



## Bakalářská práce

# Dynamické testy lepených spojů ohybem

*Studijní program:*

Strojírenství B0715A270008

*Autor práce:*

**Matěj Zemánek**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

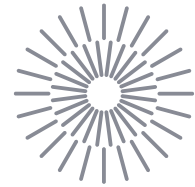
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Dynamické testy lepených spojů ohybem

*Jméno a příjmení:*

**Matěj Zemánek**

*Osobní číslo:*

S19000146

*Studijní program:*

Strojírenství B0715A270008

*Zadávací katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Přehled technologií rozebíratelného a nerozebíratelného spojování plechů (svařování, nýtování, lepení atd.).
2. Hlubokotažné plechy používané v automobilovém průmyslu.
3. Experimentální zjištění odolnosti lepených spojů v ohybu při použití vyšších rychlostí deformace.
4. Závěr.

*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* 40 – 50 stran textu  
*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.l.: 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:* 18. září 2023  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 22. května 2024

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

L.S.

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

## Prohlášení

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

Jsem si vědom/a toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom/a 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 bakalářská 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/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

12. dubna 2024

Matěj Zemánek

# Dynamické testy lepených spojů ohybem

## Abstrakt

Práce pojednává o statických a dynamických ohybových testech provedených na lepených spojích respektujících reálnou technologii lepení, která je používána ve firmě Škoda Auto a.s. V úvodní části je nastíněna motivace pro výzkum technologie lepení. V teoretické části je provedeno srovnání technologií lepení s jinými spojovacími technologiemi, objasňuje fyzikální podstatu lepení, kategorizuje lepidla a uvádí základy testování lepených spojů. Nakonec je uveden i základní přehled plechů používaných pro hluboké tažení. V experimentální části jsou prezentovány výsledky ohybových testů prováděných za různých teplot a rychlostí deformace. Základní mechanické vlastnosti testovaného plechu byly zjištěny pomocí statické zkoušky tahem. Na základě naměřených výsledků ohybových zkoušek bylo provedeno statistické vyhodnocení experimentu a formulovány závěry a doporučení pro další výzkum v oblasti lepených spojů.

## Klíčová slova

lepené spoje, automobilový průmysl, zkoušky pevnosti v ohybu

# Dynamic bending tests of bonded joints

## Abstract

The study deals with static and dynamic bending tests performed on bonded joints respecting the real bonding technology used in Škoda Auto a.s. The motivation for the research on bonding technology is outlined in the introductory part. The theoretical part compares bonding technology with other bonding technologies, explains the physical nature of bonding, categorizes adhesives and presents the basics of testing bonded joints. Finally, a basic overview of sheet metal used for deep drawing is included. The experimental part shows the results of bending tests carried out at different temperatures and strain rates. The basic mechanical properties of the tested sheet metal were determined by static tensile testing. Based on the measured bending test results, a statistical evaluation of the experiment was performed and conclusions and recommendations for further research in the field of bonded joints were formulated.

## Keywords

bonded joints, automotive industry, bending tests

## Poděkování

Za poskytnutí všech potřebných náležitostí, odborných rad a dohledu nad celým experimentem děkuji mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. Dále děkuji Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za pomoc se zprovozněním a řízením padostroje INSTRON CEAST 9350. Samozřejmě dále děkuji mé rodině a přátelům za oporu při celé době mého studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část .....</b>	<b>12</b>
2.1	Srovnání lepení s jinými spojovacími technologiemi.....	12
2.2	Teorie lepení.....	13
2.2.1	Adheze.....	14
2.2.2	Koheze.....	15
2.2.3	Technologie, technologické požadavky .....	16
2.3	Rozdělení lepidel .....	19
2.3.1	Rozdělení podle konzistence.....	20
2.3.2	Rozdělení podle počtu složek.....	21
2.3.3	Rozdělení podle tuhnutí lepidla ve spoji.....	21
2.3.4	Rozdělení dle teploty vytvrzování.....	25
2.4	Hodnocení lepených spojů.....	25
2.4.1	Nedestruktivní zkušební metody.....	25
2.4.2	Destruktivní zkušební metody.....	27
2.5	Hlubokotažné plechy pro automobilové karoserie .....	30
2.5.1	Materiály hlubokotažných plechů .....	30
2.5.2	Povlaky hlubokotažných plechů .....	31
2.5.3	Hodnocení kvality povlakových plechů:.....	33
<b>3</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>35</b>
3.1	Testované vzorky .....	35
3.2	Zkouška tahem vzorků samotných plechů.....	36
3.2.1	Příprava zkoušky tahem vzorků samotných plechů.....	36
3.2.2	Výsledky zkoušky tahem vzorků samotných plechů .....	37
3.3	Postup přípravy vzorků pro zkoušky ohybem .....	39
3.4	Statická zkouška třibodovým ohybem .....	41



3.4.1	Příprava statické zkoušky třibodovým ohybem .....	42
3.4.2	Výsledky statické zkoušky třibodovým ohybem .....	43
3.5	Dynamická zkouška třibodovým ohybem .....	45
3.5.1	Příprava dynamické zkoušky třibodovým ohybem.....	45
3.5.2	Výsledky dynamické zkoušky třibodovým ohybem .....	46
<b>4</b>	<b>Vyhodnocení a diskuze výsledků.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>54</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam obrázků, grafů, tabulek a rovnic .....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>60</b>

## Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
$A$	tažnost	[%]
$A_{80\text{mm}}$	celková tažnost	[%]
$A_g$	plastické prodloužení při maximálním zatížení	[%]
$E$	modul pružnosti	[MPa]
$E_d$	energie dopadu	[J]
$F$	síla; testovací kritérium F-testu	[N]; [-]
$F_0$	předpětí	[N]
$F_{\text{krit}}$	kritická hodnota F-testu	[-]
$H_0$	nulová hypotéza	[-]
$H_1$	alternativní hypotéza	[-]
$L$	celková délka vzorku	[mm]
$L_e$	měrná délka průtahoměru	[mm]
$R$	smluvní napětí v tahu	[MPa]
$R_{eH}$	horní mez kluzu	[MPa]
$R_{eL}$	dolní mez kluzu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$f$	frekvence	[MHz]
$h$	tloušťka vzorku	[mm]
$h_d$	výška dopadu	[mm]
$l$	vzdálenost podpor	[mm]
$t$	teplota	[°C]
$t_{\text{krit}(2)}$	kritická hodnota t-testu	[-]
$t_{\text{stat}}$	testovací kritérium t-testu	[-]
$v_0$	rychlost při předpětí	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$v_1$	první zatěžovací rychlost	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$v_2$	druhá zatěžovací rychlost	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$v_d$	rychlost dopadu	[m·s <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	elevační úhel; hladina významnosti	[°]; [%]
$\sigma_f$	napětí v ohybu	[MPa]
$\sigma_{f20-80}$	pevnost v ohybu jakožto průměr mezi 20 a 80 % časového průběhu	[MPa]
$\sigma_{fM}$	pevnost v ohybu	[MPa]
$\tau$	čas	[ms]

# 1 Úvod

Tato práce se zabývá problematikou lepených spojů, tedy druhem nerozebíratelné spojovací technologie, která má v současné době stále větší uplatnění, a to zejména v leteckém, lodním či automobilovém průmyslu. Lepení je sice stále považováno jakožto doplňková technologie, avšak její přínos je obrovský. Jelikož lepení probíhá za nízkých teplot, nedochází k nežádoucímu ovlivnění lepeného materiálu. Tato technologie nevnáší do konstrukce defacto žádnou hmotnost navíc, což se může pozitivně projevit na ekologičnosti dopravních prostředků. Za další je takto možné zvyšovat pevnost například automobilových karosérií, čímž jsou odstraňovány nepříjemné rezonance.

Lze tedy konstatovat, že určitá průmyslová odvětví by se bez lepení v současné době již neobešla vůbec. Rozhodně existuje důvod, proč tuto technologii podrobovat novým výzkumům a dalšímu vývoji. [1]

Cílem pojednávaného experimentu je zjištění odolnosti lepených spojů v ohybu, které se vyskytují konkrétně v konstrukcích vozů Škoda Auto a.s., a to za různých teplotních a deformačních podmínek.

## 2 Teoretická část

Tato část má za cíl seznámit čtenáře s co možná nejširší škálou výhod a problematik, ale i základních pouček pro vytvoření kvalitního lepeného spoje. Pro toto seznámení je též vhodné porozumět i fyzikálním principům, díky kterým je možné lepené spoje realizovat. Jelikož práce zasahuje i do oblasti automobilového průmyslu, budou určité poznatky aplikovány na případech z tohoto odvětví. Při návrhu lepeného spoje je důležité analyzovat nejen to, jaké použijeme lepidlo, ale i to, co vlastně chceme lepit. Z toho důvodu zde budou rozebrány hlubokotažné plechy, které se používají při výrobě karoserie vozu.

### 2.1 Srovnání lepení s jinými spojovacími technologiemi

Spojovací technologie je obecně možné rozdělit na dvě hlavní skupiny, tedy na mechanické a materiálové. Pro realizaci mechanického spoje je třeba použití samostatné konstrukční součásti, či více součástí, přičemž nejčastěji jde o šroubové, čepové a dnes již v méně častých případech používané nýtované spojení. Všechny tyto spoje jsou až na nýtování dále klasifikovány jakožto rozebíratelné spoje. Při vytváření mechanického spoje je nutné narušit spojované součásti dírou, což vede k nepříznivému jevu zvanému vrubový účinek. U těchto děr totiž dochází ke koncentraci napětí, takže jde o místa, ze kterých hrozí šíření trhliny ve spojovaném materiálu. Dále je patrné, že každá spojovací součást vnáší do celkové konstrukce svoji hmotnost. Pokud by tedy konstrukce obsahovala velký počet takovýchto spojů, nárůst výsledné hmotnosti by byl rozhodně nezanedbatelný. [2]

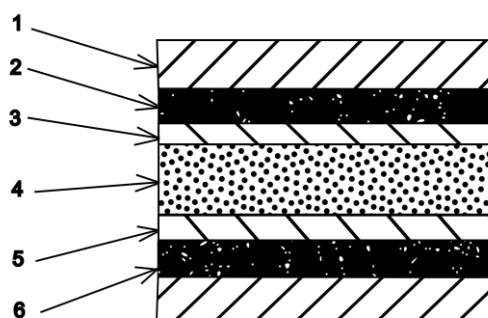
Druhou výše jmenovanou skupinou jsou materiálové spoje, do které patří mimo svařování a pájení i touto prací pojednávané lepení. Všechny materiálové spoje lze klasifikovat jako nerozebíratelné. Jeden z nejzřejmějších problémů svařování je fakt, že se tepelně ovlivňuje svářený materiál. V důsledku toho dojde v okolí spoje k degradaci materiálu, vzniká zde škodlivé vnitřní pnutí zapříčiněné tepelnou roztažností. I zde se jako v případě mechanických spojů může objevit vrubový účinek. Tyto nevýhody svařování lze alespoň částečně odstranit. Řešení pro eliminaci vnitřního pnutí je žíhání, pro vrubový účinek je řešením zabroušení svaru. Operace pro odstraňování těchto vad však pochopitelně zatěžují ekonomii i časy výroby. Pájené spoje na rozdíl od svařovaných neovlivňují tepelně materiál. Mají však menší pevnost spoje a také hrozí riziko šíření koroze. [3]

Uvědomíme-li si výčet všech nevýhod ostatních spojovacích technologií, zjistíme, že v praxi existují případy, kde by ani jedna z těchto technologií nebyla zcela vyhovující. Vezměme si jako příklad automobilovou karoserii. Základní požadavky na karoserii jsou v podstatě takové, že musí být lehká a zároveň pevná. Tyto požadavky si přitom poněkud protirečí, avšak mají svoji logiku. Lehkost karoserie se váže s nižší spotřebou pohonného agregátu, pevnost zase souvisí s pasivní bezpečností vozu. Dále je žádoucí, aby karoserie dobře odolávala korozi a nenarušovala se.

Lepení nezpůsobuje vrubové účinky, nevytváří tepelně ovlivněnou zónu, nenavýšuje hmotnost celé konstrukce a je to ekonomicky výhodný proces. Lepený spoj také není ohniskem šíření koroze, ba naopak vykazuje skvělé protikorozi vlastnosti, poněvadž těsní vodu. Izoluje jak tepelně, tak elektricky. Samozřejmě je možné vyjmenovat i celou řadu nevýhod. Těmi může být možná toxicita lepidla, časová a tepelná degradace lepeného spoje a problematická odolnost, pokud působící síly na lepený materiál způsobují odlupování. Vytvrzovací časy lepidla zpomalují celkový proces výroby. [1]

## 2.2 Teorie lepení

Zde budou vysvětleny důležité pojmy, které s lepením souvisí. Těmi hlavními jsou adheze a koheze. Na teorii adheze a koheze stojí každý lepený spoj, takže tyto teorie jsou skutečně důležité. Pokud bychom se chtěli podívat na samotnou strukturu lepeného spoje, objevíme, že se tento spoj skládá z adhezních zón, kohezních zón a z přechodů těchto zón (**Obr. 2.1**). Lepidlo tedy musí vykazovat dobrou kohezi, dobrá adheze záleží spíše na lepeném materiálu. [4]



**Obr. 2.1** Řez lepeným spojem [vlastní zdroj]

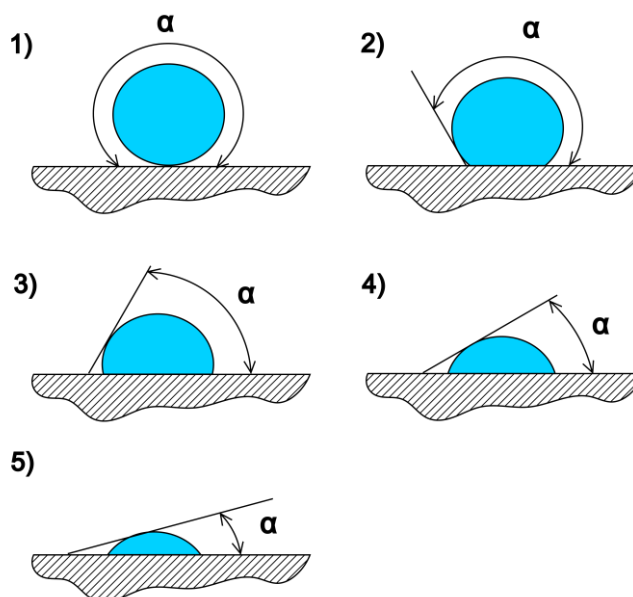
1 – lepený materiál; 2 – adhezní zóna; 3 – přechodová adhezní zóna; 4 – kohezní zóna; 5 – přechodová kohezní zóna; 6 – adhezní zóna [4]

## 2.2.1 Adheze

Adheze by se vlastně dala popsat jako dovednost různých materiálů k sobě přilnout na svých površích. Adheze má svoji podstatu ve Van der Waalsových silách. Tyto síly mají velice malý dosah zmenšující se podle šesté mocniny vzdálenosti. Je to vzájemné elektrické působení mezi dipóly, které vznikají z rozkmitaných atomů vlivem tepelné energie. Ta je nad nejnižší teplotu 0 K vždy nenulová, takže atomy existují jako dipóly běžně. Dipóly se přitahují či odpuzují, ovšem systémy, kde dochází k přitažlivým vazbám, vykazují nižší celkovou energii než v případě systémů, kde se vyskytují odpudivé vazby. Z toho důvodu dochází hlavně tedy k přitažlivým vazbám. [5]

Jak bylo řečeno, Van der Waalsovi síly mají krátký dosah. Proto se musí dbát na to, aby mělo lepidlo vynikající smáčivost a dostalo se tak do povrchových nerovností, neboť drsnost povrchu vytváří vzdálenosti větší, než jaký je dosah přitažlivosti Van der Waalsových sil. Se smáčivostí zase souvisí povrchová energie. Chceme-li dobrou smáčivost, pak je nutné, aby byla povrchová energie lepené látky větší než povrchová energie lepidla. Povrchová energie je nakonec vysvětlena jevem polarity. Platí, že čím více je materiál polární, tím větší je povrchová energie, tudíž je tedy vhodné, aby byl lepený materiál co možná nejpolarnější.

Smáčivost lze testovat dle kapkové metody (**Obr. 2.2**). Při testování se nanáší na zkoumaný povrch kapalina. To může být voda, jelikož ta má ze všech kapalin nejvyšší povrchové napětí, takže když materiál smáčí vodu, zákonitě musí umět smáčet i lepidla. Zkoumáme elevační úhel, který vzniká mezi kapkou a materiálem. Pokud je úhel pod 90°, lze mluvit o dobré smáčivosti. Čím je však úhel menší, tím lepší je smáčivost. [1]



**Obr. 2.2** Testování smáčivost [vlastní zdroj]

$\alpha$  – elevační úhel; 1) – nesmáčivý povrch; 2) – minimální smáčivost;  
3) – nedostatečná smáčivost; 4) – dostatečná smáčivost; 5) – ideální smáčivost [1]

## 2.2.2 Koheze

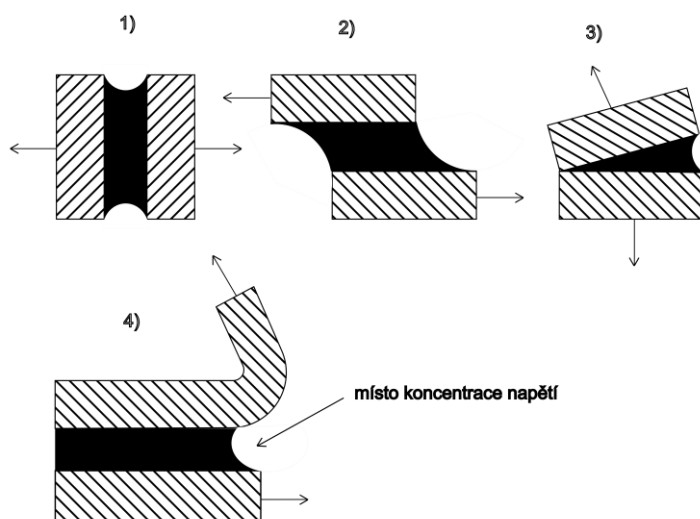
Koheze je vlastností lepidla. V podstatě jde o to, jak je lepidlo soudržné. Koheze je vyjádřitelná kohezní energií, což je energie nutná pro oddělení částic lepidel od sebe. I zde opět vystupují Van der Waalsovi síly, ale zásadní vliv zde má i míra propletení molekul polymerů v daném lepidle. Adheze je tedy ještě jednou ve zkratce schopnost lepidla a lepeného materiálu k sobě přilnout. Koheze je vlastní pevností lepidla. Z těchto důvodů je rozumné, aby byly síly adheze i koheze v rovnováze, poněvadž lepený spoj by byl pevný tak, jak pevná by byla nejslabší část.

Pro popis vytvoření lepeného spoje vznikla celá řada teorií, avšak každá má svoje benefity i protiklady. Existuje molekulová, elektrostatická, mechanická, difusní a chemická teorie. Ani jedna nedokáže zcela efektivně popsat, co se vlastně při vzniku lepeného spoje děje, tudíž se předpokládá, že skutečnost je taková, že se teorie doplňují navzájem. Nejvíce uznávaná teorie je molekulová. Podle této teorie je utvoření lepeného spoje složeno ze dvou fází. V té první se pojí makromolekuly lepidla k makromolekulám lepeného materiálu. Ve druhé fázi zvané adsorbční rovnováha se projevují Van der Waalsovi síly. Molekulová teorie říká, že materiály, které lepíme, mají mít funkční polární skupinu. [1]

## 2.2.3 Technologie, technologické požadavky

### Konstrukce lepených spojů:

Lepené spoje obecně nejsou téměř vůbec schopné odolávat odlupování, proto musí být geometrie spoje navržena s ohledem na tento fakt. Spoj je vystavován namáhání typu tah, tlak, smyk, dále je namáhán na výše zmíněné odlupování a také na odštěp. V reálném světě se samozřejmě velice často všechny tyto druhy namáhání kombinují. Chceme-li zamezit destrukci spoje v provozu, pak je tedy nutné, aby skutečné namáhání v tomto místě bylo pouze tahové, tlakové a ohybové. Jestliže neexistuje možnost, jak odlupování zabránit, pak je nutné zajistit flexibilitu alespoň jednoho z lepených materiálů. Štěpení je stejně jako odlupování škodlivé, takže i v tomto případě je nutná snaha o jeho eliminaci. Pro řešení tohoto problému je nejlepší zvětšit lepenou plochu i na úkor jisté ekonomické nevýhodnosti. Základní typy namáhání znázorňuje *Obr. 2.3*.



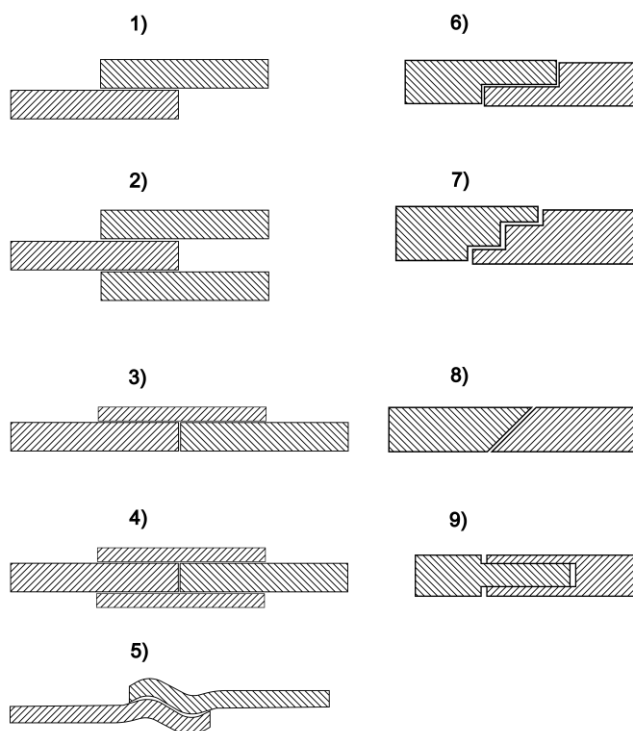
*Obr. 2.3* Možné způsoby namáhání lepeného spoje [vlastní zdroj]

1) – tah; 2) – smyk; 3) – štěp; 4) – odlupování [6]

Pro lepení plochých materiálů existují spoje tupé a spoje překrývané. Tupé spoje jsou konstrukčně jednoduché, mají však sklony k ohybovému namáhání, které může přejít až v namáhání na odštěp, takže se musí použít přeplátování buď jednostranné nebo oboustranné. Vhodným řešením je též použití spoje s drážkou. Další přínosnou modifikací je zešikmení stykové plochy nebo její stupňování v podobě schodiště. Vícestupňový spoj je odolnější vůči destrukci, v zešikmeném spoji jsou příznivěji rozloženy síly.



Překrývaný spoj však také může být vychýlen do takového stavu, ve kterém dochází k ohybu a následnému odlupování. Zde je řešením vyztužení lepeného materiálu tak, aby se ohybu zabránilo. Efektivním řešením pro zvýšení odolnosti překrývaného spoje je zvlnění v místě styku. Smykové zatížení se tak zredukuje. Znázorněné provedení takovýchto spojů ukazuje **Obr. 2.4**. V případě koutových spojů je stěžejní postupovat tak, aby vhodnou orientací a geometrií lepeného materiálu bylo opět zabráněno odlupování a odštěpování. [6]



**Obr. 2.4** Příklady základních realizací lepených spojů [vlastní zdroj]

Narušené tvary: 1) – překrytý spoj; 2) – dvojitě překrytý spoj; 3) – překrytý tupý spoj;  
4) – dvojitě překrytý tupý spoj; 5) – vlnitě překrytý spoj

Nenarušené tvary: 6) – stupňový spoj; 7) – vícešupňový spoj; 8) – zkosený spoj;  
9) – drážkový spoj [6]

### Přípravy lepených povrchů:

Aby došlo k bezproblémové aplikaci lepidla na lepený povrch, je ve většině případů nutné takovýto povrch správně ošetřit. Ne vždy se lepí materiály s dostatečnou povrchovou energií, takže pak je adheze lepidla příliš nízká. Jednou z metod je například nanášení základního nátěru. Základní nátěr je funkční materiál, jehož molekuly se na jednom konci výborně vážou ke špatně polárním povrchu a na druhém konci zase k lepidlu. Dále je možné

povrch ošetřovat plazmou. Chemická reaktivita povrchu se zlepší vlivem ionizovaného plynu. Chemické změny povrchu za účelem zvýšení reaktivity lze dosáhnout i ošetřením plamenem.

Čistota povrchu je též zásadním faktorem. Ke kontaminaci přispívají různé vlivy. Může to být prach, olej, mastnota i otisky prstů. Kontaminace ovlivňuje povrch tak, že se sníží schopnost smáčivosti, sníží se i pevnost vazby a dojde ke zmenšení kontaktní plochy. Čištění povrchů se dělí na chemické a mechanické. Mezi způsoby chemického čištění patří například použití směsi 50 % vody a 50 % isopropylalkoholu. Pro mastné či lubrikované kovy se volí agresivní rozpouštědla jako je aceton nebo metyletylketon. Kombinace průmyslového odmašťovače a rozpouštědla se používá v případě, že je kov naolejován i znečištěn zároveň. V mnoha případech je chemická příprava povrchu dostatečná.

Mechanickým čištěním se myslí vlastně broušení. Tato metoda je volena, pokud je povrch kovu zrezivělý, dále pokud je kovový povrch napuštěný průmyslovým olejem odolávajícím rozpouštědlům, který má za úkol povrch zakonzervovat. Plasty, které se vyrábějí vstřikováním zase mohou na svém povrchu nést zbytky činidel na uvolnění z formy, která také mají za cíl rozpouštědlům odolávat. Proces mechanického čištění se obecně skládá ze tří kroků. Prvním krokem je očištění, které zabrání potenciálnímu roznesení nečistot v následujícím kroku, kterým je vlastní broušení. Broušení může mít pozitivní vliv také z toho hlediska, že je snížena drsnost povrchu, která je pro dobrou adhezi lepidla taktéž žádoucí. Následuje finální očištění. V tomto kroku jsou odstraněny nečistoty vzniklé broušením. [7]

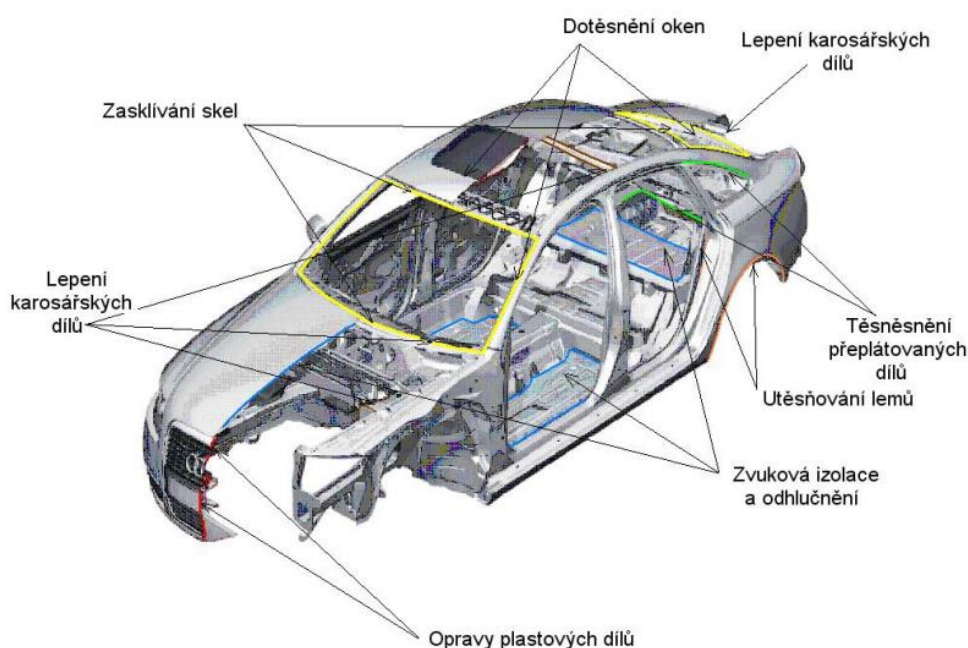
### **Druhy aplikací lepidel:**

Dále je pro technologický proces důležitá volba způsobu nanášení lepidla. Lepidla se nanášejí plošně, méně často také bodově. Nanášet se může ručně s použitím štětce. Zde je podmínka taková, že lepidlo musí být tekuté. Výhodou je, že použitelnost je vhodná též pro malé a složité plochy. Nevýhodou je nerovnoměrnost nátěru a nutnost často čistit štětec. Tuto metodu je možno automatizovat tak, že štětec je upnut do hlavice kolaborativního robota. Dalším ručním způsobem nanášení je aplikace lepidla za pomoci stříkačky nebo jehly. To je ideální v případě lepení malých částí. Umožňuje nanášet méně jak jeden miligram lepidla na 1 mm<sup>2</sup>. Dále je možné použití vytlačovací pistole. Ta je výhodná z důvodu ekonomičnosti, avšak na úkor pomalého procesu lepení.

Lepidla je možno i stříkat. Stříkání umožňuje rovnoměrný nános na rozměrné plochy. Stříká se za pomoci vzduchové či bezvzduchové pistole. Technologie stříkání může být rovněž jednoduše automatizována. Pracovník musí být v tomto případě chráněn před lepidlem vyskytujícím se jako malé částice ve vzduchu. Lepidla se mohou dodávat v pevné podobě, kdy je nutné před vlastním lepením použít tavící komoru. [6]

## Technologie lepení v automobilovém průmyslu:

Při stavbě karoserie automobilu se využívají kaučuková lepidla a epoxidové pryskyřice. Kaučuková lepidla mají těsnící čili protikorozní funkci a také antivibrační funkci kvůli dobré tlumivosti. To je určuje pro použití na místa, kde se vyskytuje řez plechu (protikorozní účel), dále pro spojování výztuh kapot a střech (antivibrační účel). Epoxidové pryskyřice se používají jako pevnostní lepidla pro zvyšování tuhosti karoserie, například v podlahové oblasti karoserie. Jsou vhodná i pro nanášení na neodmaštěné kovy, což je v automobilovém průmyslu ideální. Lepidla v automobilovém průmyslu jsou převážně jednosložková. Aktivují se při teplotách blízkým 180 °C po dobu kolem 20 minut. Dvosložková lepidla jsou pro automobilový průmysl nepraktická, proto se téměř vůbec nepoužívají. Ukázka míst na karoserii, kde se lepidla běžně aplikují je patrná z **Obr. 2.5**. [8]

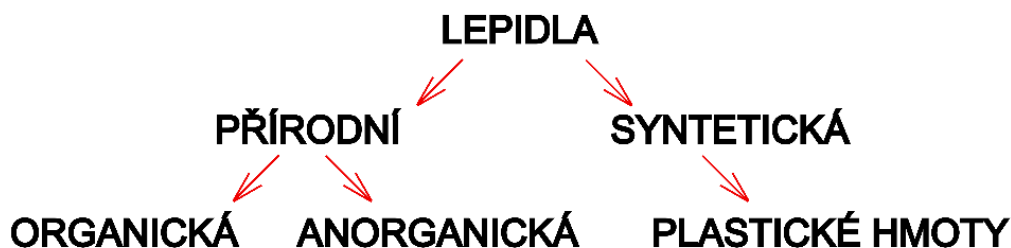


**Obr. 2.5** Typy lepených spojů v běžné automobilové konstrukci [1]

## 2.3 Rozdělení lepidel

Problematika dělení lepidel je velice obsáhlá. Na dělení se nahlíží z mnoha hledisek. Tím základním je, že lepidla jsou přírodní a syntetická, přičemž syntetická lepidla jsou výhradně jen plastické hmoty (**Obr. 2.6**). Další, o něco podrobnější hlediska dělení lepidel mohou být následující. Používá se dělení dle způsobu tuhnutí, chemického složení, konzistence, počtu složek a dle teploty vytvrzování. Chemické složení je pro tuto práci nejméně přínosné, proto bude vynecháno. Důvodem je nepřehlednost, jistá zastaralost a také to, že v tomto dělení

je popsána velká šíře lepidel nevhodných k lepení karosářských výlisků. Dělení je také komplikováno tím, že současní výrobci lepidel uvádějí vždy vlastní způsoby třídění produktů. [1]



*Obr. 2.6 Základní rozdělení lepidel [vlastní zdroj]*

### 2.3.1 Rozdělení podle konzistence

Rozdělení z hlediska konzistence je stěžejní při plánování výroby, kdy je nutno vybrat k daným lepidlům, která jsou v procesu výroby používána, příslušné stroje. [1]

#### **Tekutá lepidla:**

Jsou to roztoky, pasty a disperze. Rozdíl mezi pastou, roztokem či disperzí spočívá ve viskozitě a způsobu aplikace lepidla. Roztoky a disperze je možno nanášet jako tenké filmy na povrch lepeného materiálu. Nevýhodou je však to, že hrozí nebezpečí stečení z lepeného místa při procesu tuhnutí.

Pasty je nutno nanášet vždy za pomoci nástroje, kterým bývá nejčastěji lepicí pistole. Výhoda oproti nízkoviskózním lepidlům je taková, že u past nehrozí stečení. [9] Za tekutou fázi lepidel se považují taktéž pěny. [1]

#### **Pevná lepidla:**

Výhodou této skupiny je to, že pevná lepidla jsou jednosložková a není zde třeba do výroby uvažovat proces míchání. Dobré je také to, že z pevných lepidel nevzniká odpadní materiál. Z těchto důvodů je jejich použití oblíbené v mnoha výrobních provozech. Patří sem lepicí fólie a filmy. Ty jsou vhodné v případě, že je potřeba kontrolovat tloušťku lepeného spoje, ale nepoužitelné v případě, že spára mezi lepenými materiály mění svoji tloušťku. Dále se hodí k lepení velkých ploch.

Do této skupiny se také řadí prášková lepidla nebo také granulová lepidla. Ta se musí nejprve aktivovat ohřátím nebo rozpouštědlem. Nevýhodou je nesnadná distribuce napříč montážní halou. Granulát či prášek je možné tvarovat pro specifické účely tak, aby byly vyplněny i tvarově složité mezery. [9]

#### **Polopevná lepidla:**

Jsou zde uvedena pro úplnost. Jedná se o trvale lepidivé hmoty. [1] Dobře se s nimi manipuluje a mají tlumící schopnosti. [2]

### **2.3.2 Rozdělení podle počtu složek**

I na toto dělení se nahlíží zejména skrze montážní přípravu, což je důležité z pohledu zpracovatele. Jde o to, kolik komponent se musí míchat, aby bylo lepidlo připraveno pro svou aplikaci. [1]

#### **Jednosložková lepidla:**

Jsou nejvíce preferována, poněvadž odpadá proces míchání před lepením a manipulace je s nimi snadná. Označují se jako 1-K. [1]

#### **Dvou a vícesložková lepidla:**

Toto je nejčetnější skupina lepidel vytvrzovaných chemickou reakcí. Dvousložková lepidla se označují jako 2-K. [1]

### **2.3.3 Rozdělení podle tuhnutí lepidla ve spoji**

#### **Vodný roztok lepidel:**

Tato lepidla tuhnou potom, co se do nich nejprve vsákne voda, která se posléze vypaří. Voda je tedy v tomto případě rozpouštědlem. Nutností je, aby byl lepený materiál schopný propustit odpařující se vodu. Výhodou je nízká finanční nákladnost a rychlé tuhnutí ve spoji. Problém je zde však takový, že tato lepidla nejsou rezistentní vůči vodě. Většinou se aplikují pro lepení papírů. [1]

#### **Vodná disperze lepidel:**

Vyskytují se jakožto jemné polymery smíchané do vody. Vytvářejí tenké lepené spoje. Stejně jako v předchozím případě jsou činná po vypaření vody. [1]

### **Lepidla tuhnoucí po odtěkání organického rozpouštědla:**

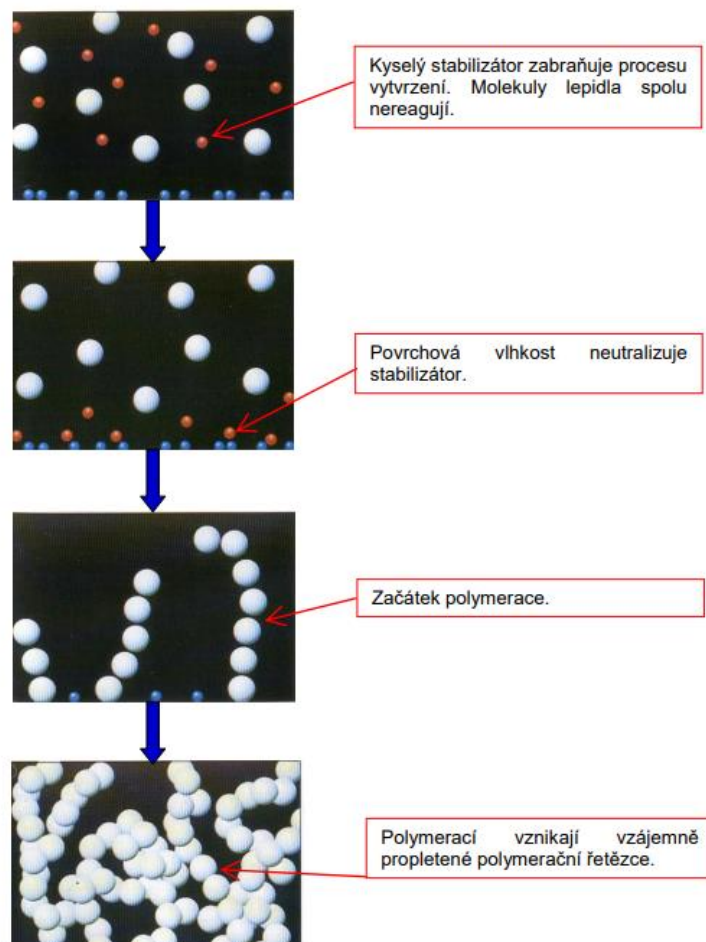
Fungují obdobně jako vodná lepidla s tím rozdílem, že na místo vody se ze spoje odpařuje jiné rozpouštědlo. I tato lepidla vytvářejí velmi tenké vrstvy. K dosažení maximálního vytvrzení je nutná velmi dlouhá doba, mnohem delší, než je potřeba k samotnému zatuhnutí. Patří sem i kaučuková lepidla. Ta se vyznačují velmi dobrou přilnavostí a dobrými kvalitami spoje. Při lepení za pomoci kaučuků není nutná zvýšená teplota. [1]

### **Lepidla tuhnoucí za zvýšené teploty:**

Jsou to reaktoplastické materiály. Četně se využívají jakožto průmyslová lepidla, tedy i v automobilovém průmyslu. Vytvrzovací teplota je zde přímo úměrná vytvrzovacímu času. Čím vyšší je teplota, tím nižší je čas potřebný k vytvrzení. Typickým představitelem jsou zde epoxidová lepidla, která mají celou řadu dobrých vlastností. [1]

### **Lepidla tuhnoucí ve vlhkém prostředí:**

Sem patří kyanoakrylátová lepidla, silikonová lepidla a lepidla na bázi isokyanátů. Jde ve všech případech o jednosložková lepidla. Způsob tuhnutí je ovšem poměrně odlišný pro tyto jednotlivé typy lepidel. U kyanoakrylátů je k aktivaci polymerizace nutno navlhčit povrch lepeného materiálu vodou. Silikonová lepidla a isokyanáty jsou aktivovány vlhkostí ze vzduchu. K aktivaci kyanoakrylátů je tedy potřebné určit přesné množství vody, ale k aktivaci silikonů a isokyanátů je potřeba znát relativní vlhkost obsaženou ve vzduchu. Schematické znázornění tuhnutí popisuje *Obr. 2.7*. [10]



*Obr. 2.7 Vytvrzovací proces lepidel tuhoucích vlivem vlhkosti okolního prostředí [1]*

### **Lepidla tuhnoucí kontaktem s kovy:**

Používají se ve formě jednosložkových tmelů a jak z názvu vyplývá, užívají se výhradně pro spojování kovových materiálů. Jsou to akrylátové hmoty na bázi dimethakrylátů. Pro jejich tuhnutí je třeba zamezit přístupu vzduchu do lepené spáry. Umí vyplňovat i špatně přístupné mezery díky dobrému vzlínavému efektu. [1]

### **Lepidla tuhnoucí přidáním tvrdidel:**

V této skupině lze uvést epoxidové pryskyřice. Ty umí lepit velmi obsáhlé spektrum všech možných materiálů, ovšem špatně fungují při použití na polyvinylchlorid, polyethylen, polypropylen a určité termoplasty. Mají tu výhodu, že je lze dlouho uchovávat. Vytvrzují se použitím diethylentriaminu. Kvalita spoje je úměrná tomu, jak dobře se pryskyřice s tvrdidlem promíchá. Lepené vrstvy jsou tenké, zajišťují se pomocí drátků či zrn vymezujících tloušťku. V současné době se epoxidové pryskyřice vytvrzují tepelně.

Dále to jsou dvousložkové polyuretany. Mají antivibrační vlastnosti a nejsou náchylné na porušení při dynamickém namáhání, odolávají též nepříznivým okolním vlivům. Nekladou se příliš vysoké standardy přesnosti při jejich aplikaci ve výrobě. Poměr promísení s tvrdidlem má být mezi 1:1 a 1:3. [1]

### **Tavná lepidla:**

Mohou se na lepený materiál aplikovat již v roztavené podobě, přičemž jsou na požadované místo přiváděna z vyhřívaného zásobníku i s vyhřívaným přívodním systémem. Povrch lepeného materiálu by měl být také ohříván, aby nedocházelo k okamžitému tuhnutí při kontaktu se studenějším povrchem. Poté se k sobě spojované materiály rychle přiloží a zatíží tlakem. Lepidlo je také možné tavit už přímo nanesené na kontaktní plochu ve formě pásků, fólií atd. [9] Tavné teploty se mohou pohybovat mezi 120 °C a 200 °C v závislosti na typu lepidla. Pokud se znovu aplikuje tavná teplota na již vytvrzený spoj, je možné ho rozlepit. [1]

### **Stále lepivá lepidla:**

Používají se převážně pro lepení obalů. Říká se jim též lepidla citlivá na tlak a dodávají se na podkladových nosičích. [1]

### **Lepidla vytvrzovaná za pomoci UV záření:**

Tuto skupinu lepidel lze nejlépe uplatnit tam, kde lepíme světelně propustné či citlivé materiály. Světlo, kterým lepidlo vystavujeme, musí vykazovat správnou vlnovou délku a musí ho na vytvrzované lepidlo dopadat dostatečné množství. Vytvrzovací proces je možný díky fotoiniciátorům. Lepidla určená pro tuto technologii vytvrzování jsou hlavně aerobní akryly. Mohou se vytvrzovat přímým působením UV světla nebo za pomoci aktivátorů umístěných do místa lepení. Lepidla však tuhnou efektivněji, pokud jsou vystavena přímému záření.

Existují také speciální pryskyřice, které je nutno vytvrzovat kombinací UV světla a viditelného světla. Ve srovnání s čistě UV vytvrzovaným lepidlem tyto pryskyřice dosahují ještě vyšších kvalit, tedy rychlejšího tuhnutí a kvalitnějšího vytvrzení. Obecně lze shrnout, že vytvrzování UV zářením zrychluje výrobní proces, zlevňuje výrobu a snadno se i do výroby zavádí. Neexistuje žádné ovlivnění lepeného materiálu. [9]



## 2.3.4 Rozdělení dle teploty vytvrzování

Můžeme určit tři teplotní oblasti, do kterých lze lepidla tuhnoucí za zvýšené teploty kategorizovat. První oblastí jsou nízké teploty do 121 °C. Řadí se sem například polyuretany a polyestery. Druhou oblastí jsou pak střední teploty v rozmezí od 121 °C do 260 °C. Toto jsou epoxidy a silikony. Poslední oblastí, tedy oblastí nad 260 °C, jsou například lepidla na bázi polyamidů. Vysokoteplotní lepidla se primárně vyskytují v konstrukcích letadel, satelitů, vesmírných raket a samozřejmě tedy v konstrukcích automobilů. [11] Lepidla určená pro lepení kovů, což jsou lepidla vhodná pro automobilový průmysl, téměř výhradně fungují na principu tuhnutí za zvýšené teploty. [1]

## 2.4 Hodnocení lepených spojů

Potenciálně existuje nepřeberné množství variant lepených spojů, avšak pochopitelně není možné všechny tyto varianty realizovat. Kvalitu lepeného spoje určuje samotné lepidlo, lepený materiál, konstrukční provedení, ale i v jakých podmínkách se spoj bude vyskytovat. Takže najdeme mnoho případů, kde si tyto kvalitu určující faktory vzájemně nerozumí. K posuzování toho, jak moc by byly lepené spoje kvalitní, by bylo potřeba vyvinout všezahrnující systém, ovšem to není v takto ohromném množství variant proveditelné. Z toho důvodu existuje alespoň částečná normalizace popisující posuzování a testování.

Lze hodnotit základní vlastnosti samotných lepidel na základě mezinárodně platných norem. Ty podrobují lepidla zkouškami obecných vlastností, chemických vlastností a za další fyzikálních vlastností. Tato testování jsou prováděna již samotnými výrobci, kteří výstupy z testů musejí deklarovat.

Hotové spoje má smysl hodnotit hlavně testováním jejich mechanických vlastností. Opět je testují výrobci, ale velmi důležité je to, aby testy dále ověřovali i uživatelé lepidel. Mechanické zkoušky jsou dvojího typu. Jsou to zkoušky nedestruktivní a zkoušky destruktivní. [1]

### 2.4.1 Nedestruktivní zkušební metody

Nedestruktivní zkoušky jsou oproti destruktivním metodám podstatně finančně méně nákladné. Nedestruktivně lze zkoumat snad jakýkoliv lepený spoj. Velkou nevýhodou je samozřejmě fakt, že pevnost spoje je vyhodnocena pouze nepřímou, například na základě vizuální kontroly, která hodnotí kvalitu struktury lepidla. V případech, kde je v provozu kvalita lepeného spoje obzvláště důležitá, se používají sofistikovanější metody, což je ultrazvuková či

rentgenová metoda. Nejhůře detekovatelné defekty jsou ty, které souvisejí s pokaženým procesem tuhnutí a se špatným přilnutím lepidla. [9]

#### **Vizuální metoda:**

Zkušený odborník je schopný detekovat mnoho defektů pouhým pohledem. Takto lze zjistit například vzduchové kapsy uvnitř vytvrzeného lepidla. Dále je dobře zjistitelné, pokud jsou vůči sobě lepené materiály nevodorovné či nesouosé. Odborník umí vyhodnotit kvalitu i na základě textury kolem rozhraní lepidla s lepeným materiálem. Tato textura může vypovídat o nezdařilém zatuhnutí či o vlhkosti, která lepidlo degradovala. [9]

#### **Zvuková metoda:**

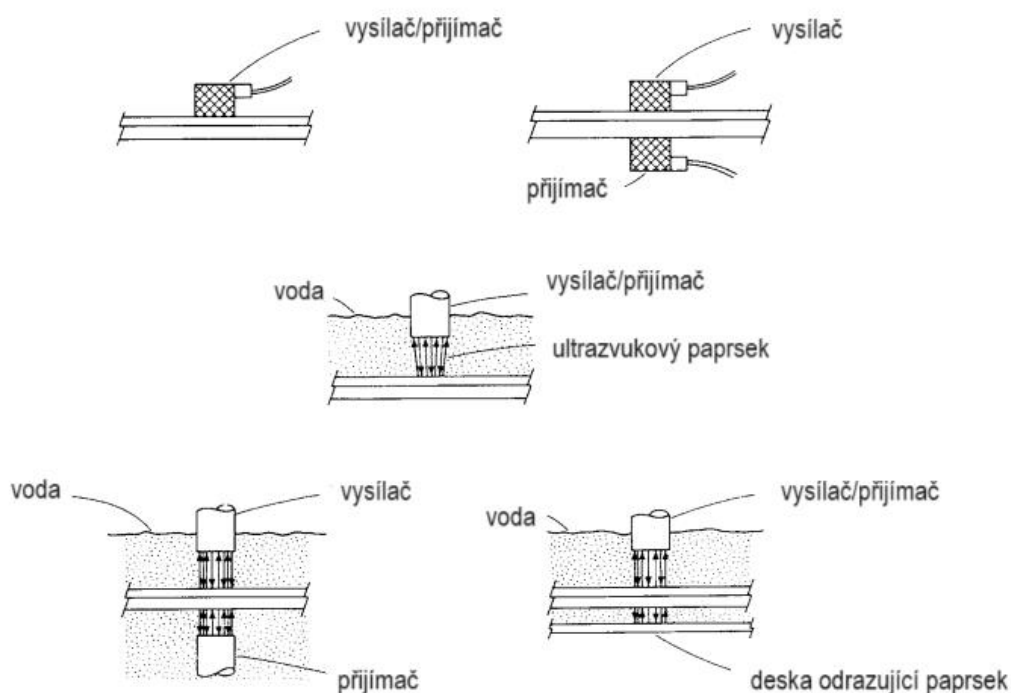
Je to jedna z nejstarších nedestruktivních zkoušek vůbec. Kvalita je posuzována za pomoci tónu, který spoj vydává po poklepání speciálním kladívkem. Tento tón dokáže indikovat nezdařilé vytuhnutí, bubliny a další závady. Vysoký tón říká, že lepená spára je lepidlem dobře vyplněná a že lepidlo správně přilnulo k povrchu. Nízký tón vypovídá o vzduchových bublinách a špatnému přilnutí lepidla. Úspěšné vyhodnocení je závislé na zkušenostech kontrolního technika, na hluku v místě, kde se zkouška provádí a na celé řadě dalších faktorů. Zvuková metoda byla modernizovaná tak, že klasické kladívko nahradilo elektromagneticky řízené kladívko a lidské ucho nahradil zvukový snímač, přičemž defekty se v tomto případě vyhodnocují pomocí frekvence a amplitudy signálu, který snímač zaznamenal. [9]

#### **Bezpečnostní metoda:**

Používá se v případech, kde je na lepený spoj požadovaná vysoká spolehlivost. Tato metoda má za cíl velmi přesně napodobit provozní podmínky s tím, že spoj je zatěžován s ještě větším namáháním, než se skutečně v provozu očekává. Pokud spoj není neočekávaně slabý, nemělo by dojít k jeho destrukci, je-li zkouška správně navržena. Zkouška v praxi může vypadat například tak, že se lepené voštinové panely namáhají odštěpovací silou, která se musí předem definovat. Pokud nevznikne defekt, pak jsou voštiny připraveny pro všechny provozní podmínky. [9]

## Ultrazvuková metoda:

Dalo by se říci, že tato metoda byla vyvinuta ze základního principu metody zvukové. V současnosti se jedná o nejpoužívanější testovací nástroj ze skupiny nedestruktivních zkoušek. Metoda může vypadat tak, že na jednu stranu lepeného spoje je umístěn ultrazvukový vysílač, na druhou stranu spoje je umístěn snímač ultrazvukových vln. Defekty všeho možného druhu se projeví jako pohlcené ultrazvukové vlny. Tyto vlny mohou mít frekvenci  $f$  v rozmezí od 2,25 do 10 MHz. Existuje vícero způsobů, jak může ultrazvuková zkouška vypadat (**Obr. 2.8**). Například tak, že snímač i vysílač ultrazvukových vln je jedno zařízení čili je tak vyřešen problém s nedostupností jedné strany spoje. Lze kontrolovat i spoje ponořené do vody, poněvadž voda je dobrým vodičem ultrazvukových vln. [9]



**Obr. 2.8** Možné způsoby realizace kontroly pomocí ultrazvuku; upraveno [9]

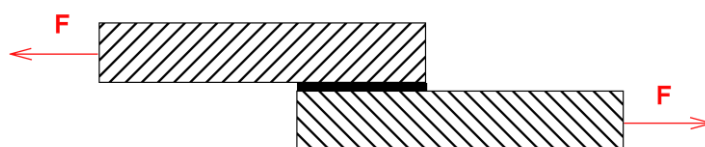
## 2.4.2 Destruktivní zkušební metody

Jejich definice je položena v příslušných normách nebo jsou popsány v materiálech, které vytvořily samotné podniky zabývající se lepením ve svých výrobních procesech. Jak již bylo nastíněno dříve, tyto testy vypovídají o pevnosti lepeného spoje s největší přesností. [12]

Destruktivní zkoušky jsou buď statické nebo dynamické. Výsledné defekty jsou zkoumány a vyhodnocovány pomocí normy ČSN EN ISO 10 365. [1]

### **Zkoušení pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465:**

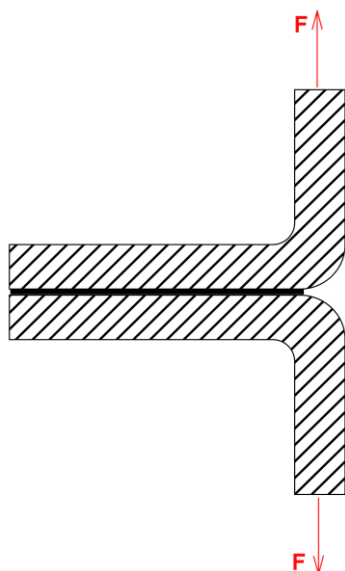
Princip této zkoušky zůstává stejný, ale vlastní provedení je upravováno tak, aby vyhovovalo konkrétním požadavkům napříč všemi možnými výrobními odvětvími. To se promítá do toho, jak rozměrná je lepená plocha testovaných vzorků, jak rozměrné mají být samotné vzorky a tak dále. Zkoušení pevnosti ve smyku se řadí do skupiny statických destruktivních zkoušek. Lepený spoj je namáhán tahem ve směru shodném s podélnou osou vzorku (*Obr. 2.9*). Zkouška končí destrukcí zatěžovaného spoje. Probíhá při pokojové teplotě nebo v teplotní komoře, kde se zkoumá vliv zvýšené či snížené teploty. Tloušťky lepených spojů se odvíjí podle toho, zda jsou testovány pevnostní či výplňová lepidla. Přesnost tloušťky zaručují distanční výplně mezery, což jsou drátky nebo kuličky. [1]



*Obr. 2.9* Vzorek pro zkoušení pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465  
[vlastní zdroj]

### **T-zkouška odlupování lepeného spoje ohnutých plechů dle normy ISO 11 339:**

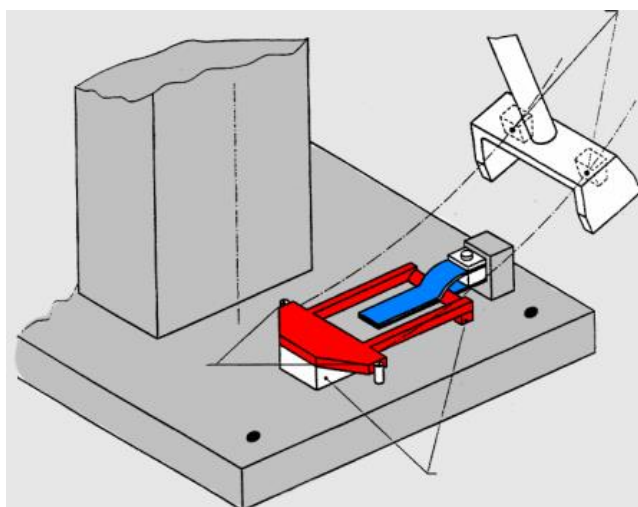
Opět se jedná o statický typ destruktivní zkoušky. Síly zatěžují vzorek na tom konci, kde se nachází ohyb obou plechů a působí kolmo k lepené ploše (*Obr. 2.10*). Oba plechy jsou ohnuty do pravého úhlu. Tloušťka vrstvy lepidla se zde definuje podobným způsobem jako v případě zkoušky ve smyku dle normy ČSN EN 1465. To samé platí o definování teploty okolí. Na stejném základě stojí i T-zkouška spoje s ohebným lepeným materiálem. Je však nutno podotknout, že se neřídí tou samou normou ISO 11 339. [1]



**Obr. 2.10** Vzorek pro zkoušku odlupování lepeného spoje ohnutých plechů dle normy ISO 11 339 [vlastní zdroj]

### Zkouška dynamické odolnosti vysoce pevných spojů proti rázovému štípání dle normy ISO 11 343:

Tato zkouška patří mezi dynamické destruktivní metody. Vzorek v tomto případě vypadá tak, že se k sobě přilepí dva plechy zohýbané takovým způsobem, aby mezi ně bylo možné vložit klín. Ten má za cíl rozštípnout lepený spoj a naráží do něj Charpyho kladivo. Klín je buď symetrického tvaru, je-li lepený materiál vzorku ohebný, nebo nesymetrického tvaru, pokud je vzorek utvořený kombinací ohebného a neohebného materiálu. Provedení zkoušky ukazuje **Obr. 2.11**. [1]



**Obr. 2.11** Provedení zkoušky dle normy ISO 11 343 [1]

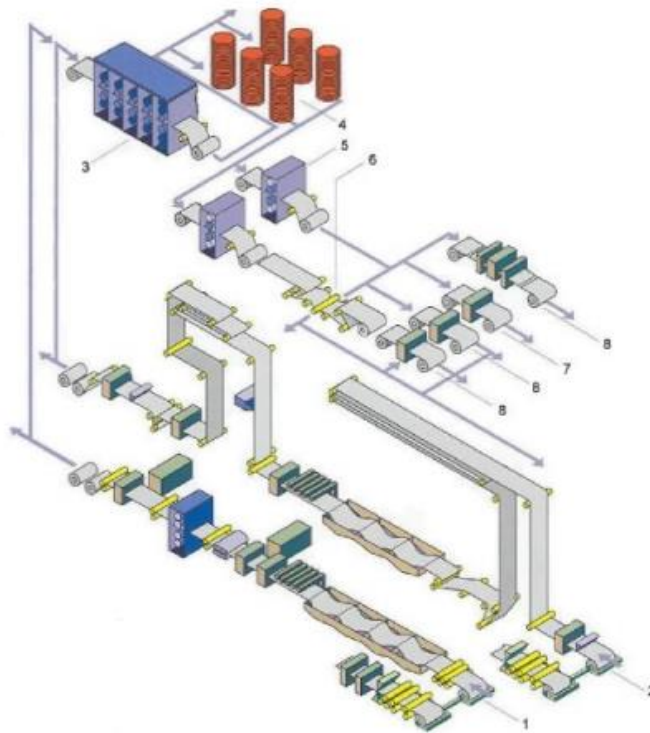
## 2.5 Hlubokotažné plechy pro automobilové karoserie

Plechové výlisky v automobilovém průmyslu vynikají velice sofistikovanými tvary, proto je jeden z nejdůležitějších požadavků na volbu vhodného materiálu tváritelnost. Dalšími požadavky jsou samozřejmě vysoká pevnost, nízká hmotnost, dobrý vzhled povrchu a v protikladu s tím vším stojí nízká cena. Uvažovaný materiál se podrobuje pevnostním testům a také je nutné otestovat, jak dobře obstojí při tažných technologických operacích. Dnes se používají převážně plechy z ocele, které se opatřují povlakem. Důvodem povlakování je větší estetičnost a výrazně zlepšené antikorozi vlastnosti. [13]

### 2.5.1 Materiály hlubokotažných plechů

Přes všelijaké snahy nahradit ocel jakožto hlavní karosářský materiál zatím ocel stále jednoznačně převažuje. Je zpracovávána válcováním za studena, tedy teploty se při tomto procesu pohybují v řádu desítek °C. Plechy, které opustí takovou válcovací linku mají výborné rozměrové a geometrické tolerance, dobrou povrchovou kvalitu a konečně také dobrou tváritelnost za studena.

Linka (*Obr. 2.12*) obsahuje mořicí a rovnací část, kde je válcovaný pás zbavován okují tím, že je ponořen do kyselé lázně. Doprovodně se okuje očišťují také mechanickým způsobem. Po tomto procesu se pás olejuje. Jádrem linky je pětistupňová řadová válcovací stolice. Válcuje se na tloušťky mezi 0,3 mm a 3,5 mm. První čtyři stolice jsou čtyřposchod'ové, poslední je šestiposchod'ová. Přímo v lince je integrované kontrolní zařízení neboli měřící váleček. Nepříznivé vnitřní pnutí se po vlastním válcování odstraňuje rekrystalizačním žíháním. Poté se na drezírovací části pás oceli zdrsňuje, aby tak byl nachystaný pro tvarové úpravy a pro povrchové úpravy. Ve finální části pás projede inspekční linkou a je nastřiháván na konečnou šířku. Také je zakonzervován v oleji, aby nemohlo při skladování dojít k jeho nechtěné korozi. [13]



**Obr. 2.12** Válcovací stolice pro válcování za studena [13]

- 1 – rovnačka pásu a mořící linka; 2 – kontinuální mořící odrezovací linka;  
 3 – tandemová válcovací stolice; 4 – žíhací pece; 5 – paralelní drezírovací stolice;  
 6 – rovnačka pásu; 7 – nástřihová linka; 8 – kontrolní linky

## 2.5.2 Povlaky hlubokotažných plechů

Jak bylo nastíněno na začátku této kapitoly, povlakování je zásadní z hlediska životnosti plechu, poněvadž se tak zamezí korozi. Je zřejmé, že povlak je nutno nanášet na očištěný a patřičně upravený povrch materiálu, jelikož musí se základním materiálem tvořit vynikající vazbu. Velkým problémem je však skutečnost, že při lisování plechů se povlaky poškozují.

Povlakování v automobilovém průmyslu znamená defacto to, že se na plechy nanáší vrstva zinku. Zinek totiž vyniká vhodnými vlastnostmi, tedy kromě již zmiňované antikorozi schopnosti lze dále jmenovat finanční nenáročnost. Je to neušlechtilý kov s pasivační vlastností, což znamená, že v kontaktu s ocelí se z něj stane anoda a ocel je tak ochráněna. Zinkuje se žárově, elektrolyticky, nebo pomocí organického způsobu.

Z důvodu zredukování opotřebování nástrojů při lisování plechů je více než žádoucí plechy mazat. Aby na svém povrchu mazivo dobře udržely, jsou opatřeny navíc ještě fosfátovým povlakem. Ten má totiž skvělé vsakovací schopnosti, tudíž mazivo z plechu nemůže před lisováním stéci. [13]

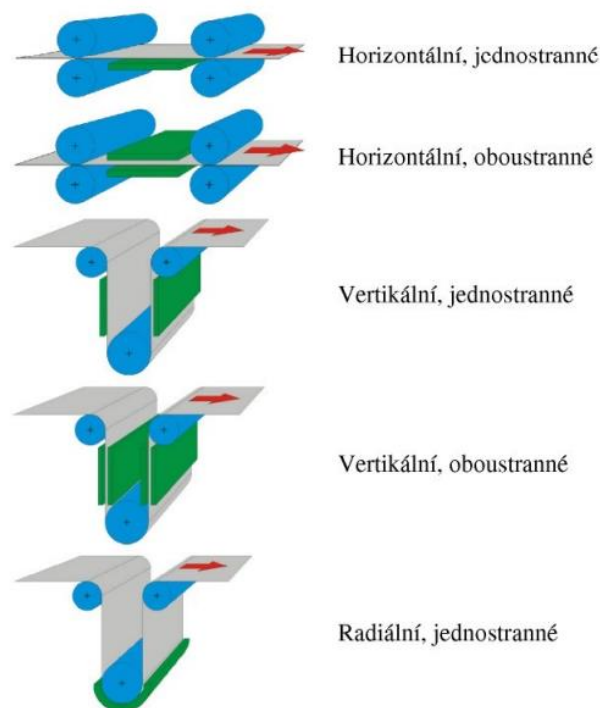
### **Žárové zinkování:**

Toto je velmi rozšířená metoda, jejíž podstatou je namáčení plechů do lázně z roztaveného zinku o teplotě 450 °C. Výsledný nános povlaku se pohybuje v rozmezí od 7 μm do 200 μm. Takto je možné zinkovat jednotlivé díly nebo kontinuálně celé ocelové pásy. Existují dva základní způsoby žárového zinkování, kterými jsou suchý a mokrý způsob. Rozdíl spočívá v tom, že při suchém způsobu jsou plechy nejprve ponořeny do tavidla, poté přichází sušení a až nakonec zinkování. Ovšem při mokřím způsobu v podstatě odpadá proces sušení, jelikož zinkované plechy přecházejí z tavidlové lázně okamžitě do zinkové lázně. To je výhodnější kvůli tomu, že efektivita tavidla tímto vzroste. [13]

### **Elektrolytické zinkování:**

Metoda elektrolytického zinkování má tu výhodu, že výsledný polotovar není ovlivněn změnou mechanických vlastností a také je možno zinkovat plech jenom z jedné strany. Vlastní pozinkování probíhá uvnitř zinkovací komory, která může mít různé uspořádání (*Obr. 2.13*). Záleží na tom, zda je pás ocelového plechu válcován v horizontální či vertikální poloze a dále také na tom, jestli anody přiléhají k pásu jednostranně nebo oboustranně. Dosažené tloušťky povlaků tvoří běžně vrstvu od 7 μm do 10 μm s tím, že je možné dosáhnout tloušťky i 3 μm. [13]





**Obr. 2.13** Uspořádání elektrolytického zinkování uvnitř zinkovací komory [13]

### 2.5.3 Hodnocení kvality povlakových plechů:

Na výslednou kvalitu je třeba nahlížet skrze mnoho aspektů. Kromě samotného ocelového plechu se hodnotí i kvalita povlaku vzhledem k tomu, čemu bude povlakový plech sloužit, jakou technologií byl zhotoven a jaký základní materiál byl vlastně použit. Plechy se také hodnotí podle toho, jestli jsou schopny zachovat svoje žádané vlastnosti i po následných technologických úpravách, což je v podstatě hodnocení již zmíněné lisovatelnosti. Ideálně lisovatelný plech by bylo možné podrobovat libovolným tvarovým změnám, avšak jeho vlastnosti by zůstaly naprosto stejné. Skutečné určování lisovatelnosti vyplývá z maximální možné deformace plechu a z maximální možné deformace povlaku tak, aby stále splňoval své protikorozní účely.

Důvody, proč se při lisování plechu poškozuje povlak, jsou dva hlavní. Prvním je skutečnost, že povlaková vrstva se ztenčuje kvůli plastickým deformacím, což časem může vést k lokálnímu obnažení základního materiálu. Druhý důvod je takový, že k lokálnímu obnažení dojde rovnou z důvodu nízké plasticity. [13]

### **Hodnocení žárového zinkování:**

Takto zinkovaný plech může mít do určité míry stále dobrou korozivzdornost i přes rozrušení povrchové vrstvy. Tyto povrchy mají dobrou homogenitu s řízenou texturou, také vynikají vysokou plasticitou, takže nepraskají. Jsou velmi vhodné pro pohledové díly. [13]

### **Hodnocení elektrolytického zinkování:**

Dalo by se shrnout, že co platí pro vyhodnocení žárového zinkování, to platí i zde v tomto případě. Jediným rozdílem je však to, že elektrolyticky zinkované plechy nemají tak dobré tribologické vlastnosti, takže se velmi doporučují určité chemické úpravy povrchů. [13]

### 3 Experimentální část

Praktická část bakalářské práce zahrnuje zkoumání toho, jak odolné jsou lepené vzorky vůči namáhání na ohyb. Tyto vzorky byly zhotoveny co možná nejpřesněji tak, aby odpovídaly reálným spojům používaným v automobilovém průmyslu, zde konkrétně ve Škoda Auto a.s. Experiment obnáší následující kroky:

- a) Příprava vzorků, tedy lepených spojů.
- b) Statická zkouška tříbodovým ohybem na zkušebním zařízení TIRA test 2300 za třech různých teplot o hodnotách  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  neboli RT a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- c) Dynamická zkouška tříbodovým ohybem na padostroji INSTRON CEAST 9350 za stejných teplot jako je uvedeno v bodu b).
- d) Zkouška tahem vzorků samotných plechů opět na zkušebním zařízení TIRA test 2300 ve třech různých orientacích vzhledem ke směru válcování, tedy  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ .

#### 3.1 Testované vzorky

Aby byl experiment směrodatný, je třeba vytvořit co nejpřesnější kopii lepeného spoje z praxe. To znamená zajistit stejný plech, stejné lepidlo, vymezit stejnou tloušťku lepené vrstvy a nasimulovat stejné podmínky lepení a vytvrzení. Pro tuto práci byl vybrán lepený spoj používaný v karosériích vozů značky Škoda Auto a.s.

##### **Karosářský plech:**

Škoda Auto a.s. poskytla karosářský plech CR 180 BH ZM 40/40 E-O, jehož tloušťka je 0,67 mm. Jde o plech opatřený zinko-hořčíkovým povlakem se stejnou vrstvou z obou stran, která činí  $40\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Je zhotoven válčováním za studena a má tu vlastnost, že je vytvrditelný zvýšenou teplotou. Plech se dodává naolejovaný a jeho smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  činí 180 MPa. [14]

##### **Konstrukční lepidlo:**

Použité lepidlo v experimentu opět koresponduje s tím, co je používáno společností Škoda Auto a.s. a je jím tedy Sika Power-494 G (produktový list viz *Příloha č. 1*). Jde o jednosložkové lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice nanášené při teplotě okolí. Vytvrzuje se tepelně. Bylo vyvinuto přímo pro potřeby automobilového průmyslu, dosahuje vysoké pevnosti, má antikorozi účinek a přilíná i na naolejované plochy.

## 3.2 Zkouška tahem vzorků samotných plechů

Tato zkouška slouží jako určitý doplněk k tříbodovým ohybovým zkouškám lepených vzorků. Na výsledky testů v ohybu má samozřejmě vliv i anizotropie materiálu. Jde o to, že válcované plechy vykazují odlišné mechanické vlastnosti vzhledem ke směru válcování. [15] Všechny vzorky plechů určené pro testování na ohyb byly odebrané ve stejné orientaci, tedy ve směru shodném se směrem válcování. Taková orientace je označována jako  $0^\circ$ . Cílem tedy bylo zjistit do jak značné míry by mohla odlišná orientace změnit výsledky ohybových zkoušek. Tahová zkouška probíhala za pokojové teploty podle normy ČSN EN ISO 6892-1.

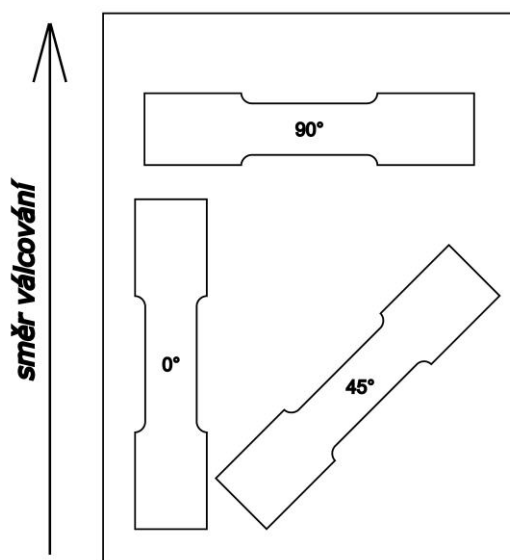
### 3.2.1 Příprava zkoušky tahem vzorků samotných plechů

Pro zkoušku bylo použito zkušební zařízení TIRA test 2300 ovládané programem LabNET. Před spuštěním vlastní zkoušky bylo nutno předdefinovat příslušné parametry s ohledem na to, aby výstupy ze zkoušky vykazovaly co nejvíce směrodatné hodnoty. Šířka testovaného vzorku byla v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 stanovena jako 20 mm, tloušťka plechu byla 0,675 mm. Start probíhal při předpětí  $F_0$  nastaveném na 200 N za rychlosti  $v_0$  zadané jako  $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  s prodlevou 4 vteřiny. Počáteční měřená délka průtahoměru  $L_e$  byla 80 mm. Vlastní zkušební rychlost  $v_1$  se nastavila na  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a po protažení o 600  $\mu\text{m}$  se aktivovala rychlost  $v_2$  činící  $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Následné ukončení nastalo za podmínky poklesu maximálního zatížení o 50 % nebo při dosažení síly 18000 N, která však sloužila pouze jako pojistka proti zničení stroje. Výsledkem zkoušek byly grafické závislosti pevnosti na protažení vzorku. Schematickou realizaci zkoušky znázorňuje **Obr. 3.1**.

Vzorků bylo testováno celkem 15, všechny za pokojové teploty. Pro každou z orientací  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  tedy proběhlo 5 testů. Znázornění orientací vůči směru válcování ukazuje **Obr. 3.2**.



*Obr. 3.1 Vzorek upnutý do zkušebního zařízení s přiloženým průtahoměrem [vlastní zdroj]*



*Obr. 3.2 Orientace vzorků vůči směru válcování [vlastní zdroj]*

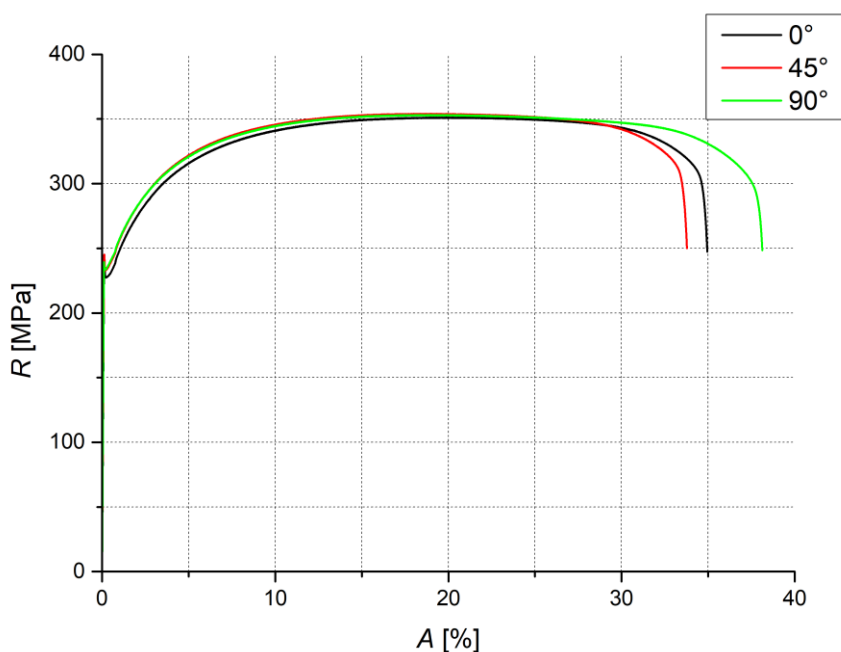
### 3.2.2 Výsledky zkoušky tahem vzorků samotných plechů

Vyhodnocenými veličinami byla dolní mez kluzu  $R_{eL}$ , což je nejnižší hodnota napětí během plastického kluzu. Dále horní mez kluzu  $R_{eH}$ , to je maximální hodnota napětí před prvním poklesem zatížení a také  $R_m$ , což je napětí při maximálním zatížení. Pak maximální

prodloužení  $A_{80\text{mm}}$  a prodloužení při maximálním zatížení  $A_g$ , obojí v procentech. Nakonec modul pružnosti  $E$ . [16] Všechny tyto veličiny ukazují **Příloha č. 2 až Příloha č. 4** a **Tab. 3.1** zobrazuje jejich průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami. Průměrné hodnoty vycházejí z pěti měření pro každou orientaci. **Obr. 3.3** dále ukazuje nejvíce reprezentativní křivky závislosti napětí na protažení. Jde o průběhy od každé orientace, které mají hodnoty  $R_m$  nejbližší svým průměrným hodnotám. Jelikož se jedná o BH ocel, která je vytvrditelná za zvýšených teplot, lze si na reprezentativních křivkách i na grafických závislostech v **Příloha č. 2 až Příloha č. 4** všimnout výrazné meze kluzu pro tyto oceli typické.

**Tab. 3.1** Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky veličin získaných tahovou zkouškou

Orientace	$R_{eL}$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80\text{mm}}$ [%]	$E$ [MPa]
0°	218,8 ± 3,5	229 ± 4,1	336,4 ± 4	19,94 ± 0,21	36,02 ± 0,57	209063 ± 1027
45°	224,1 ± 1	234,3 ± 1,2	339,9 ± 1,3	18,52 ± 0,45	33,97 ± 0,7	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



**Obr. 3.3** Ukázka reprezentativních křivek závislosti napětí na protažení [vlastní zdroj]

### 3.3 Postup přípravy vzorků pro zkoušky ohybem

#### **Stříhání plechu:**

Plech byl nastříhán CNC tabulovými nůžkami DURMA MS 2504 na výstřížky o rozměrech 100 x 20 mm (*Obr. 3.4* a *Obr. 3.5*) ve směru 0° vzhledem ke směru válcování. Bylo nutné zajistit 84 výstřížků s ohledem na to, že každá zkouška obsahovala 7 měření, přičemž zkoušek tříbodovým ohybem bylo celkem 6, tedy statický a rázový ohyb, obojí za třech různých teplot. To tedy znamená 42 vzorků lepených spojů.



*Obr. 3.4* CNC tabulové nůžky DURMA MS 2504 [vlastní zdroj]



*Obr. 3.5* Výstřížek z plechu CR 180 BH ZM 40/40 E-O [vlastní zdroj]

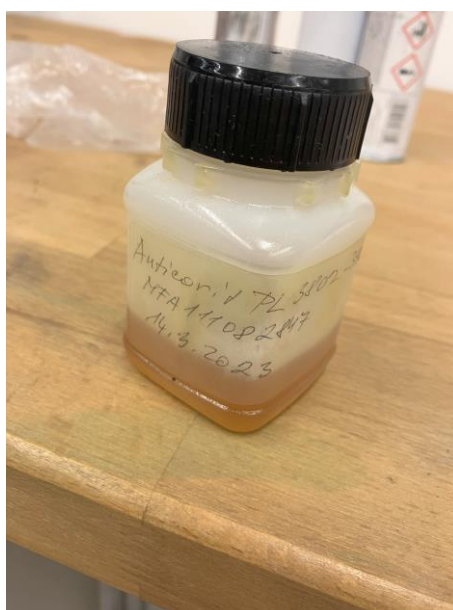


### Simulování podmínek lepení a vytvrzení:

Výstřižky byly následně odmaštěny v acetonu a vysušeny. Protože v montážním procesu při výrobě automobilů by zbavování plechů od olejové vrstvy znamenalo značné zpomalení výroby, musejí být zde používána lepidla schopna přilnout i na olej. [8] Odhaduje se, že množství oleje na plechu v praxi činí asi  $1,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pro tuto skutečnost se plechy tedy potřely pracím olejem a vrstva nátěru byla kontrolována na každém plechu IR aparátem Infralytic NG1 (**Obr. 3.6**). Použitý olej byl Anticorit PL 3802-39 LV (**Obr. 3.7**), který vyhovuje požadavkům automobilového průmyslu. Jde o olej zbavující nečistot a zároveň funguje jako mazivo při tažení plechů. Podrobné informace jsou v produktovém listu viz **Příloha č. 5**.



**Obr. 3.6** IR aparát Infralytic NG1 pro kontrolu olejové vrstvy [vlastní zdroj]



**Obr. 3.7** Prací olej Anticorit PL 3802-39 LV [vlastní zdroj]



Nakonec byly plechy slepeny s použitím měděných drátků o průměru 0,2 mm, které sloužily pro vymezení správné tloušťky lepidla. Celková tloušťka vzorku tak nakonec činila zhruba 1,5 mm. Přítlak pro dosednutí plechů na distanční drátek byl vyvinut manuální silou a každý spoj byl zajištěn svěrnou sponou, aby došlo k fixaci. Vytvrzení lepidla proběhlo v sušárně BMT VENTICELL za teploty 180 °C, doba vytvrzování činila 20 min. Teplota před vložením vzorků do sušárny byla nastavena na 185 °C, tedy 5 °C tvořilo rezervu při chladnutí prostoru uvnitř sušárny po jejím otevření. Již vytvrzené vzorky připravené k testování ještě s neodstraněnými sponkami ukazuje **Obr. 3.8**.



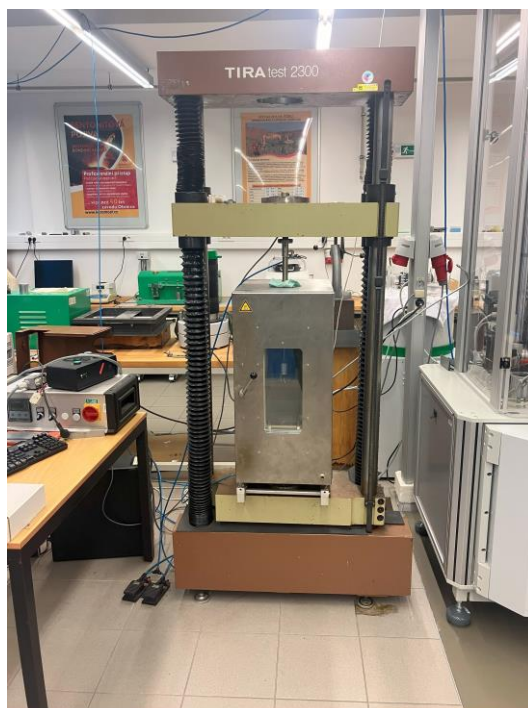
**Obr. 3.8** Vytvrzené vzorky na sušárně BMT VENTICELL s fixačními sponami  
[vlastní zdroj]

### 3.4 Statická zkouška tříbodovým ohybem

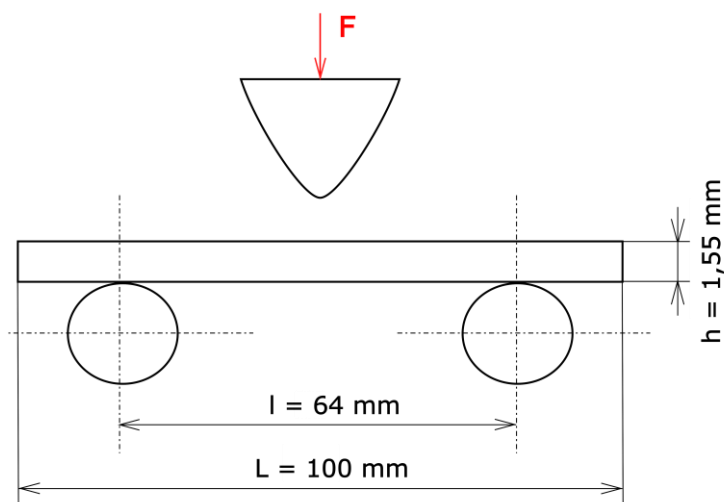
Pro testování vlastností lepených spojů sice existují normované zkoušky jako je například zkoušení pevnosti ve smyku podle ČSN EN 1465 nebo T-zkouška odlupování dle ISO 11 339, avšak pro testování lepených spojů na ohyb žádná norma neexistuje. Proto tedy byla na základě podobnosti použita zkouška stanovující ohybové vlastnosti plastů, kterou popisuje ČSN EN ISO 178.

### 3.4.1 Příprava statické zkoušky tříbodovým ohybem

Opět bylo použito zkušební zařízení TIRA test 2300, tentokrát však osazeno teplotní komorou (**Obr. 3.9**). Ta je důležitá kvůli eliminaci tepelného ovlivnění v průběhu testu. Analogicky jako v případě zkoušky tahem bylo i zde nutno do programu LabNET nadefinovat parametry zkoušky ČSN EN ISO 178 (**Obr. 3.10**). Parametry definují rozměry vzorku, dále start, vlastní průběh a ukončení zkoušky. Rozpětí podpor  $l$  bylo 64 mm, deformační rychlost  $v_1$  činila  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a předpětí při startu  $F_0$  se nastavilo na 3 N při rychlosti  $v_0$  nastavené na  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Ukončení zkoušky nastalo po dosažení dráhy příčnicku 25 mm nebo při dosažení síly 9000 N. Příčnickem se v tomto případě rozumí zatěžující trn a síla 9000 N je pouze pojistná, aby nedošlo k poškození celého zařízení. Výstupem ze zkoušky je grafická závislost pevnosti na dráze příčnicku. Malé předpětí je u této zkoušky nutné nastavit z toho důvodu, aby počáteční tvar křivky v grafické závislosti nebyl zakřivený. [17]



**Obr. 3.9** Zkušební zařízení TIRA test 2300 osazené teplotní komorou [vlastní zdroj]



**Obr. 3.10** Znárodnění zkoušky ČSN EN ISO 178 [vlastní zdroj]

$h$  – výška vzorku;  $l$  – vzdálenost mezi podporami;  $L$  – celková délka vzorku [15]

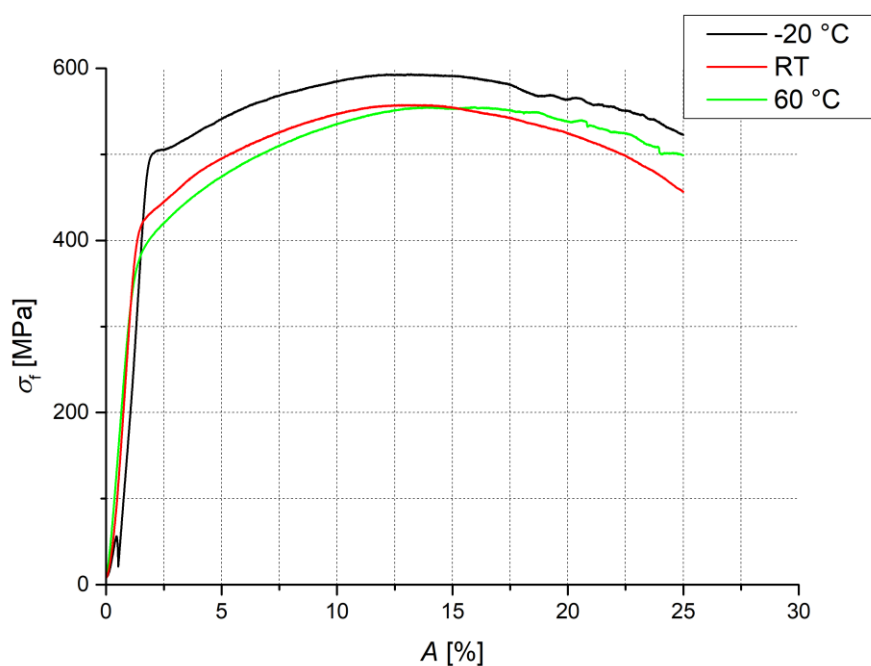
Pro tuto zkoušku bylo použito 21 vzorků testovaných za třech různých teplot po 7 kusech. Teploty byly zvoleny podle klimatických podmínek, ve kterých se lepené spoje v karoserii automobilu běžně vyskytují. Pro simulování chladných oblastí byla zvolena teplota  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dále pro simulaci teploty, které může dosáhnout například střecha automobilu vystavená dlouhodobě slunečnímu záření v letních obdobích, bylo zvoleno  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Třetí teplotou byla teplota pokojová čili přibližně  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ta je dále označována jako RT. Teploty  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bylo dosaženo v hlubokomrazícím boxu FRYKA B35-50 a teploty  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  opět v sušárně BMT VENTICELL, kde došlo k samotnému vytvrzení lepidla. Teploty byly nastaveny na  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  v hlubokomrazícím boxu a na  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  v sušárně kvůli tomu, aby při vkládání vzorků do zkušebního zařízení nedošlo k přílišnému ohřátí nebo ochlazení vlivem okolí. Konstantní teplotu při testu zajišťovala teplotní komora viz **Obr. 3.9**.

### 3.4.2 Výsledky statické zkoušky třibodovým ohybem

Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 3.2** a uvádějí pevnost v ohybu  $\sigma_{FM}$ , tedy nejvyšší napětí v ohybu, kterého vzorek během zkoušky dosáhne. V tabulce jsou uvedeny i statistické parametry, kterými jsou průměrná hodnota, směrodatná odchylka, minimum a maximum hodnot. Výstupní grafy z měření jsou uvedeny v **Příloha č. 6** až **Příloha č. 8** a jejich reprezentativní křivky od každé teploty jsou zobrazeny na **Obr. 3.11**.

**Tab. 3.2** Naměřené hodnoty a statistické parametry  $\sigma_{FM}$  [MPa]

Číslo vzorku	Teplota testování t [°C]		
	-20	RT	60
1	592,3	580,4	554,9
2	634,1	561	577,9
3	612,6	585,6	581,2
4	652,4	576,4	581,4
5	618,3	564,3	547,4
6	593,1	565	605,8
7	624,3	557,5	574,4
Průměrná hodnota	618,6	570	574,7
Směrodatná odchylka	21	10,7	19,2
Minimum	593,1	557,5	547,4
Maximum	652,4	585,6	605,8



**Obr. 3.11** Ukázka reprezentativních křivek závislosti napětí na protažení [vlastní zdroj]

## 3.5 Dynamická zkouška tříbodovým ohybem

Stejně tak jako statická zkouška tříbodovým ohybem se i tato zkouška inspiruje zkouškou stanovující ohybové vlastnosti plastů dle ČSN EN ISO 178.

### 3.5.1 Příprava dynamické zkoušky tříbodovým ohybem

Testování bylo provedeno na padostroji INSTRON CEAST 9350 vybaveném teplotní komorou (**Obr. 3.12**). I v tomto případě je padostroj řízen programem, ve kterém se nastavují veškeré specifikace příslušné zkoušky. Dopadová energie  $E_d$  byla nastavena na 52 J, dopadová rychlost  $v_d$  na  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pádová výška  $h_d$  byla 816 mm. Rozpětí mezi podporami  $l$  bylo stejné jako u statické zkoušky, tedy 64 mm. Pro uložení vzorků do padostroje musel být zhotoven originální přípravek (**Obr. 3.13**), který byl upevněn šrouby M8x50. Do přípravku byla vsazena pryžová vložka pro pohlcení zbytkové energie příčnicku po ohybu vzorku. Testováno bylo opět 21 vzorků za shodných teplotních podmínek jako v případě statické zkoušky.



**Obr. 3.12** Padostroj INSTRON CEAST 9350 s teplotní komorou [vlastní zdroj]



*Obr. 3.13 Přípravek s uloženým vzorkem namontovaný do padostroje [vlastní zdroj]*

### 3.5.2 Výsledky dynamické zkoušky tříbodovým ohybem

Výstupem zkoušky na padostroji nebyly již zpracované grafické závislosti se všemi žádanými statistickými parametry, ale pouze sběr dat obsahující naměřené hodnoty veličin jako je síla, energie, rychlost a dráha příčnicku v daných časových okamžicích. Měření proběhlo v intervalu od 0 do 15 ms s krokem  $5 \cdot 10^{-4}$  ms. Z těchto dat byly prostřednictvím programu OriginPRO 9 zpracovány grafické závislosti síly na čase, které se však musely zbavit počátečních šumů a koncových nárazů do pryže. Dále bylo za potřeby průběhy vyhladit. Tyto grafy je možno vidět v *Příloha č. 9* až *Příloha č. 11*. Ze síly bylo následně spočítáno napětí v ohybu z každého časového okamžiku pomocí rovnice (3.1). Nakonec se pevnost vyhodnotila jako průměrná hodnota mezi 20 % a 80 % časového průběhu nyní již zbaveného šumu a koncového pryžového rázu. Tato pevnost bude označována jako  $\sigma_{T20-80}$  a její výsledky i se statistickými parametry ukazuje *Tab. 3.3*. Pro pochopení je zde uveden příklad na nezpracovaných datech z prvního měření při teplotě  $-20$  °C (*Obr. 3.14*). Modré čáry vymezují oblast bez počátečního šumu a koncového rázu. Růžové čáry potom vymezují oblast mezi 20 % a 80 % z modré oblasti. Poloha růžových čar byla nalezena tím způsobem, že v editoru grafu programu OriginPRO 9 byly odečteny body příslušející polohám modrých čar. Rozdíl těchto



bodů tvoří 100 % a pokud dáme tento rozdíl do součinu se zlomkem  $\frac{x}{100}$ , kde  $x$  je v našem případě 20 % nebo 80 %, obdržíme body příslušející těmto procentům. Těm odpovídají krajní hodnoty napětí, které tvoří rozsah pro výpočet průměrné hodnoty pevnosti, tedy  $\sigma_{f20-80}$ . Napětí v každém časovém okamžiku a průměry pevností byly kvůli velkému objemu dat počítány pomocí programu Microsoft Excel. Reprezentativní grafické závislosti síly na čase od každé teploty jsou dále znázorněny na **Obr. 3.15**.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

Kde:

$\sigma_f$ ...napětí v ohybu [MPa]

$F$ ...použitá síla [N]

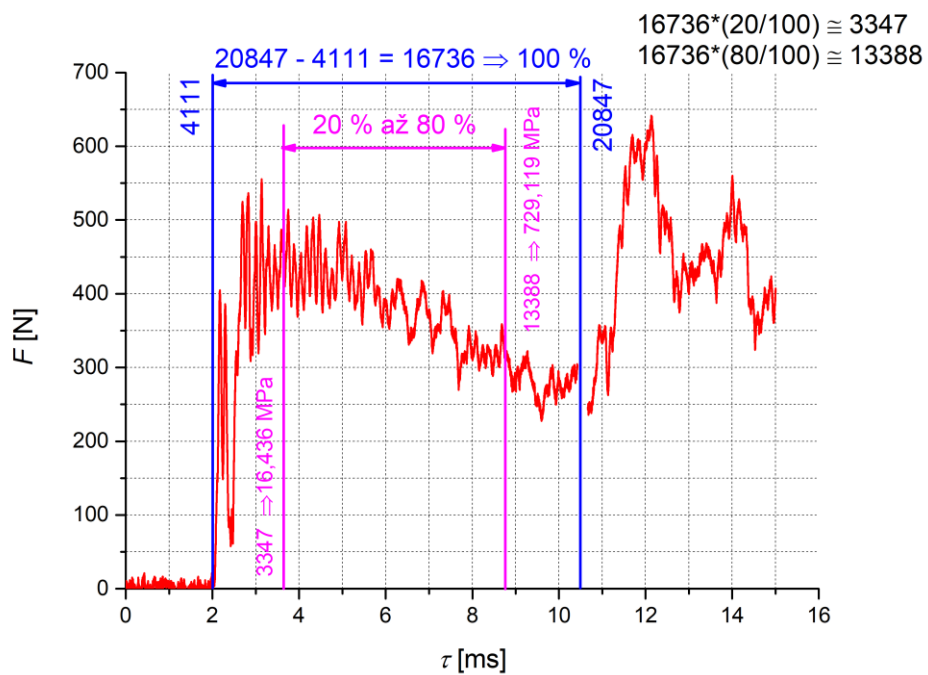
$L$ ...vzdálenost mezi podporami [mm]

$b$ ...šířka vzorku [mm]

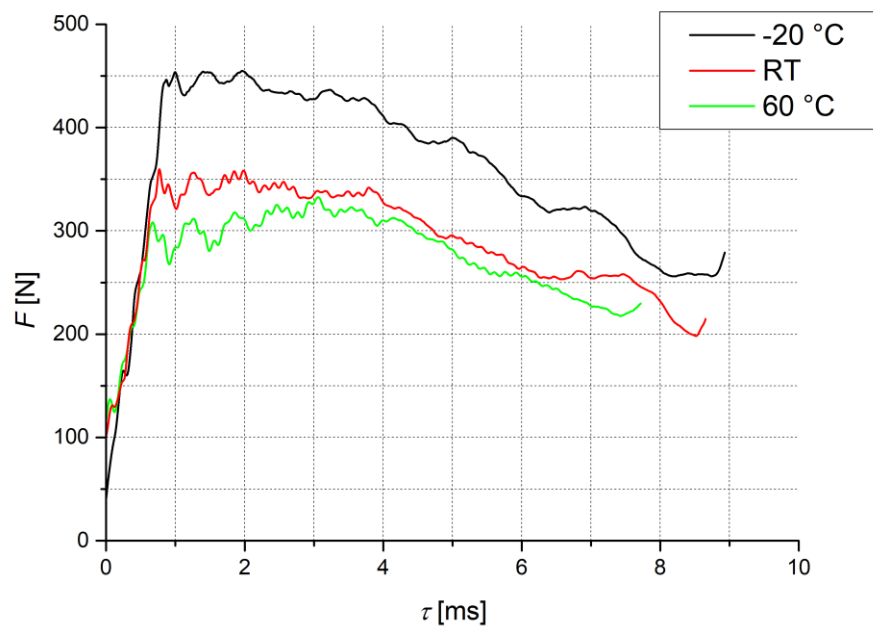
$h$ ...tloušťka vzorku [mm]

**Tab. 3.3** Zjištěné hodnoty a statistické parametry  $\sigma_{f20-80}$  [MPa]

Číslo vzorku	Teplota testování t [°C]		
	-20	RT	60
1	726,2	600,8	531,2
2	789,9	614,2	526,7
3	693,3	592,3	478,4
4	721,4	575,7	516
5	764,1	567	512,1
6	741,3	572,3	577,5
7	704,1	651,8	499,9
Průměrná hodnota	734,3	596,3	520,3
Směrodatná odchylka	33,8	29,7	30,8
Minimum	693,3	567	478,4
Maximum	789,9	651,8	577,5



**Obr. 3.14** Ukázka hledání krajních hodnot napětí pro výpočet  $\sigma_{20-80}$  [vlastní zdroj]



**Obr. 3.15** Ukázka reprezentativních křivek závislosti síly na čase [vlastní zdroj]



## 4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

V této kapitole budou interpretovány výsledky zkoušek z experimentální části. Zajímá nás, jaký vliv má teplota a anizotropie lepeného materiálu na výsledky testů. Také nás zajímá, jak si vedly vzorky namáhané staticky oproti rázovému charakteru namáhání.

Na výsledky pevností byla aplikována analýza rozptylu, též zvaná jako ANOVA. Ta umožňuje vyhodnotit, zda na hodnoty náhodné veličiny, v našem případě pevnosti, má statisticky významný vliv hodnota faktorů, což je zde způsob deformace a teplotní ovlivnění. Pro každou zkoušku bylo zopakováno 7 měření. To znamená, že pro naše potřeby musíme zvolit typ ANOVA testu jako dva faktory s opakováním. ANOVA byla provedena v programu Microsoft Excel s hodnotou hladiny významnosti  $\alpha$  ponechanou jako defaultní, tedy 0,05 %. ANOVA se dvěma faktory zavádí tři nulové hypotézy  $H_0$  a tři alternativní hypotézy  $H_1$ . Pokud tyto hypotézy aplikujeme opět na náš konkrétní případ, tak první nulová hypotéza říká, že faktor způsobu zatěžování je statisticky nevýznamný. Druhá nulová hypotéza říká, že faktor teploty je statisticky nevýznamný. Nakonec třetí nulová hypotéza říká, že vliv interakcí faktorů je statisticky nevýznamný. Alternativní hypotézy tvrdí opaky nulových hypotéz, tedy že vlivy faktorů jsou statisticky významné. O tom, které hypotézy budou platit, rozhoduje F-test porovnávající hodnoty  $F$  a  $F_{krit}$ . Je-li hodnota  $F$  větší než  $F_{krit}$ , potom se zamítá hypotéza  $H_0$  a místo ní se přijímá hypotéza  $H_1$ . V opačném případě je nulová hypotéza  $H_0$  platná. **Tab. 4.1** ukazuje vstupní hodnoty pro ANOVA test. SZ značí oblast hodnot naměřených statickou zkouškou, DZ potom oblast hodnot zjištěných zkouškou dynamickou. V **Tab. 4.2** si lze povšimnout, že pro všechny zdroje variability platí, že  $F$  je větší než  $F_{krit}$ , všechny nulové hypotézy byly tedy zamítnuty a místo nich se přijaly alternativní hypotézy. Pro výběr to znamená, že má vliv způsob deformace. Pro sloupce to znamená, že má vliv teplotní ovlivnění. Nakonec interakce říká, že je odlišný trend mezi statickým zatěžováním a dynamickým zatěžováním. [18]

**Tab. 4.1** Vstupní hodnoty ANOVA testu se dvěma faktory s opakováním

		Teplota testování t [°C]		
		-20	RT	60
Pevnost [MPa]	SZ	592,3	580,4	554,9
		634,1	561	577,9
		612,6	585,6	581,2
		652,4	576,4	581,4
		618,3	564,3	547,4
		593,1	565	605,8
		624,3	557,5	574,4
	DZ	726,2	600,8	531,2
		789,9	614,2	526,7
		693,3	592,3	478,4
		721,4	575,7	516
		764,1	567	512,1
		741,3	572,3	577,5
		704,1	651,8	499,9

**Tab. 4.2** Výsledek ANOVA testu se dvěma faktory s opakováním

Zdroj variability	$F$	$F_{\text{krit}}$	$H_0$	$H_1$
Výběr	13,8	4,1	zamítnuta	přijata
Sloupce	94,7	3,3	zamítnuta	přijata
Interakce	39	3,3	zamítnuta	přijata

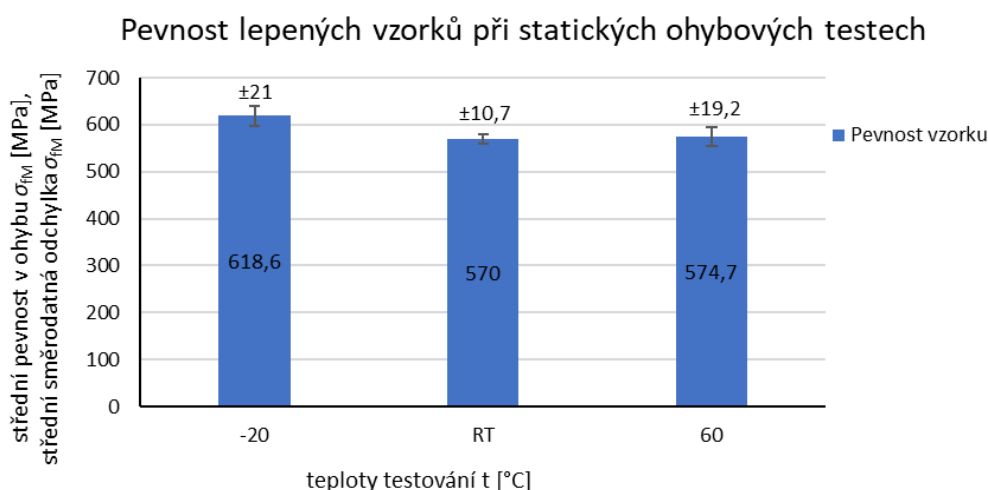
Podíváme-li se na druhý a třetí sloupec u statického způsobu zatížení v **Tab. 4.1** všimneme si, že hodnoty pevnosti si jsou mezi těmito dvěma sloupci velmi podobné. Abychom ověřili, jestli se vzájemně liší nebo ne, zavedeme t-test střední hodnoty. Řešení opět proběhlo prostřednictvím programu Microsoft Excel. Hypotetický rozdíl středních hodnot byl zaveden jako nula. Vzniká zde tedy nulová hypotéza  $H_0$ , která tvrdí, že výběry mají shodné střední hodnoty. Alternativní hypotéza  $H_1$  říká, že výběry shodné střední hodnoty nemají. Hladina významnosti  $\alpha$  zde byla opět ponechána jako 0,05 %. Vyhodnocení platnosti hypotéz se provede porovnáním  $t_{\text{stat}}$  a  $t_{\text{krit}(2)}$ . Číslo 2 v závorce u  $t_{\text{krit}(2)}$  znamená, že se jedná o oboustranný test. Nulová hypotéza  $H_0$  platí v tom případě, pokud je absolutní hodnota  $t_{\text{stat}}$  menší než  $t_{\text{krit}(2)}$ . Přijmutí alternativní hypotézy  $H_1$  nastává při situaci, kdy absolutní hodnota  $t_{\text{stat}}$  je větší než  $t_{\text{krit}(2)}$ . [19] T-test střední hodnoty byl proveden mezi všemi třemi kombinacemi sloupců, tedy

mezi prvním a druhým (1-2), prvním a třetím (1-3) i mezi druhým a třetím (2-3). Pro úplnost byl t-test doplněn i pro dynamický způsob zatěžování. V **Tab. 4.3** si můžeme všimnout, že střední hodnota je skutečně shodná pouze v případě statického zatěžování mezi druhým a třetím sloupcem.

**Tab. 4.3** Výsledky dvouvýběrových párových t-testů

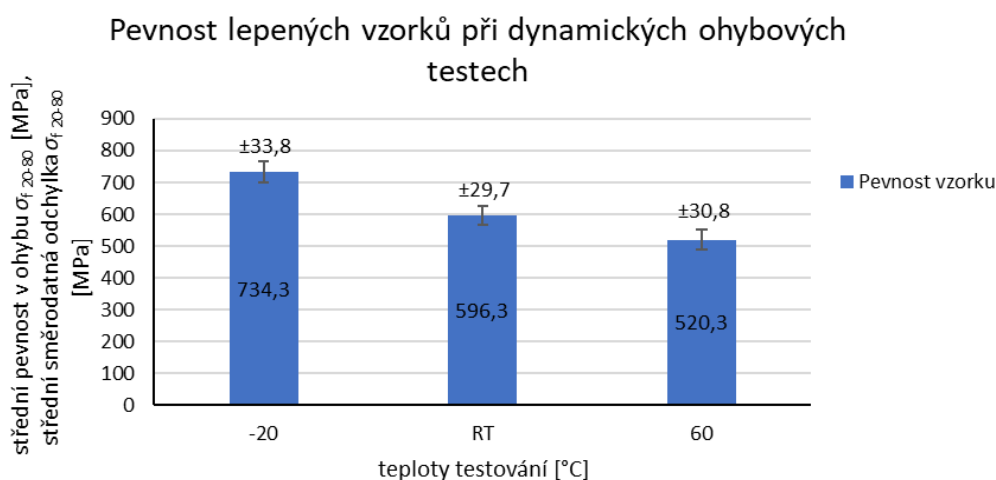
	1-2			1-3			2-3		
	$t_{stat}$	$t_{krit(2)}$	platí	$t_{stat}$	$t_{krit(2)}$	hypotéza	$t_{stat}$	$t_{krit(2)}$	platí
SZ	5	2,4	$H_1$	4	2,4	$H_1$	-0,5	2,4	$H_0$
DZ	7,4	2,4	$H_1$	16,7	2,4	$H_1$	4,1	2,4	$H_1$

Na **Obr. 4.1** můžeme vidět graf porovnání středních pevností v ohybu  $\sigma_{FM}$  s jejich směrodatnými odchylkami za teplot -20 °C, RT a 60 °C. Pevnost při teplotě -20 °C je nejvyšší, tedy  $618,6 \pm 21$  MPa. Za pokojové teploty RT došlo k mírnému pevnostnímu poklesu na  $570 \pm 10,7$  MPa. U teploty 60 °C je pevnost  $574,7 \pm 19,7$  MPa. T-testy prokázaly, že od pokojové teploty se pevnost již nemění a zůstává konstantní. U krajních teplot -20 °C a 60 °C je vyšší směrodatná odchylka než v případě pokojové teploty, takže při teplotních extrémech se spoj chová více nevyzpytatelně. Pevnost za vyšších teplot klesla přibližně o 7 až 8 % oproti pevnosti při -20 °C.



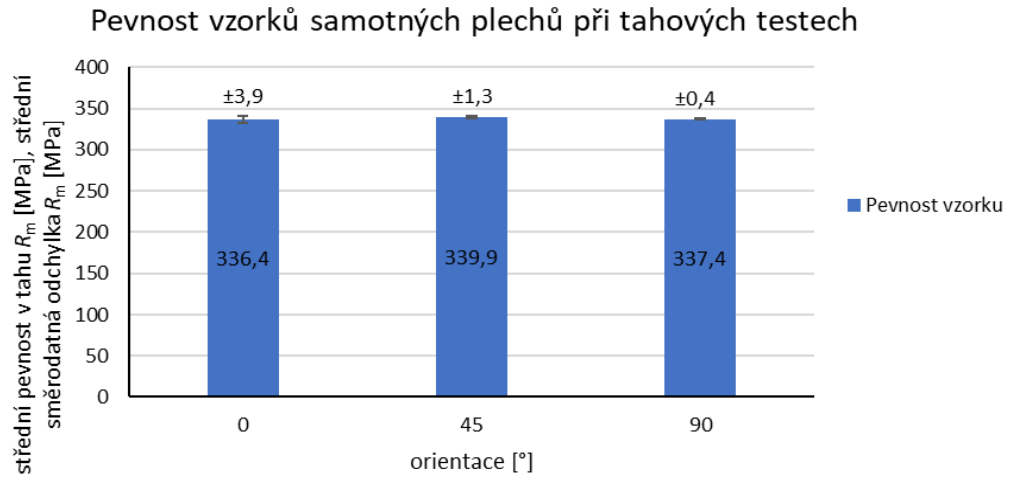
**Obr. 4.1** Graf pevnosti lepených vzorků při statických ohybových testech [vlastní zdroj]

**Obr. 4.2** stejně jako předchozí graf porovnává střední pevnosti v ohybu a jejich směrodatné odchylky za teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , RT a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tentokrát se však pracuje s průměrnou pevností  $\sigma_{F20-80}$ , která náleží dynamickým ohybovým testům. Pevnost za teploty  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  je  $734,3 \pm 33,8\text{ MPa}$ . Při teplotě RT je pak pevnost  $596,3 \pm 29,7\text{ MPa}$  a při  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  to je  $520,3 \pm 30,8\text{ MPa}$ . Na první pohled je zde jasné, že oproti statickým testům je tento trend odlišný, což koresponduje s výsledky ANOVA testu. Se vzrůstající teplotou jasně klesá pevnost. Střední směrodatné odchylky celkově oproti statickým testům vzrostly. Pevnostní pokles je pro teplotu RT 19 % a pro teplotu  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  pak 29 % oproti nejvyšší pevnosti při  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Obr. 4.2** Graf pevnosti lepených vzorků při dynamických ohybových testech [vlastní zdroj]

Poslední **Obr. 4.3** ukazuje graf středních pevností v tahu  $R_m$  se svými směrodatnými odchylkami při orientacích  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ . U všech orientací je pevnost v tahu prakticky stejná s minimálními hodnotami střední směrodatné odchylky. Orientace  $0^{\circ}$  má pevnost  $336,4 \pm 3,9\text{ MPa}$ , orientace  $45^{\circ}$  dosáhla pevnosti  $339,9 \pm 1,3\text{ MPa}$  a nakonec pro orientaci  $90^{\circ}$  je to hodnota pevnosti  $337,4 \pm 0,4\text{ MPa}$ . Z toho lze jednoznačně usoudit, že tento daný typ plechu není anizotropický a tedy není možnost, že by tímto byla ovlivněna pevnost při ohybových testech lepených spojů.



**Obr. 4.3** Graf pevnosti vzorků samotných plechů při tahových testech [vlastní zdroj]

## 5 Závěr

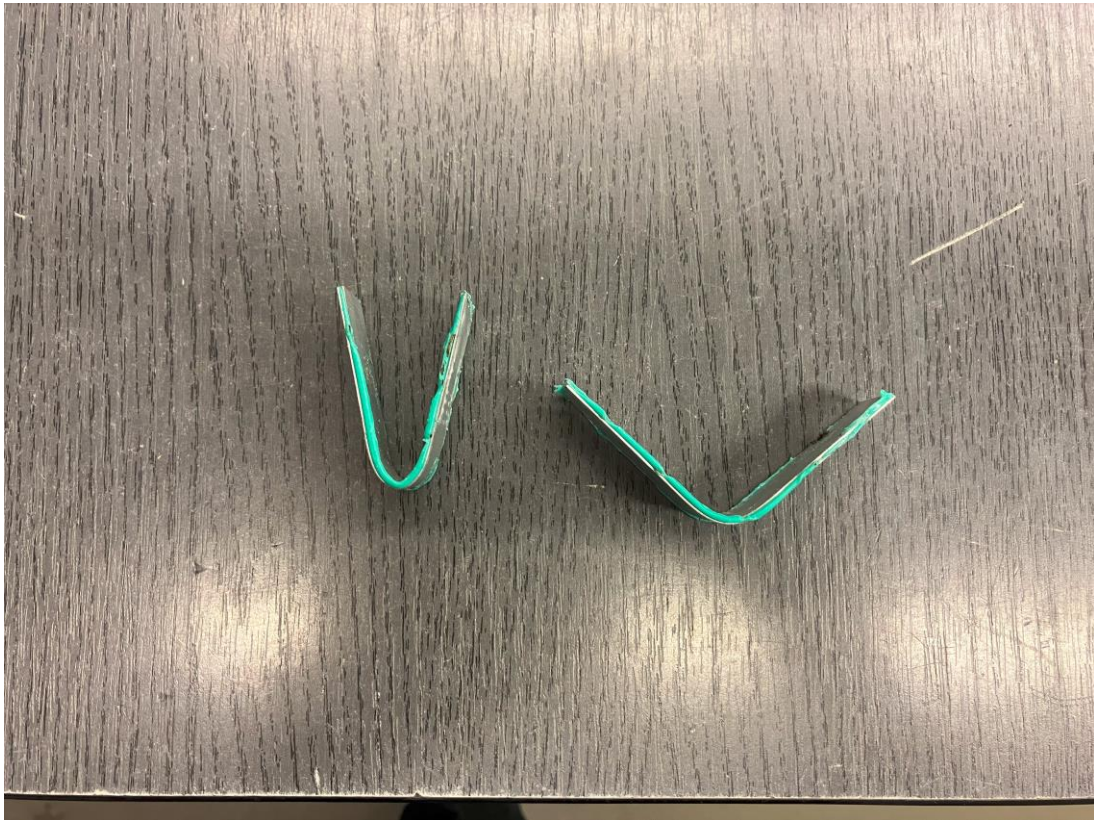
Na základě výsledků obdržených v experimentální části a po jejich analýze lze jednoznačně usoudit, že se vzrůstající teplotou klesá ohybová pevnost lepeného spoje, který se skládá z lepidla Sika Power-494 G a karosářského plechu CR 180 BH ZM 40/40 E-O. Pevnost s rostoucí teplotou sice klesá bez ohledu na způsobu zatěžování, ovšem při dynamickém charakteru zatěžování je pevnostní pokles mnohem prudší než v případě statického zatěžování. Konkrétně tedy při statickém zatěžování znatelněji klesla pevnost mezi  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  zhruba o 7 % až 8 % a za teplotou  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  již zůstala konstantní, což bylo potvrzeno za pomoci t-testu. Při dynamickém zatěžování pevnost mezi  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  poklesla o 19 %, následně dále klesala a při  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  došlo ke snížení o 29 % oproti pevnosti při  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zjištění, že trend poklesu ohybové pevnosti není u obou těchto zatěžovacích charakterů stejný, je poměrně nepředvídané.

Vývoj pevnosti v ohybu při nižších teplotách, než je  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a při vyšších teplotách, než je  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  není zcela opodstatněné zkoumat, neboť tyto teploty poměrně dobře pokrývají provozní podmínky lepených spojů na automobilech Škoda Auto a.s.

Na *Obr. 5.1* můžeme vidět srovnání deformovaného vzorku statickým ohybem s deformovaným vzorkem dynamickým ohybem. Je patrné, že dynamické zatížení způsobilo větší průhyb. Ani u jednoho případu nedošlo k odtržení lepidla od plechu, což lze považovat za kvalitní vlastnost vypovídající o dobré adhezi i kohezi.

Co se týče anizotropních vlastností karosářského plechu CR 180 BH ZM 40/40 E-O, bylo na základě tahových zkoušek zjištěno, že ve směrech  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  vůči směru válcování plechu, se tahová pevnost  $R_m$  nemění. Pro  $0^{\circ}$  se zjistila pevnost  $336,4 \pm 3,9\text{ MPa}$ , pro  $45^{\circ}$  to je  $339,9 \pm 1,3\text{ MPa}$  a nakonec pro  $90^{\circ}$  je hodnota pevnosti  $337,4 \pm 0,4\text{ MPa}$ . Z toho vyplývá, že faktor anizotropie plechu v tomto případě nehraje žádnou roli, co se týče pevnostního ovlivnění lepených spojů testovaných na ohyb.

Na závěr lze říci, že v praxi se vyskytuje velké množství konstrukčních lepidel určených pro potřeby automobilového průmyslu. Zároveň se liší i dodavatelé karosářských plechů napříč automobilovými výrobci. Z těchto kombinací vzniká opravdu nepřehledný počet lepených spojů, které se v automobilových konstrukcích vyskytují nebo mohou vyskytovat. Jelikož se tato bakalářská práce zabývala jen jedním konkrétním spojem, vzniká zde návrh na další experiment, který by měl za cíl testovat na ohyb vzorky lepených spojů používaných různými výrobci automobilů. Vzorky by byly vzájemně porovnávány a následně by bylo posuzováno, který vzorek z daného výběru má nejpříznivější vlastnosti.



*Obr. 5.1 Srovnání deformací po statickém a po dynamickém ohybu [vlastní zdroj]*



## Použitá literatura

- [1] DOUBEK, Pavel a Michaela KOLNEROVÁ. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [2] NĚMEČEK, Jan. *Napětová analýza přepřátovaných lepených spojů*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96982/F2-BP-2021-Nemecek-Jan-BP%20Nemecek%20Jan.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [3] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 3., dopl. Liberec: Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-7372-319-4.
- [4] GREGOR, Miroslav. Technologie a technika lepení - základní informace. Online. 24.5.2021 [2021-05-24]. In: *Lepidla.cz*. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/clanky/technologie-a-technika-lepeni---zakladni-informace>. [citováno 2023-10-18]
- [5] KRÁLOVÁ, Magda. Vazebné síly. Online. © 2007. In: *Edu.techmania.cz*. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/struktura-latek/pevne-latky/vazebne-sily>. [citováno 2023-10-18]
- [6] KRÍŽEK, Vladimír. *TECHNOLOGIE LEPENÍ VE STROJÍRENSTVÍ*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103686/F2-BP-2022-Krizek-Vladimir-BP-2022-Krizek-Vladimir-Technologie%20lepeni%20ve%20strojirenstvi.pdf?sequence=-1>
- [7] Změna vlastností povrchu pro dosažení lepší přilnavosti. Online. © 2023. In: *3M Science*. Dostupné z: [https://www.3m.cz/3M/cs\\_CZ/bonding-and-assembly-ctl/training-education/science-of-adhesion/changing-surface-properties/](https://www.3m.cz/3M/cs_CZ/bonding-and-assembly-ctl/training-education/science-of-adhesion/changing-surface-properties/). [citováno 2023-10-24]
- [8] PILVOUSEK, Tomáš. Lepení ve výrobě karoserie. Online. 27.6.2017 [2017-06-27]. In: *MM Průmyslové spektrum*. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie>. [citováno 2023-10-25]
- [9] PETRIE, Edward M. *Handbook of adhesives and sealants* online. McGraw-Hill Education. 2007. Dostupné z: <https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Handbook%20of%20Adhesives%20and%20Sealants.pdf>.
- [10] COMYN, J. Moisture cure of adhesives and sealants. online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, roč. 18 (1998), č. 4, s. 247-253. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00031-6).



- [11] SILVA, Lucas F. M. da; Andreas ÖCHSNER a Robert D. ADAMS. *Handbook of Adhesion Technology*. Springer Science & Business Media, 2011. ISBN 978-3-642-01168-9.
- [12] ČERNÝ, Jan. *Vliv stárí lepidla na pevnost lepeného spoje*. Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/150920>
- [13] KOLNEROVÁ, Michaela. *Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení*. Disertační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38797>
- [14] VOLKSWAGEN AG. VW 50065, *Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung*. 2019-08.
- [15] SOLFRONK, Pavel. *Technologie II - Technologie ohýbání*. Liberec, 2020.
- [16] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ (ÚNMZ). ČSN EN ISO 6892-1, *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2010.
- [17] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ (ÚNMZ). ČSN EN ISO 178, *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. 2011.
- [18] ANDĚL, Jiří. *Matematická statistika*. STNL, 1978.
- [19] DURČÁK, Pavel. *Excel – Analytické nástroje – 11. část - T-test a z-test*. Online. © 1997 – 2024. In: NaPočítači.cz. Dostupné z: <https://www.napocitaci.cz/33/excel-analyticke-nastroje-11-cast-t-test-a-z-test-uniqueidgOke4NvrWuNY54vrLeM671KsMLPkwyzQsPTwVrguwZk/>. [cit. 2024-04-26].

# Seznam obrázků, grafů, tabulek a rovnic

## Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1</i> Řez lepeným spojem [vlastní zdroj] .....	13
<i>Obr. 2.2</i> Testování smáčivost [vlastní zdroj] .....	15
<i>Obr. 2.3</i> Možné způsoby namáhání lepeného spoje [vlastní zdroj] .....	16
<i>Obr. 2.4</i> Příklady základních realizací lepených spojů [vlastní zdroj] .....	17
<i>Obr. 2.5</i> Typy lepených spojů v běžné automobilové konstrukci [1] .....	19
<i>Obr. 2.6</i> Základní rozdělení lepidel [vlastní zdroj] .....	20
<i>Obr. 2.7</i> Vytvrzovací proces lepidel tuhoucích vlivem vlhkosti okolního prostředí [1].....	23
<i>Obr. 2.8</i> Možné způsoby realizace kontroly pomocí ultrazvuku; upraveno [9].....	27
<i>Obr. 2.9</i> Vzorek pro zkoušení pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465 [vlastní zdroj].....	28
<i>Obr. 2.10</i> Vzorek pro zkoušku odlupování lepeného spoje ohnutých plechů dle normy ISO 11 339 [vlastní zdroj] .....	29
<i>Obr. 2.11</i> Provedení zkoušky dle normy ISO 11 343 [1] .....	29
<i>Obr. 2.12</i> Válcovací stolice pro válcování za studena [13] .....	31
<i>Obr. 2.13</i> Uspořádání elektrolytického zinkování uvnitř zinkovací komory [13].....	33
<i>Obr. 3.1</i> Vzorek upnutý do zkušebního zařízení s přiloženým průtahoměrem [vlastní zdroj] .	37
<i>Obr. 3.2</i> Orientace vzorků vůči směru válcování [vlastní zdroj].....	37
<i>Obr. 3.3</i> Ukázka reprezentativních křivek závislosti napětí na protažení [vlastní zdroj].....	38
<i>Obr. 3.4</i> CNC tabulové nůžky DURMA MS 2504 [vlastní zdroj] .....	39
<i>Obr. 3.5</i> Výstřížek z plechu CR 180 BH ZM 40/40 E-O [vlastní zdroj] .....	39
<i>Obr. 3.6</i> IR aparát Infracytic NG1 pro kontrolu olejové vrstvy [vlastní zdroj] .....	40
<i>Obr. 3.7</i> Prací olej Anticorit PL 3802-39 LV [vlastní zdroj].....	40
<i>Obr. 3.8</i> Vytvrzené vzorky na sušárně BMT VENTICELL s fixačními sponami [vlastní zdroj] .....	41
<i>Obr. 3.9</i> Zkušební zařízení TIRA test 2300 osazené teplotní komorou [vlastní zdroj] .....	42
<i>Obr. 3.10</i> Znázornění zkoušky ČSN EN ISO 178 [vlastní zdroj] .....	43
<i>Obr. 3.11</i> Ukázka reprezentativních křivek závislosti napětí na protažení [vlastní zdroj].....	44
<i>Obr. 3.12</i> Padostroj INSTRON CEAST 9350 s teplotní komorou [vlastní zdroj].....	45
<i>Obr. 3.13</i> Přípravek s uloženým vzorkem namontovaný do padostroje [vlastní zdroj].....	46
<i>Obr. 3.14</i> Ukázka hledání krajních hodnot napětí pro výpočet $\sigma_{F20-80}$ [vlastní zdroj] .....	48
<i>Obr. 3.15</i> Ukázka reprezentativních křivek závislosti síly na čase [vlastní zdroj] .....	48
<i>Obr. 4.1</i> Graf pevnosti lepených vzorků při statických ohybových testech [vlastní zdroj].....	51

<i>Obr. 4.2 Graf pevnosti lepených vzorků při dynamických ohybových testech [vlastní zdroj]</i>	52
<i>Obr. 4.3 Graf pevnosti vzorků samotných plechů při tahových testech [vlastní zdroj]</i>	53
<i>Obr. 5.1 Srovnání deformací po statickém a po dynamickém ohybu [vlastní zdroj]</i>	55

## **Seznam tabulek**

<i>Tab. 3.1 Průměrné hodnoty a směrodatné odchytky veličin získaných tahovou zkouškou</i>	38
<i>Tab. 3.2 Naměřené hodnoty a statistické parametry <math>\sigma_{FM}</math> [MPa]</i>	44
<i>Tab. 3.3 Zjištěné hodnoty a statistické parametry <math>\sigma_{f 20-80}</math> [MPa]</i>	47
<i>Tab. 4.1 Vstupní hodnoty ANOVA testu se dvěma faktory s opakováním</i>	50
<i>Tab. 4.2 Výsledek ANOVA testu se dvěma faktory s opakováním</i>	50
<i>Tab. 4.3 Výsledky dvouvýběrových párových t-testů</i>	51

## **Seznam rovnic**

(3.1) <i>Výpočet ohybové pevnosti pro vzorek na dvou podporách</i>	47
--	----

# Seznam příloh

Automotive

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 <sup>1</sup> 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>5</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.

### 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.



SikaPower®-494 G 1 / 2

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

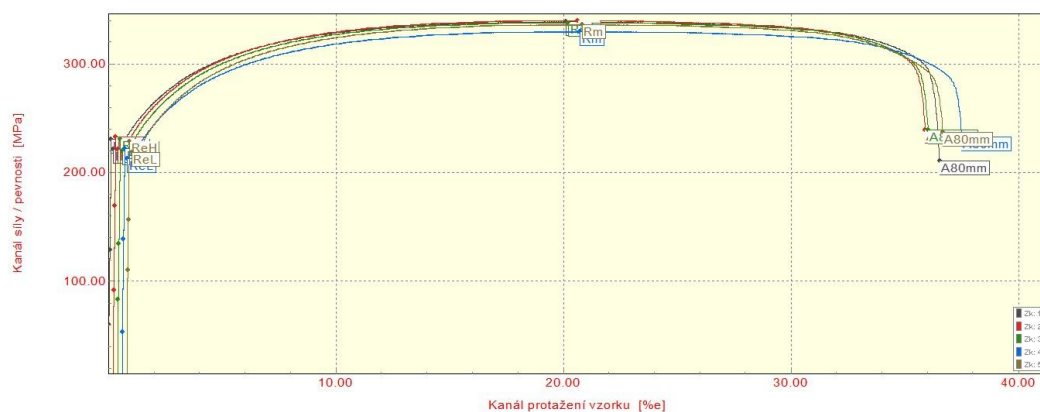
## VSTUPNÍ PARAMETRY

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 : Matěj Zemánek  
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	209437

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

*Příloha č. 2 Tahová zkouška vzorku samotného plechu při orientaci 0°*

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

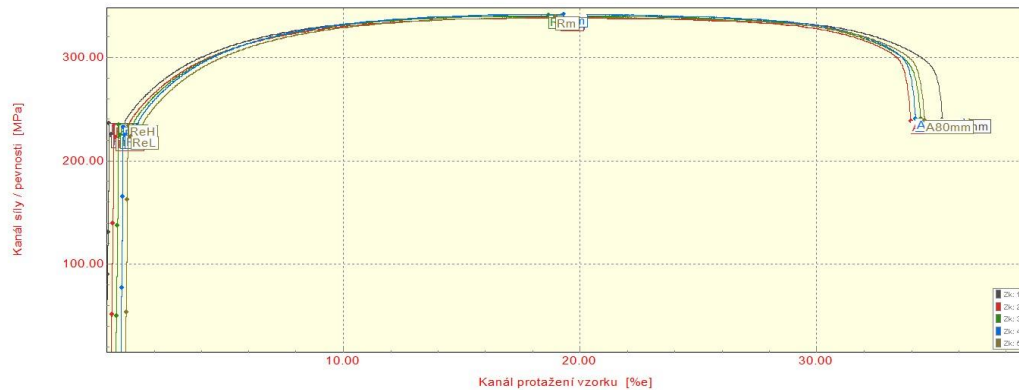
### VSTUPNÍ PARAMETRY

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 : Matěj Zemánek  
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

*Příloha č. 3 Tahová zkouška vzorku samotného plechu při orientaci 45°*



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

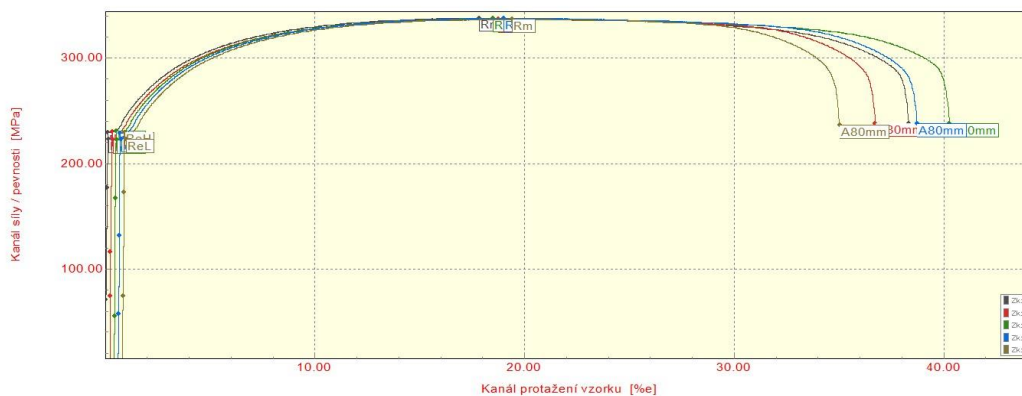
### VSTUPNÍ PARAMETRY

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 : Matěj Zemánek  
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. 4 Tahová zkouška vzorku samotného plechu při orientaci 90°*

# Produkt- I N F O R M A C E



## ANTICORIT PL 3802-39 LV

PI 3-4200

### Popis

ANTICORIT PL 3802-39 LV je nízkoviskózní olej typu Prelube - ochranný antikorozi olej s tvářecími vlastnostmi, bez obsahu baria.

ANTICORIT PL 3802-39 LV poskytuje velmi dobrou odolnost při venkovním skladování pod střešou (přístřeškem), v klimatické komoře a v kyselé atmosféře, zejména na citlivých površích pásové oceli válcované za studena.

ANTICORIT PL 3802-39 LV je snadno odstranitelný neutrálními a alkalickými čistícími prostředky. Na svislých plochách vykazuje optimální stabilitu filmu.

ANTICORIT PL 3802-39 LV se používá především v pračkách na svitky k čištění a konzervaci pásové oceli válcované za studena.

Při hmotnosti filmu cca 2 g/m<sup>2</sup> mohou být tvářecí operace prováděny bez dalších přídavných maziv.

### Použití

ANTICORIT PL 3802-39 LV lze nanášet nástřikem, ponořováním nebo naválcováním.

Je vhodný pro použití v běžných pračkách na svitky nebo na tabule.

Pro filtraci se doporučuje zahřátí produktu na minimální teplotu 40 °C.

### Charakteristika

Vlastnosti	Jednotka	Údaje	Zkouška dle
Zápach	-	mírný	-
Číslo barvy	-	4,0 kalné	DIN ISO 2049
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	890	DIN 51 757
Viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	17	DIN 51 562
Bod vzplanutí	°C	150	DIN ISO 2592
Pevné nečistoty	% hmotnosti	< 0,05	DIN 51 592
Stékavost	-	vyhovuje	E 14 *)
Odstranitelnost	-	vyhovuje	VW 52.02
Obsah aromátů v základovém oleji	% hmotnosti	< 10	Zkušební metoda VM **)
<b>Antikorozi vlastnosti (St 1405)</b>			
Klimatická komora	cykly	> 12	DIN 50 017 KFW
Solná komora	h	24	DIN 50 021 SS

\*) E 14 = zkušební metoda Adam Opel AG

\*\*\*) VM = zkušební metoda Vauxhall Motors Limited



# STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM

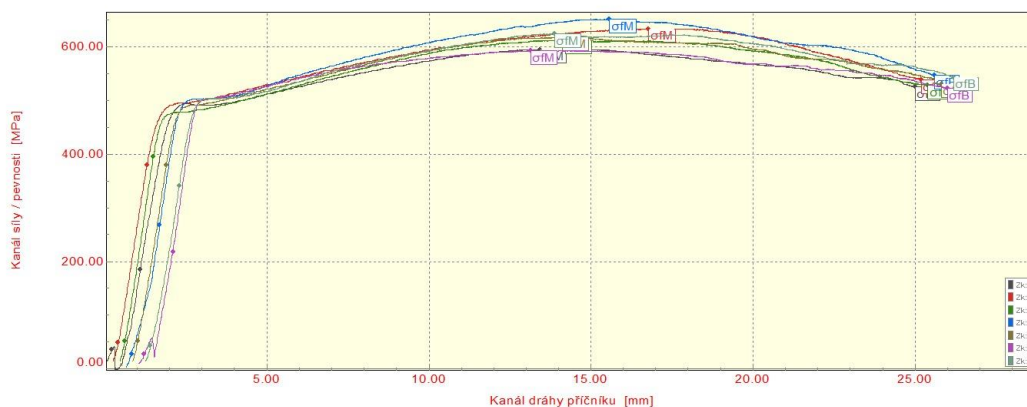
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH + SikaPower 494G - lepený spoj  
Rozměry vzorku : [1,55 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : -20°C  
Deformační rychlost : 50 mm/min.  
Vypracoval : Matěj Zemánek  
Datum provedení testu : 15.2.2024  
Pozn. : ---

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	b mm	h mm	L mm	$\sigma_M$ MPa
1	20.00	1.550	64.00	595.26
2	20.00	1.550	64.00	634.14
3	20.00	1.550	64.00	612.60
4	20.00	1.550	64.00	652.36
5	20.00	1.550	64.00	618.32
6	20.00	1.550	64.00	593.06
7	20.00	1.550	64.00	624.27

Statistika	b mm	h mm	L mm	$\sigma_M$ MPa
Průměrná hodnota	20.00	1.550	64.00	618.57
Směrodatná odchylka	0.00	0.000	0.00	21.00
Minimální hodnota	20.00	1.550	64.00	593.06
Maximální hodnota	20.00	1.550	64.00	652.36



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

*Příloha č. 6 Statická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty -20 °C*

# STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM

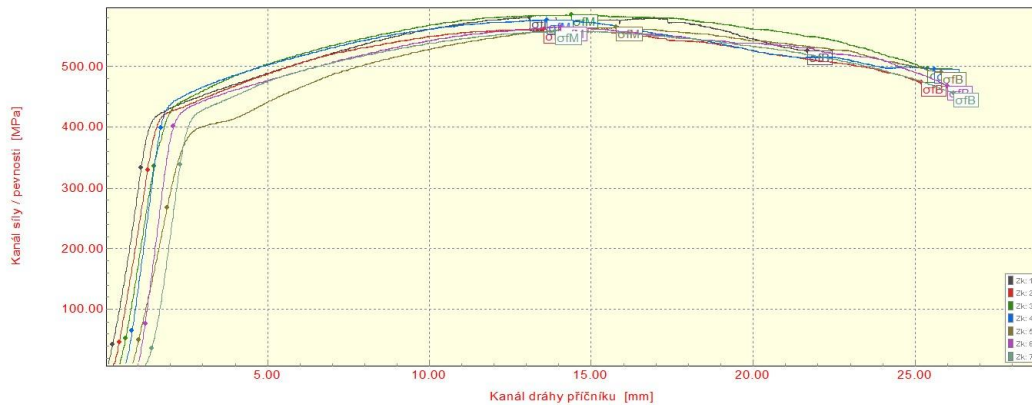
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH + SikaPower 494G - lepený spoj  
Rozměry vzorku : [1,55 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : RT  
Deformační rychlost : 50 mm/min.  
Vypracoval : Matěj Zemánek  
Datum provedení testu : 15.2.2024  
Pozn. : ---

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	b mm	h mm	L mm	$\sigma_{fM}$ MPa
1	20.00	1.550	64.00	580.44
2	20.00	1.550	64.00	561.02
3	20.00	1.550	64.00	585.59
4	20.00	1.550	64.00	576.40
5	20.00	1.550	64.00	564.29
6	20.00	1.550	64.00	564.97
7	20.00	1.550	64.00	557.50

Statistika	b mm	h mm	L mm	$\sigma_{fM}$ MPa
Průměrná hodnota	20.00	1.550	64.00	570.03
Směrodatná odchylka	0.00	0.000	0.00	10.71
Minimální hodnota	20.00	1.550	64.00	557.50
Maximální hodnota	20.00	1.550	64.00	585.59



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

*Příloha č. 7 Statická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty RT*

# STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM

## VSTUPNÍ PARAMETRY

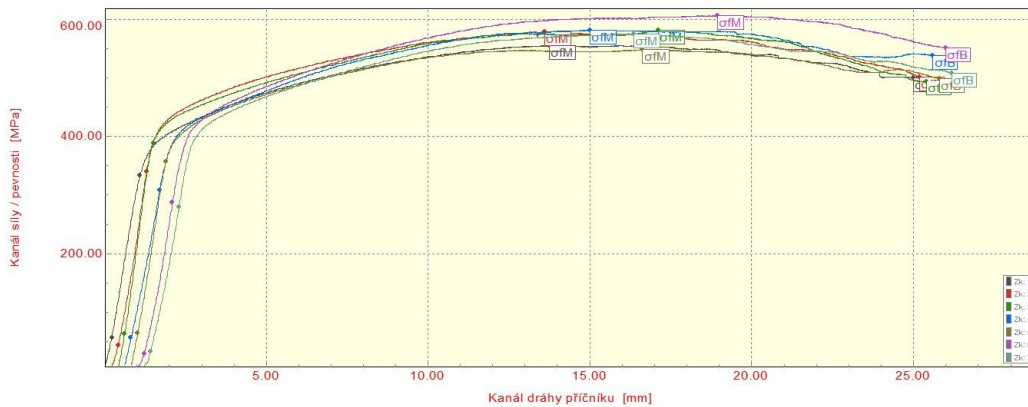
Název materiálu : CR180 BH + SikaPower 494G - lepený spoj  
Rozměry vzorku : [1,55 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 60°C  
Deformační rychlost : 50 mm/min.  
Vypracoval : Matěj Zemánek  
Datum provedení testu : 15.2.2024  
Pozn. : ---

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	b mm	h mm	L mm	$\sigma_M$ MPa
1	20.00	1.550	64.00	554.86
2	20.00	1.550	64.00	577.92
3	20.00	1.550	64.00	581.23
4	20.00	1.550	64.00	581.43
5	20.00	1.550	64.00	547.39
6	20.00	1.550	64.00	605.81
7	20.00	1.550	64.00	574.40

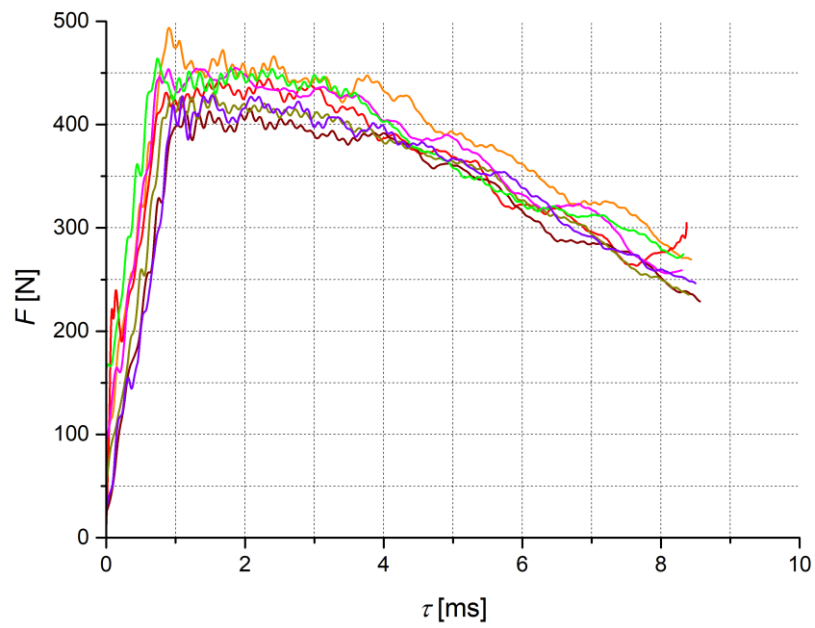
  

Statistika	b mm	h mm	L mm	$\sigma_M$ MPa
Průměrná hodnota	20.00	1.550	64.00	574.72
Směrodatná odchylka	0.00	0.000	0.00	19.17
Minimální hodnota	20.00	1.550	64.00	547.39
Maximální hodnota	20.00	1.550	64.00	605.81

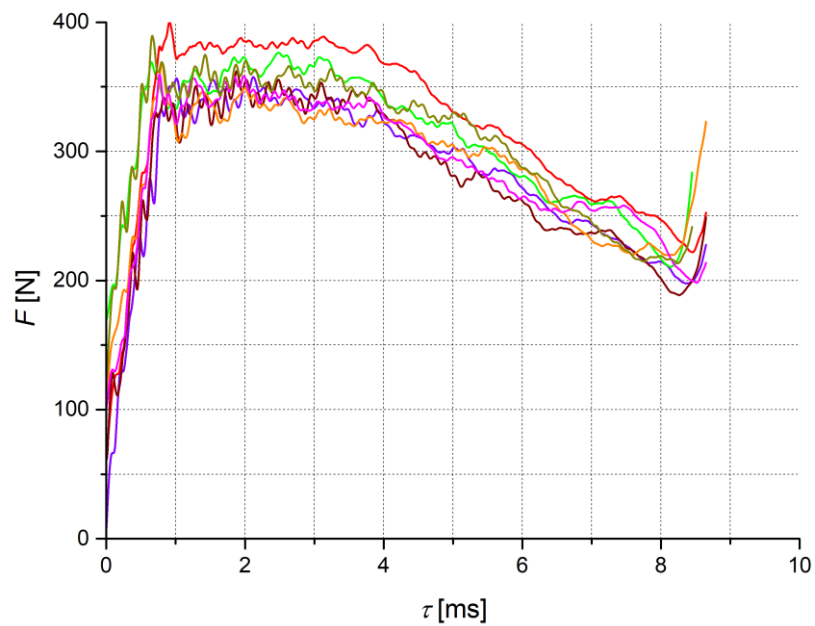


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

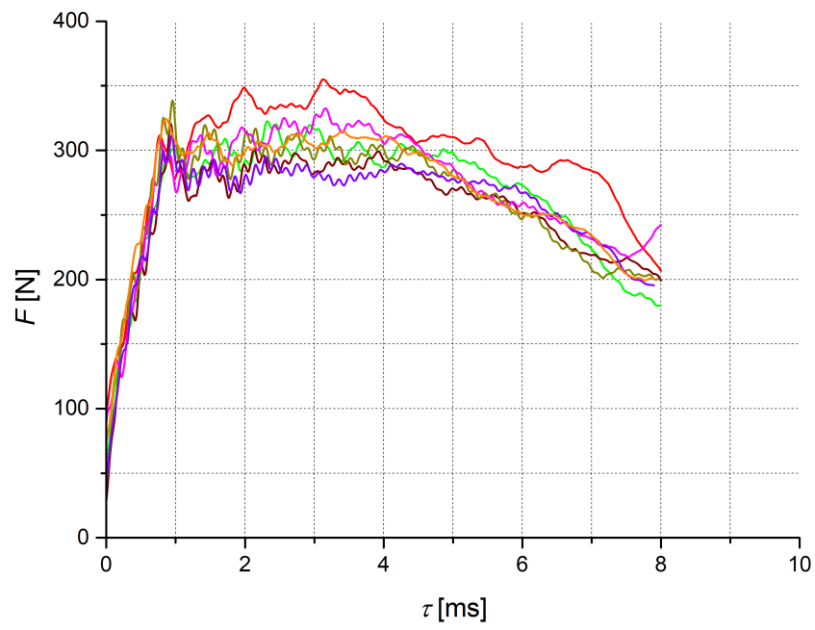
*Příloha č. 8 Statická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty 60 °C*



*Příloha č. 9 Dynamická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty -20 °C*



*Příloha č. 10 Dynamická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty RT*



*Příloha č. 11 Dynamická zkouška ohybem lepeného vzorku za teploty 60 °C*