úpravami menší deformaci než u 1000 cyklů. Největší deformace opět vykazují vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem a to 8,5 %. O 1,7 % nižší deformaci mají vzorky s otryskaným povrchem. Téměř shodné deformace jako vzorky s otryskaným povrchem dosáhli vzorky bez povrchové úpravy. Nejnižší deformaci vykazují vzorky s odmaštěným povrchem.

Průběh deformace při 200 cyklech je následující. Největší deformaci (7 %) mají vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem. O 1 % nižší deformaci vykazují vzorky s otryskaným povrchem a vzorky bez povrchové úpravy. Opět nejmenší deformaci (4,4 %) mají vzorky s odmaštěným povrchem.

### Statistické vyhodnocení

Z grafu 10 je patrné, že statisticky významný vliv má interakce nízkocyklového namáhání a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje. Což znamená, že každá kombinace těchto faktorů může mít vlastní jedinečnou hladinu.

Graf 10 Statistické vyhodnocení vlivu nízkocyklického namáhání a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje



Zdroj: [vlastní zpracování]

Tabulka 13 Scheffeho test (počet cyklů)

Deformace				
	Počet cyklů	1	2	3
1	200		0,027057	0,000000
2	500	0,027057		0,000000
3	1000	0,000000	0,000000	

Zdroj: [vlastní zpracování]

Z tabulky 13 je zřejmé, že statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05 je mezi všemi uvedenými počty cyklů.

Tabulka 14 Scheffeho test (povrchová úprava)

Deformace					
	Povrchová úprava	1	2	3	4
1	Otryskaný a odmaštěný povrch		0,000000	0,000000	0,000000
2	Otryskaný povrch	0,000000		0,000000	0,799517
3	Odmaštěný povrch	0,000000	0,000000		0,000000
4	Bez povrchové úpravy	0,000000	0,799517	0,000000	

Zdroj: [vlastní zpracování]

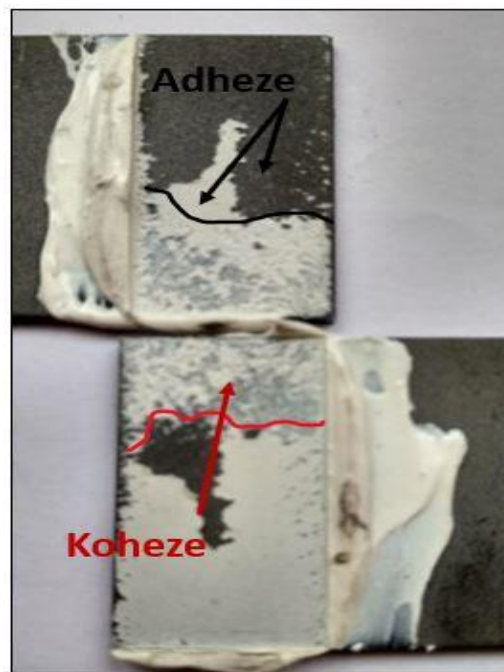
V tabulce 14 vidíme, že vzorky bez povrchové úpravy a vzorky s otryskaným povrchem se od sebe nijak statisticky významně neliší.

### 8.3 Vyhodnocení porušení lepeného spoje



Obrázek 29 Lomová plocha lepeného spoje s otryskaným a odmaštěným povrchem

Zdroj: [vlastní zpracování]



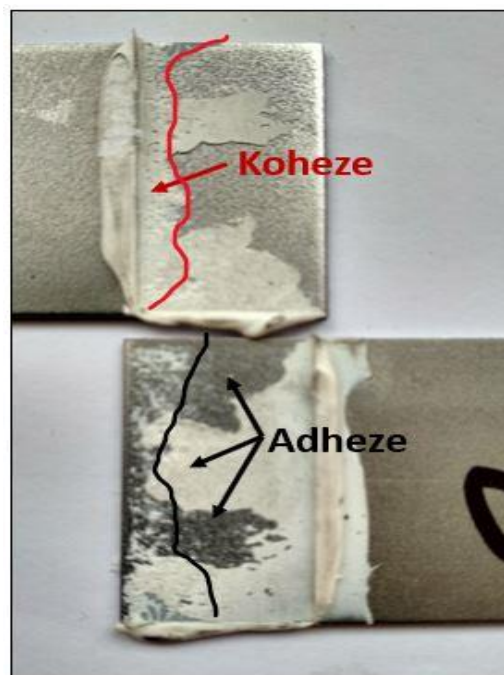
Obrázek 30 Lomová plocha lepeného spoje s otryskaným povrchem

Zdroj: [vlastní zpracování]

Na obrázku 29 je zobrazena lomová plocha lepeného spoje s otryskaným a současně odmaštěným povrchem. U tohoto povrchu je charakteristika lomu cca. 90 % adheze a 10 % koheze. Obrázek 30 znázorňuje lomovou plochu lepeného spoje s otryskaným povrchem. Na obrázku je znázorněna oblast adhezního porušení (80 %) a kohezního porušení (20 %).



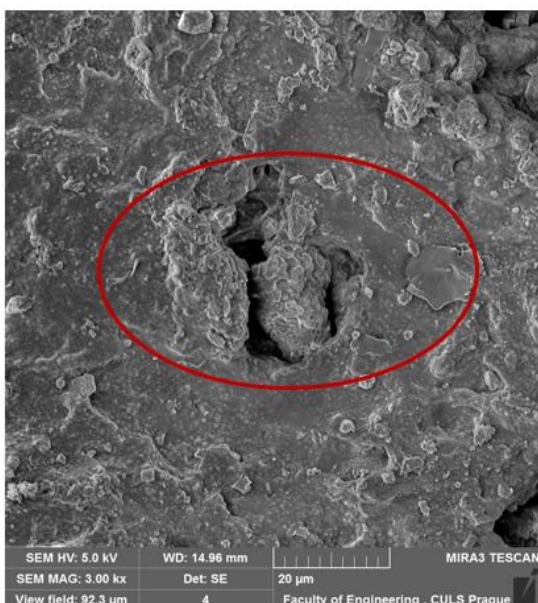
Obrázek 31 Lomová plocha lepeného spoje s odmaštěným povrchem  
Zdroj: [vlastní zpracování]



Obrázek 32 Lomová plocha lepeného spoje bez povrchové úpravy  
Zdroj: [vlastní zpracování]

Na obrázku 31 je lomová plocha lepeného spoje s odmaštěným povrchem. Charakteristika lomové plochy u tohoto spoje je adhezní. Obrázek 32 zobrazuje lomovou plochu lepeného spoje bez povrchové úpravy. Tato povrchová úprava vykazuje také z velké části adhezní porušení.

### 8.3.1 Analýza lomové plochy pomocí SEM

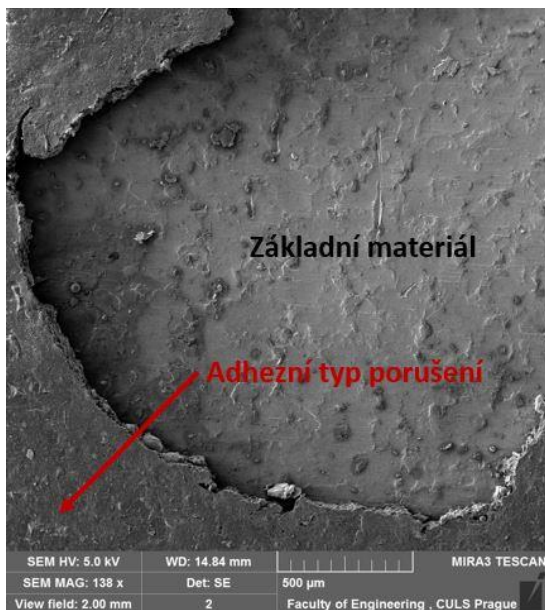


Obrázek 33 Lepený spoj s otryskaným a odmaštěným povrchem (MAG 3.00 kx)  
Zdroj: [vlastní zpracování]



Obrázek 34 Lepený spoj s otryskaným povrchem (MAG 493 x)  
Zdroj: [vlastní zpracování]

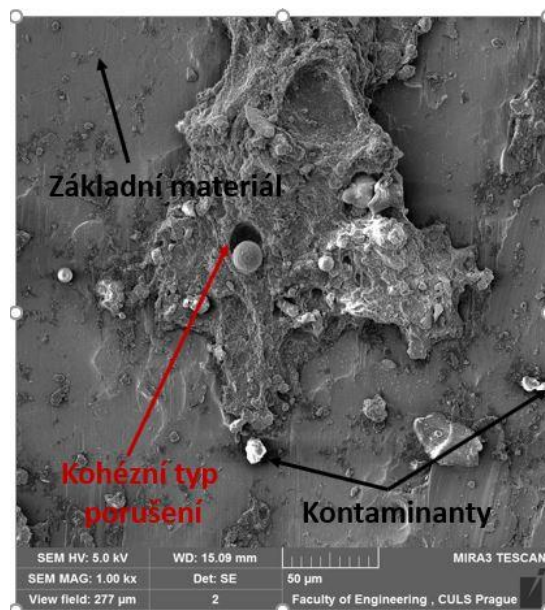
Na obrázku 33 lze vidět trhlinu ve vrstvě lepidla. Na obrázku 34 vidíme lomovou hranu polyuretanové hmoty, lze zde také pozorovat smáčivost základního materiálu.



*Obrázek 35 Lepený spoj s odmaštěným*

*povrchem (MAG 138 kx)*

*Zdroj: [vlastní zpracování]*



*Obrázek 36 Lepený spoj bez povrchové*

*úpravy (MAG 1.00 kx)*

*Zdroj: [vlastní zpracování]*

Z obrázku 35 je patrné že dochází k odlupování lepidla z adherendu v důsledku špatné adheze lepidla k adherendu. Na obrázku 36 lze pozorovat přítomnost kontaminantů u lepeného spoje bez povrchové úpravy.

## 9 Diskuze výsledků

### 9.1 Statická zkouška ve smyku

Při této zkoušce byl zjišťován vliv povrchové úpravy a vliv rychlosti zatížení na pevnost a deformaci lepeného spoje. Nejvyšší pevnosti při všech zatěžovacích rychlostech dosáhli spoje s otryskaným povrchem. O něco nižší pevnost vykazovali vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem. Vyšší pevnosti, než odmaštěné spoje dosáhli spoje bez povrchové úpravy. Z těchto výsledků měření lze vyvodit závěr, že u lepidla Roberlo RPS 45 je především důležitá mechanická úprava povrchu (tryskání). Chemická úprava povrchu (odmaštění) zde nemá význam, naopak odmaštěné spoje vykazují nižší pevnost než neodmaštěné.

Výsledky experimentu prokázali určitý vliv rychlosti zatížení na smykovou pevnost lepeného spoje u všech povrchových úprav. Při navyšování zatěžovací rychlosti docházelo k nárůstu smykové pevnosti u všech povrchových úprav. Nárůst smykové pevnosti při rychlosti zatížení 50 mm/min vůči rychlosti zatížení 2 mm/min byl nepatrný. Výrazný nárůst pevnosti vykázali lepené spoje při rychlosti zatížení 100 mm/min.

Nejvyšší deformace při rychlosti zatížení 2 mm/min měli zkušební vzorky s otryskaným povrchem. O něco nižší deformaci vykazovali lepené spoje s otryskaným povrchem. U zkušebních těles s otryskaným povrchem a u těles s otryskaným a zároveň odmaštěným povrchem docházelo se zvyšující se rychlostí zatížení k poklesu deformace. U zkušebních těles s odmaštěným povrchem byla deformace při rychlosti zatížení 2 mm/min totožná s deformací při rychlosti 50 mm/min k nárůstu deformace došlo až při rychlosti zatížení 100 mm/min. Zcela jiný průběh vykazují zkušební tělesa bez povrchové úpravy, kde deformace vykazuje nejvyšší hodnoty při rychlosti zatížení 50 mm/min a nejnižší deformace u tohoto povrchu je při rychlosti zatížení 2 mm/min.

### 9.2 Kvazistatická zkouška ve smyku

Při této zkoušce byl posuzován vliv nízkocyklického namáhání a také vliv povrchové úpravy na pevnost a deformaci lepeného spoje. Zde byla opět prokázána důležitost mechanické úpravy povrchu. I při této zkoušce dosahovali při všech počtech cyklů nejvyšší pevnosti zkušební tělesa s otryskaným povrchem o něco nižší pevnosti dosáhli zkušební tělesa s otryskaným a zároveň odmaštěným povrchem. Dále následovali vzorky bez povrchové úpravy a nejnižší pevnosti dosáhli odmaštěné vzorky. Smyková pevnost lepených spojů



s otryskaným povrchem se od spojů s otryskaným a odmaštěným povrchem téměř nelišila. Také mezi lepenými spoji bez povrchové úpravy a spoji s odmaštěným povrchem nebyl prokázán žádný významný rozdíl ve smykové pevnosti.

Kvazistatickou zkouškou ve smyku byla zjištěna nejvyšší deformace u lepeného spoje s otryskaným a současně odmaštěným povrchem. Deformace u lepeného spoje s otryskaným povrchem je velmi podobná s deformací lepeného spoje bez povrchové úpravy. Nejnižší deformaci při této zkoušce vykazují vzorky s odmaštěným povrchem.

Z výsledků této zkoušky lze utvořit závěr, že počet cyklů nijak významně neovlivňuje smykovou pevnost lepeného spoje. Hodnoty smykové pevnosti se při jednotlivých počtech cyklů nijak významně nelišili. Byl zde ale prokázán vliv nízkocyklického namáhání na deformaci lepeného spoje, která se s rostoucím počtem cyklů navyšovala. Největší nárůst deformace se zvyšujícím se počtem cyklů vykazovali vzorky s otryskaným a zároveň odmaštěným povrchem. Ostatní lepené spoje vykazovali mírnější nárůst deformace se zvyšujícím se počtem cyklů.

## 10 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na téma nízkocyklová únava konstrukčních spojů využívaných v automobilovém průmyslu. V úvodu teoretické části je popsána obecně technologie lepení spolu s výhodami a nevýhodami této technologie spojování. Podrobněji jsou zde popsány povrchové úpravy. Dále jsou v této kapitole uvedeny činitelé, které ovlivňují pevnost lepených spojů. Další kapitola se zabývá lepením v automobilovém průmyslu. Kde jsou popsány používaná lepidla při výrobě karoserie, způsoby aplikace lepidel a typy povrchů při výrobě karoserie. Závěr teoretické části je věnován hodnocení lepených spojů a únavovému chování materiálu.

Praktická část diplomové práce se zabývala posouzením vlivu rychlosti zatížení, vlivu nízkocyklického namáhání a vlivu povrchové úpravy na pevnost a deformaci lepených spojů. Pro výzkum byl využit těsnící tmel Roberlo RPS 45. Zkouškám byli podrobeny vzorky se čtyřmi povrchovými úpravami.

Z provedených zkoušek a analýz lze vyvodit několik závěrů. S navyšující rychlostí zatížení dochází k nárůstu smykové pevnosti, a to u všech zmíněných povrchových úprav lepených spojů. Závislost mezi deformací lepeného spoje a rychlostí zatížení byla zjištěna pouze u zkušebních těles s otryskaným povrchem a u těles s otryskaným a zároveň odmaštěným povrchem. Kde deformace klesá s rostoucí zatěžovací rychlostí. Dále lze také konstatovat, že se zvyšujícím se počtem cyklů se pevnost lepených spojů nijak významně nemění. Ale byl prokázán vliv nízkocyklického namáhání na deformaci lepeného spoje, která se s rostoucím počtem cyklů navyšovala. Na základě výsledků ze statické zkoušky ve smyku, lze doporučit pro statické namáhání ve smyku lepené spoje s otryskaným povrchem, které dosahovali nejvyšší pevnosti při všech rychlostech zatížení, např. při rychlosti zatížení 2 mm/min byla pevnost 1,63 MPa. Nejnižší pevnost vykazovali spoje s odmaštěným povrchem. Také pro nízkocyklické namáhání jsou nejvhodnější spoje s otryskaným povrchem, které dosáhli nejvyšší pevnosti při všech počtech cyklů, např. při 200 cyklů byla pevnost 1,66 MPa. Nejnižší pevnost při kvazistatické zkoušce vykazovali také spoje s odmaštěným povrchem. Z výsledků těchto zkoušek byla u polyuretanového tmelu Roberlo RPS 45 prokázána důležitost mechanické úpravy povrchu tryskaním. Chemická úprava povrchu odmaštěním zde nemá význam, naopak odmaštěné spoje vykazují nižší pevnost než neodmaštěné. Lepené spoje se všemi povrchovými úpravami vykazovali z větší části adhezní porušení, které je nežádoucí. Z toho vyplývá, že koheze lepidla je vyšší než jeho adheze.

## 11 Seznam literatury

- [1] Katedra strojírenské technologie. *Technologie lepení v automobilovém průmyslu*. [online]. [cit. 2018 - 1 - 18]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/lepeni.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf).
- [2] LOCTITE EUROPEAN GROUP. *Worldwide design handbook. 2. überarb. Aufl.* München: Loctite European Group 1998.
- [3] PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha : Nakladatelství techn. lit., 1980.
- [4] HABENICHT, G. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung, 4. Auflage*. Berlin : Springer, 2002. ISBN 3-540-43340-6.
- [5] OSTEN, M. *Práce s lepidly a tmely*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1982. ISBN 80-7169-338-3.
- [6] Ksp.tul. *Katedra strojírenské technologie*. [online]. [cit. 2018 - 1-19] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm).
- [7] KOVAČIČ, L. *Lepenie kovov a plastov*. Bratislava : Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1980.
- [8] HOSNEDL, S a KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra, Obecné strojní části*. Plzeň : ZČU, 1998.
- [9] BROCKMANN, W. *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*. Weinheim : WILEY-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-32014-1.
- [10] VIKTOR, KREIBICH. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha : ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01472.
- [11] Lepidla.cz. *Technologie a technika lepení základní informace*. [online] [cit. 2018 - 21-1] Dostupné z: <http://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni-zakladni-informace.html>.
- [12] FREJDIN, A. *Pevnosť a životnosť lepených spojov*. Bratislava : Alfa, 1988.

- [13] Shahid, M a Hashim, S.A. *Effect of surface roughness on the strength of cleavage joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives. [online]. [cit. 2018 -1 - 28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749601000598#BIB9>.
- [14] PILVOUSEK, T. *Lepení ve výrobě karoserie*. MM Půmyslové spektrum. [online]. [cit. 2018 - 2 - 2]. <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie.html>.
- [15] DOUBEK, P. a KOLNEROVÁ, M. *Základy technologie lepení karosářských výisků*. Liberec : Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7497-170-2..
- [16] ŠIMON, P. *Karosérie osobního automobilu*. DOCPLAYER. [online]. [Citace:2018 - 2 - 5] Dostupné z: <http://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html>.
- [17] Adhesiveandglue.com. *Polyurethane adhesives and glue - definition and properties of PUR*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 10] Dostupné z: [http://www.adhesiveandglue.com/polyurethane adhesive.html](http://www.adhesiveandglue.com/polyurethane%20adhesive.html).
- [18] SYMIETZ, D a LUTZ, A. *Strukturkleben im Fahrzeugbau*. München : Dow Automotive, 2006. ISBN 978-3-937889-43-6.
- [19] HEDIA, H.S., a další. *The influence of nanoadhesives on the tensile properties and Mode-I fracture toughness of bonded joints*. Engineering Fracture Mechanics. [online]. [cit. 2018 - 2 - 12] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.02.013..>
- [20] SEDLÁČEK, V. *Povrchy a povlaky kovů*. Praha : ČVUT, 1992. ISBN 0-444-98682-0.
- [21] ŠPIČÁK, E, a další. *Pozinkované plechy v automobilovom priemysle a ich hodnotenie*. [Článek] Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2012.
- [22] BELANGER, P. *Steel Innovations In Hot Stamping* . Great Design in Steel - Gestamp 2016:. [online]. [cit. 2018 - 2 - 12] Dostupné z: [https://www.slideshare.net/ChristopheCazes2/great-design-in-steel-gestamp-2016?qid=982f5565-5c8d-4dbb-84d0-5888f5f59009&v=&b=&from\\_search=1](https://www.slideshare.net/ChristopheCazes2/great-design-in-steel-gestamp-2016?qid=982f5565-5c8d-4dbb-84d0-5888f5f59009&v=&b=&from_search=1).
- [23] VONDRÁK, Z. *Materiály pro karoserie osobních vozidel*. Fakulta strojního inženýrství, [Bakalářská práce] Vysoké učení technické v Brně. 2011.

- [24] KLESNIL, M a LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Praha : Československá akademie věd, 1975.
- [25] KLESNIL, M a kolektiv. *Cyklická deformácia a únava kovov*. Bratislava : VEDA vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1987.
- [26] ROBERLO RPS 55. *ROBERLO*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 18]. Dostupné z: <http://en.roberlo.com/car-refinish/complementary-products/sealants-and-protectors/rps-55/>.
- [27]. 1. TOUŠENSKÁ s.r.o. *Pneumatická tryskací zařízení* [online]. [cit: 2018 - 2- 21]. Dostupné z: <https://www.1tousenska.cz/vyroba.php?sub=1&podr=1>.
- [28] ZWICK/ROELL. *Allroundline - dokonalý systém pro individuální požadavky na zkoušení ve všech oblastech*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 22]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/stroje-pro-staticke-zkouseni/zkusebni-stroje-od-5-kn-do-250-kn/zkusebni-stroje-allround-line.html>.
- [29] ČESKÁ ZEMEĎĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. *Centrum Inovací a transferu technologií*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 22]. Dostupné z: <https://citt.czu.cz/cs//portlet;citt.device-detail;device-id=12/>.
- [30] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s. MIRA3. *TESCAN PERFORMANCE IN NANOSPACE*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 25]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3>.
- [31] Ltd, Quorum Technologies. *Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 28]. Dostupné z: <https://www.quorumtech.com/quorum-product/q150r-rotary-pumped-sputter-coatercarbon-coater>.
- [32] ČSN EN 1465. *Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přepřátovaných lepených sestav*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [33] ČSN ONLINE ČSN EN ISO 9664 *Lepidla - Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem*. [online]. [Cit. 2018 - 3 - 1]. Dostupné z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/Detailnormy.aspx?k=26113>.

- [34] ČSN EN 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995.
- [35] NEŠPOR, Z. *Analýza rozptylu*. Sociologická encyklopedie. [online] [cit: 2018 - 3 - 1]. Dostupné z: [https://se.mathan.cz/index.php/Anal%C3%BDza\\_rozptylu](https://se.mathan.cz/index.php/Anal%C3%BDza_rozptylu)
- [36] DESIGN WORLD, *ADHESIVE..* [online]. [cit. 2018 - 2 - 18]. Dostupné z: <http://www.designworldonline.com/uploads/ImageGallery/Adhesive-7-JointStress2a.gif>.
- [37] SCA, *SCA präsentiert neuen E-Swirl 2 AdX für Swirl- und Raupenapplikationen..* [online]. [cit. 2018 - 2 - 26]. Dostupné z: <https://www.sca-solutions.com/de/contact/press/SCA-praesentiert-neuen-E-Swirl-2-AdX-fuer-Swirl-und-Raupenapplikationen>.
- [38] TVRZNIČEK, J a KOLEKTIV. *Škoda Octavia III - Lehké konstrukce v sériové technologii*. [Prezentace]. VVA. Lázně Bělohrad, 2013.
- [39] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. *Elektromechanikus kétoszlopos asztali minimum 150 kN névleges kapacitású húzó-nyomó szakítógép..* [online]. [Cit. 2018 - 2 - 21]. Dostupné z: <https://kutatas.bme.hu/portal/content/elektromechanikus-k%C3%A9toszlopos-asztali-minimum-150-kn-n%C3%A9vleges-kapacit%C3%A1s%C3%BA-h%C3%BAz%C3%B3-nyom%C3%B3-szak%C3%ADt-0>.
- [40] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, *Vlastnosti a zkoušení materiálu*. Fakulta strojní. [online]. [cit. 2018 - 2 - 26] Dostupné z: [https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM8\\_UnavaMaterialu.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM8_UnavaMaterialu.pdf).
- [41] PLUHAŘ, J, PUŠKÁR, a MACEK, K. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [42] RŮLIČKA, M. *Cyklická deformační křivka*. [online]. [cit. 2018 - 2 - 27]. Dostupné z: [http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources\\_old/pzk/3\\_3.html](http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/3_3.html).
- [43] CÍŠÁŘ, K. *Výzkum vlivu lepeného povrchu na pevnost lepeného spoje*. [Diplomová práce] Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze 2017

## 12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Lepený spoj.....	4
Obrázek 2 Smáčivost lepidel.....	5
Obrázek 3 Konstrukce lepených spojů.....	12
Obrázek 4 Lepidla ve výrobě karoserie.....	15
Obrázek 5 Jednotlivé spojovací technologie ve výrobě karoserie vozu Škoda Fabia.....	16
Obrázek 6 Modifikovaná epoxidová pryskyřice.....	19
Obrázek 7 Použití epoxidových lepidel v konstrukci karoserie.....	20
Obrázek 8 Schéma nanášecího systému.....	21
Obrázek 9 E-Swirl technologie.....	22
Obrázek 10 Ochranné povlaky Škoda Octavia III.....	23
Obrázek 11 Rozdělení zkoušek lepených spojů.....	25
Obrázek 12 Charakter cyklu.....	26
Obrázek 13 Cyklická křivka.....	27
Obrázek 14 cyklické změkčení a zpevnění.....	27
Obrázek 15 Iniciační únavové trhliny.....	28
Obrázek 16 Šíření únavové trhliny.....	28
Obrázek 17 Roberlo RPS 45.....	29
Obrázek 18 Tryskací kabina ITB - 65.....	30
Obrázek 19 Zwick/Roell Z150.....	31
Obrázek 20 Zkušební stroj Labortech MPTest 5.050.....	31
Obrázek 21 Elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3.....	32
Obrázek 22 Rozprašovač Quorum Q150R ES.....	32
Obrázek 23 Povrch bez mechanické úpravy.....	34
Obrázek 24 Otryskaný povrch.....	34
Obrázek 25 Vzorky umyté v izopropylalkoholu.....	34
Obrázek 26 Pozlacené vzorky Zdroj: [vlastní zpracování].....	35
Obrázek 27 Vzorek pro zkoušku ČSN EN 1465 [vlastní zpracování].....	35
Obrázek 28 Typy porušení lepeného spoje [vlastní zpracování].....	36
Obrázek 29 Lomová plocha lepeného spoje s otryskaným a odmaštěným povrchem.....	52
Obrázek 30 Lomová plocha lepeného spoje s otryskaným povrchem.....	52

Obrázek 31 Lomová plocha lepeného spoje s odmaštěným povrchem.....	53
Obrázek 32 Lomová plocha lepeného spoje bez povrchové úpravy .....	53
Obrázek 33 Lepený spoj s otryskaným a odmaštěným povrchem (MAG 3.00 kx) .....	53
Obrázek 34 Lepený spoj s otryskaným povrchem (MAG 493 x).....	53
Obrázek 35 Lepený spoj s odmaštěným povrchem (MAG 138 kx).....	54
Obrázek 36 Lepený spoj bez povrchové úpravy (MAG 1.00 kx) .....	54

## 13 Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní technické parametry Zwick/Roell Z150.....	31
Tabulka 2 výsledky pevnosti ze statické zkoušky ve smyku.....	40
Tabulka 3 Scheffeho test (rychlost zatížení) .....	42
Tabulka 4 Scheffeho test (povrchová úprava).....	43
Tabulka 5 Výsledky deformace ze statické zkoušky ve smyku .....	43
Tabulka 6 Scheffeho test (rychlost zatížení) .....	45
Tabulka 7 Scheffeho test (povrchová úprava).....	46
Tabulka 8 Dolní a horní meze sil.....	47
Tabulka 9 Výsledky pevnosti z kvazistatické zkoušky ve smyku.....	47
Tabulka 10 Scheffeho test (počet cyklů) .....	49
Tabulka 11 Scheffeho test (povrchová úprava).....	49
Tabulka 12 Výsledky deformace z kvazistatické zkoušky ve smyku .....	49
Tabulka 13 Scheffeho test (počet cyklů) .....	51
Tabulka 14 Scheffeho test (povrchová úprava).....	52

## 14 Seznam grafů

Graf 1 Průběh statických zkoušek ve smyku pro jednotlivé úpravy povrchu – 2 mm/min.....	40
Graf 2 Výsledky pevnosti ze statické zkoušky ve smyku .....	41
Graf 3 Statistické vyhodnocení vlivu rychlosti zatížení a povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje.....	42
Graf 4 Výsledky deformace ze statické zkoušky ve smyku .....	44
Graf 5 Statistické vyhodnocení interakce vlivu rychlosti zatížení a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje .....	45
Graf 6 Průběh kvazistatických zkoušek ve smyku pro jednotlivé povrchy – 200 cyklů.....	46
Graf 7 Výsledky pevnosti z kvazistatické zkoušky ve smyku.....	47



Graf 8 Statistické vyhodnocení vlivu nízkocyklického namáhání a povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje .....	48
Graf 9 Výsledky deformace z kvazistatické zkoušky ve smyku .....	50
Graf 10 Statistické vyhodnocení vlivu nízkocyklického namáhání a povrchové úpravy na deformaci lepeného spoje .....	51

# 15 Přílohy

## Příloha 1: Technický list ROBERLO RPS 45



**OZNAČENÍ PRODUKTU – R 62379 – černá, R 62380 – šedá, R 62378 – bílá**

### CHARAKTERISTIKA





RPS 45 je jednosložková polyuretanová těsnicí hmota na spoje plachů apod. Schne rychle díky atmosférické vlhkosti. Lze přelakovat všemi běžnými druhy laků.

Dobře odolává vlhkosti, povětrnostním podmínkám, kyselinám a zásadám. Je možné ji aplikovat na spojení mnoha materiálů: dřevo, kovy, hliník, polyester, sklo, PVC a keramiku.

UPOZORNĚNÍ: Produkt je nutné zpracovat do 12 měsíců od data výroby uvedeného na obalu. Po otevření kartuše produkt spotřebujte - proces tvrdnutí nelze zastavit.

<b>Báze:</b>	Polyuretan
<b>Barva:</b>	Černá, šedá, bílá
<b>Specifická váha:</b>	1,2 kg/l při 20°C
<b>Voc:</b>	82 g/l

### APLIKACE

			
	1,5-2 h	80 %	

<b>Nelepivost prachu za:</b>	1,5 - 5 h při 23° C a 50% R.H.
<b>Rychlost tuhnutí:</b>	4 mm každých 24 h při 23°C a 65% R.H. (R.H. = relativní vlhkost vzduchu)
<b>Pracovní teplota:</b>	od +5°C do +40°C
<b>Odolnost teplotám:</b>	-40°C do +90°C

### POZNÁMKY

Před aplikací očistěte a odmastěte povrch. Hmotu lze před zatuhnutím upravit vlhkou stěrkou nebo kartáčem. Po použití zamezte přístupu vzduchu do kartuše.

### ČIŠTĚNÍ

Použité nářadí je možné vyčistit ředidlem před zatuhnutím produktu.

### BEZPEČNOST

Řiďte se instrukcemi na štítku výrobku. Více informací v bezpečnostním listě výrobku.

# RPS 45

POLYURETANOVÁ TĚSNÍCÍ HMOTA

## **PRVNÍ POMOC**

V případě nevolnosti opusťte pracoviště, zasažené oči vymývejte proudem čisté vody.  
Ve všech případech zasažení očí a požití vyhledejte lékaře, předložte k nahlédnutí bezpečnostní list.

## **ZÁRUČNÍ DOBA**

Produkt si uchovává užité vlastnosti v původním neotevřeném obalu 12 měsíců od data výroby uvedeném na obalu.

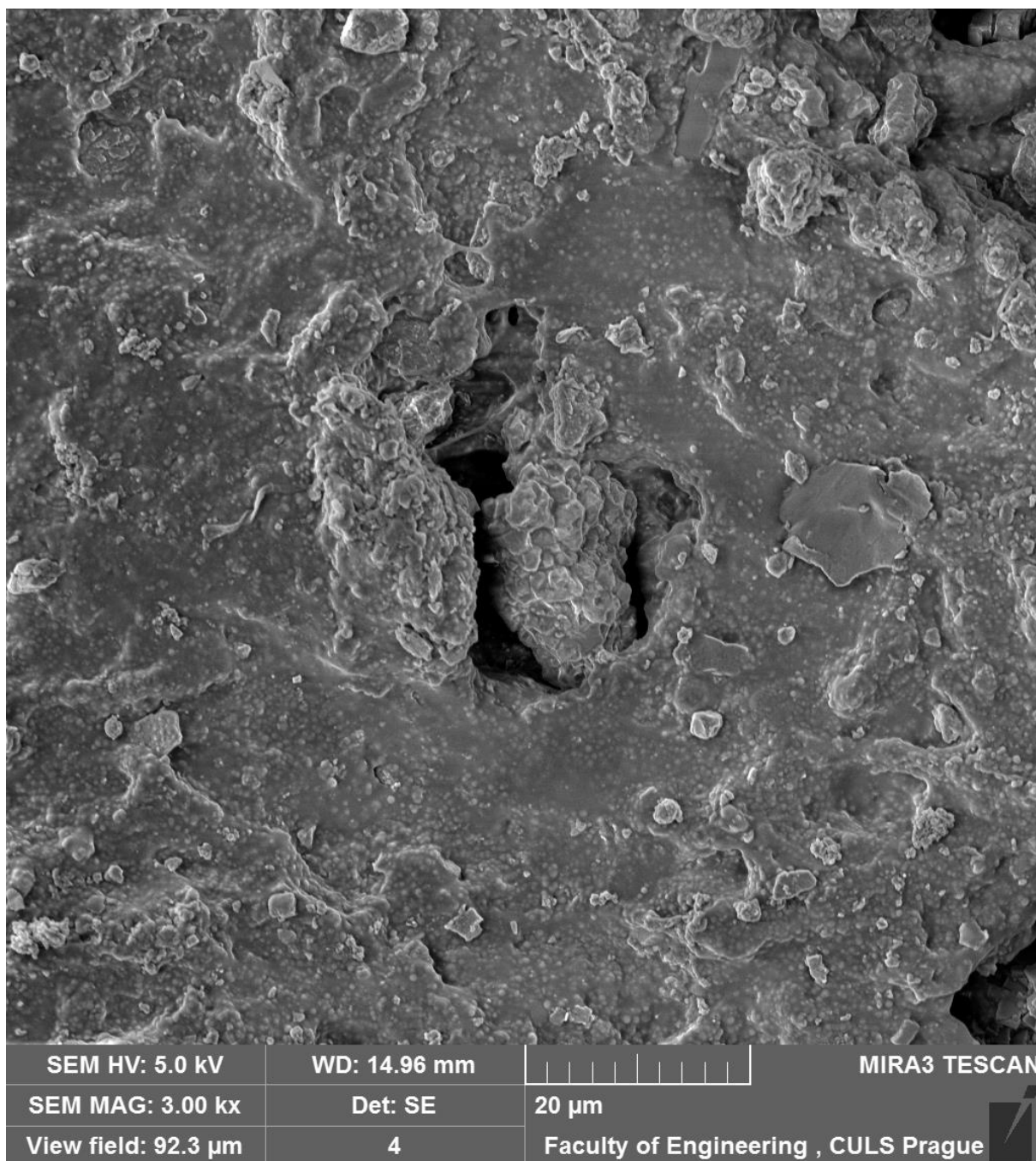
## **LIKVIDACE OBALŮ A ODPADŮ**

Nepoužité zbytky produktu a obaly se zbytky produktu odkládejte na místě určeném obcí k odkládání nebezpečných odpadů nebo předejte osobě oprávněné k nakládání s nebezpečnými odpady.

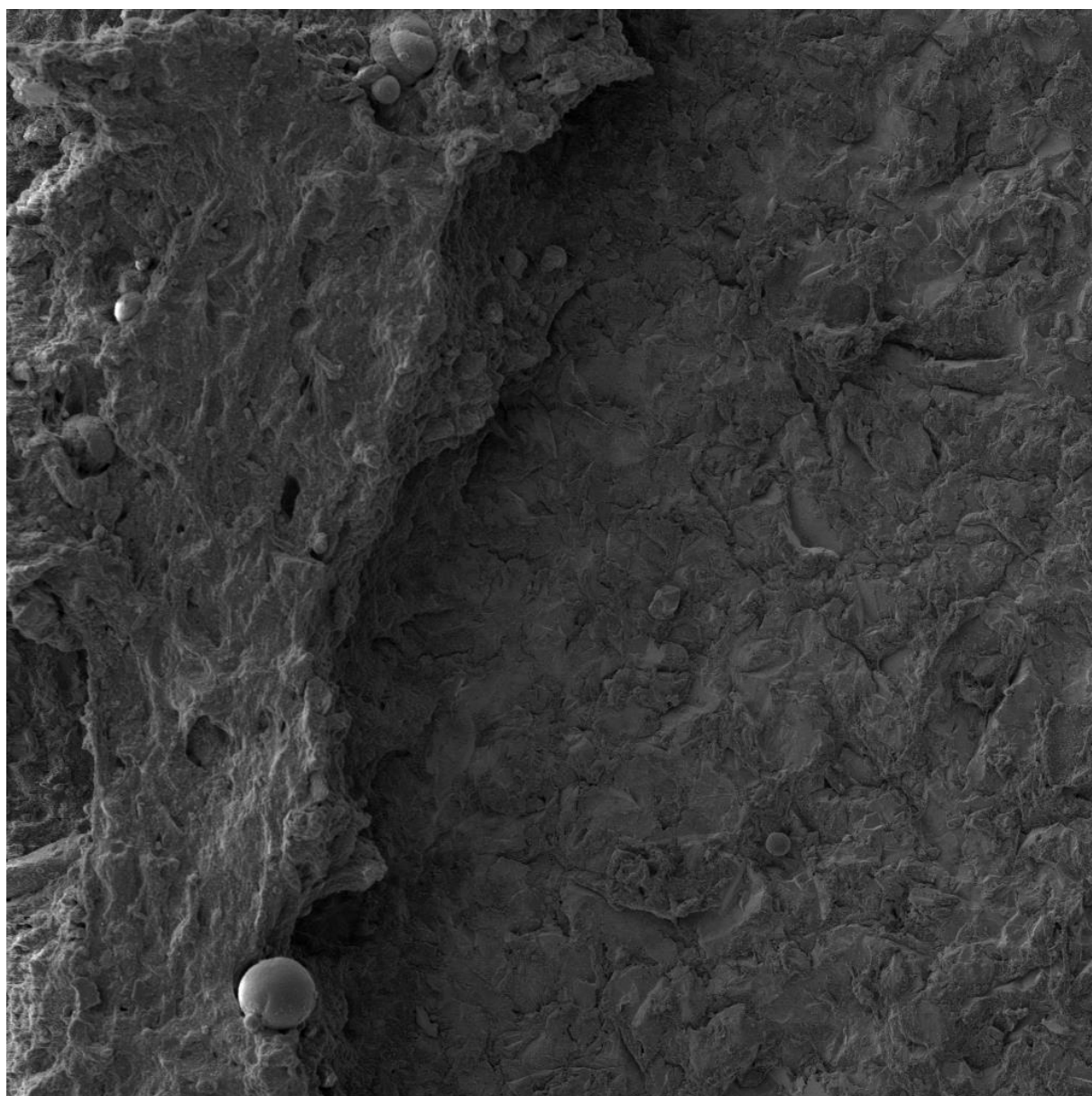
Distribuce pro Českou Republiku: ACI - Auto Components International, s.r.o., Podnikatelská 549, 190 11 Praha9, Tel: 274 021 111  
Výrobce: ROBERLO S.A. - Ctra. N-II, km 706,5 - 17457 RIUDELLOTS DE LA SELVA (Girona) SPAIN  
Tel: +34-972 478 080 - Fax: +34-972 477 394 - e-mail: info@roberlo.com



## Příloha 2: Snímky lomové plochy pomocí SEM

Detail lomové plochy otryskaného a odmaštěného zkušebního vzorku

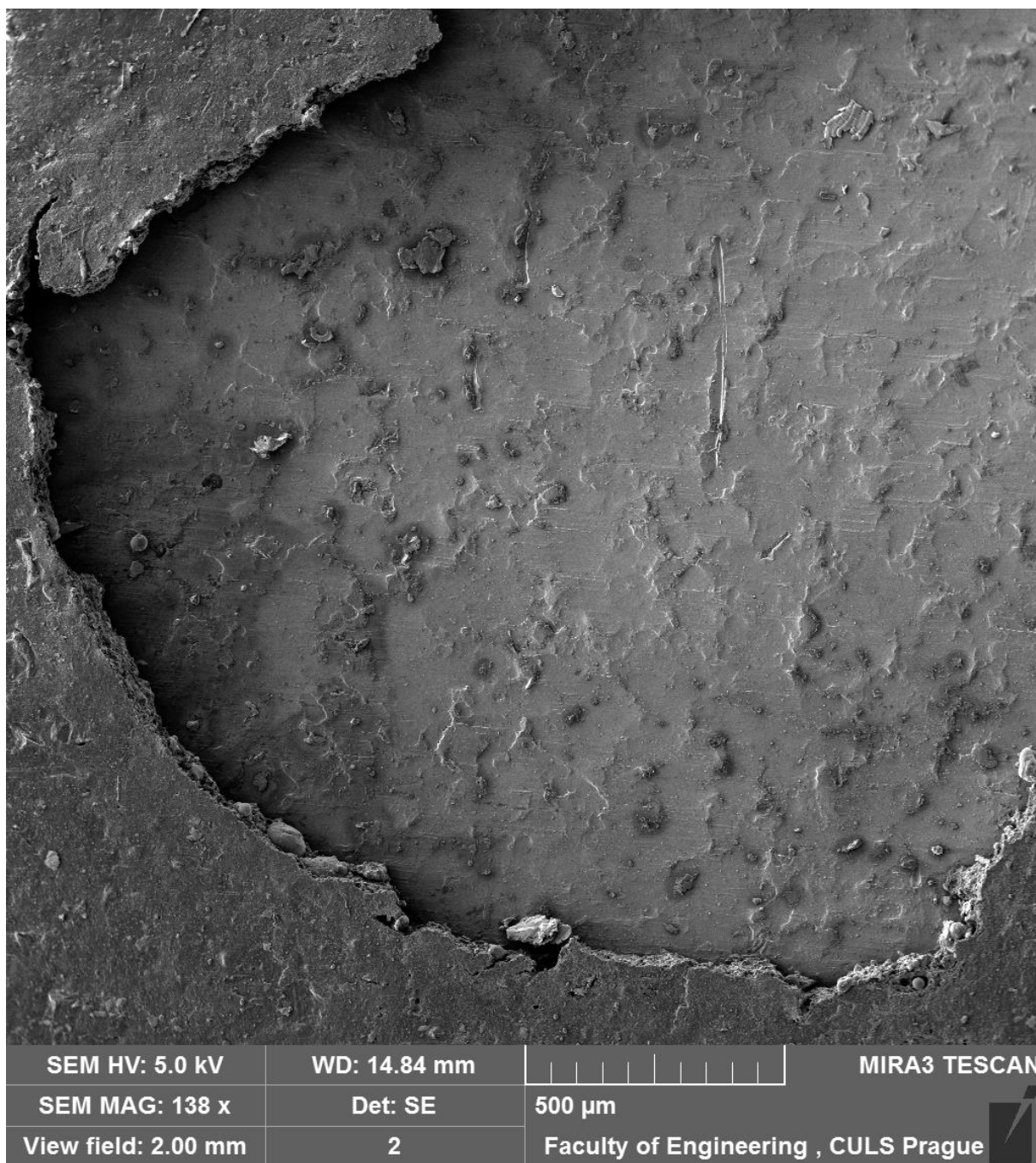


Detail lomové plochy otryskaného zkušebního vzorku

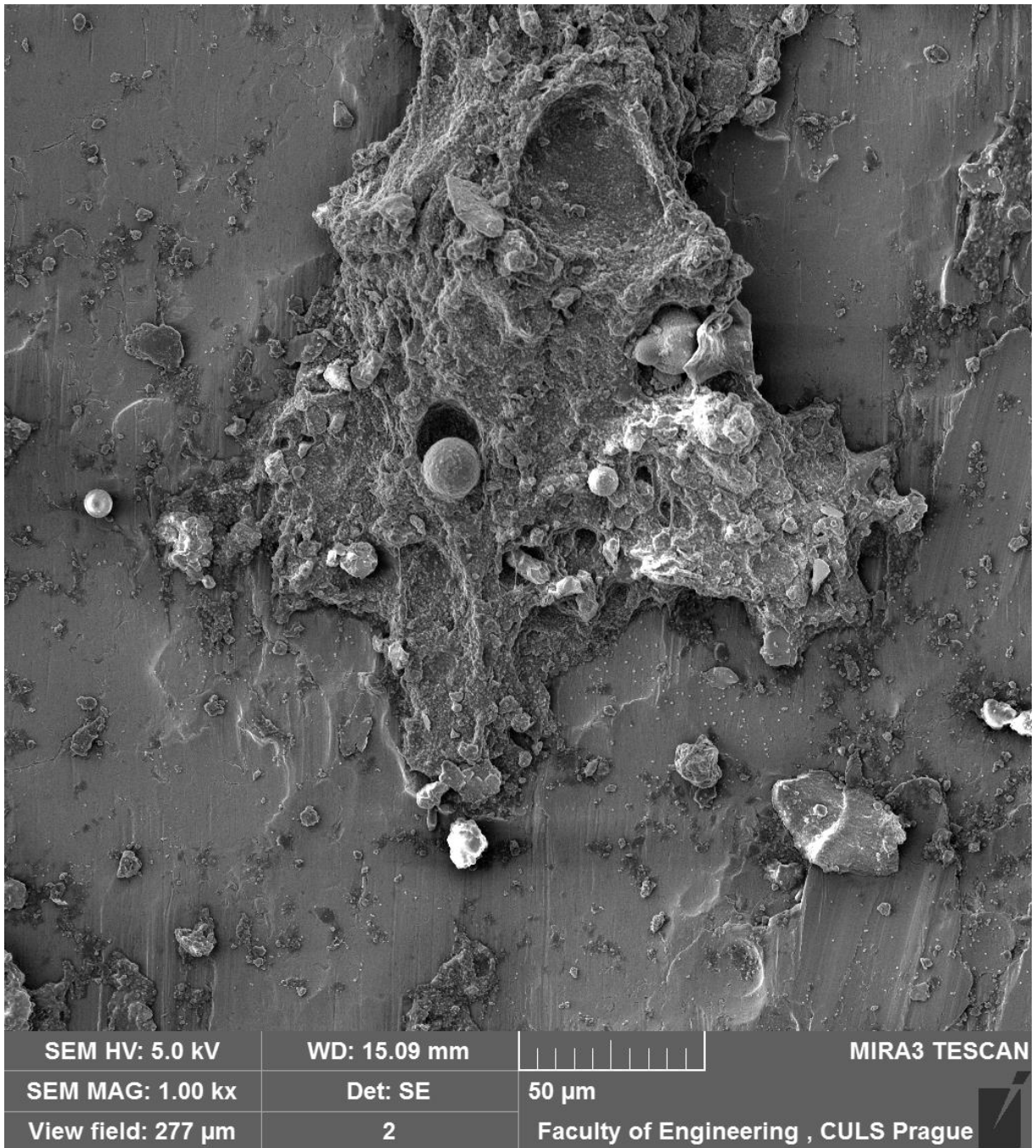


SEM HV: 5.0 kV	WD: 15.05 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 493 x	Det: SE	100 $\mu$ m	
View field: 561 $\mu$ m	1	Faculty of Engineering , CULS Prague	

Detail lomové plochy odmaštěného zkušebního vzorku



Detail lomové plochy zkušebního vzorku bez povrchové úpravy



**Příloha 3: Výsledky ze statické zkoušky ve smyku – rychlost zatížení 2 mm/min**

<b>Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem</b>									
Rychlost zatížení	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Pevnost ve smyku	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	MPa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
2	1	1,03	476,36	1,476	32,64	13,55	23,82	322,76	8%
	2	0,89	537,35	1,645	28,36	13,31	24,54	326,63	7%
	3	0,83	471,13	1,440	26,36	13,23	24,73	327,18	6%
	4	0,99	514,47	1,586	31,80	12,90	25,14	324,31	8%
	5	1,00	394,50	1,378	31,94	12,02	23,82	286,32	8%
	6	1,22	453,70	1,514	38,20	12,07	24,82	299,58	10%
	7	1,15	411,48	1,310	35,98	13,09	24,00	314,16	9%
	8	1,35	460,70	1,379	41,94	13,77	24,27	334,20	10%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,06	464,96	1,466	33,40	12,99	24,39	316,89	0,08
	$s_x$	0,16	44,482	0,106	4,78	0,60	0,46	16,00	0,013
	$v_x$	15,31%	9,57%	7,23%	14,31%	4,63%	1,89%	5,05%	15,85%

<b>Zkušební vzorky s otryskaným povrchem</b>									
Rychlost zatížení	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	MPa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
2	1	0,95	509,16	1,549	30,24	13,71	23,98	328,77	7%
	2	1,11	497,63	1,407	34,36	14,30	24,73	353,64	8%
	3	1,00	595,72	1,839	31,54	13,21	24,52	323,91	8%
	4	0,97	541,34	1,624	30,88	13,62	24,48	333,42	7%
	5	0,77	563,93	1,815	25,02	12,43	25,00	310,75	6%
	6	0,92	479,59	1,534	29,46	12,71	24,60	312,67	7%
	7	0,99	597,47	1,815	31,22	13,39	24,58	329,13	7%
	8	0,98	471,23	1,483	30,90	12,74	24,94	317,74	8%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,96	532,01	1,633	30,45	13,26	24,60	326,25	0,072
	$s_x$	0,09	46,90	0,158	2,45	0,58	0,30	13,69	0,005
	$v_x$	9,3%	8,82%	9,68%	8,04%	4,37%	1,20%	4,20%	6,94%

<b>Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem</b>									
Rychlost zatížení	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	MPa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
2	1	0,70	333,01	1,102	22,80	12,44	24,30	302,29	6%
	2	0,51	341,91	1,133	17,28	12,43	24,27	301,68	4%
	3	0,56	330,60	1,103	18,48	12,33	24,30	299,62	5%
	4	0,53	360,33	1,187	18,10	12,59	24,12	303,67	4%
	5	0,52	402,68	1,319	17,08	12,34	24,74	305,29	4%
	6	0,58	377,26	1,262	19,28	12,30	24,31	299,01	5%
	7	0,71	376,05	1,181	22,74	13,24	24,05	318,42	5%
	8	0,58	418,62	1,309	19,58	12,95	24,70	319,87	4%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,59	367,56	1,199	19,42	12,58	24,35	306,23	0,05
	$s_x$	0,07	30,16	0,082	2,10	0,32	0,23	8,07	0,005
	$v_x$	12,46%	8,21%	6,84%	10,80%	2,54%	0,95%	2,64%	10,64%



Zkušební vzorky bez povrchové úpravy									
Rychlost zatížení	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	MPa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
2	1	0,77	476,83	1,459	24,80	13,39	24,41	326,85	6%
	2	0,74	458,29	1,338	24,00	13,72	24,96	342,45	5%
	3	0,69	481,86	1,643	22,66	12,75	23,00	293,25	5%
	4	0,90	446,95	1,377	28,96	13,00	24,97	324,61	7%
	5	0,87	443,27	1,298	27,86	13,70	24,93	341,54	6%
	6	0,70	451,32	1,352	22,92	13,75	24,27	333,71	5%
	7	0,69	445,29	1,286	22,60	14,08	24,60	346,37	5%
	8	1,04	375,27	1,195	32,68	12,93	24,29	314,07	8%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,80	447,39	1,368	25,81	13,42	24,43	327,86	0,06
	$s_x$	0,12	30,44	0,126	3,43	0,44	0,61	17,63	0,01
	$v_x$	14,75%	6,80%	9,21%	13,29%	3,31%	2,48%	5,38%	16,67%

#### Příloha 4: Výsledky ze statické zkoušky ve smyku – rychlost zatížení 50 mm/min

Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
50	1	1,15	487,40	1,579	2,20	12,81	24,10	308,72	9%
	2	1,18	470,21	1,578	2,23	12,35	24,12	297,88	10%
	3	1,32	406,32	1,312	2,41	12,77	24,25	309,67	10%
	4	0,63	511,36	1,651	1,57	12,79	24,22	309,77	5%
	5	1,01	427,93	1,320	2,02	13,19	24,58	324,21	8%
	6	0,78	477,51	1,534	1,76	12,75	24,41	311,23	6%
	7	1,23	391,99	1,266	2,29	12,40	24,97	309,63	10%
	8	0,82	610,99	1,819	1,80	13,53	24,83	335,95	6%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,01	472,96	1,507	2,04	12,82	24,44	313,38	0,079
	$s_x$	0,23	64,99	0,18	0,28	0,36	0,31	10,81	0,019
	$v_x$	22,78%	13,74%	11,94%	13,71%	2,82%	1,26%	3,45%	24,05%

Zkušební vzorky s otryskaným povrchem									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
50	1	0,57	503,57	1,564	1,51	12,95	24,87	322,07	4%
	2	0,79	532,63	1,606	1,77	13,36	24,83	331,73	6%
	3	0,69	512,60	1,559	1,64	13,18	24,94	328,71	5%
	4	1,49	580,75	1,700	2,63	14,25	23,98	341,72	10%
	5	1,17	570,98	1,698	2,21	13,49	24,92	336,17	9%
	6	0,79	546,47	1,650	1,73	13,54	24,46	331,19	6%
	7	1,01	475,85	1,463	2,00	13,22	24,61	325,34	8%
	8	1,05	660,86	2,076	2,06	12,78	24,91	318,35	8%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,95	547,97	1,664	1,94	13,35	24,69	329,41	0,07
	$s_x$	0,28	53,63	0,172	0,34	0,42	0,31	7,06	0,019
	$v_x$	29,42%	9,79%	10,34%	17,44%	3,13%	1,26%	2,14%	27,14%

Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
50	1	0,58	384,97	1,267	1,50	12,52	24,27	303,86	5%
	2	0,32	363,50	1,197	1,20	12,56	24,17	303,58	3%
	3	0,60	509,14	1,531	1,54	13,40	24,82	332,59	5%
	4	0,44	459,37	1,439	1,36	12,94	24,67	319,23	3%
	5	0,91	352,25	1,097	1,90	13,37	24,01	321,01	7%
	6	0,78	411,50	1,325	1,75	12,83	24,21	310,61	6%
	7	0,69	363,02	1,146	1,64	13,10	24,18	316,76	5%
	8	0,60	356,31	1,202	1,53	12,44	23,83	296,45	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,62	400,01	1,276	1,55	12,90	24,27	313,01	0,048
	$s_x$	0,17	53,25	0,139	0,20	0,35	0,31	10,91	0,013
	$v_x$	28,13%	13,31%	10,89%	13,09%	2,73%	1,26%	3,49%	27,08%

Zkušební vzorky bez povrchové úpravy									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
50	1	1,09	396,23	1,216	2,12	13,31	24,48	325,83	8%
	2	1,81	457,01	1,439	3,00	12,89	24,64	317,61	14%
	3	1,11	482,01	1,383	2,18	14,28	24,41	348,57	8%
	4	1,77	424,89	1,295	2,95	13,33	24,62	328,18	13%
	5	1,03	387,41	1,207	2,05	13,12	24,47	321,05	8%
	6	0,65	450,75	1,372	1,60	13,27	24,76	328,57	5%
	7	0,53	511,79	1,764	1,44	12,60	23,02	290,05	4%
	8	0,67	492,62	1,567	1,62	12,79	24,58	314,38	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,08	450,34	1,405	2,12	13,20	24,37	321,78	0,082
	$s_x$	0,46	42,05	0,175	0,55	0,48	0,52	15,41	0,035
	$v_x$	42,16%	9,34%	12,46%	26,08%	3,62%	2,14%	4,79%	42,68%

**Příloha 5: Výsledky ze statické zkoušky ve smyku – rychlost zatížení 100 mm/min**

Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
100	1	0,74	594,96	1,809	1,26	12,97	25,36	328,92	6%
	2	0,89	575,50	1,821	1,36	12,58	25,12	316,01	7%
	3	1,35	577,97	1,868	1,63	12,69	24,38	309,38	11%
	4	0,76	671,68	2,092	1,27	13,04	24,62	321,04	6%
	5	0,83	666,20	1,974	1,31	13,39	25,21	337,56	6%
	6	0,65	653,00	2,115	1,20	12,71	24,29	308,73	5%
	7	1,03	563,03	1,742	1,44	13,10	24,67	323,18	8%
	8	0,81	667,57	2,095	1,30	13,11	24,30	318,57	6%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,88	621,24	1,940	1,35	12,95	24,74	320,42	0,068
	$s_x$	0,21	44,39	0,139	0,13	0,25	0,40	9,05	0,017
	$v_x$	23,30%	7,15%	7,16%	9,43%	1,95%	1,62%	2,83%	25,00%

<b>Zkušební vzorky s otryskaným povrchem</b>									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
100	1	0,78	508,97	1,607	1,29	13,12	24,14	316,72	6%
	2	0,85	504,97	1,559	1,32	13,07	24,79	324,01	7%
	3	1,16	614,98	1,806	1,51	13,76	24,75	340,56	8%
	4	0,76	573,01	1,627	1,26	14,02	25,12	352,18	5%
	5	0,61	668,74	2,103	1,20	12,85	24,75	318,04	5%
	6	0,56	607,98	2,066	1,16	12,02	24,48	294,25	5%
	7	0,66	560,95	1,697	1,22	13,23	24,98	330,49	5%
	8	0,73	717,28	2,153	1,25	13,34	24,97	333,10	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,77	594,61	1,827	1,28	13,18	24,75	326,17	0,058
	$s_x$	0,17	69,02	0,228	0,10	0,56	0,29	16,32	0,011
	$v_x$	22,48%	11,61%	12,48%	7,76%	4,27%	1,18%	5,00%	18,97%

<b>Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem</b>									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
100	1	1,06	470,48	1,425	1,45	13,71	24,09	330,27	8%
	2	1,29	495,44	1,494	1,60	13,30	24,93	331,57	10%
	3	0,86	415,44	1,281	1,34	13,17	24,63	324,38	7%
	4	1,13	427,21	1,321	1,48	13,57	23,83	323,37	8%
	5	0,84	507,71	1,639	1,33	12,64	24,50	309,68	7%
	6	1,15	409,71	1,311	1,50	12,53	24,95	312,62	9%
	7	0,92	510,76	1,620	1,37	12,89	24,46	315,24	7%
	8	0,72	643,92	2,119	1,24	12,53	24,25	303,85	6%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,00	485,09	1,526	1,41	13,04	24,46	318,87	0,076
	$s_x$	0,18	71,24	0,258	0,11	0,44	0,37	9,38	1%
	$v_x$	18,09%	14,69%	16,91%	7,50%	3,34%	1,50%	2,94%	0,17

<b>Zkušební vzorky bez povrchové úpravy</b>									
Rychlost měření	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
mm/min		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
100	1	1,13	536,71	1,698	1,50	12,99	24,33	316,05	9%
	2	0,83	451,42	1,557	1,31	12,07	24,02	289,92	7%
	3	0,53	471,31	1,461	1,13	13,28	24,29	322,57	4%
	4	0,99	463,07	1,484	1,41	12,71	24,55	312,03	8%
	5	0,84	561,55	1,731	1,33	12,97	25,01	324,38	6%
	6	1,12	472,52	1,495	1,49	12,68	24,93	316,11	9%
	7	0,91	517,11	1,583	1,37	13,38	24,42	326,74	7%
	8	1,12	575,52	1,788	1,52	12,70	25,34	321,82	9%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,94	506,15	1,600	1,38	12,85	24,61	316,20	7%
	$s_x$	0,19	44,90	0,116	0,12	0,38	0,41	10,94	2%
	$v_x$	20,43%	8,87%	7,25%	8,76%	2,99%	1,68%	3,46%	20,55%

**Příloha 6: Výsledky z kvazistatické zkoušky ve smyku – 200 cyklů**

<b>Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
200	1	0,87	601,69	1,790	452,82	13,75	24,44	336,05	6%
	2	0,92	575,58	1,785	462,90	13,31	24,22	322,37	7%
	3	0,75	513,29	1,632	435,86	13,06	24,08	314,48	6%
	4	1,01	524,63	1,627	467,14	13,35	24,16	322,54	8%
	5	1,00	652,92	1,906	464,14	14,12	24,26	342,55	7%
	6	0,88	451,80	1,531	457,04	12,26	24,07	295,10	7%
	7	0,96	411,21	1,382	451,06	12,17	24,45	297,56	8%
	8	0,98	495,48	1,528	448,58	13,12	24,71	324,20	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,91	533,02	1,665	455,85	13,15	24,24	318,66	0,07
	$s_x$	0,08	78,19	0,164	9,85	0,67	0,14	16,56	0,007
	$v_x$	9,09%	14,67%	9,85%	0,02	0,05	0,01	0,05	10,00%

<b>Zkušební vzorky s otryskaným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
200	1	0,75	586,59	1,838	468,04	13,02	24,51	319,12	6%
	2	0,75	509,74	1,638	465,94	12,60	24,70	311,22	6%
	3	0,86	495,08	1,664	465,68	12,27	24,25	297,55	7%
	4	0,71	550,41	1,708	464,34	13,39	24,06	322,16	5%
	5	1,06	592,34	1,730	474,88	14,20	24,11	342,36	7%
	6	0,77	420,10	1,364	473,36	12,80	24,07	308,10	6%
	7	0,67	422,80	1,569	463,04	11,35	23,74	269,45	6%
	8	0,92	472,21	1,455	477,46	13,09	24,80	324,63	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,80	511,01	1,644	467,90	12,80	24,21	309,99	0,062
	$s_x$	0,12	65,66	0,138	4,20	0,83	0,29	20,99	0,007
	$v_x$	15,20%	12,85%	8,39%	0,90%	6,45%	1,21%	6,77%	11,29%

<b>Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
200	1	0,54	484,49	1,587	407,60	12,50	24,42	305,25	4%
	2	0,53	461,95	1,439	429,56	13,03	24,64	321,06	4%
	3	0,58	438,60	1,335	417,54	13,44	24,44	328,47	4%
	4	0,56	384,33	1,185	418,76	13,50	24,03	324,41	4%
	5	0,63	383,91	1,228	424,02	12,75	24,53	312,76	5%
	6	0,47	440,01	1,380	424,06	13,01	24,51	318,88	4%
	7	0,72	524,60	1,514	422,22	14,23	24,35	346,50	5%
	8	0,60	452,32	1,467	435,40	12,54	24,59	308,36	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,58	446,28	1,392	422,40	13,13	24,44	320,71	0,044
	$s_x$	0,07	44,30	0,130	7,76	0,54	0,18	12,23	0,005
	$v_x$	12,09%	9,93%	9,34%	1,84%	4,14%	0,73%	3,81%	11,36%

<b>Zkušební vzorky bez povrchové úpravy</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
200	1	0,87	437,96	1,448	457,54	12,24	24,71	302,45	7%
	2	0,82	396,80	1,379	452,72	11,90	24,18	287,74	7%
	3	0,89	403,72	1,288	458,40	12,65	24,77	313,34	7%
	4	0,91	424,17	1,312	443,16	13,37	24,19	323,42	7%
	5	0,55	486,54	1,580	441,84	12,79	24,08	307,98	4%
	6	0,82	378,02	1,223	435,94	12,70	24,33	308,99	6%
	7	0,65	548,50	1,640	448,70	13,48	24,81	334,44	5%
	8	0,67	398,15	1,275	431,08	12,64	24,70	312,21	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,77	434,23	1,393	446,17	12,72	24,47	311,32	0,061
	$s_x$	0,12	53,27	0,141	9,28	0,49	0,29	12,93	0,01
	$v_x$	15,91%	12,27%	10,12%	2,08%	3,85%	1,16%	4,15%	16,39%

### Příloha 7: Výsledky z kvazistatické zkoušky ve smyku – 500 cyklů

<b>Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
500	1	1,04	540,07	1,672	1080,82	13,18	24,51	323,04	8%
	2	0,97	572,65	1,924	1083,12	12,36	24,08	297,63	8%
	3	1,09	454,98	1,489	1078,32	12,63	24,20	305,65	9%
	4	1,37	493,20	1,481	1091,28	13,63	24,43	332,98	10%
	5	1,29	570,66	1,726	1153,58	13,70	24,14	330,72	9%
	6	1,17	528,72	1,666	1090,80	12,83	24,74	317,41	9%
	7	1,08	528,61	1,634	1085,58	13,13	24,64	323,52	8%
	8	0,91	397,86	1,298	1054,52	12,65	24,23	306,51	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,12	510,84	1,611	1089,75	13,01	24,37	317,18	0,085
	$s_x$	0,15	56,00	0,176	26,44	0,45	0,23	11,92	0,009
	$v_x$	13,00%	10,96%	10,92%	2,43%	3,47%	0,94%	3,76%	10,59%

<b>Zkušební vzorky s otryskaným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
500	1	1,00	496,30	1,495	1114,52	13,62	24,38	332,06	7%
	2	0,71	637,16	1,873	1115,88	13,67	24,88	340,11	5%
	3	0,92	540,34	1,667	1120,62	13,42	24,15	324,09	7%
	4	0,82	525,46	1,615	1113,24	13,18	24,68	325,28	6%
	5	1,04	523,99	1,616	1112,72	13,27	24,44	324,32	8%
	6	0,91	615,60	1,862	1118,44	13,34	24,79	330,70	7%
	7	1,02	486,54	1,536	1113,48	12,94	24,48	316,77	8%
	8	0,90	638,84	1,895	1120,02	13,80	24,43	337,13	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,92	558,03	1,695	1116,12	13,41	24,53	328,81	0,068
	$s_x$	0,10	58,69	0,149	2,96	0,27	0,22	7,17	0,008
	$v_x$	11,26%	10,52%	8,79%	0,27%	1,98%	0,91%	2,18%	11,76%

Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
500	1	0,65	363,73	1,112	978,04	13,29	24,61	327,07	5%
	2	0,66	461,19	1,511	988,08	12,54	24,34	305,22	5%
	3	0,52	358,01	1,130	980,04	12,78	24,80	316,94	4%
	4	0,52	434,52	1,394	979,50	12,76	24,43	311,73	4%
	5	0,60	376,40	1,179	985,66	13,04	24,49	319,35	5%
	6	0,60	401,99	1,288	977,14	12,79	24,40	312,08	5%
	7	0,60	388,93	1,175	990,22	13,37	24,76	331,04	4%
	8	0,87	422,99	1,311	985,02	13,14	24,55	322,59	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,63	400,97	1,262	982,96	12,96	24,55	318,25	0,048
	$s_x$	0,10	33,95	0,131	4,60	0,27	0,16	8,01	0,008
	$v_x$	16,56%	8,47%	10,38%	0,47%	2,10%	0,64%	2,52%	16,67%

Zkušební vzorky bez povrchové úpravy									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
500	1	0,64	415,41	1,361	1067,20	12,48	24,46	305,26	5%
	2	0,81	422,67	1,365	1112,42	12,50	24,78	309,75	6%
	3	0,69	546,01	1,770	1063,06	12,77	24,15	308,40	5%
	4	0,81	497,95	1,576	1070,06	12,81	24,67	316,02	6%
	5	0,64	549,47	1,801	1045,22	12,51	24,39	305,12	5%
	6	0,95	474,25	1,443	1073,18	13,44	24,46	328,74	7%
	7	0,82	486,20	1,497	1069,10	13,29	24,43	324,67	6%
	8	0,81	432,51	1,405	1077,32	12,62	24,39	307,80	6%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,77	484,57	1,545	1071,46	12,83	24,48	314,00	0,06
	$s_x$	0,11	49,12	0,168	18,77	0,36	0,19	8,78	0,007
	$v_x$	13,84%	10,14%	10,87%	1,75%	2,83%	0,77%	2,80%	11,67%

### Příloha 8: Výsledky z kvazistatické zkoušky ve smyku – 1000 cyklů

Zkušební vzorky s otryskaným a odmaštěným povrchem									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
1000	1	1,27	530,24	1,742	2294,16	12,45	24,45	304,40	10%
	2	1,20	486,64	1,589	2281,08	12,40	24,70	306,28	10%
	3	1,49	429,21	1,411	2343,30	12,55	24,23	304,09	12%
	4	1,54	479,59	1,473	2395,02	13,18	24,70	325,55	12%
	5	1,29	407,55	1,415	2356,38	11,79	24,43	288,03	11%
	6	1,65	540,99	1,654	2297,58	13,15	24,87	327,04	13%
	7	1,33	560,22	1,759	2279,88	13,04	24,42	318,44	10%
	8	1,59	465,73	1,620	2339,78	12,18	23,61	287,57	13%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,42	487,52	1,583	2323,40	12,59	24,43	307,67	0,113
	$s_x$	0,16	50,38	0,129	38,87	0,47	0,36	14,26	0,011
	$v_x$	11,06%	10,33%	8,15%	1,67%	3,69%	1,49%	4,63%	9,73%

<b>Zkušební vzorky s otryskaným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
1000	1	0,92	553,58	1,619	2223,66	13,84	24,71	341,99	7%
	2	1,22	397,34	1,261	2308,40	12,99	24,26	315,14	9%
	3	0,96	476,43	1,532	2270,10	12,82	24,25	310,89	7%
	4	1,09	552,39	1,731	2298,56	13,14	24,28	319,04	8%
	5	0,75	561,02	1,911	2261,14	11,78	24,92	293,56	6%
	6	1,01	679,36	1,932	2266,74	14,13	24,88	351,55	7%
	7	0,98	568,22	1,772	2302,78	13,10	24,48	320,69	7%
	8	0,99	640,22	1,940	2313,12	13,54	24,37	329,97	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,99	553,57	1,712	2280,56	13,17	24,52	322,85	0,075
	$s_x$	0,13	82,13	0,220	28,65	0,67	0,26	17,03	0,009
	$v_x$	12,73%	14,84%	12,85%	1,26%	5,10%	1,07%	5,28%	12,00%

<b>Zkušební vzorky s odmaštěným povrchem</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
1000	1	0,73	341,30	1,140	1982,34	12,20	24,55	299,51	6%
	2	0,53	359,51	1,160	2002,18	12,48	24,84	310,00	4%
	3	0,74	355,82	1,156	1943,24	12,61	24,41	307,81	6%
	4	0,56	428,71	1,429	1931,12	12,16	24,67	299,99	5%
	5	0,86	344,39	1,113	1979,68	12,76	24,26	309,56	7%
	6	0,72	406,70	1,386	1970,38	12,15	24,15	293,42	6%
	7	0,68	424,37	1,471	1940,66	11,75	24,55	288,46	6%
	8	0,65	370,54	1,242	1973,52	12,30	24,26	298,40	5%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	0,68	378,92	1,262	1965,39	12,30	24,46	300,89	0,056
	$s_x$	0,10	33,36	0,135	22,95	0,30	0,22	7,29	0,008
	$v_x$	14,47%	8,80%	10,70%	1,17%	2,40%	0,90%	2,42%	14,29%

<b>Zkušební vzorky bez povrchové úpravy</b>									
Počet cyklů	č.vzorku	MAX prodloužení	MAX síla	Mez pevnosti v tahu	Čas	L	b	A	ε
		mm	N	Mpa	s	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
1000	1	0,98	447,19	1,420	2218,94	12,93	24,35	314,85	8%
	2	1,15	326,91	1,007	2244,52	13,08	24,81	324,51	9%
	3	0,91	421,65	1,322	2150,38	13,28	24,01	318,85	7%
	4	0,87	452,21	1,460	2188,10	12,65	24,49	309,80	7%
	5	1,25	449,94	1,341	2267,06	13,48	24,89	335,52	9%
	6	1,06	493,93	1,471	2232,04	13,62	24,66	335,87	8%
	7	1,07	413,89	1,272	2249,16	13,13	24,79	325,49	8%
	8	0,86	432,85	1,436	2155,02	12,28	24,54	301,35	7%
Vyhodnocení	$\bar{a}$	1,02	429,82	1,341	2213,15	13,06	24,57	320,78	0,078
	$s_x$	0,13	45,05	0,143	41,12	0,41	0,27	11,28	0,008
	$v_x$	12,76%	10,48%	10,66%	1,86%	3,13%	1,10%	3,52%	10,26%