



## Diplomová práce

# Analýza lepeného spoje při dynamickém zatížení

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Autor práce:*

**Bc. Daniel Hrnčář**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

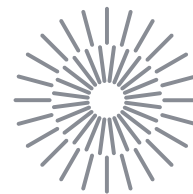
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Analýza lepeného spoje při dynamickém zatížení

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Daniel Hrnčír**

*Osobní číslo:*

S22000216

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Zadávací katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Princip vzniku lepeného spoje, základy teorie lepení. Specifika technologie lepení v automobilovém průmyslu.
2. Hodnocení lepených spojů. Statické a dynamické testy lepených spojů.
3. Pro vybrané pevnostní lepidlo provést testy lepených spojů při statickém a dynamickém zatížení.
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat.
5. Diskuze a závěr.

*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 50 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] SILVA, Lucas Filipe Martins da, Andreas ÖCHSNER a Robert D. ADAMS, ed. Handbook of adhesion technology. Heidelberg: Springer, 2011. Springer reference. ISBN 978-3-642-01168-9.
- [2] ADAMS, Robert D., ed. Adhesive bonding: science, technology and applications. Boca Raton : Cambridge: CRC Press ; Woodhead Pub, 2005. ISBN 978-0-8493-2584-7.
- [3] DWIVEDI, DHEERENDRA KUMAR. FUNDAMENTALS OF METAL JOINING: processes, mechanism and performance. S.I.: SPRINGER, 2021. ISBN 9789811648182.
- [4] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON a Stephen KYLE, ed. Close-range photogrammetry: principles, methods and applications. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1-870325-50-9.
- [5] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 6. listopadu 2023

*Předpokládaný termín odevzdání:* 6. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. listopadu 2023

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

# **Analýza lepeného spoje při dynamickém zatížení**

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá základními principy vzniku lepených spojů, jejich testování a použití v automobilovém průmyslu. V experimentální části byly provedeny testy odolnosti lepeného spoje při zkoušce štípáním. Testy byly realizovány pro statické a dynamické zatížení a pro různé teploty. Charakter porušení lepeného spoje byl hodnocen pomocí digitálního zpracování obrazu za použití softwaru NIS Elements.

Klíčová slova: dynamická zkouška, statická zkouška, lepidlo, lepený spoj, lepení, lepení karoserie

# **Analysis of the Adhesive Bonded Joint under Dynamic Loading**

## **Annotation**

The diploma thesis deals with the basic principles of formation the adhesive bonded joints, their testing and use in the automotive industry. In the experimental part, the wedge tests for assessing bond durability test were performed. Tests were carried out both under static and dynamic loads as well as at different temperatures. The failure behaviour of the adhesive bonded joint was evaluated by using the digital image processing – in this case was used software NIS Elements.

Key words: Dynamic Test, Static Test, Adhesive, Adhesive Bonding Joints, Joining, Bodywork Jointing

## **Poděkování**

Mé poděkování míří především k doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za vedení, pomocnou ruku a skvělý přístup při vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl velice poděkovat Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při provádění laboratorních zkoušek. Největší díky však patří mým rodičům a přítelkyni za velikou podporu a oporu při studiu.

## Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	10
1.Úvod.....	12
2.Teoretická část .....	13
2.1 Princip vzniku lepeného spoje .....	13
2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti lepidel.....	13
2.1.2 Průběh vytváření lepeného spoje .....	15
2.1.3 Dělení lepidel v automobilovém průmyslu.....	16
2.1.4 Výhody a nevýhody lepených spojů .....	18
2.2 Lepení v automobilovém průmyslu .....	20
2.3 Hodnocení lepených spojů.....	20
2.4.1 Příprava vzorků lepených spojů v automobilové karoserii.....	23
2.4.2 Statické testy lepených spojů .....	25
2.4.3 Dynamické testy lepených spojů .....	34
2.4.4 Vyhodnocování testů lepených spojů.....	36
3.Experimentální část.....	38
3.1 Použité materiály .....	38
3.2 Zjištění mechanických vlastností použitého typu plechu .....	39
3.3 Konstrukce zkušební přípravku .....	39
3.4 Příprava zkušebních vzorků.....	42
3.4.1 Stříhání a vrtání plechových pásků.....	42
3.4.2 Lepení zkušebních vzorků .....	43
3.4.3 Vytvrzování zkušebních vzorků.....	46
3.5 Provedení dynamických zkoušek lepeného spoje.....	47
3.5.1 Příprava zkušební stroje.....	47
3.5.2 Průběh dynamické zkoušky .....	47
3.6 Provedení statických zkoušek lepeného spoje .....	50



3.6.1 Příprava zkušebního stroje.....	51
3.6.2 Průběh statické zkoušky.....	51
3.7 Vyhodnocování naměřených dat.....	52
3.7.1 Zpracování naměřených dat.....	52
3.7.2 Výpočet potřebných veličin.....	54
3.7.3 Shrnutí zjištěných výsledků.....	54
3.8 Obrazová analýza.....	63
3.8.1 Fotografická dokumentace vzorků.....	63
3.8.2 Nastavení softwaru.....	64
3.8.3 Vyhodnocení.....	65
3.9 Statistické vyhodnocení výsledků.....	76
4.Diskuze.....	78
5.Závěr.....	81
Literatura.....	82
Seznam příloh.....	85

## Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
$\alpha$	hladina významnosti	-
$A$	tažnost	%
AF	adhezní porušení	-
$A_g$	homogenní tažnost	%
$b$	šířka lepeného spoje	mm
BH	bake-hardening	-
CF	kohezní porušení	-
DOVŠ	dynamická odolnost vůči štípání	N/mm
$E$	modul pružnosti v tahu	MPa
$F$	hodnota testovacího kritéria	-
$F_{krit}$	kritická hodnota testovacího kritéria	-
$F$	síla	N
$\Delta L$	integrovaná dráha	m
$L$	délka lepeného spoje	m
$L_1$	integrační mez 25 % dráhy	m
$L_2$	integrační mez 90 % dráhy	m
LE	lomová energie	J
$p$	nejmenší hladina významnosti	-
PUR	polyuretan	-
PŠS	průměrná štípací síla	N
$R_{eH}$	maximální mez kluzu	MPa
$R_{eL}$	minimální mez kluzu	MPa
$R_m$	mez pevnosti	MPa
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	MPa

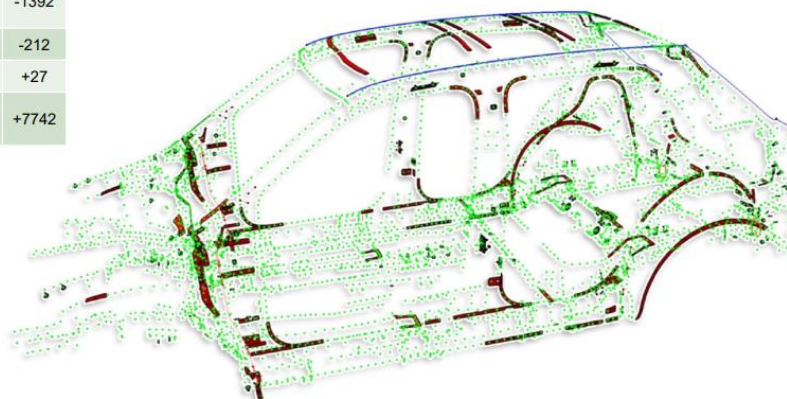
s	výběrová směrodatná odchylka	-
SCF	speciální kohezní porušení	-
SOVŠ	statická odolnost vůči štípání	N/mm

# 1.Úvod

V automobilovém průmyslu se lepení běžně používá jako alternativa k tradičním metodám spojování, ať už svařování, nýtování nebo šroubování. Lepení nejen zvyšuje bezpečnost, ale také zjednodušuje mnoho výrobních procesů a zlepšuje tak ekonomickou stránku celé výroby.

Výroba automobilů zahrnuje mnohé oblasti, kde se s aplikací lepidel můžeme setkat. Ať už se jedná o díly karoserií a interiérů, zpětná zrcátka, obložení stropu, tlumicí a tepelně izolační díly, potahy sedadel a mnohé další. Speciálně při výrobě karoserie automobilu se postupně zvyšuje podíl lepených spojů na úkor spojování pomocí svařování, viz Obr. 1.

	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



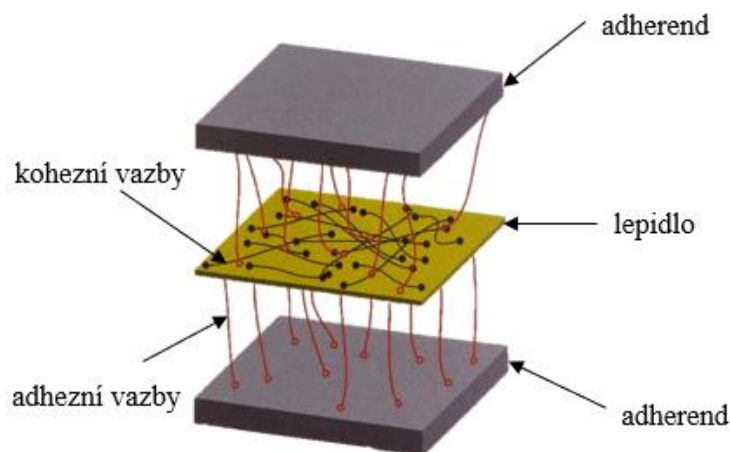
**Obr. 1** Vývoj a použití lepených spojů na karosérii automobilu [1]

Lepené spoje ovšem jako jiné technologie přináší i mnohé nevýhody. Citlivost lepených spojů především na vlhkost a teplotu může vést k jejich postupnému degradování. Celý proces lepení vyžaduje kvalitní přípravu povrchu pro zajištění adheze.

Cílem diplomové práce je provést dynamické a statické zkoušky lepených spojů vytvořených pomocí dvou typů epoxidových lepidel značek SikaPower® a BETAMATE™, a to za různých teplotních podmínek. Následně je cílem ověřit fakt, že tato lepidla mohou být používána jako ekvivalentní, tudíž by na výrobu nemělo mít vliv, jaká značka bude při lepení použita. Posledním cílem je ověření skutečnosti, že jelikož se jedná o epoxidová lepidla, měla by po vytvrzovacím procesu vykazovat poměrně stabilní mechanické vlastnosti při různých teplotních podmínkách.

## 2. Teoretická část

Pojem lepení se používá při označování technologie vytváření nerozebíratelných spojů stejných nebo různých materiálů pomocí lepidla. Lepidlo zajišťuje ve spojení dvě důležité funkce. První z nich je adheze (přilnavost) mezi lepidlem a podkladem a druhou koheze (soudržnost) ve vrstvě lepidla, viz Obr. 2. V dnešní době je na lepení nahlíženo jako na moderní způsob vytváření nerozebíratelných spojů, avšak samotná technologie je stará již stovky let. [2, 3]



Obr. 2 Schéma kohezních a adhezních vazeb [3]

### 2.1 Princip vzniku lepeného spoje

Rozdělujeme dva základní typy lepení, a to strukturální a nestructurální. Mezi strukturální lepení se řadí lepené spoje, které vykazují pevnost ve smyku vyšší než 7 MPa. Nejčastěji se jedná o konstrukční lepené spoje, které jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích a konstrukčních aplikacích. Naopak jako nestructurální lepení se označují lepené spoje, které nejsou určeny k přenášení zatížení, ale pouze ke spojení dvojice adherendů. Do této skupiny můžeme řadit lepené spoje používané například v obalovém průmyslu. [4]

#### 2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti lepidel

##### Adheze

Adheze může být definována jako stav, kdy jsou dvě tělesa držena pohromadě těsným mezifázovým kontaktem tak, že mechanická síla může být přenášena přes rozhraní mezi dvěma tělesy. [4]

Základem pro uplatnění adhezních sil je co nejlepší styk lepidla s povrchem lepeného materiálu. Nutně tedy závisí na vlastnostech lepidla jako je smáčivost a viskozita, ale i na vlastnostech povrchu lepené látky jako je čistota nebo drsnost. [2]

Základním předpokladem dobrých adhezních vlastností je zbavení povrchu nečistot, koroze a látek působících separačně, jako jsou oleje, kondenzovaná voda či absorbované plyny povrchem. [2]

Adhezní síly mohou být vytvořeny v důsledku primárních chemických vazeb, fyzikálně nebo mechanicky v důsledku nerovností povrchu lepených částí a zakotvení lepidla v nich. [2]

### **Koheze**



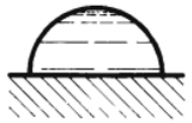
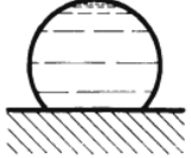
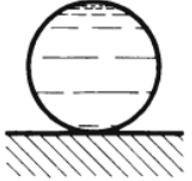
Koheze, soudržnost nebo také „vnitřní síla“ označuje účinky přitažlivých sil mezi atomy a molekulami působícími v látce. Tato skutečnost tvoří rozdíl od adheze, kde síly působí mezi různými látkami. [5]

Významný vliv na kohezi má typ adheziva a okolní teplota. V případě koheze u adhezních vrstev má její pokles vliv především na tečení použitého adheziva. [5]

Poměr mezi kohezními a adhezními silami má zásadní vliv na pevnost vytvořeného lepeného spoje. Při tvorbě lepeného spoje proto musí být zajištěna rovnováha mezi složením použitého adheziva, výběrem a povrchovou úpravou adherendů a koncovým způsobem vytvrzování, aby bylo docíleno optimální pevnosti vzniklého lepeného spoje. [5]

### **Smáčení**

Smáčení je založeno na principu toku, který závisí na působících silách, reologickém chování lepidla, vlastnostech povrchu a fyzikálně-chemických vlastnostech lepidla. Dále je smáčení ovlivněno mezipovrchovým napětím lepidla vůči vzduchu, a také mezipovrchovým napětím mezi lepidlem a lepeným povrchem. Smáčení je definováno úhlem, který svírá kapka lepidla s povrchem lepené součásti, přičemž čím menší úhel svírá, tím je smáčení lepší. Dobré smáčení samo o sobě nezaručí vysoké adhezní síly, ale výrazně přispívá ke vzniku dobré adheze. Optimální smáčení je, pokud je úhel smáčení do  $30^\circ$ , viz Obr. 3. [3, 4]

$\alpha = 0^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha > 90^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
				
ideální smáčení	dobré smáčení		špatné smáčení	nedokonalé smáčení

Obr. 3 Schéma hodnocení smáčivosti [5]

### 2.1.2 Průběh vytváření lepeného spoje

Při tvorbě lepeného spoje je nutné splnit určité podmínky definované buď výrobcem nebo výrobním postupem. Technický postup lepení je v podstatě vždy dost podobný a nejčastěji tvořen těmito kroky: [2, 6]

#### Příprava povrchu

Hlavním cílem přípravy povrchu je dosažení maximální smáčivosti a připravení povrchu pro vznik co nejlepších adhezních vazeb. Tyto faktory mají totiž výrazný vliv na výslednou pevnost lepeného spoje. Mezi procesy používané pro přípravu lepení jak kovových, tak nekovových materiálů patří jak fyzikální operace jako například broušení, pískování, ultrazvukové čištění, tak chemické operace jako je odmašťování, moření, fosfátování apod. [6]

#### Příprava lepidla

Většina výrobců už v dnešní době dodává lepidla ve stavu, kdy jsou určena rovnou k použití ve formě různých kartuší či větších nádob. [6]

#### Nanášení lepidla

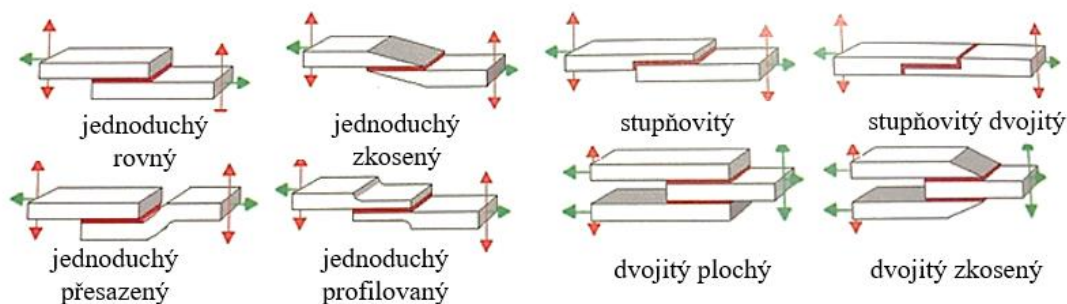
Dalším faktorem, který působí na vznik lepeného spoje, je způsob nanášení lepidla. Lepidlo musí pokrývat celou lepenou plochu a tloušťka nanášené vrstvy musí odpovídat vlastnostem použitého typu lepidla. Lepidla lze nanášet ručně pomocí různých mechanických dávkovačů, vytlačovacích pistolí, ručních stěrek, nebo lze využít strojní nanášení pomocí stříkacích pistolí, polévacích zařízení či nanášecích hlav. [2, 6]

## Tvorba lepeného spoje

Jedním z hlavních parametrů při tvorbě lepeného spoje je tzv. montážní doba, tedy doba, během které musí být přiložen druhý adherend. Následně musí dojít k zafixování adherendů a zajištění optimálního přitlaku pro vytvoření lepeného spoje. Velký či malý přitlak by mohl negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti spoje například vytlačováním lepidla ze slepu, a tím snižovat celkovou pevnost lepeného spoje. Další podstatnou proměnou je teplota, při které lepený spoj vzniká. Teplotní podmínky rozdělují lepení na lepení za studena (15-25 °C), lepení za zvýšených teplot (25-100 °C) a lepení za horka na 100 °C. [2, 6]

## Typy lepených spojů

Návrh lepeného spoje by měl zajistit dva hlavní cíle. Řízení způsobu namáhání lepeného spoje zejména lepidla, a provedení spoje tak, aby mohlo dojít k bezchybnému provedení slepení a bylo vyloučeno nebezpečí vytékání lepidla ze spoje. Ideální provedení lepeného spoje je tedy takové, aby byl zatěžován nejlépe smykovým namáháním v co největší ploše spoje. Hlavním používaným typem spojení je tedy přeplátovaný spoj, viz Obr. 4. [3]



Obr. 4 Typy používaných lepených spojů [3]

### 2.1.3 Dělení lepidel v automobilovém průmyslu

Obecně existuje mnoho typů rozdělení lepidel. Mezi nejčastější způsoby patří rozdělení dle způsobu vytvrzování (chemicky/fyzikálně), dle funkce (strukturální/nestrukturální), dle chemické vazby, nebo podle materiálového základu (organický/anorganický), kde jsou speciálním typem silikony, které vykazují organické i anorganické vlastnosti, viz Obr. 5. Níže uvedené rozdělení je podle nejvíce používaných



typů lepidel v automobilovém průmyslu při lepení karoserie, jelikož tímto tématem se práce zabývá. [3, 4, 7]



*Obr. 5 Základní rozdělení lepidel [7]*

### **Epoxidová lepidla**

Epoxidová lepidla existují jako jednosložková tak dvousložková. Nejčastěji se jedná o epoxidové pryskyřice. Velmi rozšířená jsou epoxidová lepidla pro strukturální lepené spoje. Jednosložková epoxidová lepidla mají výhodu v jednoduchém použití a manipulaci, protože není nutné dodržování různých poměrů jednotlivých složek. Nevýhodou může být nutnost vyšší teploty při vytvrzování (60-200 °C), které je však ve výrobě automobilu dosaženo při kataforetickém lakování a následném vypalování. Opakem jsou pak dvousložková epoxidová lepidla, kde je nutné dodržet poměry obou složek, ale jejich vytvrzení může probíhat již při pokojové teplotě. Dvousložková varianta je však při lepení karoserie jen zřídka používána. Epoxidová lepidla jsou dostupná se širokou škálou vlastností. Speciálně vyvinutá epoxidová lepidla jsou například schopna absorbovat olej, díky čemuž je lze aplikovat přímo na naolejované plechy v automobilovém průmyslu při výrobě karosérií. Dalšími důležitými vlastnostmi těchto lepidel je jejich houževnatost, pevnost a použitelnost v širokém teplotním intervalu. Využívány jsou především pro lepení lemových spojů na panelových dílech (dveře, kapota) nebo v podlahových částech karoserie. [3, 7, 8]

### **Polyuretanová lepidla**

Polyuretanová lepidla neboli PUR jsou dostupná ve formě reaktivních tavných lepidel. Jejich výhoda spočívá ve výborné přilnavosti i k obtížně lepitelným povrchům, vysoké odolnosti vůči korozním médiím a vysokou teplotní odolností. Vysoká flexibilita spoje a vyvážený poměr mezi pevností a tažností je ideální předpoklad pro spojování materiálů s různou tepelnou roztažností. Také se využívá jejich tlumících a těsnících vlastností. Nejznámější oblastí použití těchto lepidel je lepení zadních a předních skel v automobilovém průmyslu. Také jsou využívána jako montážní či výplňová lepidla. [3, 7]

## **Kaučuková lepidla**

Tato lepidla jsou tolerantní k lepení povrchů pokrytých olejovou vrstvou. Pro vytvrzení kaučukových lepidel je nutné provedení vulkanizace (zesíťování), čímž jsme schopni dosahovat pevností ve smyku kolem 12 MPa. V minulosti se používala pouze jako výplňová lepidla či tmely, ale v dnešní době se s nimi může setkat při spojování vnitřních výztuh kapoty nebo střechy, kde se spoléhá na jejich dobré tlumicí a antivibrační vlastnosti. [7, 8]

### **2.1.4 Výhody a nevýhody lepených spojů**

Jako každá jiná technologie přináší i lepení své výhody a nevýhody.

#### **Výhody**

Možnost vytvářet lepené spoje mezi různými materiály, různých tlouštěk či dokonce kombinovat v jednom lepeném spoji kovový a nekovový materiál například kov + plast. Díky této skutečnosti lze vytvářet vícemateriálové konstrukční řešení. Lze také lepením spojovat poměrně široké spektrum geometrií lepených součástí. [3, 4, 6, 9]

Nedochází k narušení ani ovlivnění struktury spojovaných částí jako tomu je například u svařování či nýtování. Žádné tepelné ovlivnění struktury ani tepelná deformace, čímž je docíleno zachování mechanických vlastností základních materiálů. [3, 4, 6]

Mezi další výhody patří relativně velká dynamická pevnost při malé hmotnosti spoje, minimální koncentrace napětí v lepeném spoji, schopnost redistribuce napěťových špiček místním plastickým tokem a vysoká schopnost tlumení, z čehož plynou například akustické výhody. [3, 4, 6, 9]

Použitím lepeného spoje nedochází k viditelným vlivům například na barvu nebo obecně vizuální vlastnosti lepených součástí. [3]

Jednoduchá možnost automatizace lepení v procesech hromadné výroby a díky širokému spektru dávkovací techniky lze využívat lepení v mikro i makro procesech, tedy od oblastí mikrotechniky až po lepení například součástí v leteckém průmyslu. [3]

Dobrá možnost kombinace lepení s dalšími technologickými procesy spojování jako je například bodové svařování, a tím vytváření hybridních spojů. Tyto spoje kombinují

výhody jednotlivých metod k dosažení co nejlepších ať už mechanických, fyzikálních či chemických vlastností vytvořeného spoje. Spojení bodového svařování a lepení se široce využívá v automobilovém průmyslu při výrobě karosérie. [3]

### **Nevýhody**

Mezi hlavní nevýhody spojování lepenými spoji patří nízká tepelná, někdy i chemická a mechanická odolnost oproti použitému lepenému materiálu. [3, 6]

V některých případech lepení je nutná povrchová úprava ke zlepšení adhezních podmínek lepených součástí, jako je například odstranění barvy, nečistot či odmaštění. [3, 4, 9]

Mezi další nevýhody lepených spojů patří jejich tendence k tečení při statickém zatížení nebo při zvýšených teplotách. Dále pak náchylnost lepených spojů k zatěžování odlupováním. [3, 4]

Životnost lepeného spoje je závislá na okolním prostředí, kterému je vystaven, tudíž v průběhu času může docházet k jeho postupné degradaci. [4]

Tuhnutí lepidel v lepených spojích jsou časově závislé procesy. Jejich vytvrzování je tedy spojeno s časovými limity, po které je nutné lepidlo vytvrzovat a nelze tyto časy jednoduše obejít. Dobu vytvrzování však lze ovlivnit a zkrátit za pomoci tepla. [3, 4]

Další nevýhodou může být nutnost zabezpečení předepsaného postupu lepení a nutnost vytvoření výborných mechanických a fyzikálně-chemických podmínek pro dosažení kvalitního pevného spoje. [4, 6]

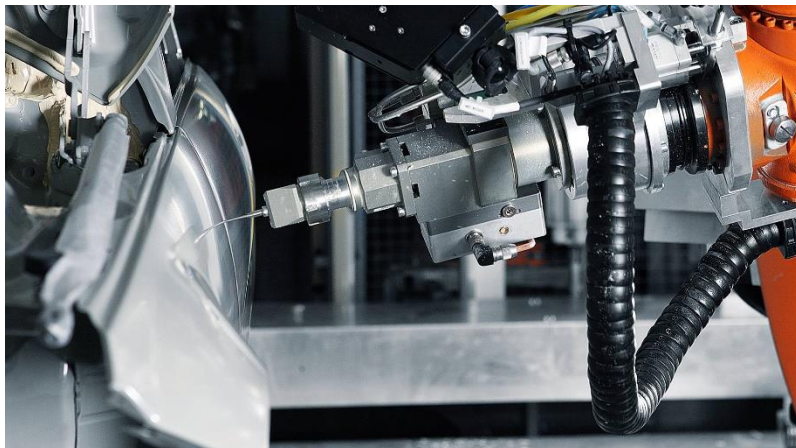
Lepené spoje mají obecně omezenou možnost oprav a demontáže. Některá tavná lepidla sice poskytují možnost nedestruktivní demontáže, z čehož plyne výhoda pro případnou recyklaci, ovšem pro většinu lepicích systémů představuje oprava či demontáž velkou překážku. [3, 9]

Velmi složité jsou pevnostní výpočty lepených spojů, jelikož deformační chování lepidel je závislé na čase, frekvenci zatěžování a teplotě, tudíž stanovení charakteristických mechanických hodnot pro daný lepicí systém je náročné. [3, 9]

## 2.2 Lepení v automobilovém průmyslu

V oblasti automobilového průmyslu dochází k mnohostrannému využívání technologií lepení, viz Obr. 6. Nejen při výrobě osobního automobilu, ale i nákladních automobilů, autobusů a obytných vozů se můžeme setkat s lepenými spoji. Díky lepení jsme schopni nahrazovat či omezovat konvenční techniky spojování jako je svařování, nýtování nebo šroubování. Zjednodušuje pracovní proces výroby a snižuje i ekonomické náklady při výrobě. Značnou výhodou použití lepených spojů při výrobě automobilu je dosahování nižší celkové hmotnosti vozu, čímž se opět snižují náklady na provoz a spotřebu vyrobeného vozidla. Jednoznačnou výhodou lepených spojů je pak schopnost spojení různých typů materiálů, od skla, přes plastové díly až po ocelové části karoserie. Další důležitá vlastnost lepidel použitých na výrobu vozidla je ochrana vůči korozi například aplikací lepidla v lemech karoserie. Velký vliv mají lepidla i co se týče výsledné tuhosti a crashové odolnosti vozidla. [9–12]

Lepení se při výrobě automobilu využívá v celé řadě případů: montáž interiéru a exteriéru, strukturální lepení karoserie, lepení autoskel nebo zvukové a tepelné izolace. Mezi přední dodavatele lepidel pro automobilový průmysl můžeme zařadit například společnosti Henkel KG a A, SIKA Schweiz AG nebo Dow Automotive. [7, 10–12]



*Obr. 6 Ukázka procesu lepení v automobilové výrobě [13]*

## 2.3 Hodnocení lepených spojů

Pro možné posuzování a hodnocení vlastností lepidel a vytvořených lepených spojů, je nutná existence norem, díky kterým lze zkoušky reprodukovat. Z důvodu toho, že lze vytvářet neomezené množství lepených systémů, tedy různých kombinací lepidel a substrátů, jsou zkoušky lepených spojů normalizovány pouze do určité míry. [7]

V současné době se používají zkoušky na zjišťování všeobecných vlastností lepidel např. podíl sušiny a barva. Dále pak zkoušky fyzikálních vlastností např. tekutost, objemová hmotnost a zkoušky chemických vlastností jako je reaktivita lepidla. Většinou tyto zkoušky provedou sami výrobci a uvedou je k příslušnému lepidlu v jeho materiálovém listu. [7]

Na tyto zkoušky následně navazují normalizované zkoušky již vytvořených lepených spojů, u kterých se zjišťují především mechanické vlastnosti lepených systémů, viz Tab. 1. Do těchto zkoušek se promítají mechanické vlastnosti jak lepidla, tak lepeného substrátu. Dále pak konstrukce a tvar lepeného spoje spolu s povrchem substrátu. [7]

Dále lze zkoušky lepených spojů rozdělit na destruktivní, jejichž výsledkem je porušení lepeného spoje a nedestruktivní zkoušky, které mají za cíl odhalit vady lepených spojů jako jsou póry nebo dutiny, viz Tab. 2. [5, 7]

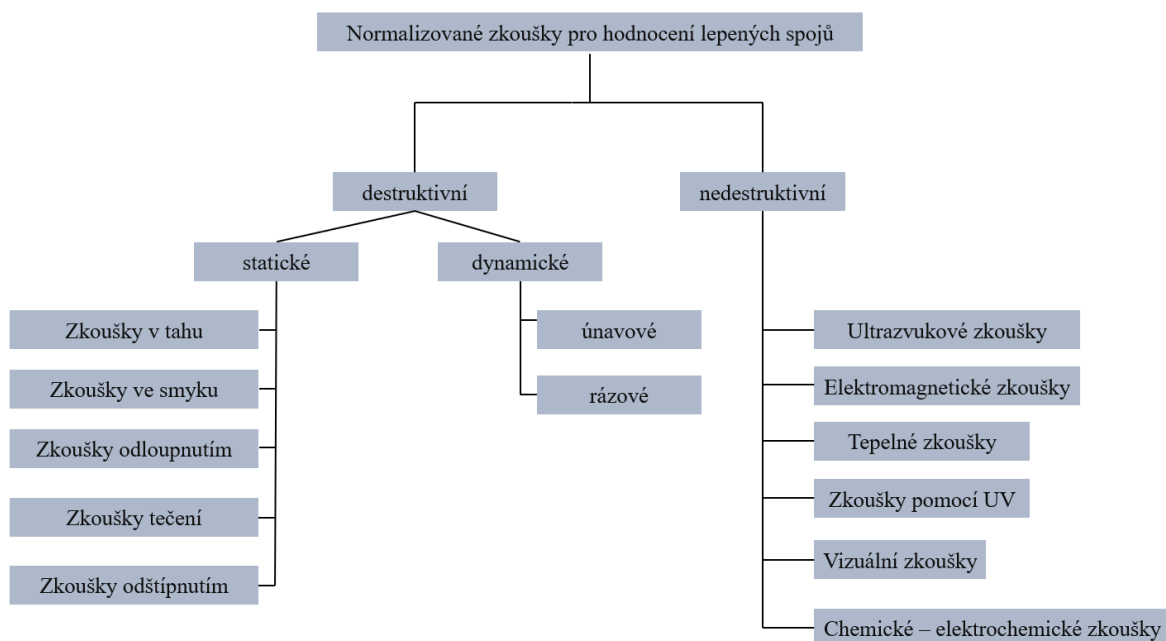
Pro ostatní zkoušky, které nezapadají do normalizovaných, používají výrobní podniky své podnikové nebo firemní normy, které byly vypracovány na základě jejich specifické výroby. Pro speciální případy zkoušení je nutné vyvinout nové metody, nebo využít přepočtení normalizované zkoušky pro požadovanou situaci, což bývá často nepřesné a znemožňuje to porovnatelnost či reprodukovatelnost. [7]

Jelikož lepené spoje vznikající při výrobě automobilu jsou vystavovány zcela specifickým podmínkám, musí výrobci automobilů využívat svých interních předpisů a norem, kterými verifikují platné normy používané ke zkoušení lepených spojů. [7]

**Tab. 1** Výběr norem pro testování lepených spojů kovů v automobilovém průmyslu [7]

ČSN EN ISO 10365	Lepidla - označení hlavních typů porušení lepeného spoje
ČSN EN 1465	Lepidla - stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech
ČSN EN ISO 9664	Lepidla - zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem
ČSN EN 13887	Konstrukční lepidla - směrnice pro přípravu povrchu kovů a plastů před lepením
ČSN EN 28510-1	Lepidla - zkouška v odlupování zkušební tělesa z ohebného a tuhého adherendu. Část 1: Odlupování pod úhlem 90° (ISO 8510- 1:1990)
ČSN EN 1464	Lepidla - stanovení odolnosti vysoce pevných lepených spojů proti odlupování. Metoda kontinuálního navíjení
ČSN EN ISO 14678	Lepidla - stanovení odolnosti vůči tečení (vytékání ze slepu)
ČSN EN ISO 11343	Lepidla - stanovení dynamické odolnosti vysoce pevných slepů vůči štípání rázem - Metoda štípání rázem pomocí klínu
ČSN EN ISO 11339	Lepidla - T-zkouška v odlupování slepů z ohebných adherendů
ČSN EN 1966	Strukturní lepidla - charakterizace povrchu měřením adheze tříbodovou ohybovou zkouškou
ČSN EN 14022	Strukturní lepidla - stanovení doby zpracovatelnosti vícesložkových lepidel
ČSN EN 14869-1	Konstrukční lepidla - stanovení smykového chování konstrukčních slepů - Část 1: Torzní metoda zkoušení používající natupo slepené duté válce
ČSN EN 14869-2	Konstrukční lepidla - stanovení smykového chování konstrukčních slepů - Část 2: Smyková zkouška na adherendech větší tloušťky
ČSN EN 14258	Konstrukční lepidla - mechanické chování slepů po krátkodobém a dlouhodobém vystavení určené teplotě
ČSN EN 14444	Konstrukční lepidla - kvalitativní hodnocení trvanlivosti slepených sestav - Zkouška porušení slepu klínem
ČSN EN 13999-1 až 4	Lepidla - Krátkodobá metoda měření emisních vlastností lepidel s nízkým obsahem rozpouštědel nebo bezrozpouštědlových lepidel po nanesení
ČSN EN 15190	Konstrukční lepidla - metody zkoušení pro posuzování dlouhodobé trvanlivosti lepených kovových spojů
ČSN EN 15274	Konstrukční lepidla pro všeobecné použití - požadavky a metody zkoušení

**Tab. 2** Rozdělení zkoušek pro hodnocení lepených spojů [5]

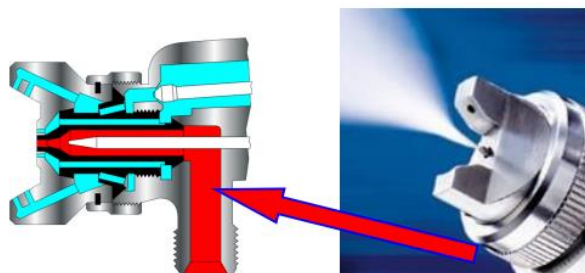


### 2.4.1 Příprava vzorků lepených spojů v automobilové karoserii

Oproti obecně platným normám je nutné v přípravě vzorků lepených spojů souvisejících s konstrukcí automobilové karoserie zohlednit specifické požadavky výroby. Spočívá to především v nanášení maziv na povrch lepených plechů, časové prodlevě při lepení, způsobu aplikace lepidla a vytvrzovacím procesu na konci lepení. Při přípravě vzorků se tedy snažíme přiblížit reálné výrobě, aby byly výsledky co nejvíce věrohodné. [7]

#### Nanášení maziv

Norma ČSN EN 13887, která stanovuje způsob přípravy vzorků pro lepené spoje stanovuje fyzikální nebo chemické úpravy povrchů, které by měly být použity. V reálné karosářské výrobě, ale nedochází k odmašťování výlisků použitých pro lepení karoserie, tudíž při výrobě vzorků lepených spojů souvisejících s karoserií je nutné plechy nejdříve odmastit a následně nanést požadované množství maziva použitím například nanášecí pistole, viz Obr. 7, aby podmínky lepení vzorku odpovídaly podmínkám lepení v reálné výrobě. [7, 14]



*Obr. 7 Pistole na nanášení maziva na plech [7]*

### **Časová prodleva**

Při přípravě vzorku je potřeba dbát na časové prodlevy mezi nanášením maziva a poté lepidla, aby bylo docíleno simulace reálného výrobního taktu linky při výrobě karoserie. Po slepení vzorků je opět nutné dodržení časové prodlevy před vytvrzením pro dostatečné nasáknutí maziva z povrchu plechu do použitého lepidla, které musí být schopno mazivo absorbovat. [7]

### **Aplikace lepidla**

Každé z požadovaných lepidel má jiné požadované aplikační podmínky dané výrobcem například z hlediska teploty při nanášení na povrch. Dalším požadavkem je nanášení lepidla v určitém množství buď ve formě tenké housenky nebo celoplošně, viz Obr. 8. V závislosti na teplotě při nanášení je i rozdílná obtížnost v dodržení požadovaného tvaru a množství naneseného lepidla, protože se změnou teploty se mění i jeho viskozita. Lepidla se proto před vytvářením vzorků temperují a následně nanášejí vytlačovací pistolí z kartuše při požadované teplotě. [7]



*Obr. 8 Aplikace housenky lepidla z kartuše vytlačovací pistolí [15]*

### **Průběh vytvrzování**

Při vytvrzování naneseného lepidla se opět snažíme docílit reálného procesu vytvrzování. Při lepení karoserie probíhá vytvrzování po nanesení katarforézní barvy obvykle



20 minut při 180 °C. V laboratorních podmínkách využíváme teplovzdušné sušárny, které jsou schopny docílit požadovaných vytvrzovacích podmínek. [7]

## 2.4.2 Statické testy lepených spojů

### Zkouška smykové pevnosti v tahu ČSN EN 1465

Podle průmyslového odvětví, kde je zkouška aplikována, dochází k modifikaci této zkoušky z hlediska rozměrů vzorů či velikosti přeplátování lepeného spoje. [7]

Rozměry plechů, které lepený spoj vytvoří jsou normou stanoveny na 25 x 150 mm a jejich přeplátování je dáno typem použitého lepidla. Přeplátování 16 mm se použije v případě, že se zkouší výplňová lepidla. Při zkoušení pevnostních lepidel se použije přeplátování o velikosti 10 mm. Dalším důležitým parametrem je tloušťka vrstvy naneseného lepidla. Pro výplňová lepidla je tloušťka vrstvy lepidla stanovena na 2 mm a pro pevnostní na 0,2 mm. Přesná tloušťka vrstvy lepidla je dosažena použitím distančních drátků či skleněných kuliček v místě spoje. Tyto parametry vzorku se používají při testování plechů karoserií v automobilovém průmyslu. [7, 16]

Zkouška probíhá zatížením zkušební vzorku statickým tahem na trhacím zařízení ve směru osy vzorku až do jeho úplného porušení, viz Obr. 9. Zatěžování lepeného spoje může probíhat při běžných laboratorních teplotních podmínkách nebo lze použít teplotní komoru. Standardní teploty zkoušení v teplotních komorách jsou + 80°C, - 35°C. Výsledkem zkoušky je napětí zjištěné při porušení spoje a vyhodnocení typu porušení dle normy EN ISO 10365. [7, 16]



Obr. 9 Zkouška smykové pevnosti v tahu [7]

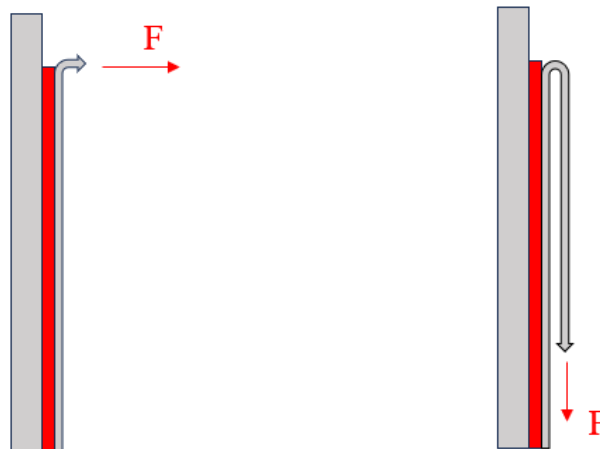
### Zkouška odlupováním zkušební tělesa z ohebného a tuhého adherendu ČSN EN 28510-1

Zkouškou odlupováním zkušební tělesa z ohebného a tuhého adherendu lze stanovit adhezni a kohezní pevnost lepeného spoje mezi tuhou kovovou deskou o tloušťce 1,5 mm a kovovou folií o tloušťce 0,1 - 0,15 mm. Lepený povrch musí mít minimálně

25 x 150 mm. Pro normu ČSN EN 28510-1 je definovaný úhel odlupování 90° a pro normu ČSN EN 28510-2 je definován úhel 180°, jak lze vidět na Obr.10 a Obr.11. [5, 17]

Zkouška se provádí na trhacích zařízeních. Pokud je však nutné přesné dodržení požadovaného úhlu odlupování, provádí se za pomoci válečkového odlupovacího zařízení. [17]

Tímto zkoušením lze získat lepší přehled o adhezních a kohezních vlastnostech lepeného spoje než při zkoušce smykové pevnosti v tahu. Následně dochází k porovnávání výsledků s jinou lepenou dvojicí. [5, 17]



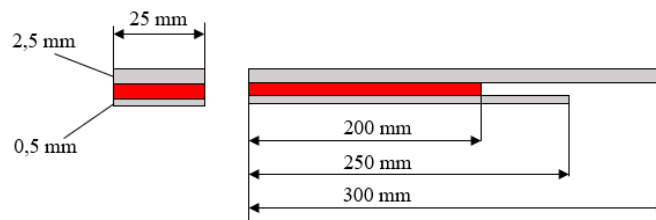
**Obr.10** Zkouška ČSN EN 28510-1 [5]    **Obr.11** Zkouška ČSN EN 28510-2 [5]

### **Zkouška odlupování kontinuálním navíjením ČSN EN 1464**

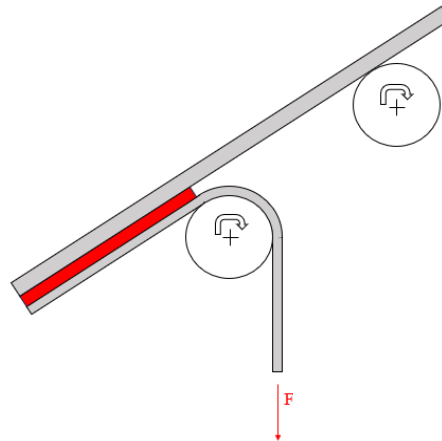
Zkouška odlupování kontinuálním navíjením se provádí pomocí trhacího stroje opatřeného vhodným upínacím přípravkem se samovyrovnávacím úchytem pro držení vzorku, přičemž podpěrné válečky o průměru 25 mm se musí volně otáčet, viz Obr.13 [18]

Zkušební vzorek je tvořen jedním tuhým adherendem o tloušťce 2,5 mm a pružným adherendem od tloušťce 0,5 mm. Lepená plocha vzorku je definovaná na 25 x 200 mm při délce pásů plechu 300 a 250 mm, viz Obr.12. [18]

Cílem zkoušky je úplné odloupení slepených adherendů. Následně se při vyhodnocování zanedbají výsledky síly potřebné k odloupení prvních a posledních 25 mm. Výsledkem zkoušky je pak odolnost lepeného spoje proti odlupování vyjádřená v N/mm. [18]



**Obr.12** Rozměry zkušebního vzorku při zkoušce ČSN EN 1464 [5, 18]



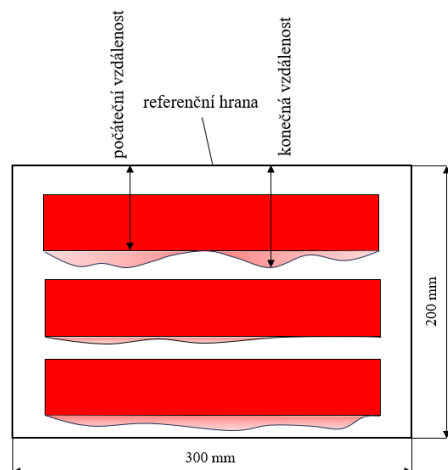
**Obr.13** Zkouška ČSN EN 1464 [5, 18]

### **Zkoušky odolnosti vůči tečení ČSN EN ISO 14678**

Norma popisuje sedm základních metod hodnocení tokových charakteristik lepidel po nanesení:

#### **Metoda 1: Odolnost proti tečení po aplikaci**

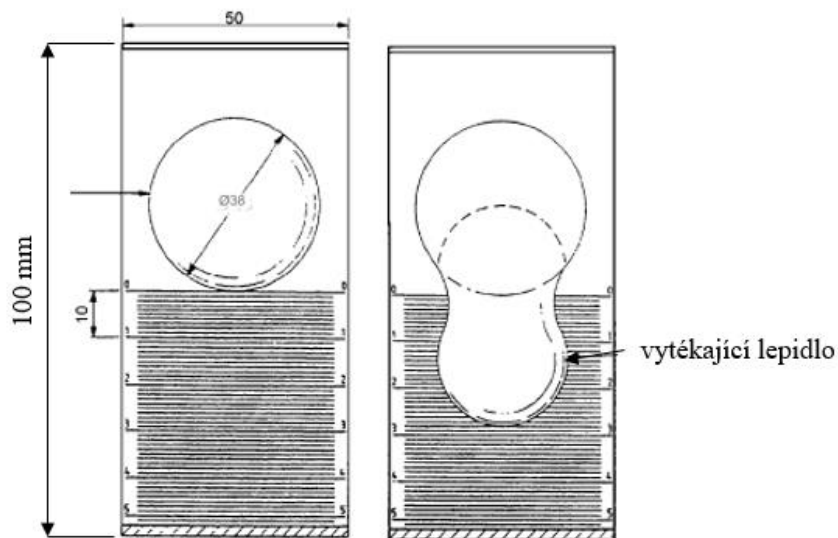
Princip zkoušky spočívá v nanesení mokrého filmu lepidla o definované tloušťce a tvaru na zkušební skleněnou desku o rozměrech 200 x 300 mm viz Obr.14. Delší hrana desky se určí jako referenční a změří se vzdálenost jednotlivých vrstev filmu lepidla od referenční hrany. Následně se zkušební vzorek zavěsí svisle do zkušební atmosféry. Vyhodnocuje se míra stékání nanesené vrstvy lepidla. Výsledek se vyjadřuje jako průhyb jednotlivých filmů lepidla. [19]



**Obr.14** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 1 [19]

### Metoda 2: Odolnost proti stékání po aplikaci

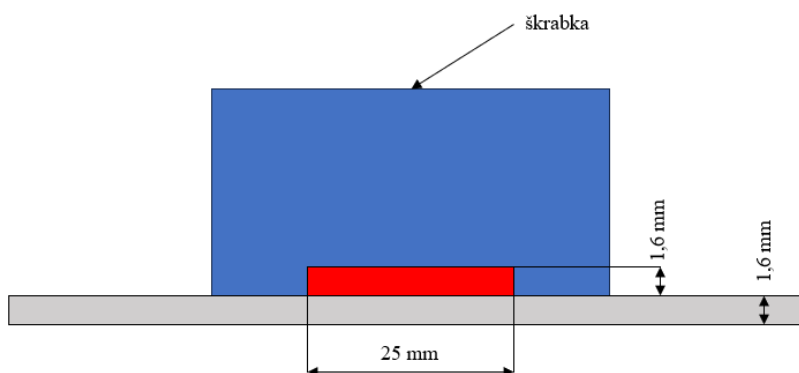
Princip metody zkoušky odolnosti proti stékání po aplikaci spočívá ve vyplnění zkušební dutiny lepidlem a následném vytlačení pomocí pístu, viz Obr.15. Rozměry dutiny jsou definovány průměrem 38 mm a hloubkou 9,5 mm. Zkušební zařízení se zavěsí svisle do zkušební atmosféry a měří se následný stupeň prověšení lepidla. [19]



**Obr.15** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 2 [19]

### Metoda 3: Odolnost proti tečení po aplikaci během vytvrzování

Mokrý film lepidla se nanese na odmaštěnou hliníkovou desku o rozměrech 100 x 150 x 1,6 mm pomocí škrabky s definovaným rozměrem vyříznutí, viz Obr.16. Nanášení probíhá ve směru kratšího rozměru desky tak, aby vznikl pásek lepidla o rozměru 25 x 75 mm. Po nanesení lepidla se zkušební vzorek umístí do vytvrzovací atmosféry zkušební pece tak, aby byl pásek lepidla orientován vodorovně. Opět se vyhodnocuje průhyb pásu lepidla. [19]

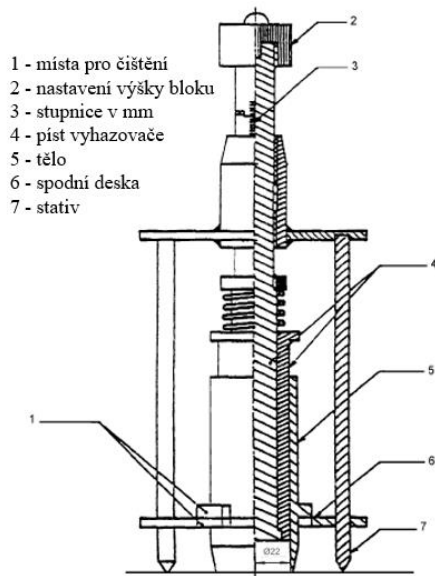


Obr.16 Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 3 [19]

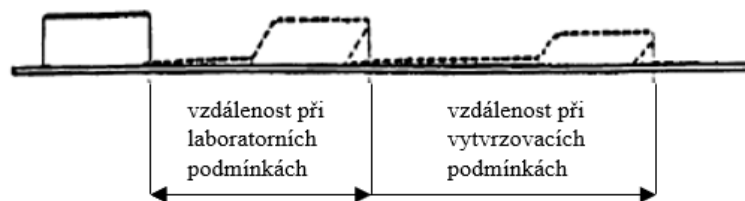
### Metoda 4: Měření statického toku lepidel po aplikaci a během vytvrzování

Měření statického toku lepidel spočívá v nanesení definovaného množství zkušebního lepidla na zkušební plech o rozměrech 150 x 50 mm. Pomocí speciálního přípravku, viz Obr.17 se nanese definovaný váleček lepidla o průměru 22 mm a výšce 4 mm. Následně dojde ke změření počáteční polohy válečku od okraje. Poté se zkušební plech umístí do vytvrzovací komory, kde se umístí do přípravku, který zajistí náklon zkušebního plechu 60° vůči horizontální rovině. Tuto zkoušku lze provádět i mimo vytvrzovací komoru při běžných laboratorních podmínkách. [19]

Výsledkem zkoušky je pak měření posunu a deformace válečku lepidla v závislosti na jeho původní pozici, viz Obr.18. [19]



**Obr.17** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 4 - přípravek [19]

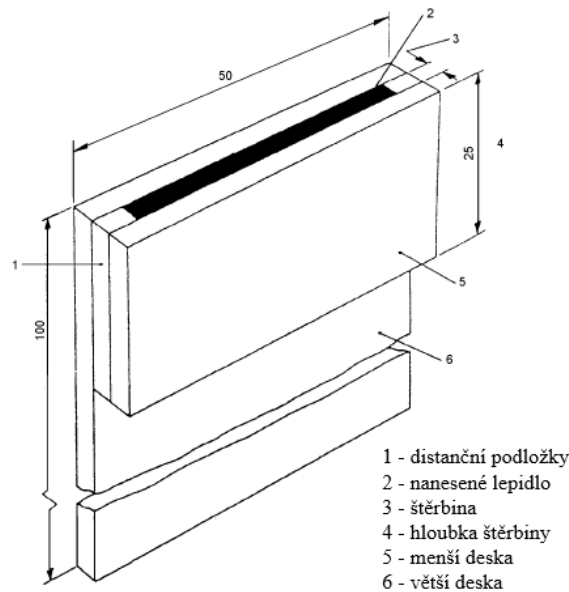


**Obr.18** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 4 – výsledek zkoušky [19]

### **Metoda 5: Odolnost proti tečení po aplikaci**

Tato metoda se zaměřuje na princip toku lepidla z přeplátovaného spoje. Desky o rozměrech 50 x 100 mm a 50 x 25 mm jsou umístěny k sobě a pomocí distančních podložek o rozměrech 5 x 25 mm a tloušťce 0,5 - 2 mm se vytvoří štěrbina. Takto vytvořená štěrbina se vyplní lepidlem a celý zkušební vzorek se umístí na vodorovnou podložku tak, aby lepidlo stékalo štěrbinou svisle dolů, viz Obr.19. [19]

Výsledné hodnocení se provádí posouzením, zda lepidlo, které bylo nanesené do vzniklé štěrby, protéklo přes spodní hranu štěrby ve stanoveném čase při zkušební atmosféře. [19]



**Obr.19** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 5 [19]

### **Metoda 6: Odolnost proti odkapávání po aplikaci**

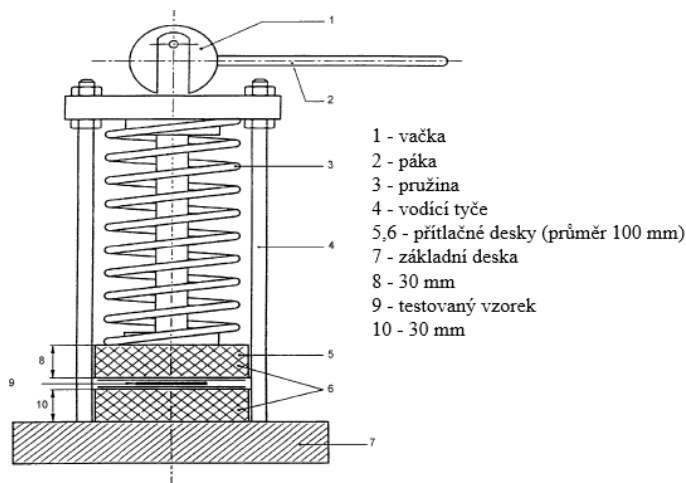
Zkouška se provádí umístěním zkoušeného lepidla do zkušební misky opatřené specifikovanými kruhovými otvory o průměrech například 3 mm, 4 mm, 5 mm atd. Na dno misky se nanese vrstva 5 mm lepidla a miska se zavěsí vodorovně po stanovenou dobu tak, aby mohlo docházet k odkapávání lepidla z vytvořených otvorů.

Výsledkem zkoušky je vyhodnocení největšího průměru otvoru v mm, ze kterého nedošlo k odkápnutí lepidla. [19]

### **Metoda 7: Odolnost proti tečení během vytvrzovacího cyklu**

Tato zkušební metoda se využívá k hodnocení tekutosti lepidel, změn chování tekutosti lepidla v důsledku doby skladování a stanovení změn chování v důsledku prostředí. Zkouška je určena pro lepidla dodávaná ve formě lepicího filmu. [19]

Z lepicího filmu je nutné vyříznout kruhové vzorky o průměru 38 mm, které se následně vloží mezi dvě hliníkové folie a tloušťce 0,025 mm. Celý zkušební vzorek se vloží do zkušebního přípravku, viz Obr.20 a je zatížen tlakem 0,35 MPa. Poté je vložen do vytvrzovacího zařízení a vytvrzen podle stanovených podmínek výrobcem. Následně dojde k vyjmutí vzorku a změření výsledného průměru. Z naměřených hodnot pak dojde k výpočtu toku zkoušeného lepidla. [19]

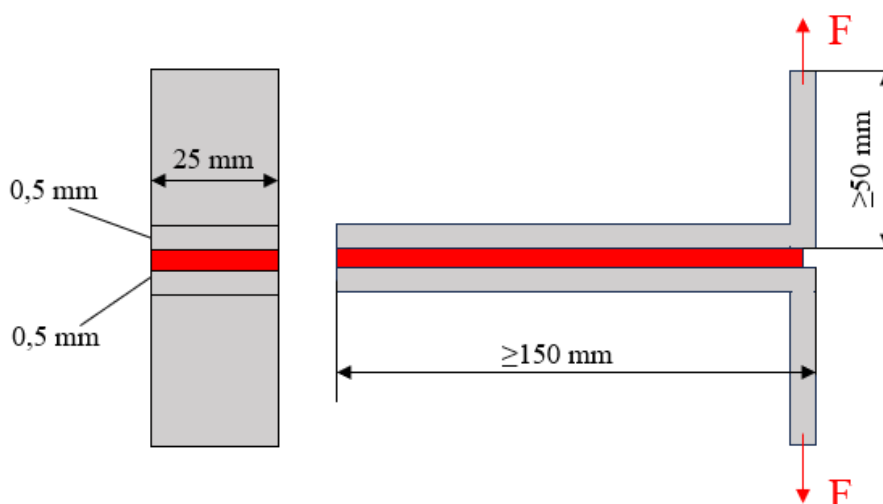


**Obr.20** Zkoušky ČSN EN ISO 14678 metoda 7 [19]

### T zkouška odlepování slepů ČSN EN ISO 11339

Zkouška probíhá zatěžováním zkušebního lepeného spoje odlupováním statickým tahem ve směru kolmém na lepenou plochu za pomoci trhacího stroje. Zkušební vzorek je tvořen dvěma plechy, které jsou ohnuté o 90° a jejich rozměry lze vidět viz Obr.21. Vzorek je upnut do čelistí trhacího stroje za dva volné ohnuté konce.

Výsledkem zkoušky je zjištění potřebné síly, kterou muselo trhací zařízení vyvodit k rozlepení lepeného spoje. Zkouška by měla probíhat do odlepení minimálně 150 mm slepeného vzorku. Následně se při hodnocení zanedbá prvních a posledních 25 mm slepu. Hodnotí se odolnost lepidla proti odloupení a typ porušení dle ČSN EN ISO 10365. [3, 10]



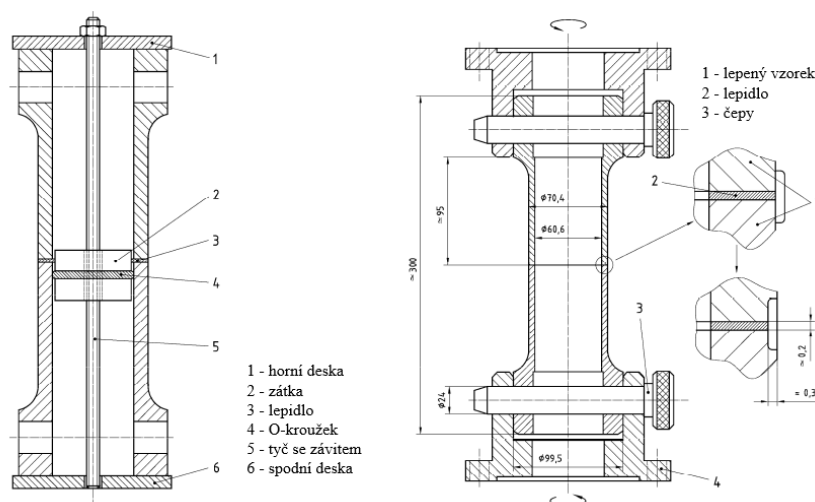
**Obr.21** Zkouška ČSN EN ISO 11339 [20]



## Torzní metoda zkoušení používající natupo slepené duté válce ČSN EN 14869-1

Zkouška probíhá torzním zatěžováním natupo slepeného vzorku pomocí torzního zkušebního stroje až do úplného porušení vzorku. Duté vzorky se nejprve slepí tak, aby došlo k úplnému zaplnění spoje. Následně se zkušební vzorek upne do torzního zařízení, viz Obr.22 a zatěžuje do úplného porušení.

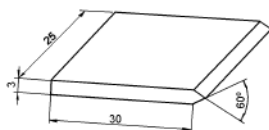
Výsledkem zkoušky je výpočet modulu pružnosti ve smyku lepených adherendů, nejvyšší smykové napětí a použitého lepidla a jejich typ porušení dle normy ČSN EN ISO 10365. [21]



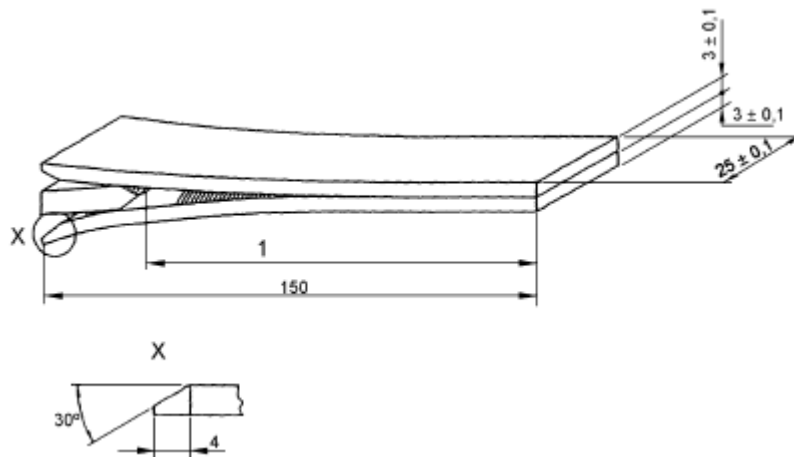
Obr.22 Zkouška ČSN EN ISO 14869-1 [21]

## Zkouška porušení slepu klínem ČSN EN 14444

Princip zkoušky je postaven na postupném vnikání klínu, viz Obr.23 mezi dvě slepené desky, viz Obr.24. V první fázi zkoušky musí dojít ke vniknutí klínu do lepeného spoje celou jeho délkou. Následně je nutné změřit délku vzniklé trhliny od místa vniku klínu. Dalším krokem je vystárnutí vzorku dle normy EN ISO 9142. Poté se změří konečná délka trhliny a oba slepené plechy se od sebe oddělí. Posledním krokem je vyhodnocení typu jejich porušení dle normy ČSN EN ISO 10365. [22]



Obr.23 Zkouška ČSN EN 14444 – rozměry zkušebního klínu [22]



*Obr.24 Zkouška ČSN EN 14444 [22]*

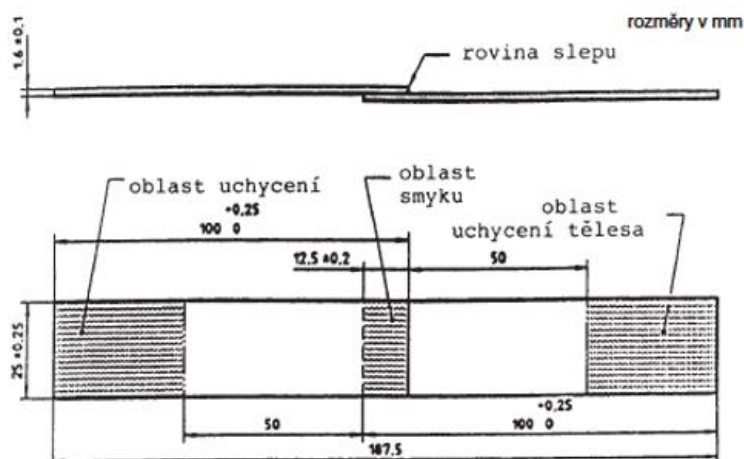
### 2.4.3 Dynamické testy lepených spojů

#### Zkouška únavové smykové pevnosti v tahu ČSN EN ISO 9664

Princip této únavové zkoušky spočívá v cyklickém zatěžování zkušebního lepeného spoje tahem. [23]

Zkušební stroj, na kterém zkouška probíhá, musí být schopen vyvíjet sinusoidní únavové napětí. Zkušební frekvence je stanovena na 30 Hz, pokud není určeno jinak. Maximální frekvence může být ovšem 60 Hz, kvůli možnému nadměrnému zahřátí lepeného spoje. [23]

Zkušební vzorek je zhotoven slepením dvou plechových pásků přeplátovaným spojem, viz Obr.25. Zkouška probíhá až do porušení lepeného spoje, kde se stanoví počet cyklů, který zkoušený spoj vydržel a následně se stanoví únavové křivky, které se vztahují k únavové odolnosti lepeného spoje. [23]



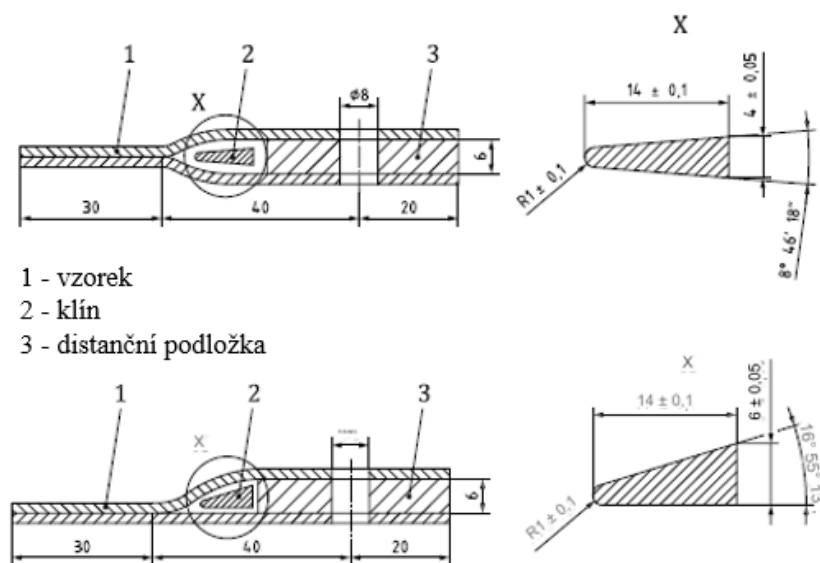
**Obr.25** Zkouška ČSN EN ISO 9664 [23]

### Zkouška dynamické odolnosti vůči štípání rázem ČSN EN ISO 11343

Princip zkoušky spočívá v dynamickém zatížení zkušebního vzorku pomocí kaleného ocelového klínu, viz Obr.26. Klín může být symetrický nebo asymetrický. Symetrický klín se používá při testování ohebných adherendů, zatím co nesymetrický klín je využíván k testování lepené dvojice ohebného a neohebného adherendu. Uvedenou zkoušku lze provádět i za různých teplotních podmínek. Mezi slepenou dvojici adherendů je vložen ocelový klín a vzorek je dynamicky rozštípnut pomocí zkušebního stroje, který musí být schopen vyvolat minimální energii rázu 50 J a rychlost nárazu nejméně 2 m/s. K provedení zkoušky lze používat stroje jak kyvadlové, tak stroje na principech padostroje. [7, 24]

Zkušební vzorek je tvořen dvěma plechy o tloušťce 0,6 - 1,7 mm a rozměrech 20 x 90 mm a jejich vzájemná lepená plocha má rozměry 20 x 30 mm. Příprava povrchu vzorků probíhá buď podle pokynů výrobce lepidla, nebo dle normy ČSN EN 13887. Maximální tloušťka vrstvy naneseného lepidla nesmí překročit  $2 \pm 0,01$  mm. Vzorek je do zkušebního stroje upnut pomocí otvoru vyvrtaného do vzorku a ocelového čepu.

Hodnocení zkoušky spočívá v určení průměrné štípací síly, lomové energie, dynamické odolnosti vůči štípání a typu porušení vzorku dle ČSN EN ISO 10365. Pokud dojde ke zvětšení či poškození upínacího otvoru vzorku, zkouška je neplatná. [7, 24]



- 1 - vzorek  
 2 - klín  
 3 - distanční podložka





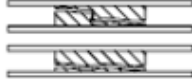

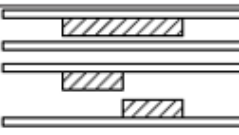


**Obr.26** Zkušební klíny dle ČSN EN ISO 11343 [24]

## 2.4.4 Vyhodnocování testů lepených spojů

Po provedení zkoušek lepených spojů je součástí procesu následné vyhodnocování, které probíhá dle normy ČSN EN ISO 10365. V normě jsou definované základní typy porušení lepeného spoje, bez ohledu na to, jakou mechanickou zkouškou byl vzorek testován. Spolu s naměřenou hodnotou získanou zkoušením tvoří komplexní zhodnocení testovaného zkušební vzorku. [7, 25]

Vyhodnocení probíhá rozdělením lepené plochy na 10 stejných částí, z nichž na každé se vyhodnocuje zvlášť typ porušení. Následně se vždy uvádí průměrná hodnota ze všech oblastí lepené plochy. Normou jsou definována základní porušení lepených spojů, viz Tab. 3. Nejčastěji se můžeme setkat s porušením typu CF, AF a SCF, přičemž při lepení karosářských plechů je porušení typu AF nepřípustné. V praxi se běžně porušená plocha lepeného spoje hodnotí pouhým okem. [7, 25]

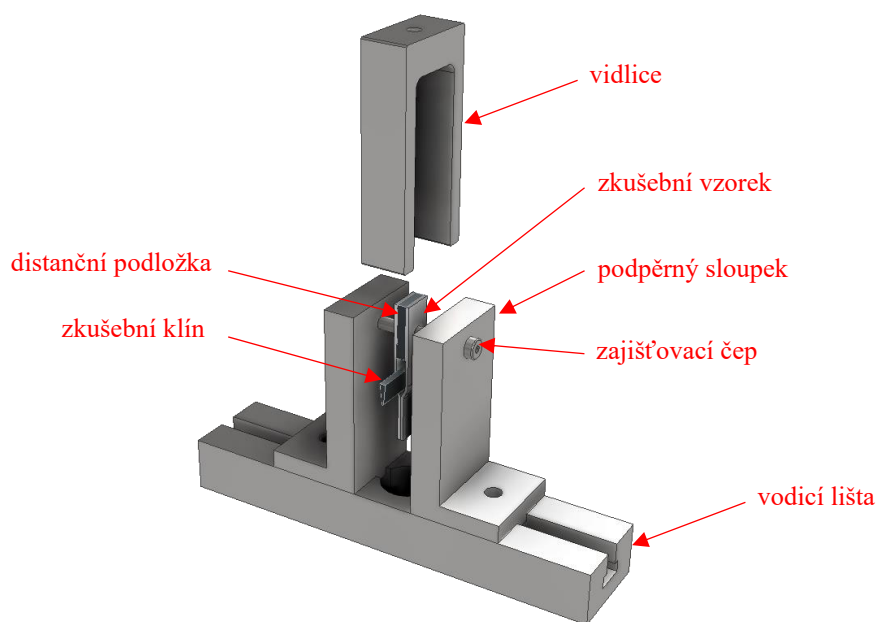
Tab. 3 Vyhodnocování možných typů porušení lepeného spoje [25]

Místo porušení	Typ porušení	Označení
<b>Základní materiál</b>	 Porušení jednoho nebo obou adherendů	SF
	 Porušení koheze adherendu	CSF
	 Delaminace	DF
<b>Lepidlo</b>	 Kohezní porušení	CF
	 Speciální kohezní porušení	SCF
	 SWCF	SWCF
	 Adhezní porušení	AF
	 Kohezní a adhezní porušení + odlupování	ACFP
<b>Koroze na rozhraní</b>	 Koroze spoje	COR

### 3. Experimentální část

V rámci experimentální části diplomové práce byly provedeny následující kroky:

- dynamické a statické zkoušky lepených spojů dle normy ČSN EN ISO 11343
- pro provedení zkoušek byl použit padostroj Instron Ceast 9350 s teplotní komorou a univerzální zkušební stroj TiraTest 2300 s teplotní komorou
- princip zkoušek spočíval v rozštípnutí jednotlivých zkušebních vzorků tvořených lepidlem a dvěma plechovými pásky dynamickým a statickým působením vidlice na zkušební klín, viz Obr.27.
- pro testování byla zvolena dvě vysokopevnostní lepidla, která byla nanesena na vývojový karosářský plech
- zkoušky byly prováděny za různých teplotních podmínek
- výsledky provedených zkoušek byly vyhodnoceny statistickým zpracováním a digitálním zpracováním obrazu za použití softwaru NIS Elements



*Obr.27 Princip zkoušky ČSN EN ISO 11343 [24]*

#### 3.1 Použité materiály

Pro vytvoření zkušebních vzorků byla použita dvě vysokopevnostní lepidla, která jsou ve výrobě používána jako ekvivalentní. Jednalo se o lepidla SikaPower® označení SikaPower®-494G (dále jen jako SikaPower®), a BETAMATE™ s označením BETAMATE™ 1440 (dále jen jako BETAMATE™). Jednotlivé materiálové listy k použitým lepidlům lze najít v přílohách č.1-2. Signifikantním rozdílem v použitých

lepidlech byla jejich barva, díky které lze od sebe lepidla rozeznat. Lepidlo SikaPower® je tyrkysové barvy, oproti tomu lepidlo BETAMATE™ má barvu oranžovou.

Lepidla byla nanesena na vývojový plech používaný při výrobě automobilových karoserií o tloušťce 0,65 mm a označení CR180BHQM40/40E-O. Jedná se o plech válcovaný za studena s hodnotou smluvní meze kluzu  $R_{p0,2} = 180$  MPa a BH efektem. Dále je povrch plechu oboustranně opatřen zinko-hořčíkovým povlakem o množství minimálně 40 g/m<sup>2</sup> a je naolejován. [26]

### 3.2 Zjištění mechanických vlastností použitého typu plechu

Pomocí statické zkoušky tahem provedené na univerzálním zkušebním stroji TIRA Test 2300 dle normy ČSN EN ISO 6892-1 byly zjištěny mechanické vlastnosti použitého plechu CR180BHQM40/40E-O. Softwarem trhacího stroje byly následně vygenerovány protokoly o provedených statických zkouškách tahem. Spolu s podmínkami, za jakých zkoušky probíhaly, je lze najít v přílohách č.3-5. Software následně vypočítal výsledné mechanické vlastnosti použitého plechu, viz Tab. 4. [27]

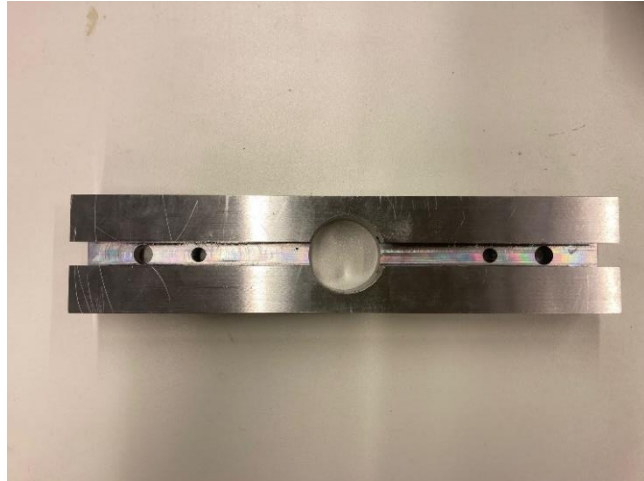
**Tab. 4** Mechanické vlastnosti použitého vývojového plechu

Materiál	$R_{eL}$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A$ [%]	$E$ [MPa]
CR180BHQM40/40E-O						
0°	218,8 ± 3,5	229,0 ± 4,1	336,4 ± 4,0	19,94 ± 0,21	36,02 ± 0,57	209063 ± 1027
45°	224,1 ± 1,0	234,3 ± 1,2	339,9 ± 1,3	18,52 ± 0,45	33,97 ± 0,70	220248 ± 5175
90°	222,7 ± 0,4	229,7 ± 0,8	337,4 ± 0,4	18,15 ± 0,33	37,31 ± 2,14	223975 ± 4729

### 3.3 Konstrukce zkušebního přípravku

Při konstrukci zkušebního přípravku bylo nutné vycházet z rozměrů vzorku, které jsou normalizované dle normy ČSN EN ISO 11343, viz Obr.26. Skutečnost, že vzorek měl být upevněn ve zkušebním přípravku skrze otvor o průměru 8 mm a zatěžován ve svislé poloze, bylo nutné opět promítnout do konstrukce přípravku. Dále musela být splněna možnost využít zkušební přípravek pro statické i dynamické testování v různých teplotních podmínkách, což vedlo k nutnosti dimenzovat rozměry přípravku tak, aby se vešel do teplotní komory padostroje Instron Ceast 9350 i teplotní komory univerzálního zkušebního stroje TiraTest 2300.

Přípravek vycházel z již stávajícího přípravku pro zkoušku ohybem, ze kterého byla použita a upravena vodící lišta. Rozdělen byl na 3 části. Vodící lištu, do které byly pomocí kamenů a šroubů upnuty podpěrné sloupky, viz Obr.28.



**Obr.28** Vodící lišta zkušebního přípravku

Další částí byly již zmíněné 2 podpěrné sloupky, mezi které byl umístěn zkušební vzorek, viz Obr.29.



**Obr.29** Podpěrné sloupky zkušebního přípravku

Poslední částí přípravku byla vidlice, která měla za úkol narazit do zkušebního klínu, a tím přerazit zkoušený vzorek, viz Obr.30.





**Obr.30** Vidlice zkušební přípravku

Výsledný zkušební přípravek byl následně namontován do zkušebních strojů, viz Obr.31, Obr.32. Pro zajištění zkušební vzorku ve zkušebním přípravku byl použit šroub ISO 7379-8-M6-80 a mezi plechové pásky vzorku byla vložena distanční podložka o rozměrech 20 x 20 x 6 mm a dírou o průměru 8,5 mm ve prostřed z materiálu ČSN 11 500 pro zajištění rozevření plechových pásek dle normy ČSN EN ISO 11343. Výkresovou dokumentaci jednotlivých částí použitého přípravku lze nalézt v přílohách č.6-8.



**Obr.31** Zkušební přípravek v padostroji



**Obr.32** Zkušební přípravek v trhacím stroji

## 3.4 Příprava zkušebních vzorků

### 3.4.1 Stříhání a vrtání plechových pásků

Z vývojového karosářského plechu o tloušťce 0,65 mm označení CR180BHBM40/40E-O byly pomocí tabulových nůžek MS2504 vystřiženy pásky plechu o rozměrech 20 x 90 mm definovaných normou ČSN EN ISO 11343, viz Obr.33 a Obr.34. [24, 26]



**Obr.33** Stříhání plechu na tabulových nůžkách



**Obr.34** Výsledný plechový pásek

Dalším krokem bylo vyvrtání otvorů o průměru 8 mm do jednotlivých plechových pásků pro pozdější uchycení zkušebních vzorků ve zkušebním přípravku, viz Obr.35 a Obr.36. Pozice a průměr otvoru byly opět definovány výše zmíněnou normou ČSN EN ISO 11343.



*Obr.35 Průběh vrtání uchycovacích otvorů*



*Obr.36 Připravený plechový pásek dle normy*

### **3.4.2 Lepení zkušebních vzorků**

V prvním kroku přípravy lepení byly předpřipravené plechové pásky odmaštěny a očištěny pomocí acetonu a technického benzínu, jak lze vidět na Obr.37. Následně byly plechové pásky osušeny. Dále byly orýsovány 30 mm od lepeného okraje pro pozdější nanášení lepidla.



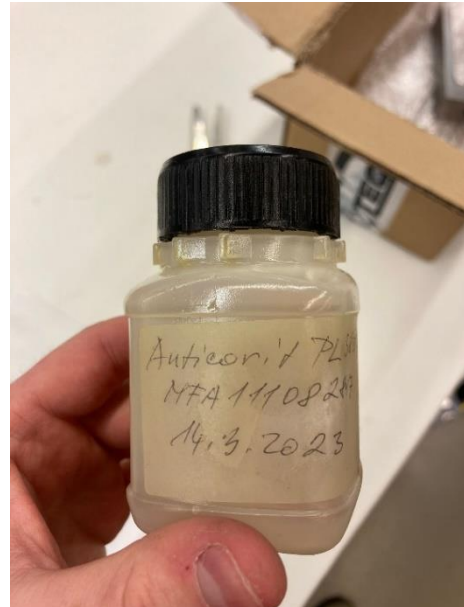
*Obr.37 Odmašťování plechových pásek*

Jelikož karosářské plechy prochází před lisováním v reálném procesu pracím cyklem, bylo nutné tyto podmínky opět nasimulovat. Svitky plechu dodané slévárnou na sobě mají běžně

velké množství nečistot a jsou na povrchu namazané. Proto plech prochází procesem praní, kdy dochází k omytí nečistot pracím olejem, který pak následně na plechu zůstává. Bylo tedy zapotřebí nanést množstvím  $1,5 \text{ g/m}^2$  pracího oleje Anticorit PL 3802 – 39LV pomocí bavlněné tkaniny na každý plechový pásek, viz Obr.38, Obr.39.



**Obr.38** Namazané plechové pásy



**Obr.39** Prostředek Anticorit PL 3802 – 39LV

Pro kontrolu přesně naneseného množství oleje byl použit ruční snímač tloušťky olejové vrstvy Infralytic NG2, který vyhodnotí množství naneseného maziva na povrchu, viz Obr.40. Tato kontrola byla provedena po kondicionaci pracího oleje po dobu 1 hodiny.



**Obr.40** Měření pomocí Infralytic NG2

V dalším kroku přípravy vzorků byla nanášena housenka lepidla na namazanou část plechového pásku za pomoci pistole na kartuše, viz Obr.41. Housenka lepidla byla nanášena vždy na jeden z dvojice plechových pásků, které později vytvořili lepenou dvojici. Na vzorek se umístila teflonová folie tak, aby zamezila rozprostírání lepidla mimo lepenou oblast při přitlačování druhého plechového pásku, viz Obr.42.



**Obr.41** Nanášení housenky lepidla

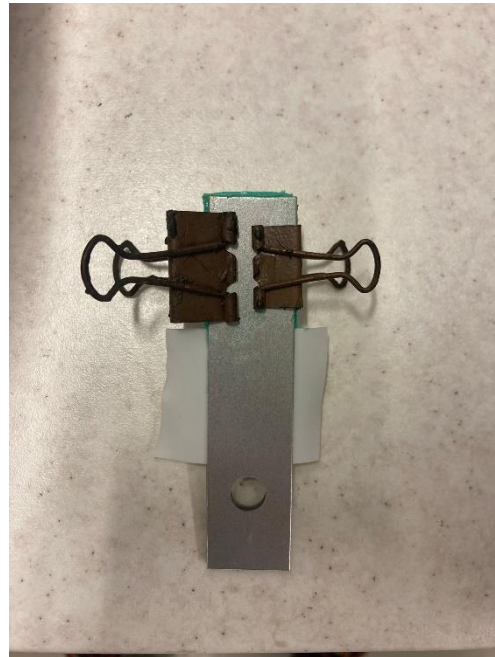


**Obr.42** Umístění teflonové folie

Posledním krokem před slepením dvojice plechových pásků bylo umístění měděného drátku o průměru 0,2 mm pro zajištění normou definované vrstvy lepidla v lepeném spoji, viz Obr.43. Následně k sobě byly předpřipravené plechové pásky přitlačeny. Tlak na lepený spoj byl vyvíjen rovnoměrně tak, aby bylo přebytečné lepidlo ze spoje vytlačeno ven a vznikla přesně definovaná vrstva lepidla ve spoji. Posledním krokem přípravy bylo zafixování slepených vzorků pomocí fixačních svorek, jak lze vidět na Obr.44.



*Obr.43 Umístění drátku v lepeném spoji*



*Obr.44 Zafixování vzorku před vytvrzením*

### **3.4.3 Vytvrzování zkušebních vzorků**

Připravené zkušební vzorky pro oba typy testovaných lepidel byly přemístěny do vytvrzovací komory Venticell 222, viz Obr.45, kde byly při teplotě 180 °C po dobu 20 minut vytvrzovány. Tyto podmínky měly za cíl simulovat skutečný proces vytvrzování, ke kterému dochází při vypalování barvy nanesené na karoserii v reálném procesu výroby. Následně byly vzorky z vytvrzovací komory vyjmuty, přičemž byla odstraněna teflonová folie a neslepený konec rozevřen pro pozdější umístění klínu do lepeného spoje, viz Obr.46.



*Obr.45 Vytvrzovací komora Venticell 222*



*Obr.46 Výsledné vytvrzené vzorky*

### **3.5 Provedení dynamických zkoušek lepeného spoje**

Jak bylo již víckrát zmíněno, dynamické zkoušení vzorků lepeného spoje bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 11343. Pro obě použítá lepidla SikaPower® a BETAMATE™ bylo dynamické zkoušení provedeno za teplot  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro stanovené teploty bylo provedeno testování vždy pěti vzorků od každého lepidla. Celkově tedy bylo dynamicky testováno 50 vzorků. Snímanou veličinou během průběhu dynamické zkoušky byla síla vyvozená na rozštípnutí zkušební vzorku.

#### **3.5.1 Příprava zkušebního stroje**

Pro dynamické zkoušení vzorků byl zvolen jako zkušební padostroj Instron Ceast 9350 s teplotní komorou. Následně byl do přístroje namontován zkušební přípravek. Dále byla stanovena dopadová energie  $55,33\text{ J}$  a dopadová rychlost  $4\text{ m/s}$  použitá na testování vzorků.

#### **3.5.2 Průběh dynamické zkoušky**

Prvním krok zkoušky spočíval ve vystavení zkoušených vzorků výše zmíněným teplotám. Této skutečnosti bylo dosaženo pomocí mrazicího zařízení Fryka B 35-50 a ohřívacího zařízení Ecocell 55, viz Obr.47 a Obr.48. Následně došlo k jednotlivému

umístování vzorků do padostroje s teplotní komorou, ve kterém byla vždy právě zkoušená teplota, viz Obr.49.



**Obr.47** Mrazicí zařízení FRYKA B 35-50



**Obr.48** Ohřívací zařízení EcoCell 55



**Obr.49** Padostroj Instron Ceast 9350



Vzorek byl umístěn vždy do zkušebního přípravku v teplotní komoře stroje. Postup musel být rychlý, aby nedošlo k výraznému ovlivnění teploty v padostroji. Nejprve byl mezi slepené pásky vložen normalizovaný nesymetrický zkušební klín, viz Obr.50. Následoval distanční člen pro dosažení normalizované mezery 6 mm mezi plechovými páskami. Celá sestava byla pomocí čepu zafixována ve zkušebním přípravku, viz Obr.51. Po umístění vzorku bylo nutné počkat až se teplota v teplotní komoře opět ustálí na zkušební teplotě.

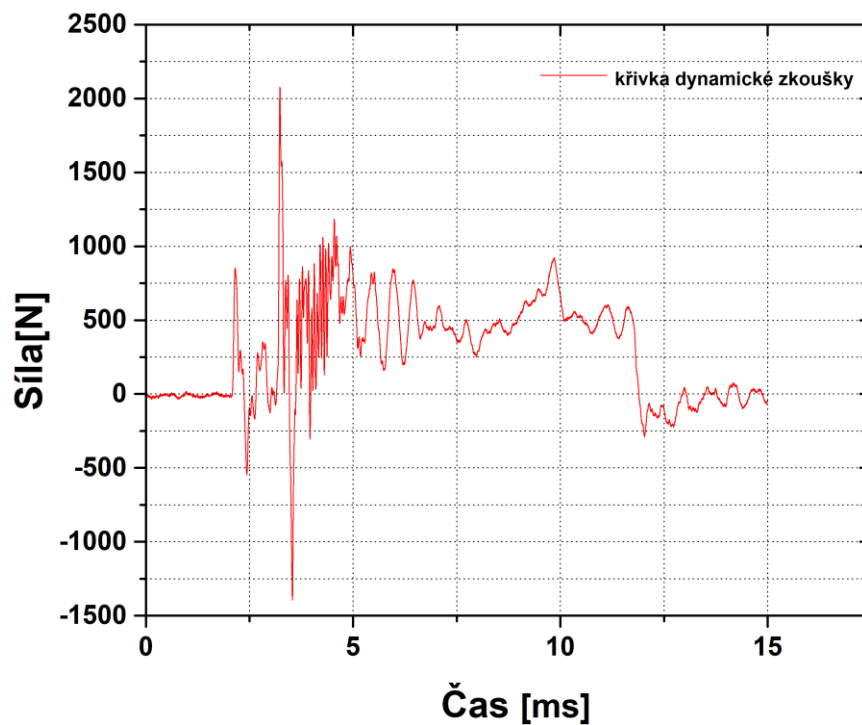


**Obr.50** Nesymetrický normalizovaný klín



**Obr.51** Umístění vzorku v padostroji

Posledním krokem bylo spuštění padostroje a rozštípnutí lepeného spoje. Výsledkem dynamické zkoušky pak byl záznam o průběhu zaznamenávané síly v závislosti na čase s frekvencí samplování 2 MHz, viz Obr.52. Tato hrubá data bylo nutné v následném postprocesu zpracovat.



*Obr.52 Graf dynamické zkoušky, teplota 20 °C, vzorek 1, SikaPower®*

### 3.6 Provedení statických zkoušek lepeného spoje

Tato statická zkouška spočívala v provedení výše zmíněné dynamické zkoušky statickým zatěžováním. Cílem bylo získat srovnání, jak se zkoušená lepidla chovají za předpokladu, že dynamickou zkoušku ČSN EN ISO 11343 provedeme staticky. Opět byla zkouška prováděna při teplotách -40 °C, -20 °C, 20 °C, 60 °C a 80°C. Pro každou teplotu a oba typy lepidla bylo testováno 5 vzorků, tudíž celkový počet byl opět 50. Snímanou veličinou během průběhu statické zkoušky byla síla vyvozená na rozštípnutí zkušebního vzorku.

### 3.6.1 Příprava zkušebního stroje

Pro statické zkoušení vzorků byl zvolen univerzální zkušební stroj TiraTest 2300 s teplotní komorou. Následně byl do přístroje namontován zkušební přípravek. Dále byla stanovena zatěžovací rychlost 20 mm/min použitá na testování vzorků.

### 3.6.2 Průběh statické zkoušky

První krok zkoušky spočíval opět ve vystavení zkoušených vzorků výše zmíněným teplotám. Této skutečnosti bylo dosaženo pomocí mrazicího a ohřívacího zařízení, viz Obr.47. Následně došlo k jednotlivému umístění vzorků do trhacího zařízení s teplotní komorou, ve kterém byla vždy právě zkoušená teplota, viz Obr.53, Obr.54.



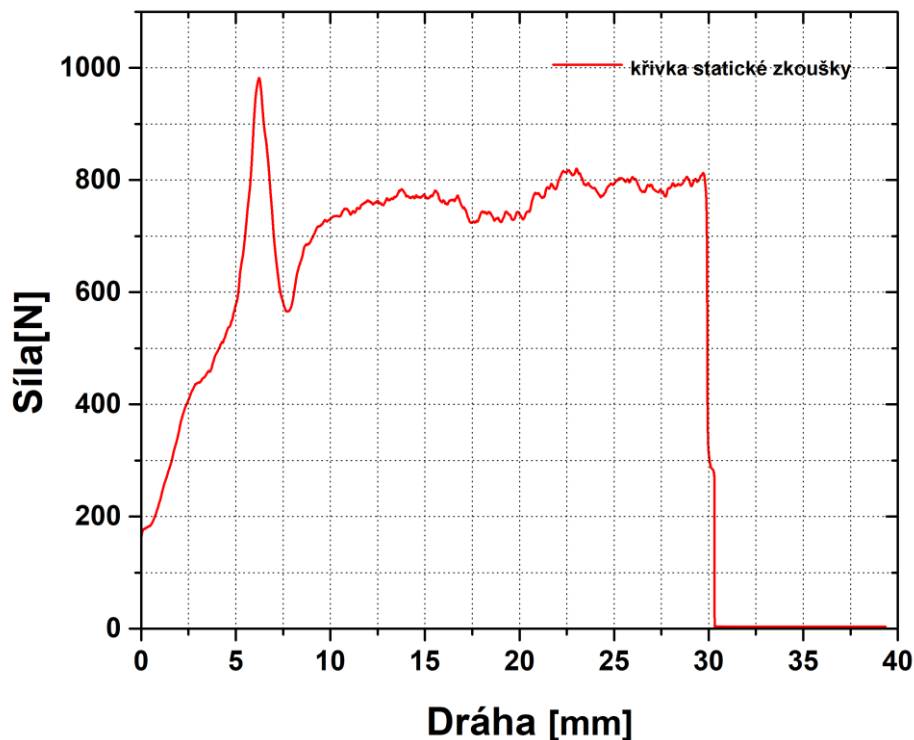
**Obr.53** Průběh statické zkoušky při 20 °C



**Obr.54** Teplotní komora trhacího stroje

Postup umístění zkoušeného vzorku do zkušebního přípravku byl identický jako při výše zmíněné dynamické zkoušce.

Posledním krokem bylo opět spuštění trhacího zařízení a rozštípnutí lepeného spoje. Výsledkem statické zkoušky pak byl záznam o průběhu zaznamenávané síly v závislosti na dráze, viz Obr.52. Takto získaná hrubá data bylo zapotřebí v následném postprocesu zpracovat.



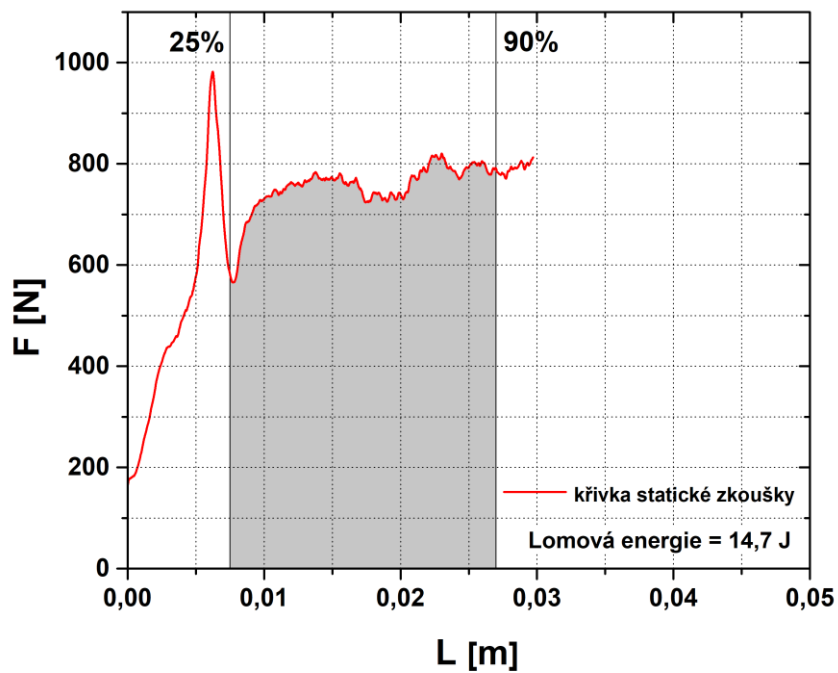
Obr.55 Graf statické zkoušky, teplota 20 °C, vzorek 1, SikaPower®

### 3.7 Vyhodnocování naměřených dat

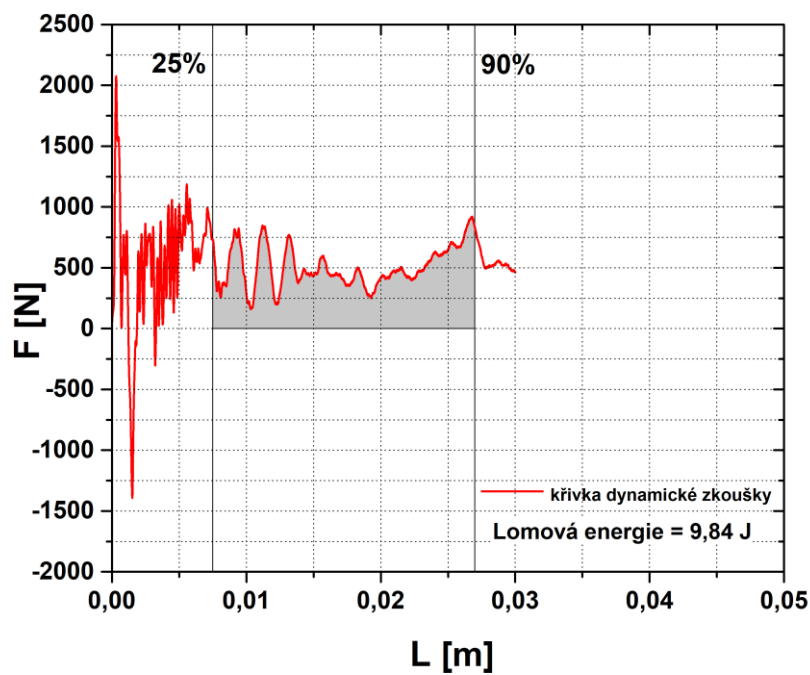
Naměřená data byla importována do softwaru Origin Pro 9.0, následně byla zpracována pro potřeby následného výpočtu. Pomocí integrace byla vypočítána lomová energie potřebná pro rozštípnutí vzorku lepeného spoje. Následně byl proveden výpočet průměrné štípací síly a statické či dynamické odolnosti vůči štípání.

#### 3.7.1 Zpracování naměřených dat

Data naměřená statickou a dynamickou zkouškou bylo nutné před použitím pro výpočty nejprve zpracovat. Pomocí softwaru Origin Pro 9.0 byla data oříznuta tak, aby začínala momentem vniknutí klínu do lepeného spoje až po jeho vystoupení ze slepu. Následně byl proveden výpočet hodnoty lomové energie, jako výsledná plocha pod křivkou v intervalu od 25-90 % naměřených hodnot závislosti síly na délce lepené oblasti, viz Obr.56. a Obr.57.



Obr.56 Graf, výpočet lomové energie, statická zkouška, teplota 20 °C, vzorek 1, SikaPower®



Obr.57 Graf, výpočet lomové energie, dynamická zkouška, teplota 20 °C, vzorek 1, SikaPower®

### 3.7.2 Výpočet potřebných veličin

Z hodnoty lomové energie byl následně proveden výpočet průměrné štípací síly a statické/dynamické odolnosti vůči štípání aplikováním rovnic (1)-(3).

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 0,027 - 0,0075 = 0,0195 \text{ m} \quad (1)$$

$$P\check{S}S = \frac{LE}{\Delta L} \quad (2)$$

$$DOV\check{S} = \frac{P\check{S}S}{b}; SOV\check{S} = \frac{P\check{S}S}{b} \quad (3)$$

*Kde:*

*LE .... Lomová energie [J]*

*F .... Síla [N]*

*L .... Délka lepeného spoje [m]*

*L<sub>1</sub> .... Integrační mez 25 % dráhy [m]*

*L<sub>2</sub> .... Integrační mez 90 % dráhy [m]*

*ΔL .... Integrovaná dráha [m]*

*PŠS .... Průměrná štípací síla [N]*

*DOVŠ .... Dynamická odolnost vůči štípání [N/mm]*

*b .... Šířka lepeného spoje [mm]*

*SOVŠ .... Statická odolnost vůči štípání [N/mm]*

### 3.7.3 Shrnutí zjištěných výsledků

Výše zmíněný postup výpočtu byl postupně aplikován na všechna data zkoušených vzorků, viz Tab. 5 – 9. Při postupném porovnávání naměřených výsledků bylo zjištěno, že lepidlo SikaPower® vykazuje ve všech počítaných veličinách vyšší hodnoty než lepidlo BETAMATE™. Dále bylo zjištěno, že obě lepidla vykazují změny počítaných veličin

v závislosti na teplotních podmínkách, viz Obr.58 - Obr.63. Zda se jedná o statisticky významné rozdíly bylo následně vyhodnoceno v kapitole 3.9.

*Tab. 5 Výsledné veličiny při teplotě -40 °C*

Podmínky prováděných zkoušek -40 °C									
<b>BETAMATE™</b>		Statická zkouška			<b>SikaPower®</b>		Statická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]		
1	533,85	26,69	10,41	1	712,82	35,64	13,9		
2	587,69	29,38	11,46	2	689,74	34,49	13,45		
3	643,59	32,18	12,55	3	635,90	31,79	12,4		
4	631,28	31,56	12,31	4	666,67	33,33	13		
5	525,13	26,26	10,24	5	725,64	36,28	14,15		
<b>x</b>	<b>584,31</b>	<b>29,22</b>	<b>11,39</b>	<b>x</b>	<b>636,46</b>	<b>34,31</b>	<b>13,38</b>		
<b>s</b>	<b>54,27</b>	<b>2,71</b>	<b>1,06</b>	<b>s</b>	<b>30,99</b>	<b>1,80</b>	<b>0,70</b>		
<b>BETAMATE™</b>		Dynamická zkouška			<b>SikaPower®</b>		Dynamická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]		
1	280,51	14,03	5,47	1	483,59	24,18	9,43		
2	288,72	14,44	5,63	2	362,56	18,13	7,07		
3	289,23	14,46	5,64	3	389,74	19,49	7,6		
4	318,46	15,92	6,21	4	436,92	21,85	8,52		
5	278,46	13,92	5,43	5	388,21	19,41	7,57		
<b>x</b>	<b>291,08</b>	<b>14,55</b>	<b>5,68</b>	<b>x</b>	<b>412,21</b>	<b>20,61</b>	<b>8,04</b>		
<b>s</b>	<b>16,04</b>	<b>0,80</b>	<b>0,31</b>	<b>s</b>	<b>48,09</b>	<b>2,40</b>	<b>0,94</b>		

Tab. 6 Výsledné veličiny při teplotě -20 °C

Podmínky prováděných zkoušek -20 °C							
<b>BETAMATE™</b>	Statická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Statická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	577,44	28,87	11,26	1	683,59	34,18	13,33
2	592,31	29,62	11,55	2	847,18	42,36	16,52
3	603,08	30,15	11,76	3	640,00	32,00	12,48
4	594,87	29,74	11,6	4	676,92	33,85	13,2
5	645,13	32,26	12,58	5	805,64	40,28	15,71
x	<b>602,56</b>	<b>30,13</b>	<b>11,75</b>	x	<b>730,67</b>	<b>36,53</b>	<b>14,25</b>
s	<b>25,53</b>	<b>1,28</b>	<b>0,50</b>	s	<b>90,17</b>	<b>4,51</b>	<b>1,76</b>
<b>BETAMATE™</b>	Dynamická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Dynamická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	382,56	19,13	7,46	1	509,23	25,46	9,93
2	402,56	20,13	7,85	2	473,85	23,69	9,24
3	354,87	17,74	6,92	3	506,67	25,33	9,88
4	295,90	14,79	5,77	4	454,36	22,72	8,86
5	350,26	17,51	6,83	5	492,31	24,62	9,6
x	<b>357,23</b>	<b>17,86</b>	<b>6,97</b>	x	<b>487,28</b>	<b>24,36</b>	<b>9,50</b>
s	<b>40,35</b>	<b>2,02</b>	<b>0,79</b>	s	<b>23,17</b>	<b>1,16</b>	<b>0,45</b>



Tab. 7 Výsledné veličiny při teplotě 20 °C

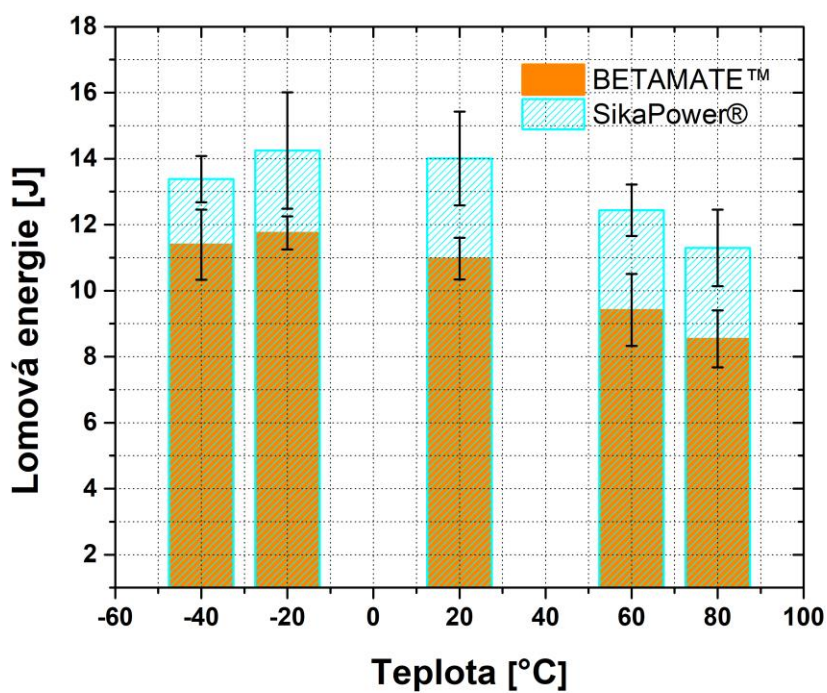
Podmínky prováděných zkoušek 20 °C							
<b>BETAMATE™</b>	Statická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Statická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	553,85	27,69	10,8	1	753,85	37,69	14,7
2	619,49	30,97	12,08	2	694,36	34,72	13,54
3	538,46	26,92	10,5	3	644,62	32,23	12,57
4	551,79	27,59	10,76	4	670,77	33,54	13,08
5	549,23	27,46	10,71	5	826,67	41,33	16,12
x	<b>562,56</b>	<b>28,13</b>	<b>10,97</b>	x	<b>718,05</b>	<b>35,90</b>	<b>14,00</b>
s	<b>32,37</b>	<b>1,62</b>	<b>0,63</b>	s	<b>72,92</b>	<b>3,65</b>	<b>1,42</b>
<b>BETAMATE™</b>	Dynamická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Dynamická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	465,64	23,28	9,08	1	504,62	25,23	9,84
2	437,95	21,90	8,54	2	554,87	27,74	10,82
3	452,82	22,64	8,83	3	505,64	25,28	9,86
4	412,31	20,62	8,04	4	609,74	30,49	11,89
5	407,18	20,36	7,94	5	535,90	26,79	10,45
x	<b>435,18</b>	<b>21,76</b>	<b>8,49</b>	x	<b>542,15</b>	<b>27,11</b>	<b>10,57</b>
s	<b>25,27</b>	<b>1,26</b>	<b>0,49</b>	s	<b>43,33</b>	<b>2,17</b>	<b>0,85</b>

Tab. 8 Výsledné veličiny při teplotě 60 °C

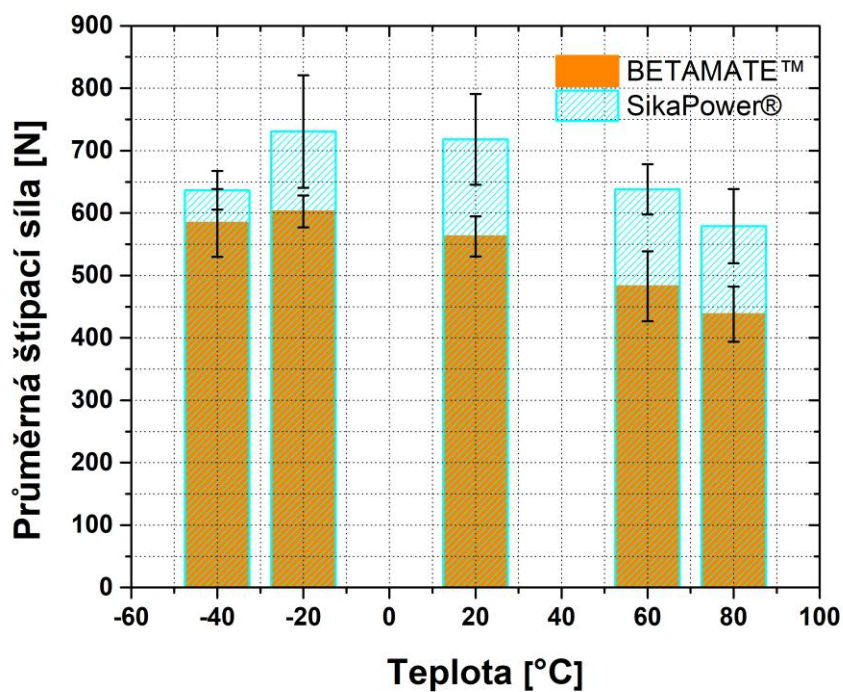
Podmínky prováděných zkoušek 60 °C							
<b>BETAMATE™</b>	Statická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Statická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	480,51	24,03	9,37	1	628,21	31,41	12,25
2	469,74	23,49	9,16	2	576,92	28,85	11,25
3	501,03	25,05	9,77	3	676,41	33,82	13,19
4	403,59	20,18	7,87	4	636,41	31,82	12,41
5	558,97	27,95	10,90	5	672,31	33,62	13,11
x	<b>482,77</b>	<b>24,14</b>	<b>9,41</b>	x	<b>638,05</b>	<b>31,90</b>	<b>12,44</b>
s	<b>56,09</b>	<b>2,80</b>	<b>1,09</b>	s	<b>40,25</b>	<b>2,01</b>	<b>0,78</b>
<b>BETAMATE™</b>	Dynamická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Dynamická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	469,23	23,46	9,15	1	686,67	34,33	13,39
2	502,56	25,13	9,8	2	641,54	32,08	12,51
3	508,72	25,44	9,92	3	606,15	30,31	11,82
4	513,85	25,69	10,02	4	586,67	29,33	11,44
5	499,49	24,97	9,74	5	649,74	32,49	12,67
x	<b>498,77</b>	<b>24,94</b>	<b>9,73</b>	x	<b>634,15</b>	<b>31,71</b>	<b>12,37</b>
s	<b>17,42</b>	<b>0,87</b>	<b>0,34</b>	s	<b>39,03</b>	<b>1,95</b>	<b>0,76</b>

Tab. 9 Výsledné veličiny při teplotě 80 °C

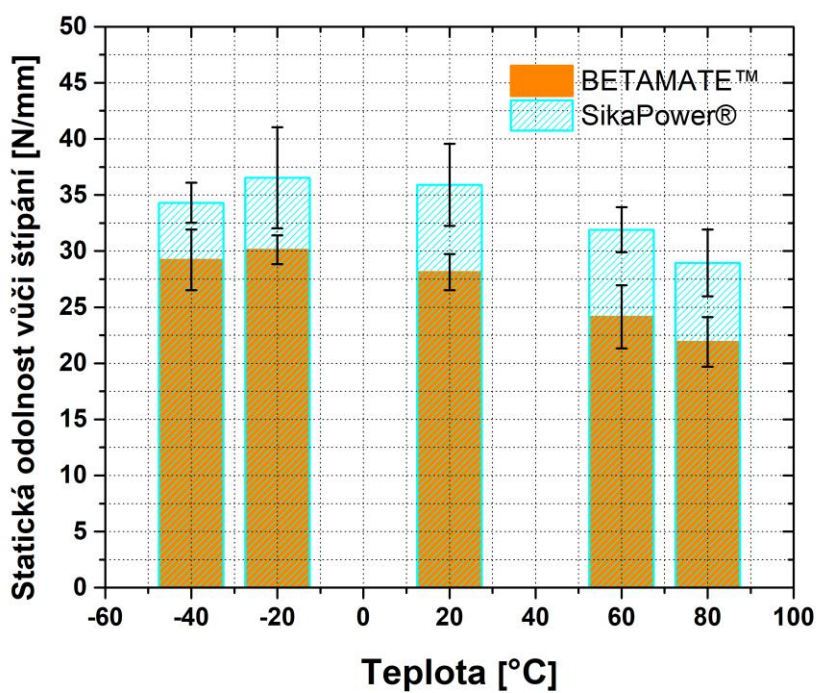
Podmínky prováděných zkoušek 80 °C							
<b>BETAMATE™</b>	Statická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Statická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	SOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	406,15	20,31	7,92	1	603,59	30,18	11,77
2	390,77	19,54	7,62	2	485,13	24,26	9,46
3	423,59	21,18	8,26	3	643,08	32,15	12,54
4	485,13	24,26	9,46	4	599,49	29,97	11,69
5	484,10	24,21	9,44	5	564,10	28,21	11
x	<b>437,95</b>	<b>21,90</b>	<b>8,54</b>	x	<b>579,08</b>	<b>28,95</b>	<b>11,29</b>
s	<b>44,16</b>	<b>2,21</b>	<b>0,86</b>	s	<b>59,51</b>	<b>2,98</b>	<b>1,16</b>
<b>BETAMATE™</b>	Dynamická zkouška			<b>SikaPower®</b>	Dynamická zkouška		
Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]	Vzorek	PŠS [N]	DOVŠ [N/mm]	LE [J]
1	529,23	26,46	10,32	1	648,21	32,41	12,64
2	472,31	23,62	9,21	2	577,44	28,87	11,26
3	512,82	25,64	10	3	521,03	26,05	10,16
4	538,46	26,92	10,5	4	682,05	34,10	13,3
5	535,90	26,79	10,45	5	656,41	32,82	12,8
x	<b>517,74</b>	<b>25,89</b>	<b>10,10</b>	x	<b>617,03</b>	<b>30,85</b>	<b>12,03</b>
s	<b>27,29</b>	<b>1,36</b>	<b>0,53</b>	s	<b>66,21</b>	<b>3,31</b>	<b>1,29</b>



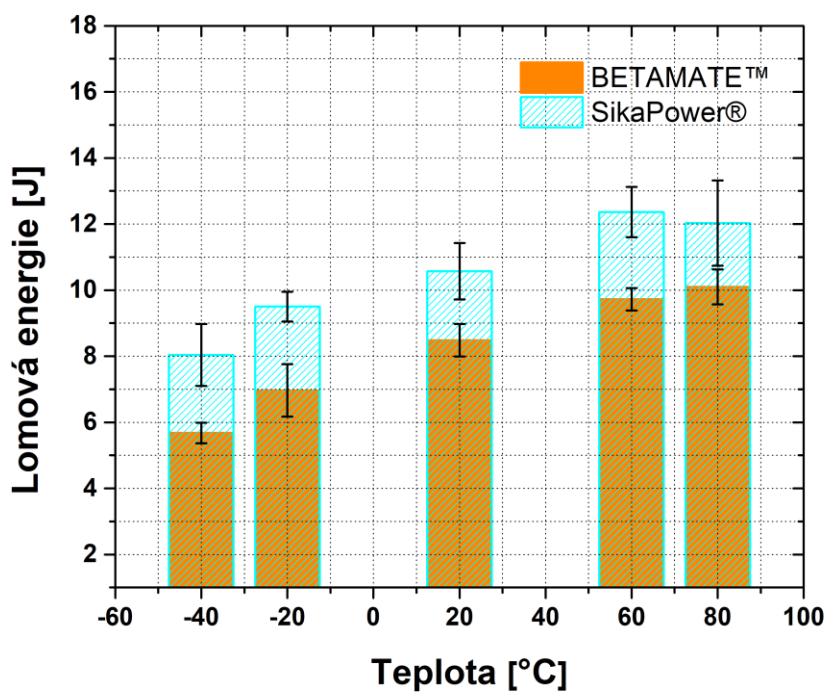
Obr.58 Graf závislosti lomové energie na teplotě při statickém zkoušení



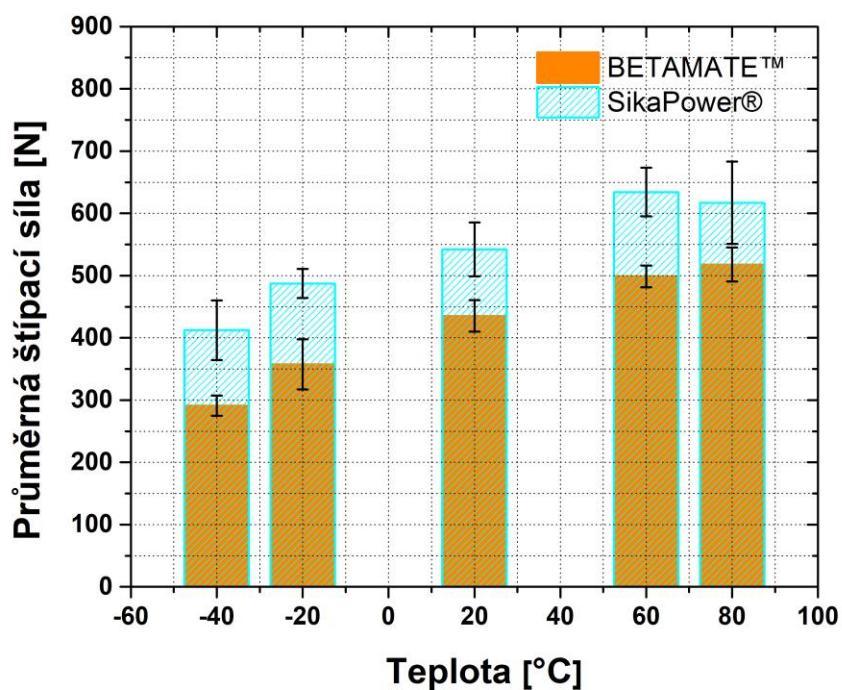
Obr.59 Graf závislosti průměrné štípací síly na teplotě při statickém zkoušení



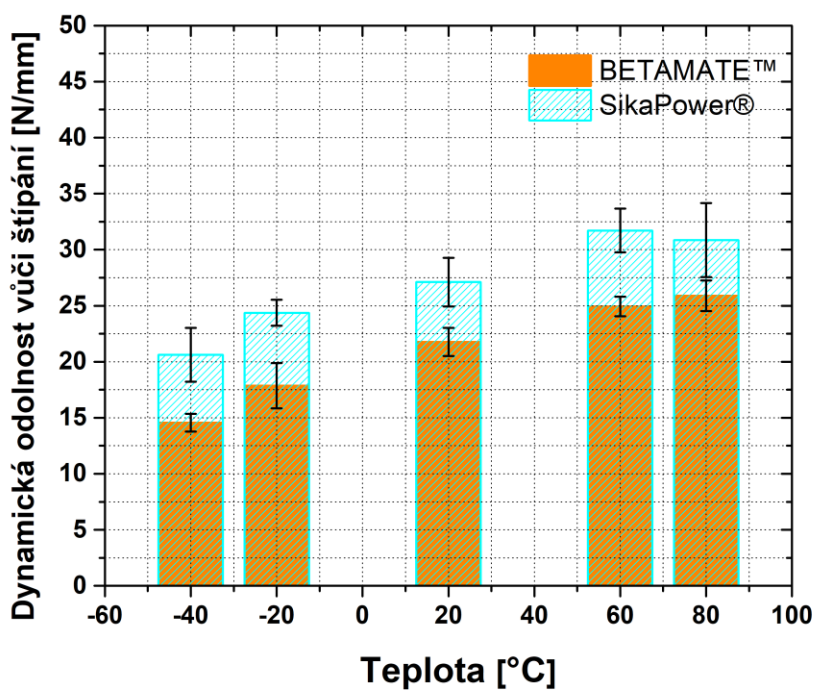
Obr.60 Graf závislosti statické odolnosti vůči štípnání na teplotě při statickém zkoušení



Obr.61 Graf závislosti lomové energie na teplotě při dynamickém zkoušení



Obr.62 Graf závislosti průměrné štípací síly na teplotě při dynamickém zkoušení



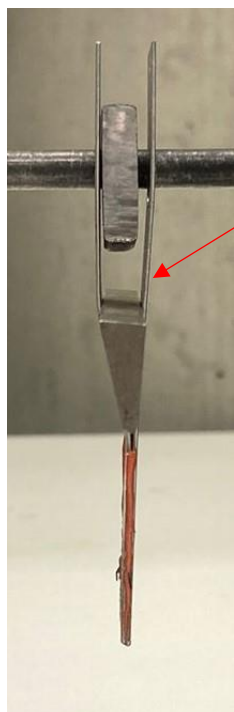
Obr.63 Graf závislosti dynamické odolnosti vůči štípaní na teplotě při dynamickém zkoušení

### 3.8 Obrazová analýza

Jedním z posledních kroků vyhodnocování bylo využití obrazové analýzy pro určení typů porušení jednotlivých zkušebních vzorků. Očekávanými typy porušení lepidla byly typ CF a SCF, přičemž nepřijatelným typem porušení je typ porušení AF, jelikož se jedná o lepení karosářských plechů. Norma ČSN EN ISO 11343 dovoluje pro vyhodnocení typu porušení lepeného spoje použití softwaru pro obrazovou analýzu, nebo lze typ porušení vyhodnotit pouhým vizuálním posouzením. Pro tento krok byl využit software NIS-Elements. Vyhodnocování typů porušení vzorků probíhalo dle normy ČSN EN ISO 10365.

#### 3.8.1 Fotografická dokumentace vzorků

Prvním krokem bylo nafocení jednotlivých vzorků. Z každé lepené dvojice byl vybrán vždy ten plechový pásek, který byl během zkoušky rovnoběžně vůči působícímu zkušebnímu klínu, viz Obr.64. Tento krok byl proveden pro zajištění posuzování vždy stejného členu lepeného spoje. Následně byly vzorky umístěny na podložku s měřítkem, potřebným pro pozdější softwarové nastavování, a vyfoceny pomocí CANON EOS 1100D a objektivem Canon EF-S 15-85 mm, viz Obr.65.



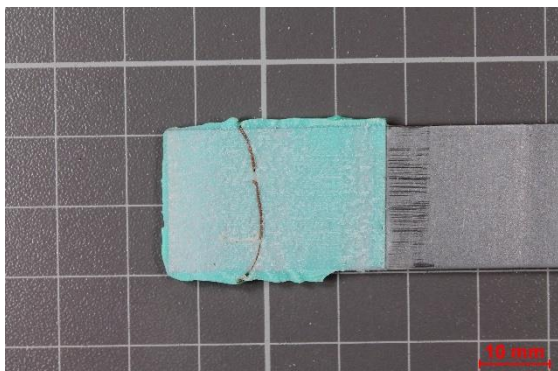
posuzovaný plechový  
pásek z lepené dvojice

**Obr.64** Detailní zobrazení lepeného spoje

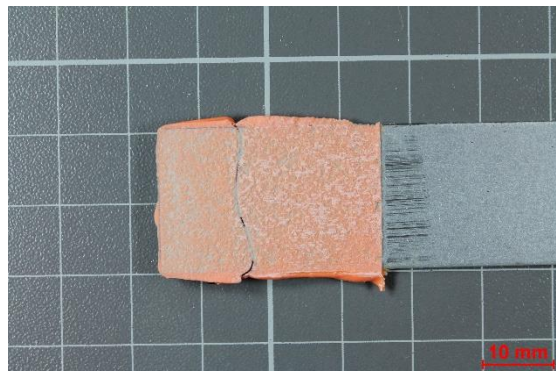


**Obr.65** Focení vzorků

Výsledným výstupem pak byly jednotlivé fotografie všech lepených spojů vytvořených pro oba typy použitých lepidel SikaPower® a BETAMATE™, viz Obr.66 a Obr.67.



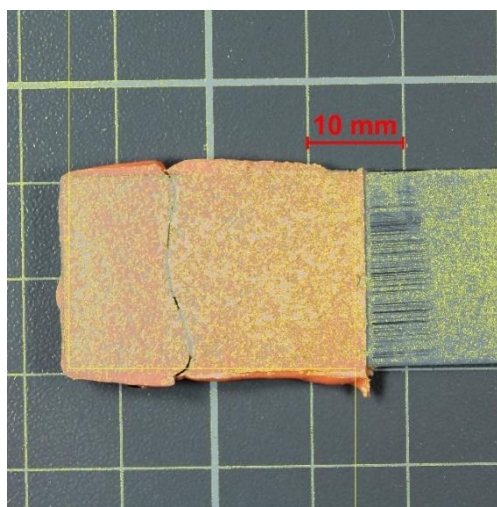
**Obr.66** Dyn. zk., -20°C, vz. 3, SikaPower®



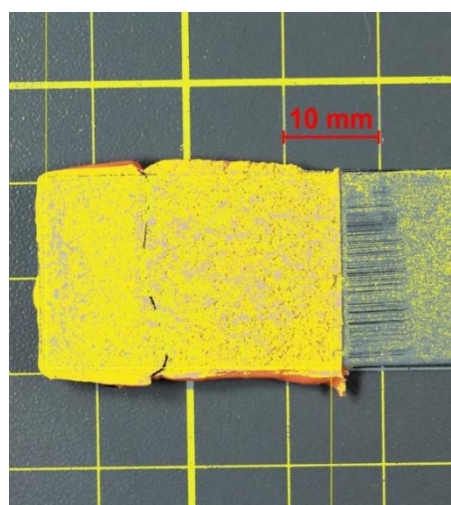
**Obr.67** Dyn. zk., -20°C, vz. 3, BETAMATE™

### 3.8.2 Nastavení softwaru

Pořízená fotografie byla naimportována do softwaru pro obrazovou analýzu NIS-Elements. Nejprve bylo v softwaru vždy překalibrováno měřítko díky podložce s měřítkem, na kterou byl vzorek při focení umístěn. Následně bylo provedeno barevné naprahování v závislosti na intenzitě barvy použitého lepidla. Prahování probíhalo principem definování míst, kde došlo ke koheznímu porušení CF, viz Obr.68. a Obr.69. V místech, kde již intenzita barvy lepidla nebyla tak výrazná, docházelo ke speciálnímu koheznímu porušení SCF. Takovýto postup byl postupně aplikován na všechny nafocené vzorky.



**Obr.68** Naprahování oblastí lepeného spoje



**Obr.69** Žluté oblasti definované jako porušení CF

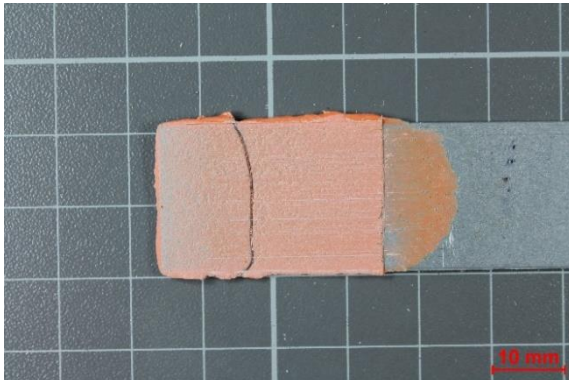


### 3.8.3 Vyhodnocení

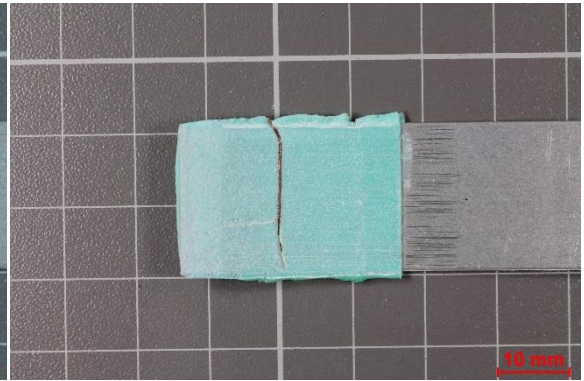
Software z nadefinované oblasti lepeného spoje 30 x 20 mm vyhodnotil procentuální zastoupení kohezního porušení CF. Zbývající hodnotu do 100 % následně tvořilo speciální kohezní porušení SCF. Dle normy ČSN EN ISO 10365 je při existenci více typů porušení nutné uvádět procentuální zastoupení jednotlivých porušení. Jednotlivá procentuální zastoupení zjištěných poruch a vybrané odpovídající vzorky jsou shrnuty, viz Tab. 10 - 14 a Obr.70 - Obr.89. Z výsledků obrazové analýzy je tedy patrné, že porušení zkoušených lepených spojů dle výše zmíněné normy bylo výhradně kohezního charakteru, ať už typu CF či SCF. Z důvodu dominantního postavení porušení typu CF, bylo následné porovnání provedeno na tomto typu, viz Obr.90 a Obr.91. Z naměřených hodnot porušení vyplývá, že procentuální zastoupení porušení typu CF se s teplotou mění a u obou typů lepidel se liší. Zda se jedná o statisticky významné odchylky bylo zjištěno statistickým zpracováním v kapitole 3.9.

*Tab. 10 Procentuální zastoupení typů porušení lepených spojů při teplotě -40 °C*

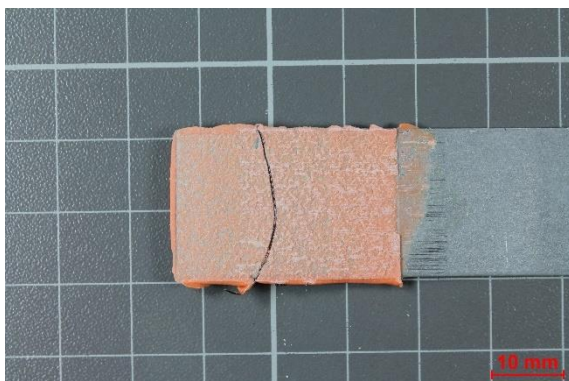
<b>Podmínky prováděných zkoušek -40 °C</b>								
<b>BETAMATE™</b>		<b>Statická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>		<b>Statická zkouška</b>		
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	81,2	18,8	1	87,4	12,6	2	76,2	23,8
2	74	26	3	89,8	10,2	4	78,8	21,2
3	70,2	29,8	4	78,8	21,2	5	78,6	21,4
4	80	20	5	78,6	21,4	x	<b>82,16</b>	<b>17,84</b>
5	81,3	18,7	x	<b>82,16</b>	<b>17,84</b>	s	<b>6,03</b>	<b>6,03</b>
x	<b>77,34</b>	<b>22,66</b>	s	<b>6,03</b>	<b>6,03</b>			
s	<b>4,99</b>	<b>4,99</b>						
<b>BETAMATE™</b>		<b>Dynamická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>		<b>Dynamická zkouška</b>		
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	79,1	20,9	1	82,9	17,1	2	88,4	11,6
2	66,9	33,1	2	88,4	11,6	3	79,9	20,1
3	78,8	21,2	3	79,9	20,1	4	86,2	13,8
4	69,2	30,8	4	86,2	13,8	5	85,5	14,5
5	72,4	27,6	5	85,5	14,5	x	<b>84,58</b>	<b>15,42</b>
x	<b>73,28</b>	<b>26,72</b>	x	<b>84,58</b>	<b>15,42</b>	s	<b>3,27</b>	<b>3,27</b>
s	<b>5,53</b>	<b>5,53</b>	s	<b>3,27</b>	<b>3,27</b>			



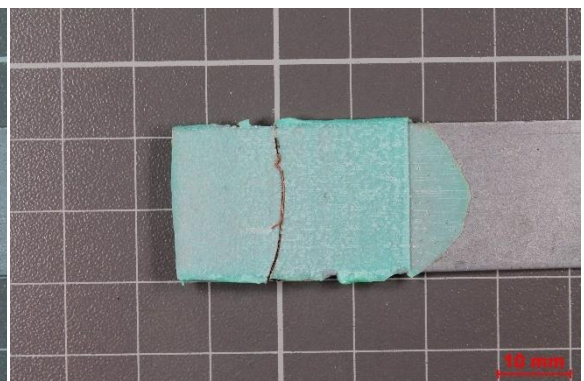
**Obr.70** St. zk, -40 °C, vz. , BETAMATE™



**Obr.71** St. zk, -40 °C, vz. , SikaPower®



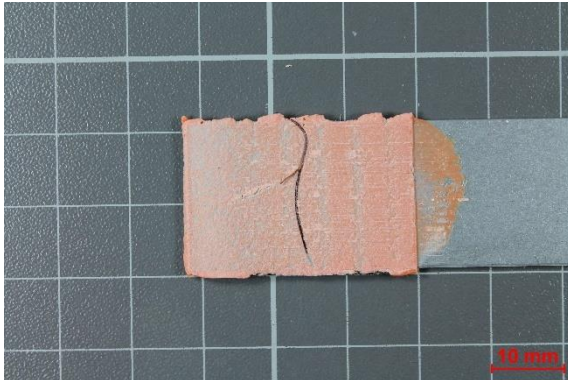
**Obr.72** Dyn. zk, -40 °C, vz. , BETAMATE™



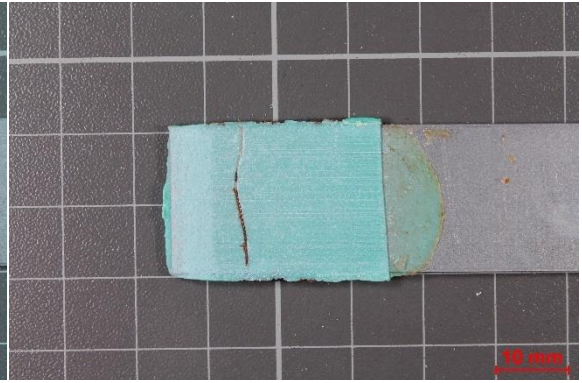
**Obr.73** Dyn. zk, -40 °C, vz. , SikaPower®

*Tab. 11 Procentuální zastoupení typů porušení lepených spojů při teplotě -20 °C*

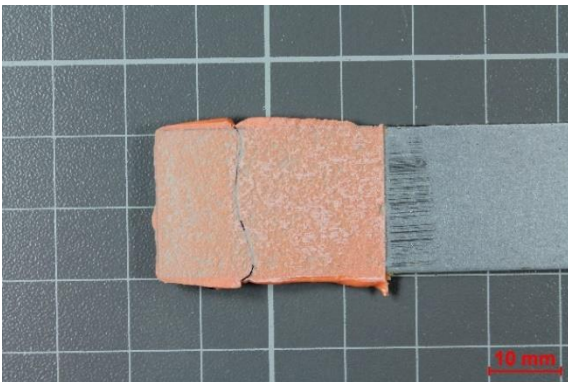
<b>Podmínky prováděných zkoušek -20 °C</b>					
<b>BETAMATE™</b>	<b>Statická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>	<b>Statická zkouška</b>	
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	63,9	36,1	1	74,8	25,2
2	66,6	33,4	2	80,5	19,5
3	61,8	38,2	3	80,2	19,8
4	61,7	38,3	4	79,4	20,6
5	60,8	39,2	5	64,7	35,3
<b>x</b>	<b>62,96</b>	<b>37,04</b>	<b>x</b>	<b>75,92</b>	<b>24,08</b>
<b>s</b>	<b>2,33</b>	<b>2,33</b>	<b>s</b>	<b>6,68</b>	<b>6,68</b>
<b>BETAMATE™</b>	<b>Dynamická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>	<b>Dynamická zkouška</b>	
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	60,2	39,8	1	53,5	46,5
2	70,5	29,5	2	64,4	35,6
3	66,3	33,7	3	74,2	25,8
4	66,5	33,5	4	75,9	24,1
5	69,2	30,8	5	73,1	26,9
<b>x</b>	<b>66,54</b>	<b>33,46</b>	<b>x</b>	<b>68,22</b>	<b>31,78</b>
<b>s</b>	<b>3,97</b>	<b>3,97</b>	<b>s</b>	<b>9,35</b>	<b>9,35</b>



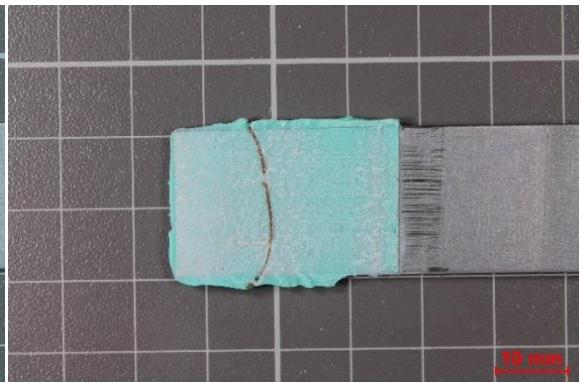
**Obr.74** St. zk, -20 °C, vz. , *BETAMATE™*



**Obr.75** St. zk, -20 °C, vz. , *SikaPower®*



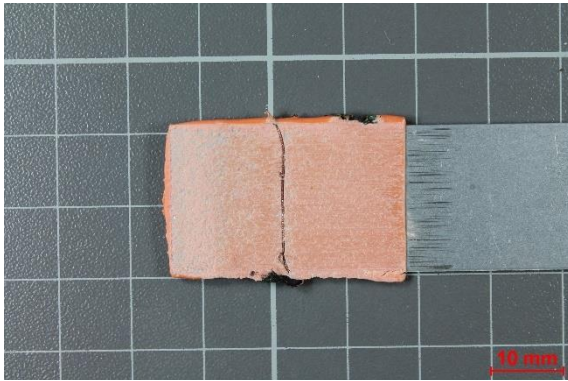
**Obr.76** Dyn. zk, -20 °C, vz. , *BETAMATE™*



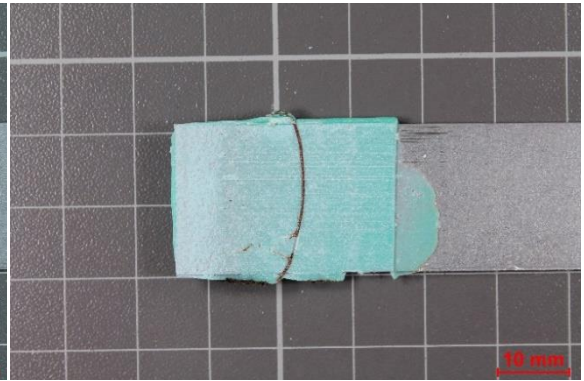
**Obr.77** Dyn. zk, -20 °C, vz. , *SikaPower®*

Tab. 12 Procentuální zastoupení typů porušení lepených spojů při teplotě 20 °C

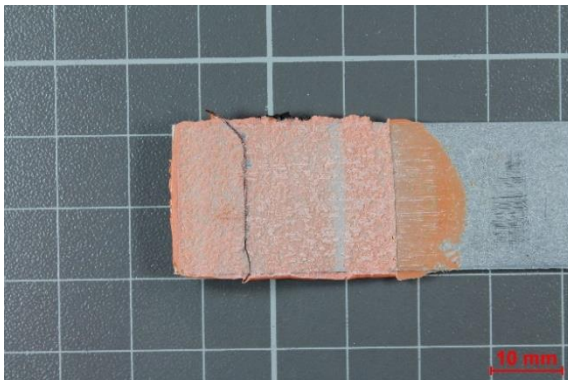
Podmínky prováděných zkoušek 20 °C								
<b>BETAMATE™</b>		Statická zkouška		<b>SikaPower®</b>		Statická zkouška		
Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]
1	71,6	28,4	1	83,3	16,7	1	48,9	51,1
2	64,9	35,1	2	68,4	31,6	2	63,8	36,2
3	76,8	23,2	3	80,6	19,4	3	65,9	34,1
4	77,6	22,4	4	83,9	16,1	4	62,7	37,3
5	78,7	21,3	5	75,6	24,4	5	64,5	35,5
<b>x</b>	<b>73,92</b>	<b>26,08</b>	<b>x</b>	<b>78,36</b>	<b>21,64</b>	<b>x</b>	<b>61,16</b>	<b>38,84</b>
<b>s</b>	<b>5,73</b>	<b>5,73</b>	<b>s</b>	<b>6,46</b>	<b>6,46</b>	<b>s</b>	<b>6,95</b>	<b>6,95</b>
<b>BETAMATE™</b>		Dynamická zkouška		<b>SikaPower®</b>		Dynamická zkouška		
Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]
1	76,5	23,5	1	48,9	51,1	1	48,9	51,1
2	71,3	28,7	2	63,8	36,2	2	63,8	36,2
3	75,4	24,6	3	65,9	34,1	3	65,9	34,1
4	72,2	27,8	4	62,7	37,3	4	62,7	37,3
5	75,6	24,4	5	64,5	35,5	5	64,5	35,5
<b>x</b>	<b>74,2</b>	<b>25,8</b>	<b>x</b>	<b>61,16</b>	<b>38,84</b>	<b>x</b>	<b>61,16</b>	<b>38,84</b>
<b>s</b>	<b>2,30</b>	<b>2,30</b>	<b>s</b>	<b>6,95</b>	<b>6,95</b>	<b>s</b>	<b>6,95</b>	<b>6,95</b>



**Obr.78** St. zk, 20 °C, vz. , BETAMATE™



**Obr.79** St. zk, 20 °C, vz. , SikaPower®



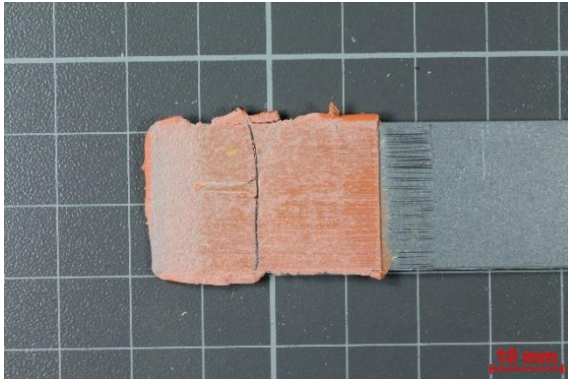
**Obr.80** Dyn. zk, 20 °C, vz. , BETAMATE™



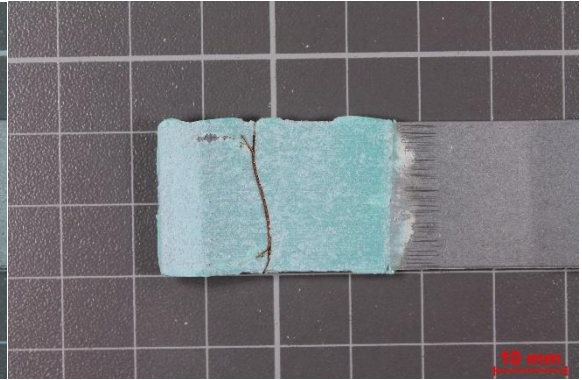
**Obr.81** Dyn. zk, 20 °C, vz. , SikaPower®

Tab. 13 Procentuální zastoupení typů porušení lepených spojů při teplotě 60 °C

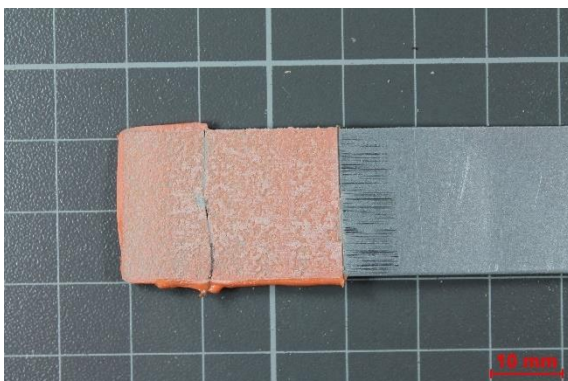
Podmínky prováděných zkoušek 60 °C								
<b>BETAMATE™</b>		Statická zkouška		<b>SikaPower®</b>		Statická zkouška		
Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]
1	72,8	27,2	1	73	27	1	60,2	39,8
2	67,2	32,8	2	71,4	28,6	2	57,9	42,1
3	65,3	34,7	3	64,9	35,1	3	64,4	35,6
4	79,3	20,7	4	66,9	33,1	4	69,1	30,9
5	62,5	37,5	5	65,3	34,7	5	61,5	38,5
x	<b>69,42</b>	<b>30,58</b>	x	<b>68,3</b>	<b>31,7</b>	x	<b>62,62</b>	<b>37,38</b>
s	<b>6,69</b>	<b>6,69</b>	s	<b>3,68</b>	<b>3,68</b>	s	<b>4,32</b>	<b>4,32</b>
<b>BETAMATE™</b>		Dynamická zkouška		<b>SikaPower®</b>		Dynamická zkouška		
Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]	Vzorek	CF [%]	SCF [%]
1	74	26	1	60,2	39,8	1	60,2	39,8
2	65,8	34,2	2	57,9	42,1	2	57,9	42,1
3	70,7	29,3	3	64,4	35,6	3	64,4	35,6
4	73,4	26,6	4	69,1	30,9	4	69,1	30,9
5	71,7	28,3	5	61,5	38,5	5	61,5	38,5
x	<b>71,12</b>	<b>28,88</b>	x	<b>62,62</b>	<b>37,38</b>	x	<b>62,62</b>	<b>37,38</b>
s	<b>3,25</b>	<b>3,25</b>	s	<b>4,32</b>	<b>4,32</b>	s	<b>4,32</b>	<b>4,32</b>



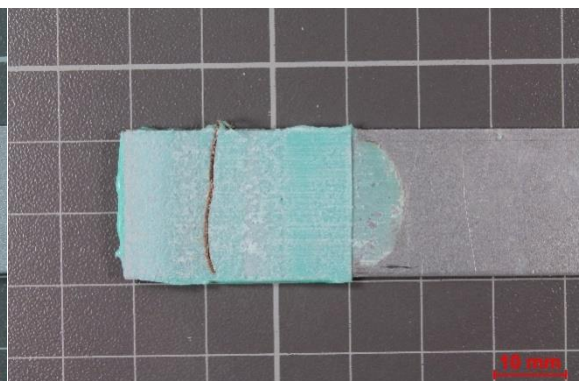
*Obr.82 St. zk, 60 °C, vz. , BETAMATE™*



*Obr.83 St. zk, 60 °C, vz. , SikaPower®*



*Obr.84 Dyn. zk, 60 °C, vz. , BETAMATE™*

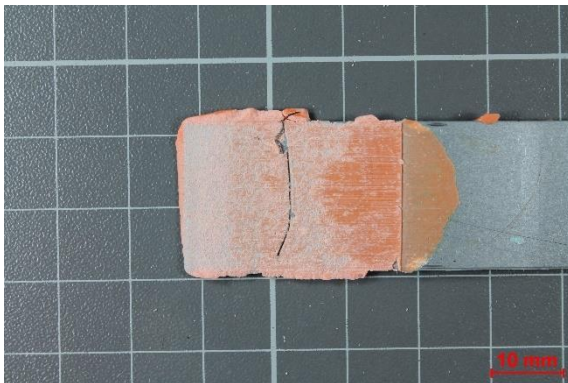


*Obr.85 Dyn. zk, 60 °C, vz. , SikaPower®*



*Tab. 14 Procentuální zastoupení typů porušení lepených spojů při teplotě 80 °C*

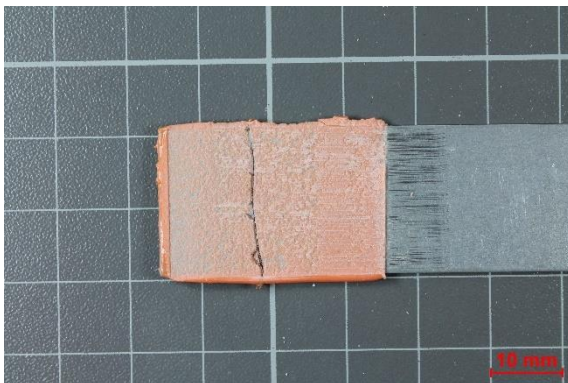
<b>Podmínky prováděných zkoušek 80 °C</b>								
<b>BETAMATE™</b>		<b>Statická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>		<b>Statická zkouška</b>		
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	72,4	27,6	1	77,9	22,1	2	85,4	14,6
2	61,7	38,3	2	85,4	14,6	3	79,2	20,8
3	64,6	35,4	3	79,2	20,8	4	81,2	18,8
4	62,4	37,6	4	81,2	18,8	5	78,3	21,7
5	70,1	29,9	5	78,3	21,7	<b>x</b>	<b>80,4</b>	<b>19,6</b>
<b>x</b>	<b>66,24</b>	<b>33,76</b>	<b>x</b>	<b>80,4</b>	<b>19,6</b>	<b>s</b>	<b>3,07</b>	<b>3,07</b>
<b>s</b>	<b>4,77</b>	<b>4,77</b>	<b>s</b>	<b>3,07</b>	<b>3,07</b>			
<hr/>								
<b>BETAMATE™</b>		<b>Dynamická zkouška</b>		<b>SikaPower®</b>		<b>Dynamická zkouška</b>		
<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>	<b>Vzorek</b>	<b>CF [%]</b>	<b>SCF [%]</b>
1	67,7	32,3	1	66,2	33,8	2	57,6	42,4
2	67,9	32,1	2	57,6	42,4	3	47,4	52,6
3	64,1	35,9	3	47,4	52,6	4	55,7	44,3
4	62,8	37,2	4	55,7	44,3	5	60,6	39,4
5	65,1	34,9	5	60,6	39,4	<b>x</b>	<b>57,5</b>	<b>42,5</b>
<b>x</b>	<b>65,52</b>	<b>34,48</b>	<b>x</b>	<b>57,5</b>	<b>42,5</b>	<b>s</b>	<b>6,90</b>	<b>6,90</b>
<b>s</b>	<b>2,24</b>	<b>2,24</b>	<b>s</b>	<b>6,90</b>	<b>6,90</b>			



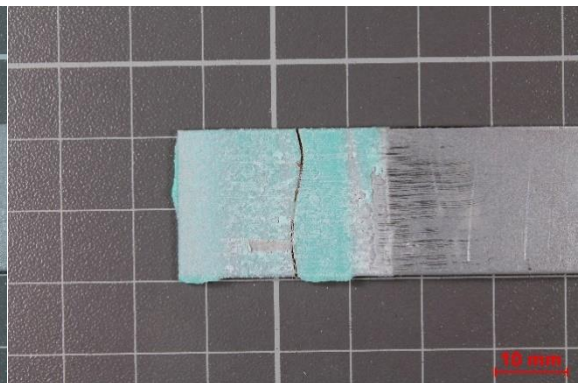
**Obr.86** St. zk, 80 °C, vz. , BETAMATE™



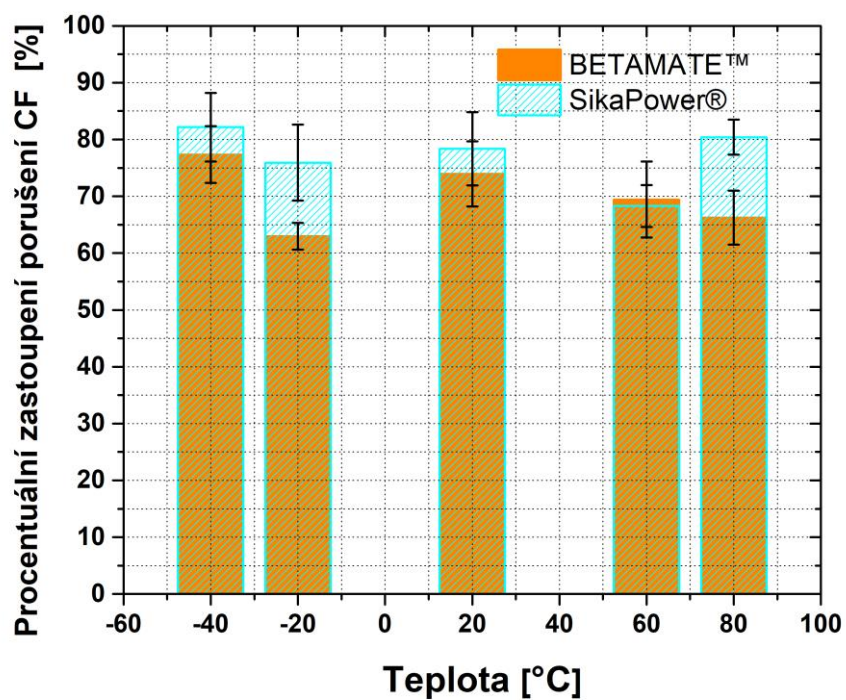
**Obr.87** St. zk, 80 °C, vz. , SikaPower®



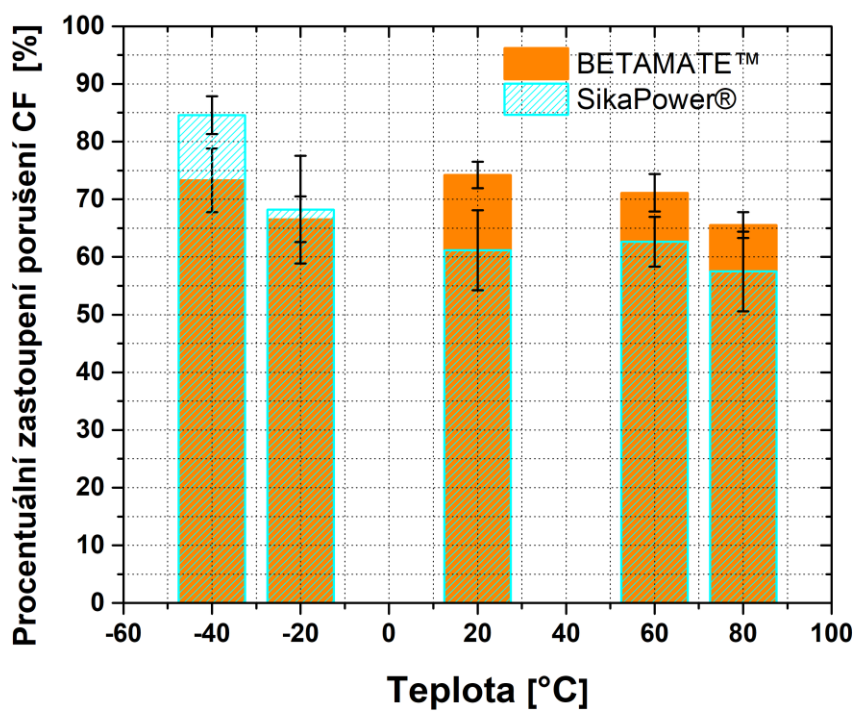
**Obr.88** Dyn. zk, 80 °C, vz. , BETAMATE™



**Obr.89** Dyn. zk, 80 °C, vz. , SikaPower®



Obr.90 Graf závislosti porušení CF na teplotě při statickém zkoušení



Obr.91 Graf závislosti porušení CF na teplotě při dynamickém zkoušení

### 3.9 Statistické vyhodnocení výsledků

Pro statistické vyhodnocení vlivů použitých lepidel a teplotních podmínek na zkoušené lepené spoje byla použita dvoufaktorová analýza rozptylu neboli Anova, která má za cíl otestovat, zda faktory teplota a druh lepidla mají trvalý či náhodný vliv na naměřené hodnoty. Tato statistická metoda byla aplikována na hodnoty statické a dynamické odolnosti vůči štípání, a dále pak na procentuální zastoupení typu porušení lepených spojů CF.

Testovanými faktory byl druh použitého lepidla a teplota prostředí. Hladina významnosti  $\alpha$  byla zvolena 0,05. Následně byly porovnávány hodnoty testovacích kritérií  $F$  s kritickými hodnotami testovacích kritérií  $F_{\text{krit}}$ . Pokud byla hodnota testovacího kritéria  $F > F_{\text{krit}}$ , byl vliv daného faktoru hodnocen jako statisticky významný. Dále došlo k porovnání hodnoty  $p$ , jakožto nejmenší hladiny významnosti, při které je ještě možné tvrdit, že daný faktor má trvalý vliv na naměřené hodnoty se zvolenou hladinou významnosti  $\alpha$ . Pokud byla hodnota  $p < \alpha$ , byl posuzovaný faktor hodnocen jako statisticky významný. Pokud jedna z nerovností nebyla splněna, faktor byl vyhodnocen jako statisticky nevýznamný. Celkový výpočet byl proveden pomocí softwaru Excel 2023 a podrobnější tabulku výpočtů lze nalézt v příložených přílohách č.9-12.

Statisticky významný vliv na statickou i dynamickou odolnost vůči štípání byl prokázán pro faktor teploty i druhu lepidla. Vzájemná interakce těchto faktorů však nemá statisticky významný vliv, viz Tab. 15 a Tab. 16.

Na procentuální zastoupení typu porušení CF při obou typech zkoušek byl prokázán statisticky významný vliv faktorů teploty i druhu použitého lepidla. Navíc i vzájemná interakce posuzovaných faktorů byla statisticky významná, viz Tab. 17 a Tab. 18.

**Tab. 15** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na dynamickou odolnost vůči štípání

	<i>F</i>	p	<i>F krit</i>	Vliv
Typ lepidla	123,682	8,259E-14	4,085	ANO
Teplota	61,579	1,461E-16	2,606	ANO
Interakce	0,408	0,802	2,606	NE

**Tab. 16** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na statickou odolnost vůči štípání

	<i>F</i>	p	<i>F krit</i>	Vliv
Typ lepidla	78,409	5,703E-11	4,085	ANO
Teplota	14,518	2,085E-07	2,606	ANO
Interakce	0,423	0,791	2,606	NE

**Tab. 17** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při dynamické zkoušce

	<i>F</i>	p	<i>F krit</i>	Vliv
Typ lepidla	4,909	0,032	4,085	ANO
Teplota	14,486	2,138E-07	2,606	ANO
Interakce	8,531	4,477E-05	2,606	NE

**Tab. 18** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při statické zkoušce

	<i>F</i>	p	<i>F krit</i>	Vliv
Typ lepidla	22,494	2,677E-05	4,085	ANO
Teplota	7,606	0,000118	2,606	ANO
Interakce	3,709	0,012	2,606	ANO

## 4. Diskuze

Cílem diplomové práce bylo provedení statických a dynamických testů lepených spojů vytvořených dvěma epoxidovými lepidly dvou konkurenčních výrobců. Obě lepidla SikaPower® a BETAMATE™ jsou používána jako vysokopevnostní lepidla při lepení karoserií v automobilovém průmyslu. Zmíněná lepidla využívá například ve své výrobě Škoda Auto a.s., jakožto největší výrobce automobilů v Česku. V jejich výrobě jsou obě lepidla používána jako ekvivalentní, tudíž by nemělo mít na výrobu vliv, které ze zmíněných lepidel bylo použito.

Provedený postup testování a přípravy vzorků měl za cíl co nejvěrohodněji nasimulovat reálný výrobní proces, ve kterém jsou lepidla používána. Tato skutečnost se nejvíce projevila ve výsledných odolnostech lepených spojů, kdy se ukázalo, že nelze brát v potaz například uvedené hodnoty dynamických odolností vůči štípání v materiálových listech lepidel. Ty jsou totiž uváděné v závislosti na jiných zkušebních parametrech oproti reálnému procesu lepení.

Po provedení dynamických zkoušek dle normy ČSN EN ISO 11343 a následném statistickém vyhodnocení bylo zjištěno, že lepidlo SikaPower® dosahovalo vyšší dynamické odolnosti vůči štípání než lepidlo BETAMATE™ při všech zkoušených teplotních podmínkách. Nejvíce rozdílných hodnot dosahovala lepidla při teplotě 60 °C, kdy lepidlo SikaPower® dosahovalo o 20 % vyšší hodnoty dynamické odolnosti vůči štípání. Nejmenší rozdíl mezi použitými lepidly panoval při teplotě 80 °C, kdy byla dynamická odolnost vůči štípání lepidla SikaPower® vyšší o cca 16 %. V závislosti na těchto zjištěních tedy můžeme tvrdit, že vysokopevnostní lepidla SikaPower® a BETAMATE™ nevykazují ekvivalentní dynamické odolnosti vůči štípání. Co se týče vlivu teplotních podmínek na zkoušená lepidla, bylo zjištěno, že obě lepidla vykazují změnu odolnosti vůči štípání v závislosti na teplotních podmínkách i přesto, že se jedná o epoxidová lepidla a měla by být teplotně stálá po vytvrzení. Lepidlo SikaPower® dosahovalo při teplotě - 40 °C hodnoty dynamické odolnosti o cca 24 % nižší než při teplotě 20 °C a při 60 °C dosahovalo hodnoty o cca 17 % vyšší než při teplotě 20 °C. Lepidlo BETAMATE™ dosahovalo při teplotě - 40 °C hodnoty dynamické odolnosti o cca 33 % nižší než při teplotě 20 °C a při 80 °C dosahovalo hodnoty o cca 19 % vyšší než při teplotě 20 °C.

Po provedení statických zkoušek a následném statistickém vyhodnocení bylo zjištěno, že lepidlo SikaPower® dosahovalo i vyšší statické odolnosti vůči štípání než lepidlo BETAMATE™ při všech zkoušených teplotních podmínkách. Zajímavým se jeví fakt, že při dynamickém zkoušení se hodnoty dynamické odolnosti vůči štípání zvyšovaly spolu se vzrůstající teplotou, zatímco při statickém zkoušení se statická odolnost vůči štípání spolu se vzrůstající teplotou snižovala. Nejvíc rozdílných hodnot dosahovala lepidla při teplotách 20 a 60 °C, kdy lepidlo SikaPower® dosahovalo o 22 % vyšší hodnoty statické odolnosti vůči štípání. Nejmenší rozdíl mezi použitými lepidly panoval při teplotě - 40 °C, kdy byla statická odolnost vůči štípání lepidla SikaPower® vyšší o cca 15 %. V závislosti na těchto zjištěních můžeme opět tvrdit, že vysokopevnostní lepidla SikaPower® a BETAMATE™ nevykazují ekvivalentní statické odolnosti vůči štípání. Co se týče vlivu teplotních podmínek na zkoušená lepidla, bylo naměřeno, že obě lepidla vykazují změnu odolnosti vůči štípání v závislosti na teplotních podmínkách. Lepidlo SikaPower® dosahovalo při teplotě 80 °C hodnoty statické odolnosti o cca 19 % nižší než při teplotě 20 °C a při - 20 °C dosahovalo hodnoty o cca 2 % vyšší než při teplotě 20 °C. Lepidlo BETAMATE™ dosahovalo při teplotě 80 °C hodnoty statické odolnosti vůči štípání o cca 22 % nižší než při teplotě 20 °C a při - 20 °C dosahovalo hodnoty o cca 7 % vyšší než při teplotě 20 °C.

Statisticky významnými se ukázaly vlivy použitého typu lepidla i teplotních podmínek na typ porušení zkoušeného lepeného spoje při dynamických zkouškách. Po provedení obrazové analýzy porušeného lepeného spoje bylo zjištěno dominantní postavení porušení typu CF, ale jeho procentuální zastoupení se měnilo s teplotními podmínkami i použitým typem lepidla. Lepidlo SikaPower® dosahovalo nejvyššího procentuálního zastoupení porušení CF při teplotě - 40 °C, kdy dosahovalo přibližně 85 %, naopak nejnižší zastoupení tohoto porušení bylo při teplotě 80 °C, a to cca 58 %. Oproti tomu lepidlo BETAMATE™ vykazovalo nejvyšší procentuální zastoupení tohoto typu porušení při teplotě 20 °C, a to cca 74 %. Při teplotě 80 °C dosahovalo porušení CF nejnižší hodnoty přibližně 66 %.

Při statických zkouškách lepidlo SikaPower® dosahovalo nejvyššího procentuálního zastoupení porušení CF při - 40 °C, přibližně 82 %. Naopak nejnižší zastoupení porušení CF vykazovalo při 60 °C, a to 68 %. Při použití lepidla BETAMATE™ bylo nejvyšší zastoupení porušení typu CF při - 40 °C, cca 77 % a nejmenší při - 20 °C, a to přibližně 63 %. Opět byl

tedy prokázán statisticky významný vliv teploty na typ porušení lepeného spoje a byla prokázána odlišnost obou použitých lepidel.

Důležitou proměnnou v oblasti použití lepidel je jejich expirační doba. Možným důvodem výrazného poklesu statické a dynamické odolnosti vůči štípání u lepidla BETAMATE™ může být stáří lepidla, které by se mohlo negativně propisovat do výsledných vlastností lepeného spoje. Dalším možným pokračováním v této problematice by tedy mohlo být provedení výše zmíněných zkoušek s využitím lepidel s různou dobou stáří/expirace, díky čemuž by bylo možné porovnat, zda nedochází k postupné degradaci epoxidového lepidla a následně tím ke zhoršení mechanických vlastností lepených spojů.



## 5.Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést dynamické a statické zkoušky lepených spojů vytvořených pomocí dvou typů epoxidových lepidel značek SikaPower® a BETAMATE™, a to za různých teplotních podmínek. Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 11343 a to při pěti různých teplotách. Následně byla naměřená data zpracována a vzájemně porovnána.

Dalším cílem bylo ověření faktu, že zkoušená vysokopevnostní lepidla značek SikaPower® a BETAMATE™ mohou být používána jako ekvivalentní při lepení automobilových karoserií. Dle naměřených statických a dynamických odolností vůči štípání a jejich následným statistickým vyhodnocením pomocí analýzy rozptylu bylo zjištěno, že zmíněná lepidla dosahují výrazně odlišných odolností vůči štípání, a tudíž nelze tato lepidla považovat za ekvivalentní.

Posledním cílem diplomové práce bylo ověření, zda zkoušená epoxidová lepidla SikaPower® a BETAMATE™ vykazují stabilní mechanické vlastnosti po vytvrzení při různých teplotních podmínkách. Provedená statistická analýza naměřených statických/dynamických odolností vůči štípání potvrdila, že změna teplotních podmínek má statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti lepených spojů vytvořených pomocí výše zmíněných lepidel, konkrétně na jejich statickou/dynamickou odolnost vůči štípání.

## Literatura

- [1] ŠIMON, Petr. *Karosérie osobního automobilu* [online]. B.m.: Škoda Auto a.s. 4. března 2015 [vid. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html?fbclid=IwAR13FILrw0gmBwSZhz2E0IorbdsrtTAUrfkWLSuFI-xdaf3PQgl7a3ATWY8>
- [2] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 978-80-7372-133-6.
- [3] REISGEN, Uwe a Lars STEIN. *Fundamentals of joining technology: Welding, brazing and adhesive bonding*. Düsseldorf: DVS Media, 2016. English Edition, 13. ISBN 978-3-945023-76-1.
- [4] EBNEAJJAD, Sina, ed. *Adhesives technology handbook*. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew Pub, 2008. ISBN 978-0-8155-1533-3.
- [5] HABENICHT, Gerd. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung; mit 37 Tabellen*. 4., erw. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2002. ISBN 978-3-540-43340-8.
- [6] LENFELD, Petr. *Technologie II. 2. část, (Zpracování plastů)*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-305-8.
- [7] DOUBEK, Pavel a Michaela KOLNEROVÁ. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [8] Lepení ve výrobě karoserie [online]. 2017, (7,8) [vid. 2024-02-10]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie](http://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie)
- [9] POCIUS, Alphonsus V. *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2. ed. München: Hanser, 2002. ISBN 978-1-56990-319-3.
- [10] *Technologie lepení pro automotive* [online]. B.m.: KALETECH. [vid. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://www.kalettech.cz/cz/technologie-lepeni/automotive/>
- [11] HABENICHT, Gerd. *Applied adhesive bonding: a practical guide for flawless results*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-32014-1.
- [12] ADAMS, Robert D. a Richard D. ADAMS, ed. *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Boca Raton: CRC Press [u.a.], 2005. ISBN 978-1-85573-741-9.
- [13] *Lepení a utěšňování* [online]. [vid. 2024-04-09]. Dostupné z: [www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/procesni-technologie/lepeni-a-utesnovani](http://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/procesni-technologie/lepeni-a-utesnovani)

- [14] ČSN EN 13887. *Konstrukční lepidla - Směrnice pro přípravu povrchu kovů a plastů před lepením*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2004
- [15] *Opravy karosérie Lepení* [online]. B.m.: TEROSON. [vid. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/23474402-Opravy-karoserie-lepeni.html>
- [16] ČSN EN 1465. *Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání překládaných lepených sestav*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [17] ČSN EN 28510-1. *Lepidla - Zkouška v odlupování zkušební tělesa z ohebného a tuhého adhérendu - Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [18] ČSN EN 1464. *Lepidla - Stanovení odolnosti lepených spojů proti odlupování - Metoda kontinuálního navíjení*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010
- [19] ČSN EN ISO 14678. *Lepidla - Stanovení odolnosti vůči tečení (vytékání ze slepu)*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006
- [20] ČSN EN ISO 11339. *Lepidla - T-zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adhérendů*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2022
- [21] ČSN EN 14869-1. *Konstrukční lepidla - Stanovení smykového chování lepených konstrukčních spojů - Část 1: Torzní metoda zkoušení používající natupo slepené duté válce*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011
- [22] ČSN EN 14444. *Konstrukční lepidla - Kvalitativní hodnocení trvanlivosti slepených sestav - Zkouška porušení slepu klínem*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006
- [23] ČSN EN ISO 9664. *Lepidla - Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1997
- [24] ČSN EN ISO 11343. *Lepidla - Stanovení dynamické odolnosti vysokopevnostních lepených spojů vůči štípaní rázem - Metoda štípaní rázem pomocí klínu*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020

- [25] ČSN EN ISO 10365. *Lepidla - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2022
- [26] VDA 239-100. *Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung*. B.m.: Německo. 2016
- [27] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2021.

## Seznam příloh

- Příloha č.1** Materiálový list lepidla SikaPower®-494 G
- Příloha č.2** Materiálový list lepidla BETAMATE™1440
- Příloha č.3** Protokol statické zkoušky tahem, směr odebrání vzorků 0°
- Příloha č.4** Protokol statické zkoušky tahem, směr odebrání vzorků 45°
- Příloha č.5** Protokol statické zkoušky tahem, směr odebrání vzorků 90°
- Příloha č.6** Výkres A4\_001\_DP
- Příloha č.7** Výkres A4\_002\_DP
- Příloha č.8** Výkres A4\_003\_DP
- Příloha č.9** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na dynamickou odolnost vůči štípání
- Příloha č.10** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na statickou odolnost vůči štípání
- Příloha č.11** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při dynamické zkoušce
- Příloha č.12** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při statické zkoušce

Provisional Product Data Sheet  
Version 5 (07 / 2018)

## SikaPower®-494 G

Low viscous semi crash resistant structural metal adhesive

### Technical Product Data

Chemical base	Epoxy hybrid
Color (CQP 001)	Light green
Hazard designation	see MSDS
Non-volatile compounds (CQP 576-1)	> 99 %
Density before / after curing (CQP 576-1)	1.3 / 1.3 kg/l approx.
Application temperature	40°C (nozzle) approx.
Viscosity; 50°C, oscillation 5Hz, P/P 25 mm, 1 mm gap (CQP 584-1)	450 Pa·s approx.
Curing time / substrate temperature	20 min / 175°C
Lap shear strength <sup>2</sup> , at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	20 MPa approx.
Lap shear strength <sup>2</sup> , -30°C / +80°C, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	23 / 16 MPa approx..
Lap shear strength <sup>2</sup> , 20' 160°C / 40' 200°C, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	20 / 20 MPa approx.
Lap shear strength <sup>3</sup> , 1.5 mm metal sheet, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	30 MPa approx.
Dynamic resistance to cleavage <sup>4</sup> (CQP 580-3,-6 / ISO 11343)	30 N/mm approx.
T-Peel strength <sup>5</sup> (CQP 580-2,-6 / ISO 11339)	9 N/mm approx.
Tensile strength <sup>6</sup> (CQP 580-5,-6 / ISO 527)	30 MPa approx.
Elongation at break <sup>6</sup> (CQP 580-5,-6 / ISO 527)	5% approx.
Glass transition temperature, DMTA (CQP 509-1 / DIN EN ISO 6721, EN 61006)	100°C approx.
Shelf life, at 23°C	10 months

<sup>1)</sup> CQP = Corporate Quality Procedures

<sup>2)</sup> DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m<sup>2</sup> Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 25 x 10 x 0.3 mm; rate of extension: 10 mm/min.

<sup>3)</sup> H420 ZE 50/50 1.5 mm; 3 g/m<sup>2</sup> Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 25 x 10 x 0.3 mm; rate of extension: 10 mm/min.

<sup>4)</sup> DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m<sup>2</sup> Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 20 x 30 x 0.3 mm; impact speed: 2.0 m/s.

<sup>5)</sup> DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m<sup>2</sup> Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer 25 x 100 x 0.3 mm; rate of extension: 100 mm/min.

<sup>6)</sup> Rate of extension: 2 mm/min.

Automotive

### Description

SikaPower®-494 G is a one-part, cold-applied, heat-curing high-structural, impact modified adhesive based on epoxy.

SikaPower®-494 G is designed for sheet metal assembly work in the body shop and is cured with heat, e.g. in the paint oven, to form a high-performance thermoset.

SikaPower®-494 G is manufactured in accordance with ISO 9001/14001 quality assurance system and with the Responsible Care program.

### Product Benefits

- One-part
- High strength
- Adheres well to oily substrates
- High resistance to washing out
- Suitable for joining different metals
- Spot-weldable
- Distortion-free joining
- Provides protection against corrosion
- No damage to substrates
- Contains no solvents, PVC or isocyanates

### Areas of Application

SikaPower®-494 G is suitable for structural bonding of different types of metal, especially for hem-flange application by hang-on-parts. As an adhesive product it is designed for use in combination with spot-welding, riveting, clinching and other mechanical fastening techniques, and in some cases as a partial replacement for them. The bonding of oily substrates (standard anti-corrosion treatment and deep drawing oils, approx. 3 g/m<sup>2</sup>) is possible because of the oil uptake during the heat curing that is an essential part of the process.





**Dow Automotive**

Provisorisches Technisches Datenblatt

# BETAMATE™ 1440

## Crashstabiler Strukturklebstoff

### Anwendung / Beschreibung:

**BETAMATE™ 1440** ist ein einkomponentiger Epoxidklebstoff, welcher speziell für den Einsatz im Rohbau entwickelt wurde. Der Klebstoff wird angewendet, um die Betriebsfestigkeit, die Crashstabilität und die Steifigkeit des Fahrzeuges zu erhöhen.

### Eigenschaften:

- Ausgezeichnete Prozess- und Lagerstabilität
- Ausgezeichnete Haftung auf den im Automobilbau verwendeten Stahlsorten, einschliesslich beschichteten Stählen und vorbehandeltem Aluminium. Gute Verträglichkeit von Ölen und Trockenschmierstoffen
- Erhöht die Steifigkeit und Crashstabilität des Fahrzeuges
- Hohe Beständigkeit des Klebstoffes und der Verklebung.
- Eignung zur Abdichtung und Schutz des Metalls als auch der Schweisspunkte vor Korrosion
- Kompatibel mit anderen mechanischen und thermischen Fügeverfahren
- Kompatibel mit dem KTL - Prozess und auswaschbeständig
- Vorhärter
- Bis zu sechs Wochen Offenzeit im gefügten Zustand

### Applikation:

Das Produkt ist kalt anpumpbar, wirbelsprühbar und ist mittels Dünnstrahlspritzen oder als Raupe applizierbar. Es kann mit folgenden Parametern appliziert werden:

<b>Auftragungsgeschwindigkeit</b>	200 - 500 mm/s
<b>Temperaturen:</b>	<b>Empfohlen:</b>
Folgeplatte	unbeheizt möglich, oder 30-40°C
Folgeplatte - Dosierer	Pro Heizzone ca. 5°C Temperaturerhöhung.
Düse	40 - 55°C. 45 - 60°C

Um eine optimale Benetzung des Bauteiles mit dem Klebstoff zu erzielen, sollten die Bauteile bei mindestens 15°C gelagert werden. Bei einer längeren Unterbrechung der Applikation, zum Beispiel über das Wochenende (länger als 48 Stunden), sollte die Heizung abgestellt werden.

**Alle Dow Automotive Produkte werden in erster Linie mit den Automobil-Herstellern für deren Bedürfnisse und gemäss deren Spezifikation entwickelt und von den Kunden für bestimmte Anwendungen freigegeben.**

**Der Einsatz für andere als die freigegebenen Anwendungen bedarf der vorherigen, schriftlichen Gutheissung durch den technischen Dienst der Dow Automotive.**

## Příloha č.2 Materiálový list lepidla BETAMATE™1440

### Technische Daten:

<b>Basis</b>	Epoxidharz
<b>Farbe</b>	rot
<b>Dichte 23°C (DIN 52451)</b>	1.24 g/ml
<b>Anteil nichtflüchtiger Bestandteile</b>	> 99 %
<b>Viskosität / Fließgrenze (45°C, Bohlin, Casson)</b>	46 Pas / 410 Pa
<b>Aushärtebedingung</b>	> 140°C / 30 Minuten
<b>Standardaushärtung</b>	180°C / 30 Minuten
<b>Zugfestigkeit (DIN EN ISO 527-1)</b>	31 MPa
<b>Bruchdehnung (DIN EN ISO 527-1)</b>	ca. 11%
<b>E-Modul (DIN EN ISO 527-1)</b>	1830 MPa
<b>Zugscherfestigkeit (DIN EN 1465) (CRS 14O3, 1.5 mm) Klebschichtdicke: 0.2 mm Verklebte Fläche: 25x10 mm</b>	29.6 MPa
<b>Winkelschälfestigkeit (DIN EN ISO 11339) (DX56 D Z100 MC, 0.8mm) Klebschichtdicke: 0.2 mm Verklebte Fläche: 25x100 mm</b>	9.4 N/mm
<b>Schlagschälfestigkeit (ISO 11343) (CRS 14O3, 1 mm; 2m/s) Klebschichtdicke: 0.2 mm Verklebte Fläche: 20x30 mm</b>	46 N/mm
<b>Vorbehandlung der Klebflächen</b>	Das Material wurde für die Haftung auf öligem Blech mit bis zu 5 g/m <sup>2</sup> Ölaufgabe entwickelt.
<b>Verarbeitung</b>	<b>aus Kartuschen:</b> Druckluftpistolen mit mechanischem Stempel, oder Handdruckpistolen. <b>aus Hobbock und Fässern:</b> Mit beheizbaren, handelsüblichen Hobbock- und Fasspumpen.
<b>Reinigung</b>	Vor dem Aushärten kann der unausgehärtete Klebstoff mit BETACLEAN 3510 entfernt werden. <b>Achtung:</b> Haftflächen dürfen <u>nicht</u> mit BETACLEAN 3510 gereinigt werden!
<b>Gebinde</b>	<b>Hobbock und Fass:</b> 20, 25, 45, 100 und 200 kg (Mehrweggebinde mit PE-Sack) <b>Kartuschen:</b> 0,36 kg
<b>Lagerstabilität</b>	Das Material ist bei Temperaturen unter 30°C zwölf Monate verarbeitbar.

Die angegebenen Daten sind Standardwerte.

---



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

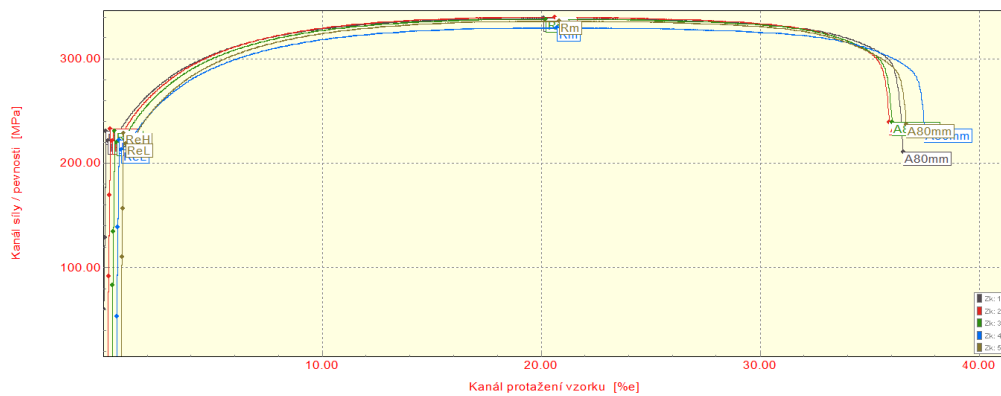
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH ZM 40/40 E-O  
 Rozměry vzorku : [0,65 x 20] mm  
 Směr odebrání vzorku : 0°  
 Teplota : RT  
 Deformační rychlost : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 27.2.2024  
 Pozn. :

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	221.5	230.3	338.6	19.95	36.43	209676
2	221.3	232.7	339.7	20.24	35.59	209394
3	219.6	231.1	337.9	19.67	35.52	209569
4	212.8	222.0	329.8	19.99	36.81	207236
5	218.7	228.8	336.2	19.85	35.77	209439

Statistika	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	218.8	229.0	336.4	19.94	36.02	209063
Směrodatná odchylka	3.5	4.1	4.0	0.21	0.57	1027
Minimální hodnota	212.8	222.0	329.8	19.67	35.52	207236
Maximální hodnota	221.5	232.7	339.7	20.24	36.81	209676



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

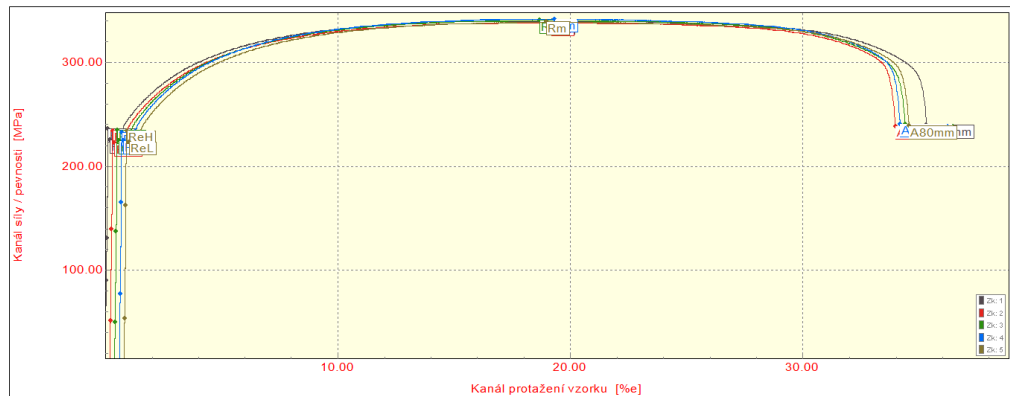
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH ZM 40/40 E-O  
 Rozměry vzorku : [0,65 x 20] mm  
 Směr odebrání vzorku : 45°  
 Teplota : RT  
 Deformační rychlost : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 27.2.2024  
 Pozn. :

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	225.2	235.8	340.3	19.05	35.20	217367
2	222.7	234.4	338.4	18.83	33.66	216177
3	224.5	234.7	340.5	18.13	33.88	227676
4	224.5	232.5	341.6	18.58	33.47	223681
5	223.6	234.1	338.8	18.00	33.65	216340

Statistika	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	224.1	234.3	339.9	18.52	33.97	220248
Směrodatná odchylka	1.0	1.2	1.3	0.45	0.70	5175
Minimální hodnota	222.7	232.5	338.4	18.00	33.47	216177
Maximální hodnota	225.2	235.8	341.6	19.05	35.20	227676



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

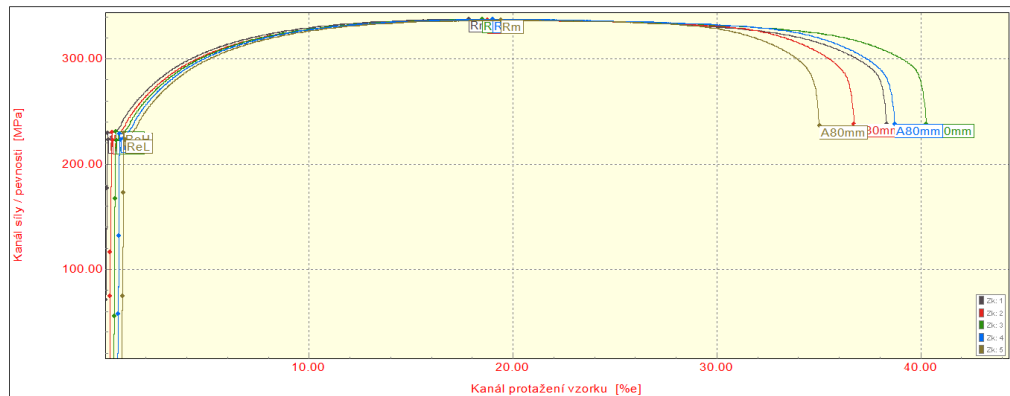
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH ZM 40/40 E-O  
 Rozměry vzorku : [0,65 x 20] mm  
 Směr odebrání vzorku : 90°  
 Teplota : RT  
 Deformační rychlost : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 27.2.2024  
 Pozn. :

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

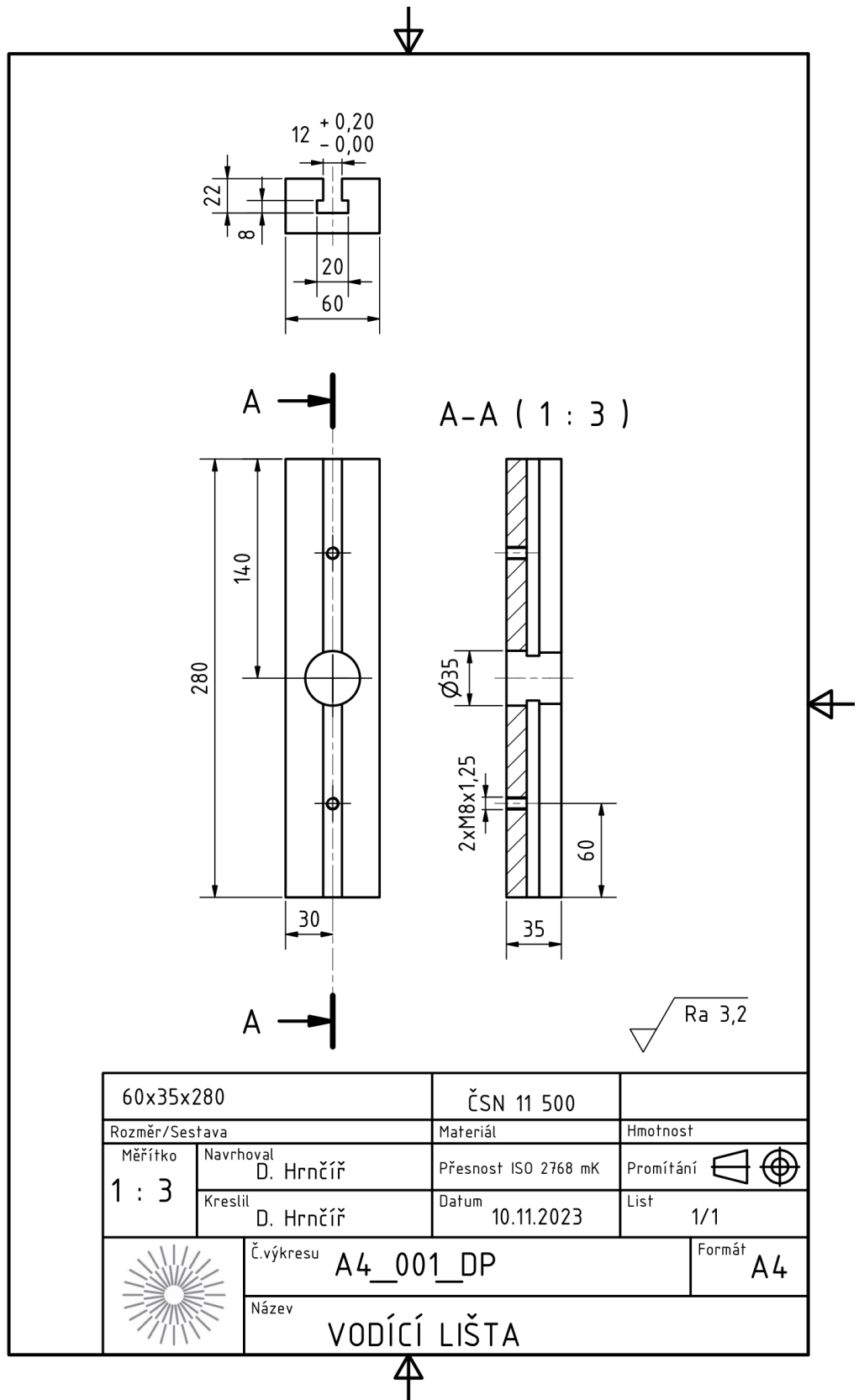
Zkouška	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	222.5	229.2	337.8	17.69	38.22	227499
2	222.4	230.4	336.9	18.41	36.42	222565
3	222.3	230.6	337.5	17.93	39.77	221574
4	223.2	228.8	337.6	18.25	38.02	230003
5	222.9	229.4	336.9	18.45	34.13	218235

Statistika	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	222.7	229.7	337.4	18.15	37.31	223975
Směrodatná odchylka	0.4	0.8	0.4	0.33	2.14	4729
Minimální hodnota	222.3	228.8	336.9	17.69	34.13	218235
Maximální hodnota	223.2	230.6	337.8	18.45	39.77	230003

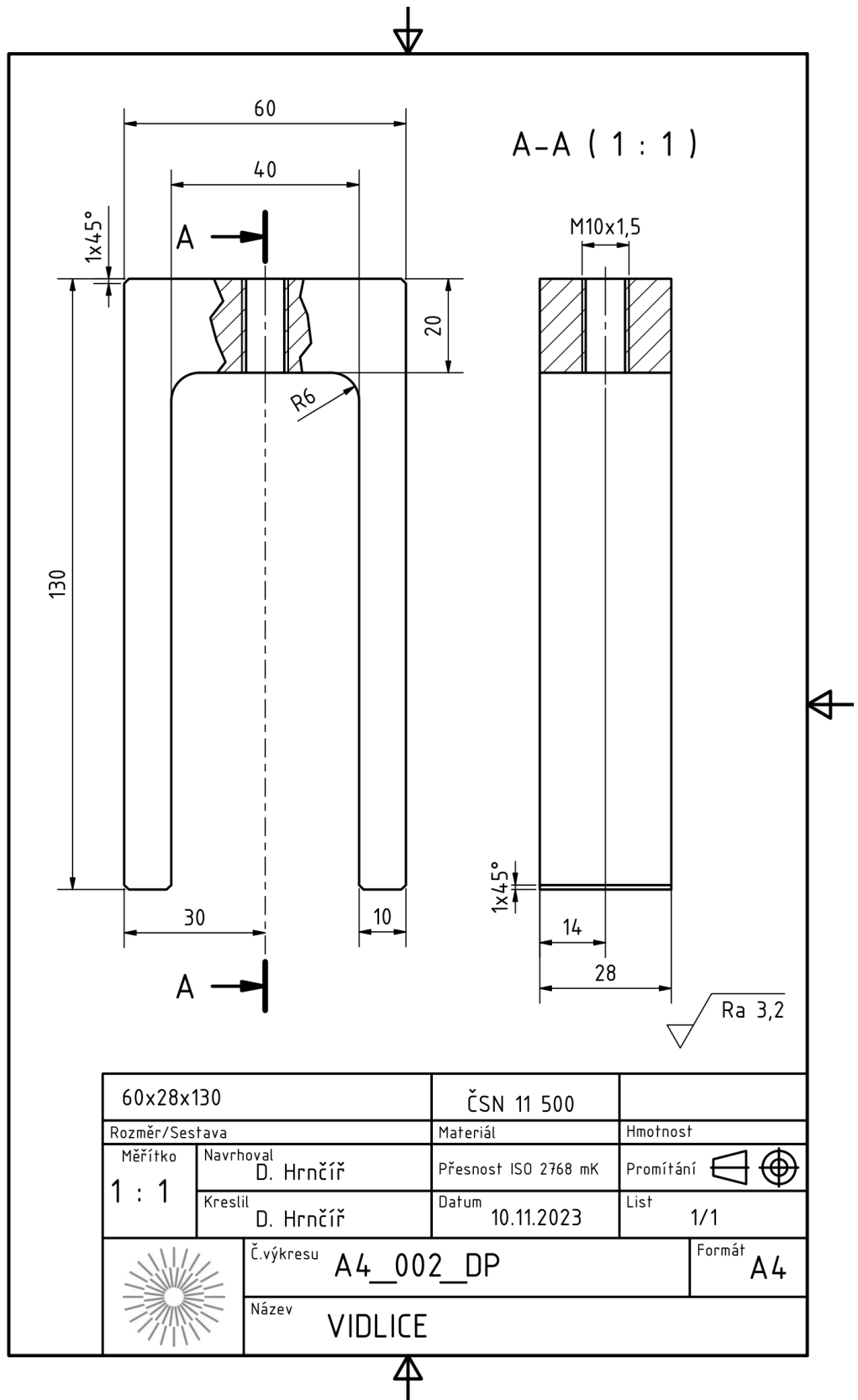


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

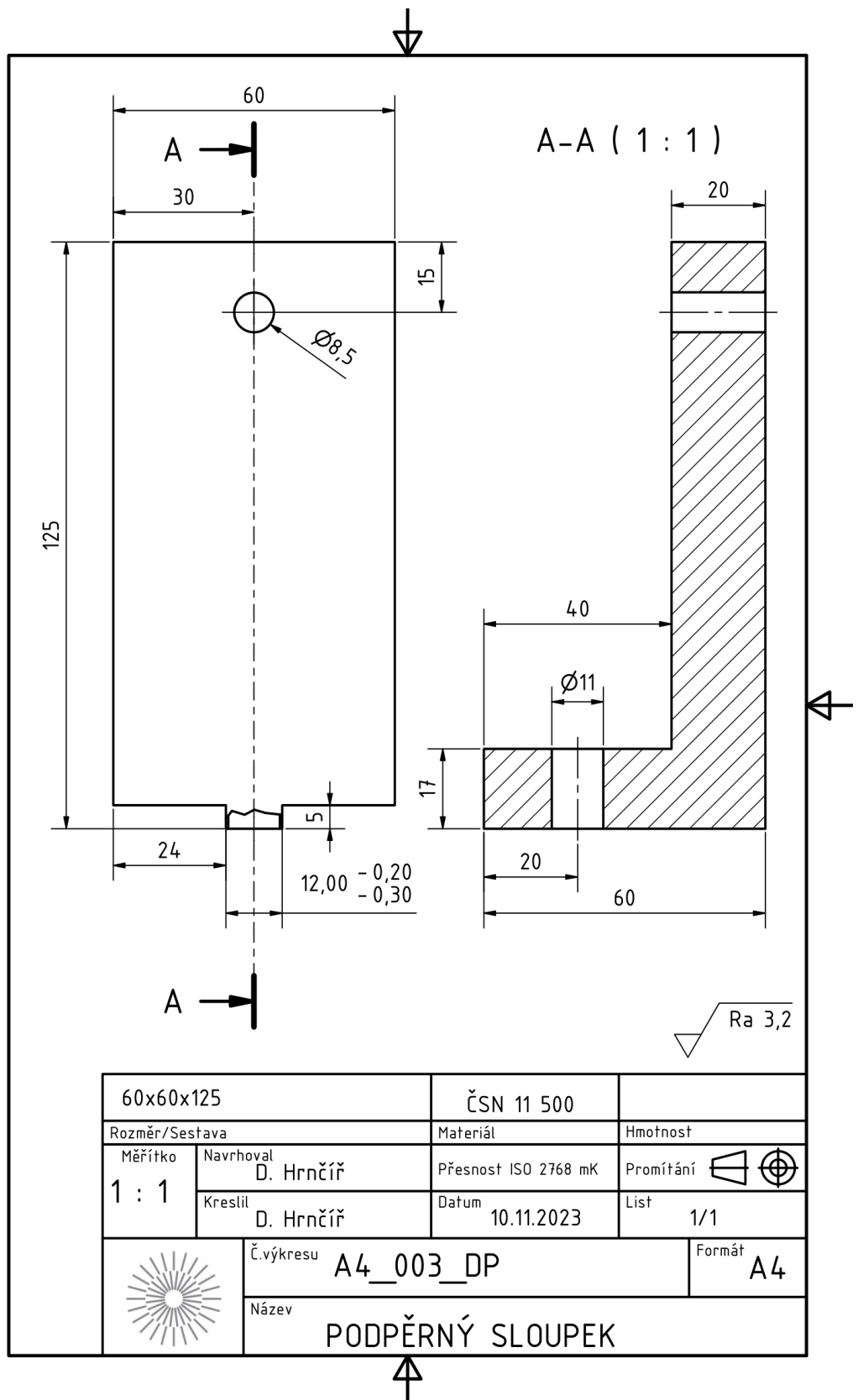
Příloha č.6 Výkres A4\_001\_DP



Příloha č.7 Výkres A4\_002\_DP



Příloha č.8 Výkres A4\_003\_DP



**Příloha č.9** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na dynamickou odolnost vůči štípání

Anova: dva faktory s opakováním

Teplotní podmínky

Faktor	-40	-20	20	60	80	Celkem
<i>BETAMATE™</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	72,769	89,308	108,795	124,692	129,436	525
Průměr	14,554	17,862	21,759	24,938	25,887	21
Rozptyl	0,644	4,071	1,596	0,759	1,862	20,525
<i>SikaPower®</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	103,051	121,821	135,538	158,538	154,256	673,205
Průměr	20,610	24,364	27,108	31,708	30,851	26,928
Rozptyl	5,782	1,342	4,695	3,809	10,959	22,089
<i>Celkem</i>						
Počet	10	10	10	10	10	
Součet	175,821	211,128	244,333	283,231	283,692	
Průměr	17,582	21,113	24,433	28,323	28,369	
Rozptyl	13,045	14,151	10,743	14,758	12,544	

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	p	F krit
Výběr	439,295	1	439,295	123,682	8,259E-14	4,085
Sloupce	874,864	4	218,716	61,579	1,461E-16	2,606
Interakce	5,797	4	1,449	0,408	0,802	2,606
Dohromady	142,073	40	3,552			
Celkem	1462,029	49				

**Příloha č.10** Anova, vliv druhu lepidla a teploty na statickou odolnost vůči štípání

Anova: dva faktory s opakováním

Teplotní podmínky

Faktor	-40	-20	20	60	80	Celkem
<i>BETAMATE™</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	146,077	150,641	140,641	120,692	109,487	667,538
Průměr	29,215	30,128	28,128	24,138	21,897	26,702
Rozptyl	7,363	1,630	2,619	7,865	4,874	14,422
<i>SikaPower®</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	171,538	182,667	179,513	159,513	144,769	838
Průměr	34,308	36,533	35,903	31,903	28,954	33,52
Rozptyl	3,243	20,326	13,293	4,051	8,853	16,386
<i>Celkem</i>						
Počet	10	10	10	10	10	
Součet	317,615	333,308	320,154	280,205	254,256	
Průměr	31,762	33,331	32,015	28,021	25,426	
Rozptyl	11,917	21,154	23,861	22,041	19,932	

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	p	F krit
Výběr	581,143	1	581,143	78,409	5,703E-11	4,085
Sloupce	430,406	4	107,601	14,518	2,08E-07	2,606
Interakce	12,538	4	3,134	0,423	0,791	2,606
Dohromady	296,468	40	7,412			
Celkem	1320,554	49				



**Příloha č.11** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při dynamické zkoušce

Anova: dva faktory s opakováním

Teplotní podmínky

Faktor	-40	-20	20	60	80	Celkem
<i>BETAMATE™</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	366,4	332,7	371	355,6	327,6	1753,3
Průměr	73,28	66,54	74,2	71,12	65,52	70,132
Rozptyl	30,617	15,753	5,275	10,577	5,002	24,039
<i>SikaPower®</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	422,9	341,1	305,8	313,1	287,5	1670,4
Průměr	84,58	68,22	61,16	62,62	57,5	66,816
Rozptyl	10,697	87,457	48,318	18,637	47,64	130,024
<i>Celkem</i>						
Počet	10	10	10	10	10	
Součet	789,3	673,8	676,8	668,7	615,1	
Průměr	78,93	67,38	67,68	66,87	61,51	
Rozptyl	53,831	46,655	71,053	33,053	41,263	
<b>ANOVA</b>						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F krit</i>
Výběr	137,448	1	137,448	4,909	0,032	4,085
Sloupce	1622,253	4	405,563	14,486	2,138E-07	2,606
Interakce	955,363	4	238,841	8,531	4,477E-05	2,606
Dohromady	1119,892	40	27,997			
Celkem	3834,956	49				

**Příloha č.12** Anova, vliv druhu lepidla a teploty, zastoupení porušení typu CF při statické zkoušce

Anova: dva faktory s opakováním

Teplotní podmínky

Faktor	-40	-20	20	60	80	Celkem
<i>BETAMATE™</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	386,7	314,8	369,6	347,1	331,2	1749,4
Průměr	77,34	62,96	73,92	69,42	66,24	69,976
Rozptyl	24,948	5,433	32,857	44,707	22,723	49,544
<i>SikaPower®</i>						
Počet	5	5	5	5	5	25
Součet	410,8	379,6	391,8	341,5	402	1925,7
Průměr	82,16	75,92	78,36	68,3	80,4	77,028
Rozptyl	36,328	44,637	41,733	13,555	9,435	48,633
<i>Celkem</i>						
Počet	10	10	10	10	10	
Součet	797,5	694,4	761,4	688,6	733,2	
Průměr	79,75	69,44	76,14	68,86	73,32	
Rozptyl	33,687	68,909	38,627	26,243	69,988	

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	p	F krit
Výběr	621,634	1	621,634	22,494	2,677E-05	4,085
Sloupce	840,777	4	210,194	7,606	0,000118	2,606
Interakce	410,035	4	102,509	3,709	0,012	2,606
Dohromady	1105,424	40	27,636			
Celkem	2977,870	49				