

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**

**Výzkum vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou  
pevnost lepeného spoje**

**Diplomová práce**

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

**Autor práce:** Bc. Adam Uhlíř

Praha 2016

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Adam Uhlíř

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Výzkum vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje

Název anglicky

Research of influence of adhesive bonded material deformation on resultant strength of adhesive bond

---

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je výzkum vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje. Mezi dílčí cíle řešení diplomové práce patří provedení literární rešerše, na jejímž základě bude stanovena následná experimentální část diplomové práce. Diplomant připraví a následně experimentálně posoudí vliv různě deformovaných lepených materiálů na mechanické vlastnosti lepeného spoje. Na základě závěrů z výzkumu diplomant stanoví přínos pro oblast praktické aplikace technologie lepení.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

deformace, mechanické vlastnosti, lepený materiál, technologie lepení

---

Doporučené zdroje informací

ADAMS, R. D., COMYN, J., WAKE, W. C.: Structural adhesive joints in engineering. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997.

BROCKMANN, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley – VCH, 2009.

Časopis: International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Strojírenská technologie, Manufacturing technology atd.

EBNESAJJAD, S.: Adhesives technology handbook. Norwich: William Andrew, 2008.

LANCASTER, J. F.: Metallurgy of welding. Cambridge: Abington Publishing, 2001.

LOCTITE: Der Loctite. Worldwide Design Handbook. München: Loctite European Group, 1998.

MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004.

MITTAL, K. L.: Contact angle, wettability and adhesion. Boston: Brill Academic Publisher, 2003.

PACKHAM, D. E.: Handbook of adhesion. Chichester: John Wiley and Sons, 2005.

---

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 13. 4. 2015

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 26. 02. 2016

---

**Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Výzkum vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D., a všechny literární prameny, publikace a další zdroje jsem uvedl v seznamu použité literatury.

V Praze dne 24.3.2016

Podpis: .....

Bc. Adam Uhlíř

**Poděkování:**

Děkuji tímto vedoucímu práce doc. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za odborné vedení při vytváření této práce, za cenné rady, věnovaný čas a ochotu při konzultacích. A dále také děkuji pánům Milanu Klímovi a Miroslavu Markovi za pomoc při experimentálním měření.

Veliké poděkování patří v neposlední řadě také mé rodině a blízkým přátelům, bez jejichž motivace a podpory by tato práce vznikala jen velmi obtížně.

## **Výzkum vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje**

### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá problematikou technologie lepení. Jejím cílem je provedení a vyhodnocení experimentu na základě znalostí shrnutých v literární rešerši. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V první části jsou popsány obecné faktory ovlivňující pevnost lepených spojů, hlavní výhody a nevýhody technologie lepení a dále rozdělení lepidel. Druhá část se věnuje zkoumání vlivu deformace lepených materiálů na výslednou pevnost lepeného spoje. Je zde popsán a znázorněn pracovní postup a průběh zkoušky. Dále jsou zde uvedeny výsledky jednotlivých měření, které jsou zpracovány ve formě tabulek a grafů. Závěrem byly výsledky shrnuty a bylo provedeno celkové hodnocení měření.

**Klíčová slova:** deformace, mechanické vlastnosti, lepený materiál, technologie lepení

## **Research of influence of adhesive bonded material deformation on resultant strength of adhesive bond**

### **Summary:**

The diploma thesis deals with bonding technology, which aims to execution and evaluate an experiment based on knowledge summarized in the literature search. The work is divided into two main parts. The first part describes the general factors affecting the strength of bonded joint, the main advantages and disadvantages of bonding technology and distribution of adhesives. The second part is devoted to examining the impact of deformation of the bonded materials to final bonding strength. There is described and illustrated working procedure and testing procedure. There are presented results of individual measurements, which are processed in the form of tables and graphs. In conclusion the results were summarized and it was made an overall assessment of the measurement.

**Keywords:** deformation, mechanical properties, adhesive material, adhesive technology

## Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	CÍL PRÁCE A METODIKA.....	3
3	TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY LEPENÉHO SPOJE .....	5
3.1	Historický vývoj lepení.....	5
3.2	Základní pojmy .....	7
3.3	Faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje .....	9
3.3.1	Výběr vhodného lepidla.....	9
3.3.2	Příprava materiálu.....	10
3.3.3	Vhodná konstrukce .....	14
3.4	Výhody a nevýhody lepených spojů .....	23
3.4.1	Přednosti lepených spojů:.....	23
3.4.2	Limity lepených spojů: .....	24
3.5	Rozdělení lepidel .....	25
4	VÝZKUM VLIVU DEFORMACE LEPENÉHO MATERIÁLU NA VÝSLEDNOU PEVNOST LEPENÉHO SPOJE .....	29
4.1	Zkušební podmínky .....	29
4.1.1	Norma ČSN EN 1465 (Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech) .....	29
4.1.2	Norma ČSN ISO 10 365 (označení hlavních typů porušení lepeného spoje).....	32
4.1.3	Použitá lepidla .....	33
4.2	Použití přístroje a pomůcky.....	35
4.3	Příprava vzorků.....	37
4.4	Úprava vzorků před lepením.....	38
4.5	Proces lepení a fixace .....	41
4.6	Destruktivní zkouška .....	44
4.7	Zpracování výsledků.....	47

4.8	Vyhodnocení experimentu.....	50
5	ZÁVĚR.....	59
6	ZDROJE.....	61
7	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
8	SEZNAM TABULEK.....	65
9	SEZNAM ZKRATEK A JEDNOTEK.....	65
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	66



# 1 ÚVOD

V mnoha praktických aplikacích, je prakticky nemožné vytvořit celou řešenou konstrukci z jednoho kusu z důvodu vysokých nákladů a geometrických omezení. Řešením je výroba malých částí, které mohou být sestaveny dohromady později. Tento proces vlastní montáže vyžaduje použití spojů. Spoje jsou zcela zásadní pro přenos zatížení mezi jednotlivými částmi, jsou však omezovány určitými faktory ovlivňujícími výsledné možnosti použití vzniklých konstrukcí. Technologie lepení je díky svým specifickým vlastnostem v dnešní době jedním z nejvyužívanějších způsobů spojování materiálů a její využití lze proto nalézt prakticky v každém odvětví průmyslu.

Diplomová práce se zabývá problematikou lepení, jejím hlavním úkolem je provedení a vyhodnocení experimentu, kdy jsou porovnávány pevnosti lepených vzorků s rozdílnou geometrií.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část tvoří ucelený teoretický přehled, kde jsou popsány nejdůležitější poznatky technologie lepení. Je zde uvedena stručná historie, dále je zde popsána celková podstata této technologie. Jsou zde popsány jednotlivé fáze probíhající v procesu lepení od přípravy povrchu, přes nanášení lepidla až k fázi vytvrzování. Dále jsou zde popsány faktory ovlivňující pevnost lepených spojů. Následně jsou zde uvedeny výhody a nevýhody při aplikaci této technologie. Ke konci této části je uvedeno rozdělení jednotlivých druhů lepidel společně se stručným popisem jejich základních vlastností.

Experimentální část diplomové práce vychází z předpokladu, že působ namáhání je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících pevnost lepeného spoje. Práce se bude věnovat testování jednoho z nejtypičtějších způsobů zatěžování; zatěžování smykem v tahu. Pro tento způsob je nejvíce používán jednostranně přeplátovaný spoj, pro jednoduchou montáž a nízké náklady na zpracování. Nežádoucí je však neaxiální zatížení, které u tohoto spoje vzniká, v jehož důsledku dochází při zatížení k roztržení spoje. Předpokladem práce je, že úpravou tvaru lepených materiálů, ještě před lepením, dojde ke snížení působení neaxiálních sil na spoj a tím bude zvýšena únosnost spoje. Prakticky budou zkoušeny vzorky, které budou od hlavní osy zkušebního tělesa odkloněny o úhly  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  a  $30^\circ$ .

V práci bude využito technologické tahové zkoušky s řízenou deformací. Zkouška bude probíhat a bude vyhodnocena za podmínek stanovených technickou normou ČSN EN 1465. Bude zde využito sedm kovových vzorků pro každou jednotlivou deformaci a každé jednotlivé lepidlo. Lepidla budou v práci využita tři, pro lepší přehlednost a průkaznost výsledků.

V závěru experimentální části budou data ze zkoušek za pomoci statistických funkcí vyhodnocena a prezentována. Výsledkem bude potvrzení nebo vyvrácení daného předpokladu. Pro úplnost a přehlednost bude práce doplněna o obrázky a tabulky, v experimentální části budou výstupní data navíc doplněna o grafy se slovním popisem.

## **2 CÍL PRÁCE A METODIKA**

### **Cíl práce**

Cílem práce je provedení a vyhodnocení experimentu týkajícího se výzkumu vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje. Dílčím cílem řešení práce je provedení literární rešerše, na jejímž základě bude stanovena následná experimentální část. Literární rešerše bude obsahovat informace o technologii lepení, například: obecné faktory ovlivňující pevnost lepených spojů, hlavní výhody a nevýhody technologie lepení a dále rozdělení lepidel. V praktické části je cílem připravit a provést experiment vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost spoje. Na základě závěrů z experimentu bude stanoven přínos pro oblast praktické aplikace technologie lepení.

### **Metodika**

Práce vychází z předpokladu, že způsob namáhání je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících pevnost lepeného spoje. V současném průmyslu je nejvíce používán jednostranně přeplátovaný spoj, pro jeho jednoduchou montáž a nízké náklady na zpracování. Na druhou stranu dochází u tohoto spoje k nežádoucí situaci způsobené neaxiálním zatížením. Zvyšováním zatížení spoje dochází na obou koncích přeplátování ke zvýšení napětí a při dosažení kritického zatížení se spoj směrem od konců přeplátování ke středu naruší a dojde k roztržení spoje. Předpokladem práce je, že úpravou tvaru lepených materiálů, ještě před lepením, dojde ke snížení působení neaxiálních sil na spoj a zvýšení únosnosti spoje.

Experimentálně budou zkoušeny a hodnoceny vzorky, které budou od hlavní osy zkušebního tělesa odkloněny o úhly  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  a  $30^\circ$  a bude potvrzen nebo vyvrácen daný předpoklad. Celý experiment bude vycházet z rešeršní části a bude založen na principu normy ČSN EN 1465. V práci budou využita tři lepidla a měřeno bude vždy sedm spojů pro každý jednotlivý úhel.

Veškeré experimenty budou probíhat v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze.

Vzorky budou nastříhány z tabule plechu konstrukční oceli S235J0 na padacích nůžkách, následně budou naohýbány na příslušné úhly a označeny pro jednoznačnou identifikaci. Dále budou mechanicky upraveny otryskáním a poté chemicky očištěny acetonem. Po slepení budou zafixovány a minimálně na týden ponechány pro vytvrzení lepidla. Následně se připevní podložky umožňující uchycení do trhačoho stroje. Na trhačím stroji budou vzorky destruovány a výsledné hodnoty budou za pomoci statistických funkcí vyhodnoceny a prezentovány formou grafů a tabulek v závěru práce.

Detailní popis experimentu, norem, použitých materiálů, lepidel a přístrojů bude popsán v kapitolách "4.1 Zkušební podmínky" a "4.2 Použité přístroje a pomůcky". Vzorce a následné zpracování výsledků bude popsáno v kapitole "4.7 Zpracování výsledků". Shrnutí výsledků, tabulky a grafy budou uvedeny v kapitole "4.8 Vyhodnocení experimentu".

### **3 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY LEPENÉHO SPOJE**

V této části budou vysvětleny základní pojmy, uvedena stručná historie a bude zde nastíněna problematika po teoretické stránce. Budou zde popsány jednotlivé fáze probíhající v procesu. Dále zde budou popsány faktory ovlivňující pevnost lepených spojů, výhody a nevýhody při aplikaci této technologie. Ke konci této části bude uvedeno rozdělení jednotlivých druhů lepidel společně se stručným popisem jejich základních vlastností.

#### **Podstata technologie lepení**

Lepení je jednou ze základních technologií spojování materiálů. Jedná se o nerozebíratelné spojení, kdy dochází ke spojení různých součástí prostřednictvím tenké vrstvy lepidla (tzv. film), které přilne k oběma lepeným plochám. Při tomto spojení se využívají adhezivní síly mezi lepidlem a lepenými materiály a zároveň kohezní síly lepidla. Způsoby lepení závisí na druhu použitého lepidla, konstrukčním řešení lepeného spoje, tvaru a velikosti součástí a celkovém technologickém postupu zhotovení lepeného spoje. Aby mohlo dojít k přilnutí lepidla, musí být lepidlo v okamžiku lepení vždy v kapalném stavu. Metodu je možné použít ke vzájemnému spojení stejných nebo různých materiálů.

#### **3.1 Historický vývoj lepení**

Technologie lepení je stará už tisíce let, avšak největšího pokroku dosáhla teprve za posledních několik desítek let, proto je považována za moderní technologii spojování materiálů.

Lepení používali lidé již v době kamenné, kdy pryskyřicí z bříz připojovali hroty kopí, harpun a seker. Později ve starém Egyptě používali k lepení ozdob rakví lepidla, která byla vyrobena ze směsi křídly a klišu. První nalezené důkazy o užívání lepidel pochází z doby okolo 6000 let př. n. l. Na archeologických nalezištích byly nalezeny rozbité keramické nádoby, které byly opraveny pryskyřicí a také sošky, které měly připevněné oči do očních důlků lepidlem, které vydrželo více než 6000 let. Lepidla již ve starověku neplnila pouze funkci spojovací, ale využívala se také k utěšňování a z dnešního pohledu tak plnila funkci tmelů. Babyloňané jako jedni z prvních používali pryskyřici pro utěsnění lodí.[1]

Ve starověku byly k lepení využívány; albumin získávaný ze zvířecích kůží, dextrin vyráběný z papyrusu a glutin vyráběný ze zbytků kůží a kostí. Římané například používali pro těsnění svých lodí dehtu a včelího vosku. Později se stali průkopníky používání vaječného bílku jako lepidla pro spojování zlatých fólií s papírem.[1]

V sedmnáctém století došlo k většímu rozšíření používání a výroby lepidel, když byly v Nizozemsku založeny první plantáže pro pěstování surovin potřebných pro výrobu klišu. Roku 1814 byl v Americe udělen první patent na výrobu lepidel, o devět let později, roku 1823 bylo ve Velké Británii patentováno první kaučukové lepidlo.[1]

Dalším důležitým bodem ve vývoji lepidel byl objev nitrace celulózy (v letech 1845 až 1846). Roku 1912 byl na obuvnické výstavě v Budyšině představen výrobní postup pro lepení obuvi, zahrnující také speciální stroje pro nanášení lepidla.[1]

Prakticky až do období druhé světové války byly využívány pouze materiály, které byly schopny lepidlo vsáknout (textil, kůže, papír, dřevo). Po tomto období došlo k objevům polymerů (epoxydy, polychloropren, butylkaučuk) a také byla objevena fenolformaldehydová pryskyřice modifikovaná polyvinylformalem. Tato pryskyřice pod názvem Redux umožnila společnosti de Havilland roku 1943 ve Velké Británii revoluci v technologii lepení. Redux umožnil výrobu letounu typu DH-103 Hornet. Jednalo se o letoun smíšené konstrukce ze dřeva a kovu, kde bylo využito lepení duralu na překližku a tím bylo dosaženo snížení množství dřeva. V sedmdesátých letech dvacátého století přešli na techniku lepení i ostatní výrobci letadel a začala se ve větší míře uplatňovat i v ostatních odvětvích průmyslu. Technologii lepení můžeme v současnosti nalézt ve všech odvětvích průmyslové výroby a nelze o ní již hovořit jako o podpůrné technologii.[1]

### 3.2 Základní pojmy

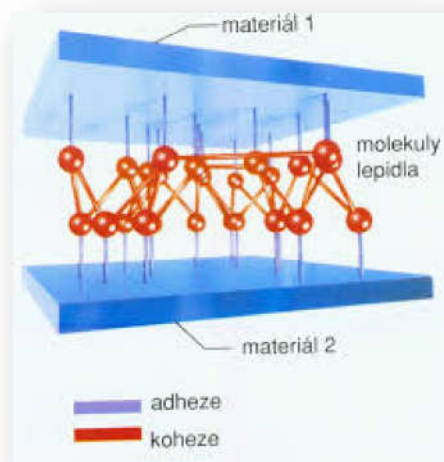
V této části budou vysvětleny a znázorněny základní pojmy.

**Adheze:** „(přilnavost) *Vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Adheze souvisí s molekulovou strukturou lepidla. Je výsledkem působení fyzikálních sil, mezimolekulárních a chemických vazeb.*“ [16]

**Koheze:** „(někdy též vnitřní adheze) je tzv. soudržnost. Charakterizuje stav látky (lepidla), ve kterém drží její částice pomocí mezimolekulárních a valenčních sil pohromadě. Velikost koheze udává tzv. kohezní energii, což je velikost energie potřebné k odtržení jedné částičky od ostatních.“ [16]

Adheze a koheze jsou znázorněny na obrázku č. 1.

Obrázek č. 1 Znázornění adhezních a kohezních sil [17]



**Adhezivo:** lepidlo[2]

**Adherend:** spojovaný materiál, na který se nanáší vrstva lepidla[2]

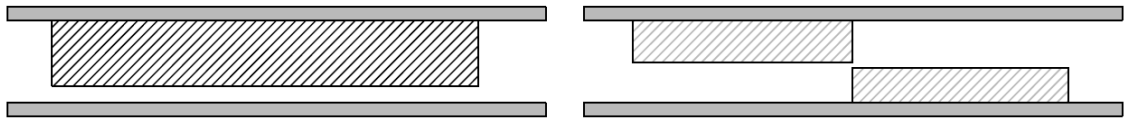
**Lepený spoj:** spojení dvou nebo více adherendů za použití lepidla[2]

**Film lepidla:** souvislá vrstva ztuhlého nebo vytvrzeného lepidla mezi adherendy[2]

**Pevnost:** jedná se o komplexní vyjádření vlastností adherendů, adheze a koheze lepidla, tedy pevnosti spoje. Obvykle je udávána smyková pevnost při zatěžování v tahu. Jednotkou je MPa = N/mm<sup>2</sup>. [1]

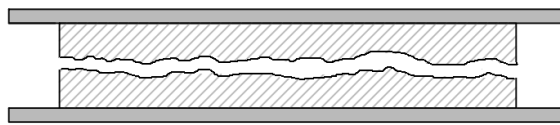
**Adhezní lom:** destrukce spoje, kdy trhlinka vzniká oddělením adheziva od adherendu. Znázorněn na obrázku č. 2. [2]

Obrázek č. 2 Adhezní porušení [zdroj autor]



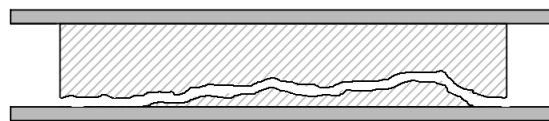
**Kohezní lom:** destrukce spoje, kdy trhlinka vzniká ve vrstvě adheziva. Znázorněn na obrázku č. 3. [2]

Obrázek č. 3 Kohezní porušení [zdroj autor]



**Smíšený lom (speciální kohezní lom, lom na hranici substrátu):** kombinace adhezního a kohezního lomu. Znázorněn na obrázku č. 4. [2,9]

Obrázek č. 4 Speciálně kohezní porušení [zdroj autor]



**Smáčivost:** charakterizuje povrchové napětí lepidla. Pro dosažení dobré smáčivosti je zcela zásadní, aby povrchové napětí kapaliny bylo menší než povrchové napětí smáčeného materiálu. [2]



### **3.3 Faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje**

Technologické postupy při lepení závisí z velké části na typu adherendu, přípravě povrchu a vhodně zvolené konstrukci. V této kapitole budou právě tyto faktory ovlivňující celkovou pevnost spoje vysvětleny.

#### **3.3.1 Výběr vhodného lepidla**

V současné době existuje značné množství nejrůznějších typů lepidel s různými materiálovými vlastnostmi a různými cenami. Do těchto lepidel se navíc podle potřeby mohou přidávat přísady, díky kterým můžeme zlepšit nejen materiálové vlastnosti, jako je mez pevnosti, mez kluzu nebo odolnost proti různým způsobům zatěžování, ale i odolnost proti rozpouštědlům a dalším negativním faktorům. Stanovení vhodného typu lepidla je dáno především druhem užití a požadovanými vlastnostmi lepeného spoje. Tyto faktory musí být zohledněny nejen pro výběr lepidla, ale také by měly být využity při vývoji nového lepidla a následný výběr aditiv.[3,6]

#### **Faktory ovlivňující výběr lepidla:**

- tvrdost a pórovitost lepeného materiálu,
- požadované mechanické vlastnosti spoje,
- teplota vytvrzení lepidla,
- teplota vhodná k užívání lepidla,
- odolnost proti chemikáliím, povětrnostním vlivům a UV záření,
- estetické nároky – barva, lesk,
- cena, atd.[3]

Jednotlivé druhy lepidel budou dále popsány v kapitole "3.5 Rozdělení lepidel".

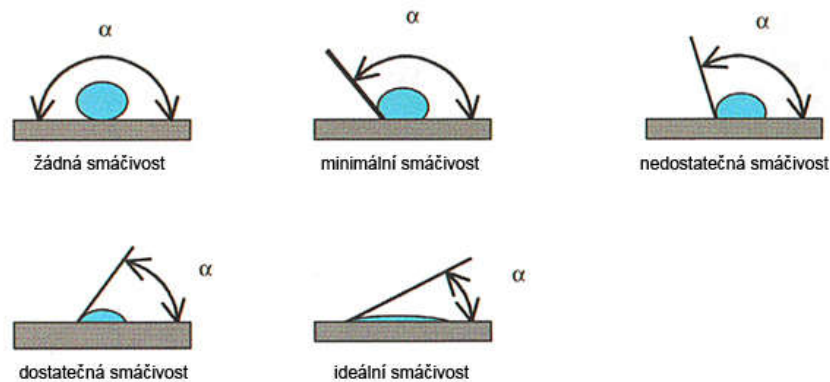
### 3.3.2 Příprava materiálu

Další ze zásadních faktorů ovlivňujících pevnost lepeného spoje je příprava materiálu. Obecně lze říct, že vlastnosti lepeného spoje jsou tím lepší, čím lépe je připraven povrch. Podle způsobu provedení lze přípravu rozdělit na fyzikálně mechanickou nebo chemickou. Nejvýhodnější je použití jejich kombinace.[1,32]

Při přípravě povrchu je důležité, aby na povrchu kovů nezbyly žádné nečistoty v podobě vrstev oleje, mastnot, okují a nežádoucích nerovností, které by zhoršovaly přilnutí lepené vrstvy. V této kapitole budou vysvětleny nejdůležitější faktory týkající se přípravy povrchu.[4]

**Smáčivost** - Jedná se o údaj charakterizující povrchové napětí lepidla. Pro dosažení dobré smáčivosti je zcela zásadní, aby povrchové napětí lepidla bylo menší než povrchové napětí materiálu. Smáčivost se určuje několika způsoby, nejčastěji však tzv. kapkovou metodou znázorněnou na obrázku č. 5.[2]

Obrázek č. 5 Kapková metoda [18]



Smáčivost lepidel

Samotná metoda se provede nanesením kapky o známém průměru na zkoušený odmaštěný materiál a pomocí optických přístrojů případně z fotografie se zjišťuje úhel ( $\alpha$ ).  $\alpha$  je úhel, který svírá tečna povrchu kapky a lepený materiál. Čím je menší kontaktní úhel  $\alpha$ , tím je lepší smáčivost a povrchové napětí materiálu větší. Pokud je smáčivost dobrá znamená to, že lepidlo je pro daný povrch vhodné.[2,4]

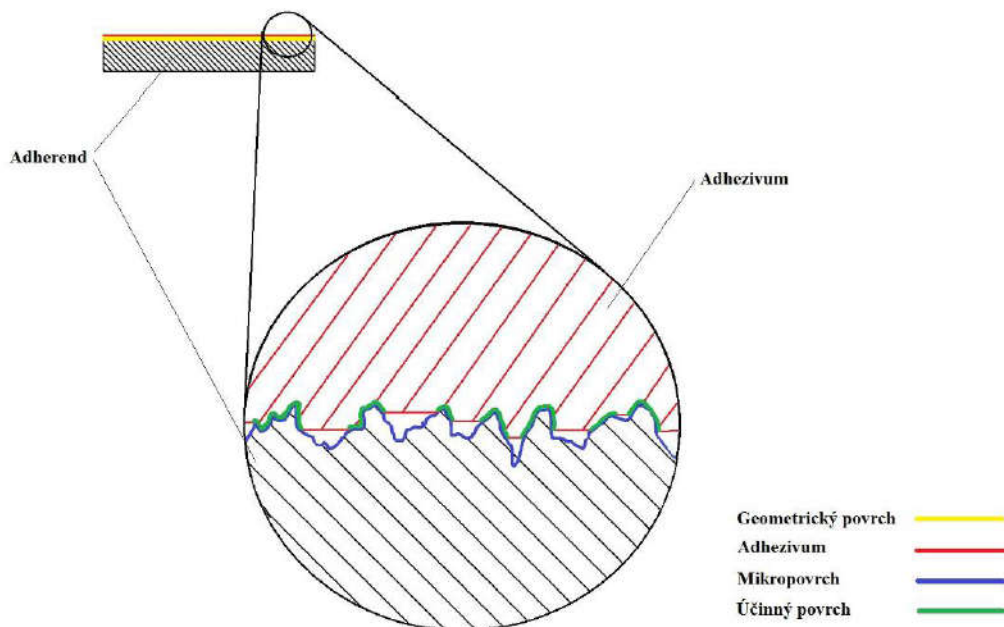
Smáčivost lepeného povrchu je dále ovlivněna vlivem nerovností, rychlostí smáčení lepeného povrchu a viskozitou lepidla. Nakolik pokryje lepidlo materiál, je závislé na konzistenci lepidla, čistotě a drsnosti povrchu.[2]

### Drsnost povrchu

Pevnost lepených spojů je ovlivněna velikostí a tvarem nerovností, ty jsou dány přirozenou strukturou materiálu, způsobem jeho výroby a také způsobem dodatečné povrchové úpravy. Pro vytvoření pevného spoje mezi tuhými materiály jsou nejvhodnější plochy jemně opracované, nevhodné jsou však plochy hlazené nebo leštěné. Praxí bylo zjištěno, že přiměřené zdrsňení lepeného povrchu má příznivý vliv na pevnost spoje zvětšením účinné plochy možného styku s lepidlem. Pro upřesnění je lepená plocha rozdělena na tři druhy povrchů (obrázek č. 6).[1,2]

- geometrický povrch - jedná se o vnější rozměry lepené plochy,
- mikropovrch – celková plocha včetně všech nerovností,
- účinný povrch – jedná se o část mikropovrchu, která je smáčena lepidlem.

Obrázek č. 6 Druhy povrchu adherendu [10]

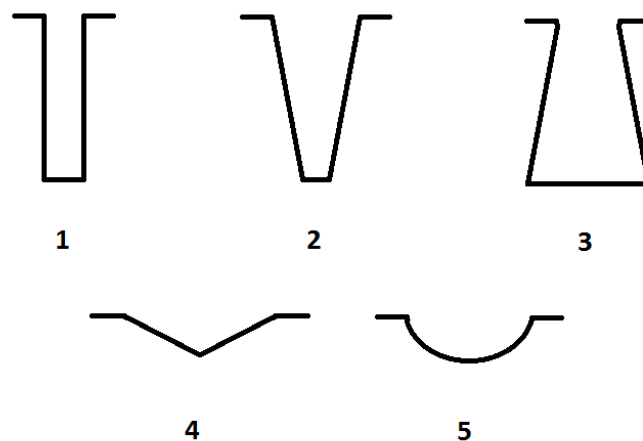


Pro většinu běžných lepidel jsou hodnoty optimálního zdrsnění uváděny pro parametr  $R_a$  (průměrná aritmetická úchylka profilu) v rozmezí 6 až 12  $\mu\text{m}$ . Tyto hodnoty odpovídají běžnému soustružení, frézování nebo hrubému broušení. Nejlepších výsledků se dosahuje otryskáváním lepených ploch korundovým, křemičitým nebo ocelovým pískem.[1,2]

Základní typy nerovností jsou schematicky zobrazeny na obrázku č. 7. Jedná se o tyto typy nerovností: [1]

1. válcová nerovnost,
2. kónická otevřená nerovnost,
3. kónická uzavřená nerovnost,
4. kónická plochá nerovnost,
5. miskovitá nerovnost.

Obrázek č. 7 Základní typy nerovností lepených ploch [1]



Úpravami drsností lepených materiálů, kterými se dosáhne většího mikropovrchu je často dosaženo vyšší pevnosti lepených spojů. Zde však platí, že ne každé zdrsnění povrchu zvýší pevnost lepeného spoje, protože rozhodujícím faktorem je povrch účinný a ne mikropovrch.[1]

### **Fyzikálně mechanická úprava**

Úprava se provádí za účelem získání určité požadované kvality povrchu, kterou hodnotíme jako drsnost (popsáno výše). Fyzikálně mechanická úprava napomáhá zvyšovat přilnavost lepidla, dochází k vyrovnávání hrubých povrchových nerovností a očištění materiálu od fyzických nečistot (okuje, staré nátěry, prach, vrstva oxidů, atd.).[1,5]

### Způsoby fyzikálně mechanické přípravy:

- **Broušení, smirkování a leštění** – převážně mechanické, případně ruční opracování např. brousící kotouče, brusiva, brousící pasty, prášky kdy dochází k odebrání třísek velmi malých průřezů.[1,5]
- **Tryskání** – nejčastěji se využívá kinetické energie pneumaticky urychlovaných částic abraziva, které způsobují na povrchu otryskaného materiálu plastické deformace povrchových vrstev. Tím dochází k odstraňování oxidů a nečistot. Charakter otryskání je dán tvarem tryskačního materiálu.[1,5]
- **Kartáčování** – povrch je opracováván mechanickým působením drátů kartáče. [1,5]
- **Obrábění** – z obrobku se materiál odděluje ve formě třísky břitem řezného nástroje.[1,5]
- **Ultrazvukové čištění** – materiál je čištěn působením akusticko-mechanických kmitů. [1,5]
- **Ozařování** (gama záření, ultrafialové záření) – na povrch materiálu působí světelné záření o určité vlnové délce.[1,5]

### Chemická úprava

Tato úprava se provádí za účelem odstranění látek bránících dobrému přilnutí lepidla k materiálu. Jde o konečnou úpravu před samotným lepením. Proto všechny materiály musí být dokonale očištěny a odmaštěny. Odstraňují se nečistoty ulpělé na materiálu (oleje, prachové částice, vazelíny, zbytky brousících a leštících past, atd.) a nečistoty vzniklé chemickou přeměnou materiálu (okuje, rez, jiné korozní produkty, atd.) Používají se k tomu technologie zvané odmašťování, leptání a moření.[4,5]

- **Odmašťování** – Způsob, při kterém se odstraňují ulpělé částice z povrchu materiálu. Neodmašťují se jen lepené plochy, ale celá součást. Při odmaštění pouze lepených ploch, vzniká riziko opětovného znečištění během manipulace. Používají se alkalická odmašťovadla nebo organická rozpouštědla. Prostředek se volí tak, aby nenarušoval odmašťovaný materiál. Metodu lze kombinovat s působením ultrazvuku.[1,5]
- **Leptání** - Způsob, kdy úpravou dochází k rozpouštění povrchu materiálu. Používají se například kyseliny.[1,5]

- **Moření** - Způsob přípravy, kdy se z povrchu kovů chemickými činidly odstraňují vrstvy oxidických nečistot. Kyseliny pronikají trhlinami a póry v okujích, které následně rozpouští.[1,5]

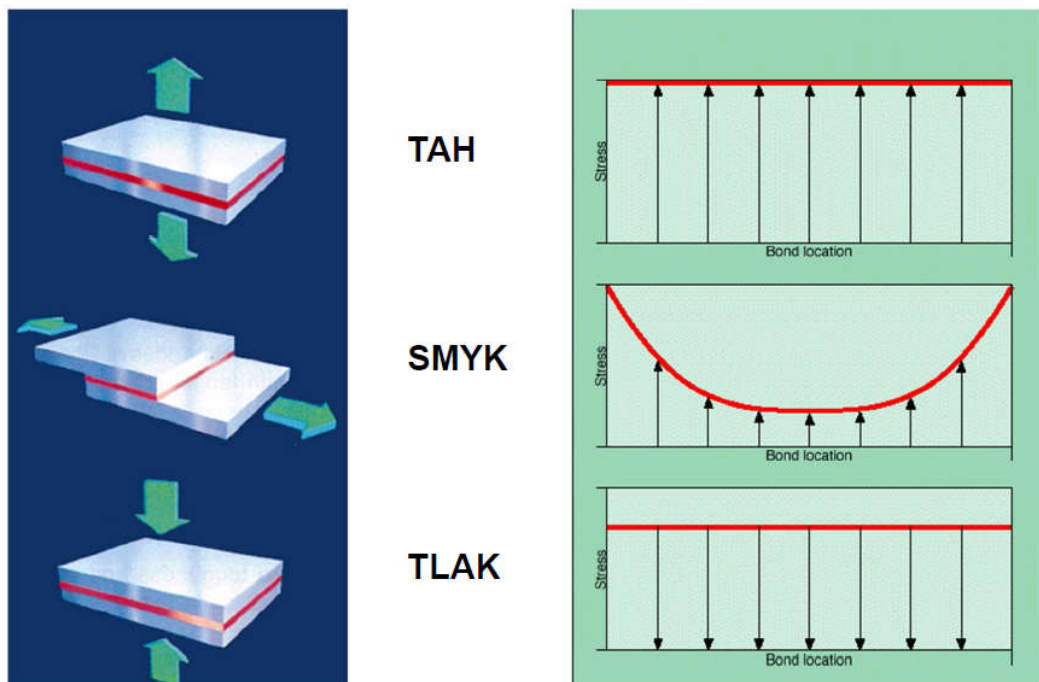
Především u kovů je nutné dodržet po úpravě časovou lhůtu, ve které musí dojít k jejich slepení. Při jejím překročení dochází opět k degradaci surového povrchu materiálu probíhající oxidací. V praxi se udává délka této doby 2 hodiny.[1]

### 3.3.3 Vhodná konstrukce

#### Způsob namáhání

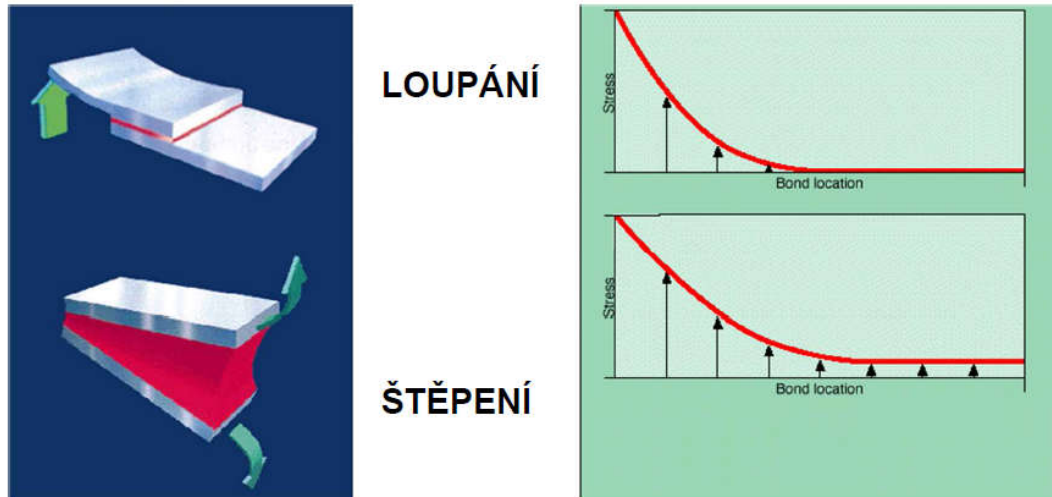
Způsob namáhání je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících pevnost spoje. Spoje mohou být zatěžovány staticky nebo dynamicky. Lepidla jsou svými materiálovými vlastnostmi navrhována především pro čtyři typické způsoby zatěžování: **tahem**, **tlakem**, **smykem** a **odlupováním**. Lepený spoj dobře drží při namáhání v **tahu**, **tlaku**, případně při namáhání ve **smyku**. Znázornění vhodných typů namáhání je na obrázku č. 8. Spoj je však málo vhodný při namáhání na **odlupování** nebo **štěpení**, znázorněno na obrázku č. 9.[4,15]

Obrázek č. 8 Vhodné typy namáhání a rozložení napětí ve spoji [15]



Odlup je specifický způsob zatěžování, jedná se kombinaci namáhání smykem a ohybem, kdy vzniká bod nebo linie, kde dochází ke koncentraci napětí vyvolanému zatěžujícími silami. Při tomto extrémním případě snadno vzniká porušení lepeného spoje, po kterém dochází k rychlému šíření trhliny.[4,15]

Obrázek č. 9 Nevhodné typy namáhání a rozložení napětí ve spoji [15]



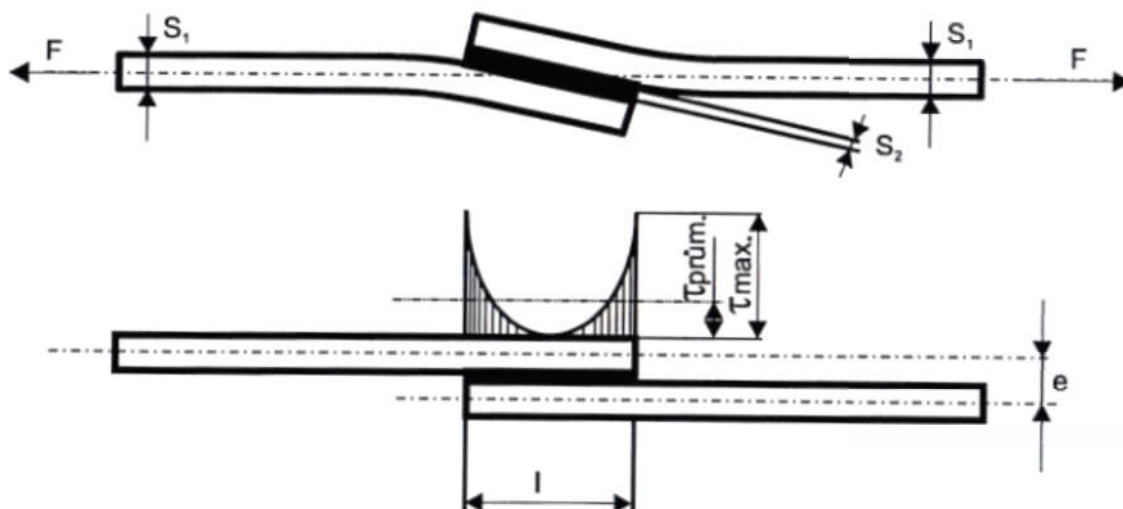
Tyto charakteristické způsoby zatěžování se většinou objevují v různých kombinacích (např. tah – smyk, odlup – tah). Ve speciálních případech se však s těmito zatěžovacími stavy můžeme setkat samostatně (např. čistý tah nebo čistý smyk).[1,4]

### Přeplátované spoje

Téměř ve všech případech lepených spojů se v současném průmyslu nejvíce používá jednostranně přeplátovaný spoj pro jeho jednoduchou montáž a nízké náklady na zpracování. Při namáhání v tahu musí být převedena tahová síla z jedné součásti do druhé přes vrstvu lepidla (tzv. film). V současné době existuje velké množství literatury zabývající se zlepšením pevnosti spoje změnou tvaru součástí, nebo modifikací lepidla. [11]

V případě použití základního přeplátovaného spoje dochází k nežádoucí situaci způsobené neaxiálním zatížením. Při zvyšování zatížení spoje dochází na obou koncích přeplátování ke zvýšení napětí a v některých případech i k postupné deformaci lepených materiálů. Následně při dosažení kritického zatížení se spoj směrem od konců přeplátování ke středu naruší a dojde k roztržení spoje. Obecně platí, že k roztržení dochází tím dříve, čím větší je deformace lepených částí. Z obrázku č. 10 je zřejmé, že nesouosostí sil dochází ke vzniku ohybového momentu. [3]

Obrázek č. 10 Průběh napětí ve spoji (kombinace tah + ohyb) [2]

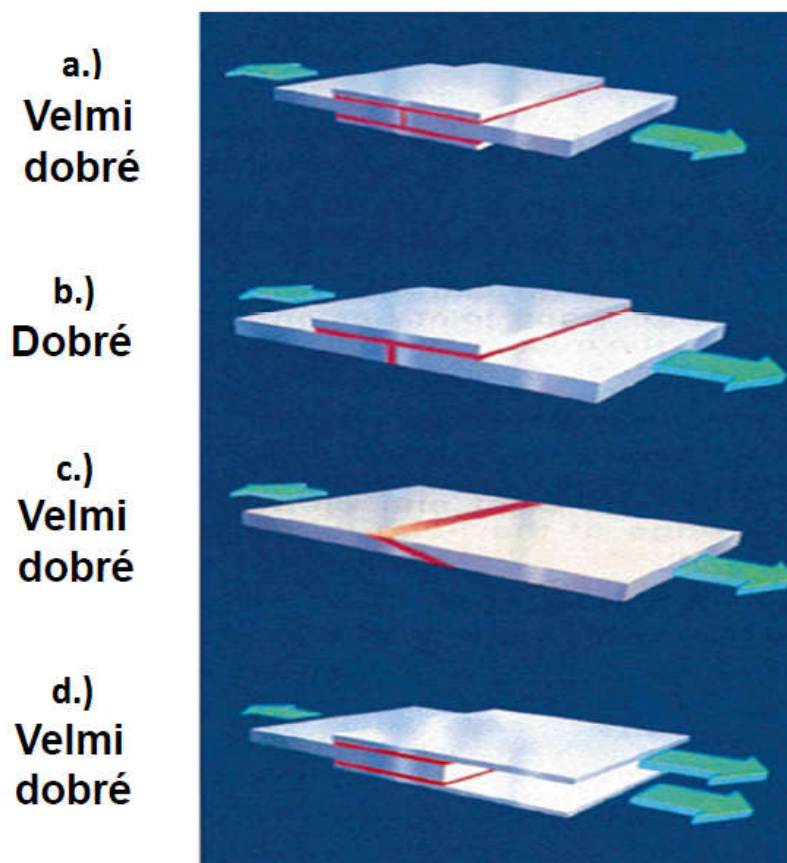


Obecná řešení pro zvýšení pevnosti ve spoji jsou následující:

1. **Změna lepených materiálů** – lze použít pouze za předpokladu, že v dané situaci lze volit lepené materiály. V praxi však většinou tato varianta není umožněna s ohledem na určité předem požadované vlastnosti lepených materiálů.[4,14]
2. Zabránění působení excentrických sil **úpravami lepeného spoje** (obrázek č. 11): volbou **jednostranného přeplátování**, **dvojitého přeplátování** nebo **dvojitého překrytí**, kde dochází k vyrovnání sil. Dalším dobrým způsobem je **zkosené překrytí**, zde jsou čela lepených materiálů zkosená o úhel  $30^\circ$  a lepena přímo na sebe.[3,15]

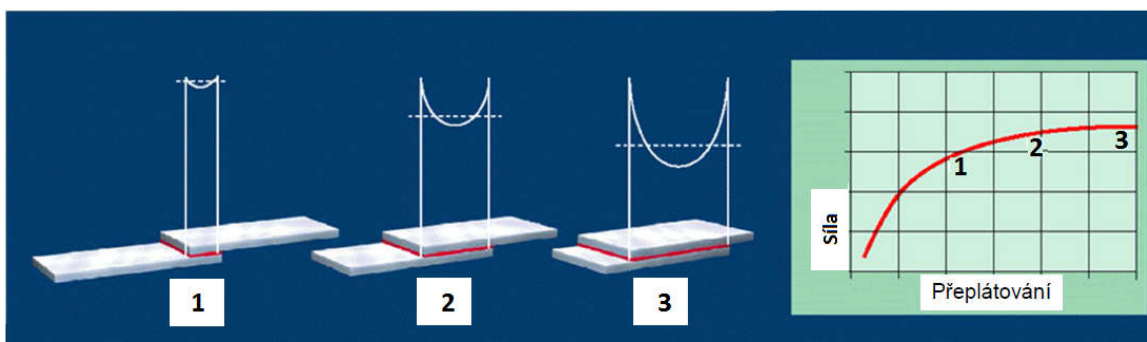


Obrázek č. 11 Možnosti konstrukce spojů předcházejících nesouososti sil [15]



3. **Rozšířením spoje:** Zvětšením šířky přeplátovaného spoje dojde úměrně ke zvětšení zatížení, při kterém dojde k porušení spoje. Nerovnoměrnost napětí ve spoji zde zůstává stejná. Druhou možností je změna délky přeplátování. Zde je však problém se skutečností, že prodloužením přeplátování se od jisté délky již nezvyšuje pevnost spoje. To je způsobeno koncentrací napětí ve špičkách na začátku a konci spoje, kde dochází k největšímu namáhání. Střední část je namáhána podstatně menší silou, (obrázek č. 12).[4,12,15]

Obrázek č. 12 Vliv délky přeplátování na celkovou pevnost spoje [15]



4. **Optimalizováním přeplátování spoje:** Optimalizací se zde rozumí zvolení vhodnější konstrukce.

Jednou z možností je vytvoření optimálního **předem tvarovaného úhlu**

#### Výpočet teoretického optimálního předem vytvořeného úhlu

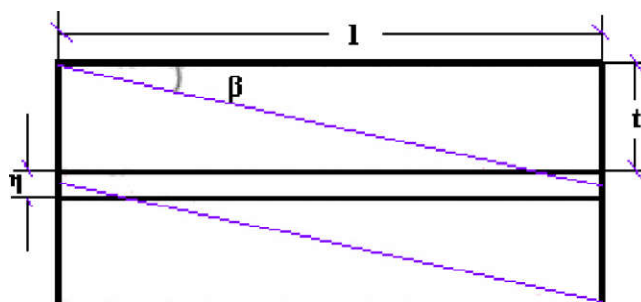
Standardní jednostranně přeplátovaný spoj byl zkoumán Min You, Zhi Li, Xiao-ling Zheng a kolektivem [11]. Je-li tloušťka lepeného materiálu  $t$  (2 mm) a tloušťka lepidla  $\eta$  (0,2 mm), a zatěžující síla  $F$ , je možné vypočítat působící ohybový moment  $M$  podle vzorce:

$$M = F \left( \frac{t}{2} \right) k \quad (1)$$

kde je:  $k$  ... součinitel ohybového momentu [11]

Pro úpravu vzorce a výpočet teoretického optimálního předem tvarovaného úhlu  $\beta$ , který zajistí optimální působení zatěžující síly, je potřeba znát délku přeplátování spoje. Konfigurace přeplátovaného spoje pro optimální zatížení je znázorněna na obrázku č. 13, kde  $l$  (12,5 mm) je délka přeplátování. [11].

Obrázek č. 13 Znárodnění konfigurace přeplátovaného spoje [11]



Vzhledem k tomu, že délka přeplátování  $l$  je mnohem větší, než je rameno vyvolávající ohybový moment, lze předpokládat, že vypočtený úhel bude velmi malý. (znázorněno na obrázku č. 13). Použitím matematického vztahu č. 1 uvedeného výše a jeho úpravami na vzorec č. 2 bylo zjištěno, že teoretický předem vytvořený úhel by měl být v tomto případě přibližně  $10^\circ$ . [11,12].

$$\beta \approx \arctan\left(\frac{t+\eta}{l}\right) = \arctan\left(\frac{2+0,2}{12,5}\right) = 9,98^\circ \quad (2)$$

kde je:  $l$  ... délka přeplátování  
 $t$  ... tloušťka lepeného materiálu  
 $\eta$  ... tloušťka lepidla [11,12]

Při experimentu, který provedli Min You, Zhi Li, Xiao-ling Zheng a kolektiv [11], kdy porovnávali napětí vznikající ve vrcholech lepidla pro vzorky s velikostí deformace  $0^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $10^\circ$  a  $15^\circ$  u vzorků s přeplátováním 25 mm, bylo zjištěno, že nejlepší výsledky bylo dosaženo při deformaci  $7^\circ$ . Při této deformaci bylo dosaženo o 64% vyšší meze pevnosti než u vzorků bez deformace U deformace  $10^\circ$  bylo dosaženo o 34,5% vyšší pevnosti a u vzorků s  $15^\circ$  deformací byla pevnost vyšší o 17,3%.

### Předem tvarovaný přeplátovaný spoj zvlněný

Obrázek č. 14 Zvlněný přeplátovaný spoj [12]

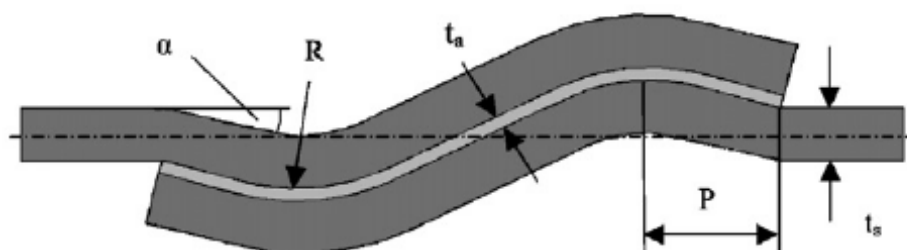
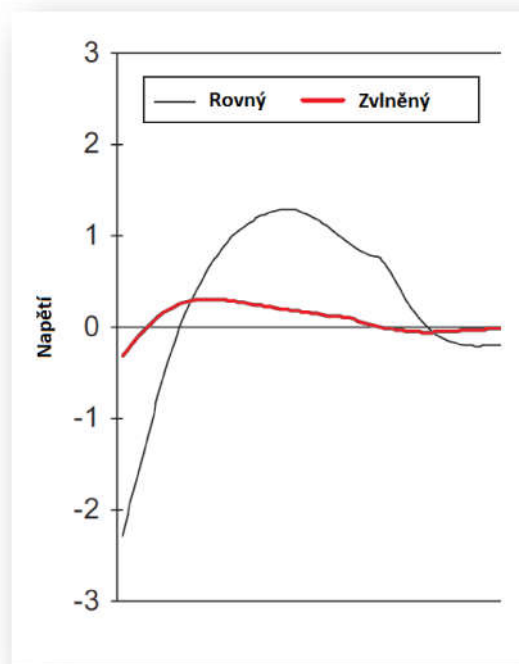


Schéma zvlněného přeplátovaného spoje, navrženého Zeng a Sun [14], je znázorněno na obrázku č. 14. Úhel  $\alpha$ , byl zvolen  $7^\circ$ , počáteční podíl přeplátování P byl zvolen na 25 % délky přeplátování a poloměr R, který byl zvolen 10 mm. Rozložení napětí, vznikajících při zatížení podél horizontální roviny u klasického přeplátovaného spoje a vlnitého spoje je znázorněno na obrázku č. 15. Kritické napětí vznikající tahem na konci klasického přeplátovaného spoje, je v případě zvlněného spoje nahrazeno napětím v tlaku a zbývající tahová napětí jsou rovnoměrněji rozložena v centrální oblasti spoje.[12,13,14]

**Obrázek č. 15 Rozložení napětí u klasického a zvlněného přeplátovaného spoje [12]**

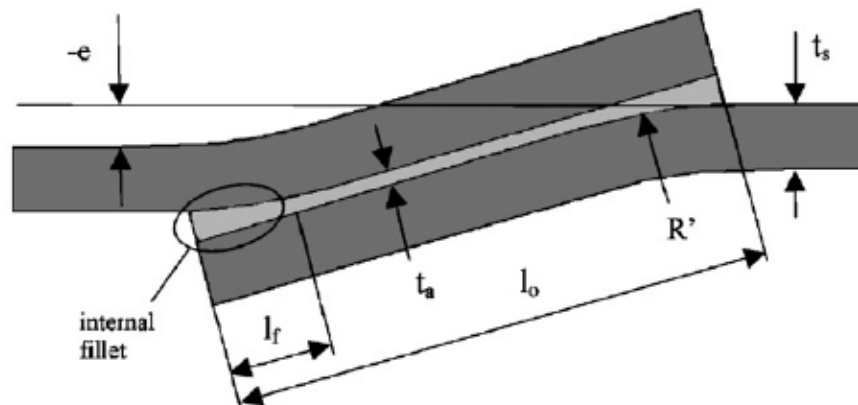


Zeng a Sun [14] předem nedefinovali přesnou geometrii potřebnou pro nejvhodnější únosnost spoje. Jejich experiment se zabýval parametrickou studií, kde proměnné zahrnovaly původní podíl na překrytí P, úhel  $\alpha$  a poloměr R. Experiment ukázal, že nejlepší konfigurace je pro relativně plochý spoj s úhlem  $\alpha$  ležícím v rozmezí mezi  $1^\circ$  až  $6^\circ$ . Dále bylo zjištěno, že nejlepších výsledků je dosahováno za předpokladu, kdy se minimální počáteční podíl přeplátování P činil méně než 14% z celkové délky přeplátování. S ohledem na celkovou geometrii vychází, že nejlepších výsledků je dosahováno s největším poloměrem vlny R, kterého lze prakticky dosáhnout.[12,13,14]

### Překlátovaný spoj s předem vytvořeným úhlem a prodlouženým překlátováním

Dalšími kdo studovali problematiku předem deformovaných překlátovaných spojů, byl Fessel, Broughton, a kolektiv [12]. Navrhli překlátovaný spoj, kde ponechali delší přesah, tedy délka přelepu byla delší než délka deformované části (obrázek č. 16).

Obrázek č. 16 Deformovaný překlátovaný spoj s prodlouženým překlátováním [12]



Oblast přesahu kde dochází při zatížení spoje ke vzniku ohybového momentu a tedy k největším napětím je zde popsána pomocí faktoru  $K$ . Výpočet faktoru  $K$  je uveden ve vzorci č. 3. V rámci tohoto experimentu byly zkoumány různé kladné a záporné hodnoty faktoru  $K$  v kombinaci s různými délkami přesahu  $l_f$  přelepu za účelem snížení napětí v oblasti přesahu.[12]

$$K = \frac{e}{t_s + t_a} \quad (3)$$

kde je:  $e$  ... excentricita  
 $t_s$  ... tloušťka spojovaného materiálu  
 $t_a$  ... tloušťka adheziva[12]

Zkoumáním různých kombinací bylo zjištěno, že nelze přesně vyjádřit který poměr a jaké hodnoty excentricity a délky překlátování jsou nejvýhodnější. Obecně však lze říci, že spojem s přesahem překlátování lze dosáhnout vyšších hodnot pevnosti než u spoje bez přesahu o 8% až 40%. Jak lze předpokládat, tento rozdíl byl více znatelný u křehkých lepidel, která jsou více citlivá na špičková napětí. Dále bylo prokázáno, že pevnost takového spoje je nejvíce závislá na adhezi lepidla, kdy deformované spoje bez přesahu selhaly nejčastěji z důvodu odlupování zatímco spoje s přesahem selhaly většinou smykem.[12,13]

## **Doba vytvrzování**

Jedná se o konečnou fázi technologie lepení skládající se z několika dalších fází. Na rozdíl od ostatních technologií spojování, jako jsou například nýtování nebo šroubové spojení, nedosahují lepené spoje maximální pevnosti ihned po zhotovení. Při nanášení lepidla na povrch materiálu je lepidlo povrchově aktivní. Po nanesení se odpařují rozpouštědla, lepidlo tuhne a začínají vytvrzovací reakce. Proto je doba od nanesení lepidla do přiložení lepeného materiálu časově omezena - jedná se o dobu otevřeného sestavení spoje. Tato doba nesmí překročit dobu pracovní životnosti lepidla. Dále se jedná o dobu uzavřeného sestavení spoje – časový interval od okamžiku spojení lepených dílů do okamžiku zatížení předepsaným tlakem (uveden od výrobce). Doba této činnosti by měla být co nejkratší. A poslední fází je zafixování slepené sestavy, které zamezuje změně polohy při vytvrzování. Celková doba potřebná pro vytvrzení závisí především na použitém adhezivu, jeho reaktivitě, síle nanesené vrstvy a je vždy udávána výrobcem.[2,3]

### 3.4 Výhody a nevýhody lepených spojů

Před výběrem vhodné technologie spojování materiálů a její aplikace na danou konstrukci je nutné porovnat přednosti a nedostatky jednotlivých technologií. V praxi jsou většinou vybírány technologie finančně nenáročné a efektivní. Technologie lepení tyto požadavky zcela jistě splňuje.

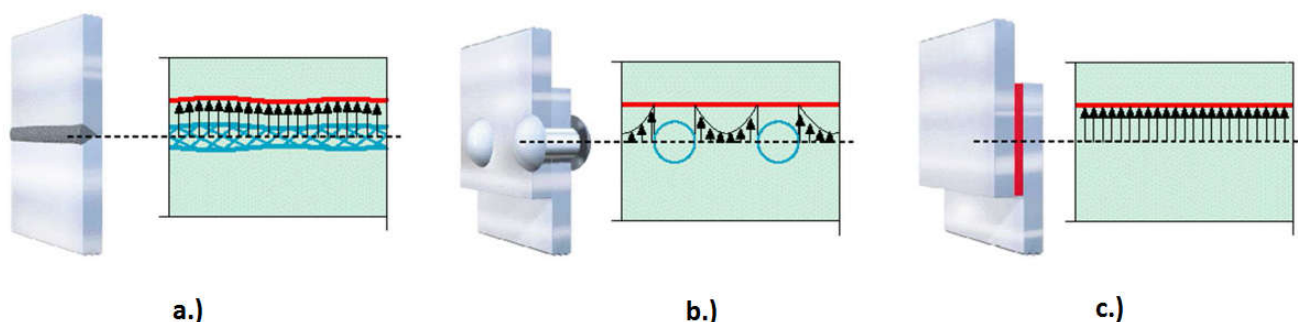
V posledních letech se stávají lepidla stále pevnější, odolnější a mají důležitou roli v moderním průmyslu i konstruktérství. Typy materiálů, které mohou být v současnosti lepeny, jsou prakticky neomezené. Obdobně jako všechny ostatní technologie spojování materiálů, tak i lepení se vyznačuje značnými výhodami oproti jiným metodám. Samozřejmě je nutné též počítat s limitujícími faktory. Ty je potřeba znát, aby bylo možné lepené spoje v dané kvalitě a za danou cenu nejen naprojektovat, ale také vyrobit. Níže jsou uvedeny obecné přednosti a nedostatky technologie lepení.[1,3]

Mezi hlavní přednosti patří možnost spojování různých druhů a tloušťek materiálů, aniž by byl ovlivněn základní materiál lepených částí a rovnoměrnost rozložení zatížení na rozdíl od dalších technologií spojování, jako je například svařování nebo nýtování. Porovnání rozložení zatížení je zobrazeno na obrázku č. 17. I přes všechny výhody závisí pevnost a únosnost lepeného spoje především na vhodně zvolené konstrukci.[1,3]

#### 3.4.1 Přednosti lepených spojů:

- možnost spojování stejných nebo různých materiálů bez ohledu na tloušťku,
- připravené spoje mohou být vodotěsné, plynotěsné, s dobrou elektrickou, tepelnou a zvukovou izolací,
- rovnoměrně rozložené zatížení
- nenarušují povrch materiálu, profil ani estetický vzhled,
- tlumí vibrace a zvyšují tuhost i vzpěrovou pevnost,
- téměř nezvyšují hmotnost souboru,
- vysoká pevnost ve smyku a rázu,
- zabraňují vzniku elektrolytické koroze kovových adherendů,
- průhledné, případně barevně přizpůsobitelné.[1,4,6]

Obrázek č. 17 Rozložení napětí při různých technologiích spojování: a.) svařování, b.) nýtování, c.) lepení [15]



Pro úplnost je ale také potřeba kromě předností, které byly již zmíněny výše, určit limitující vlastnosti lepených spojů. Při samotné konstrukci je třeba zajistit takové podmínky, aby limity lepení měly podřadný význam. Pokud toto nelze zajistit, je vhodnější vybrat jinou metodu spojování. Například v situacích, kde je velké nebezpečí odlupování, zajistí lepší výsledky svařování, nýtování, šroubování či pájení. Nejvýznamnější limity jsou uvedeny v přehledu níže.[1,3]

### 3.4.2 Limity lepených spojů:

- nerozebíratelné spoje,
- vysoké nároky na přípravu lepeného povrchu (rovinnost, čistota povrchu),
- nutné speciální úpravy povrchu u adherendů se špatnými adhezními vlastnostmi,
- citlivost na odlupování,
- potřeba použití vytvrzovacích přípravků u některých druhů lepidel (vícesložková lepidla),
- časově omezená životnost některých lepidel,
- maximální pevnosti se dosahuje až s určitým časovým odstupem,
- omezená odolnost proti vyšším teplotám u některých lepidel,
- náročnost na vybavení pracoviště při výrobě ve větším měřítku,
- tečení polymerních složek termoplastických lepidel v důsledku dlouhodobého statického namáhání.[1,4,6]



### 3.5 Rozdělení lepidel

V současné době existuje mnoho kritérií, podle kterých mohou být lepidla v technické praxi rozdělována. Podle rozdílných nároků uživatelů na chemické a fyzikální vlastnosti jsou do lepidel přidávána různá aditiva, z tohoto důvodu je toto rozdělení spíše orientační. Pro praxi se dále využívá mnohonásobně širšího rozdělení.

Nejobecnějším kritériem je dělení na základě **chemického složení**. Podle základní složky lepidla dělíme na **organická** a **anorganická**. Organická se dále rozdělují na lepidla **živočišného** nebo **rostlinného** původu. Mezi anorganická lepidla můžeme zařadit lepidla na bázi reaktoplastů, termoplastická, elastomerová a také směsná.[16]

Dalším hlediskem pro rozdělení může být teplota okolního prostředí, ve kterém dochází k tuhnutí. Při teplotách od 15 do 25 °C se jedná o **lepení za normální teploty**, při teplotách od 30 do 100 °C o **lepení za tepla** a při teplotách nad 100 °C o **lepení za horka**. [2,7]

Lepidla také můžeme dělit na **jednosložková** nebo **dvousložková**. Jednosložková obsahují ředidlo, jehož odpařením dochází k vytvrzení lepidla. Dvousložková tvrdnou působením tužidla, které se smíchá s lepidlem. Po promíchání obou složek dochází k rychlé reakci a je tedy nutné vzniklou směs zpracovat v předepsané době.[2,7]

Posledním zde zmíněným způsobem rozdělení je podle principu tuhnutí, tedy přechodu z kapalné fáze na fázi pevnou. Rozdělují se na čtyři hlavní skupiny a ty se dále rozdělují do podskupin.[2]

- I. **Lepidla tuhnoucí vsáknutím a odpařením rozpouštědel ve spoji** – K vytvrzení lepidla dochází vsáknutím a odpařením rozpouštědla, tím se vytvoří vrstva lepidla neboli film. Zásadním předpokladem pro tento způsob použití je poréznost a propustnost pro plyny alespoň u jednoho z adherendů. Lepidla vytváří tenký film a s výjimkou albuminových lepidel nevyplňují nerovnosti povrchů lepených materiálů.[2]
  - **Roztoková** - lepidlo je rozpuštěno ve vhodném rozpouštědle. Rozpouštědlem mohou být - voda, líh, aceton atd. Pro řádné vytvrzování je potřeba, aby alespoň jeden z lepených materiálů byl propustný pro páry

daného rozpouštědla. Pokud by toto nebylo umožněno, rozpouštědlo by zůstalo ve směsi se samotným lepidlem a to by setrvalo dlouhodobě v nezměněném stavu. Rozdělují se na **lepidla na vodní bázi** (*klihová, škrobová, minerální* atd.) a na **lepidla na bázi organických rozpouštědel** (*kaučuková, polyamidová, polystyrenová*, atd.).[3]

- **Disperzní** – dochází k jemné disperzi polymerů ve vodě. Po vsáknutí vody do základního materiálu a jejím odpaření vzniká souvislá vrstva slinutím částic lepidla. Tento proces vyžaduje dosažení minimální teploty pro vytvoření filmu, která se pohybuje podle typu lepidel okolo 10 až 12 °C. Např.: *asfaltové emulze, kaučukové latexy* atd.[1,2]

**II. Lepidla reaktivní** - jedná se o lepidla na bázi pryskyřic (epoxidových, fenolických, močovinových a melaninových), vhodná pro použití v průmyslovém měřítku. [2]

- **tuhnoucí vlivem vlhkosti prostředí** – reakce probíhá mezi lepidlem a vlhkostí základního materiálu, nebo mezi lepidlem a vzdušnou vlhkostí z okolního prostředí. V aplikační formě se jedná o monomery v kapalné nebo pastovité formě. Příkladem mohou být *kyanoakrylátová* nebo *silikonová* lepidla.[1,2]
- **tuhnoucí kontaktem s kovy** - v aplikační formě se jedná o kapalné nebo pastovité monomery. Vytvrzují se po zamezení přístupu vzduchu působením kovových iontů, které slouží jako katalyzátor pro tyto reakce. Příkladem jsou *akrylátová lepidla*. [1,2]
- **tuhnoucí po přidání tvrdidel (vícesložková lepidla)** - vytvrzují přidáním tvrdidla do základní složky lepidla. Nejčastějším typem jsou lepidla postavena na bázi epoxidových pryskyřic nebo polyuretanů. Jednotlivé složky jsou dodávány v samostatných obalech a k jejich mísení dochází těsně před použitím. Poměr jednotlivých složek je vždy udáván výrobcem lepidla. Příkladem jsou lepidla *epoxidová, fenolická* nebo *polyesterová*. [1,2]

**Epoxidová lepidla** jsou jakostní lepidla, která se používají k lepení mnoha různých materiálů. (kovy, sklo, keramika, atd.), a která mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti. Pevnost lepidel se pohybuje v rozmezí od 15 MPa (lepidla pro domácí použití) do 20 MPa (vysokopevnostní lepidla). Zpracování se provádí smícháním s tvrdidly v rozmezí od běžných teplot až po teplotu 200 °C. Nejpoužívanějším tvrdidlem za běžné teploty bývá diethylentriamin (tvrdidlo P1), případně dikyandiamid (tvrdidlo KP1) pro lepení za tepla. Doba zpracovatelnosti bývá nejčastěji v rozmezí 30 minut až 3 hodiny, podle druhu připravené kompozice. Manipulační pevnosti bývá dosaženo po 1 až 5 hodinách. Při lepení bývá lepidlo nanášeno na jednu z lepených ploch, tloušťka filmu by měla být v rozmezí 0,1 až 0,2 mm. Zafixování spoje by mělo být minimálním tlakem 0,02 MPa. Vlastnosti lepidel mohou být upravovány tvrdidly nebo dalšími přísadami. Přidáním přísad lze dosáhnout například prodloužení zpracovatelnosti směsi, vyšší pevnosti v odlupování nebo zvýšení odolnosti za tepla. Urychlení vytvrzení lepidel s běžnými tvrdidly se provádí přidáním vhodných urychlovačů.[1,2,7]

- **tuhnoucí zvýšenou teplotou** - v aplikační formě jsou to látky v kapalné nebo pastovité formě na bázi pryskyřic. Tvrdidlo je obsaženo v lepidle již z výroby. K aktivaci tvrdidla a následnému vytvrzování lepidla dochází obvykle při teplotách 80 až 200 °C. Používají se téměř výhradně v průmyslových aplikacích.[1,2]

**III. Lepidla tavná** – v běžných podmínkách se jedná o pevné látky termoplastického charakteru. V praxi bývají ve formě granulí, pásků nebo válcových tyček. Při zpracování se zahřáním roztaví, dojde ke zkapalnění a stanou se lepivými. Teplota závisí na druhu lepidla (běžně od 120 °C, případně až přes 240 °C). Po nanesení na spojovaný materiál a následném zchladnutí získají ihned manipulační pevnost. Příkladem mohou být lepidla *polyamidová, polyesterová a polyerhylonová*. [2,6]

**IV. Lepidla stále lepivá, citlivá na tlak** Jedná se o lepidla, která se v aplikační formě vyskytují v kombinaci s různými nosiči. V praxi se nejčastěji používají ve formě samolepicích jednostranných nebo oboustranných pásek nebo fólií. Doporučená teplotní hranice použitelnosti bývá běžně do 60 °C. Pro většinu materiálů platí, že pevnost tohoto spoje je daleko nižší než pevnost spojovaného materiálu, proto nejsou vhodné pro vytváření konstrukčních spojů. Manipulační pevnosti se dosahuje jen samotným přitlačením obou materiálů. [1,6] Pro kvalitní spojení musí být splněny následující podmínky:

- Adheze lepidla a povrchu lepeného materiálu musí být tak vysoká, aby umožnila vytvrzení jen nízkým tlakem vyvolaným rukou.
- Koheze vrstvy lepidla musí být větší než adheze působící mezi lepeným materiálem a lepicí vrstvou pásky, aby při odstranění pásky nezůstaly stopy lepidla na povrchu polepeného materiálu.
- Adheze lepicí vrstvy vůči nosiči musí být větší než adheze vůči lepenému povrchu. V opačném případě by při odlepení zůstávalo lepidlo na povrchu materiálu, na který byla páska přilepena.[1,3,7]

## **4 VÝZKUM VLIVU DEFORMACE LEPENÉHO MATERIÁLU NA VÝSLEDNOU PEVNOST LEPENÉHO SPOJE**

Experimentální část diplomové práce vychází z teoretických poznatků uvedených v rešeršní části. Pro potřeby práce bude zkoušena smyková pevnost v tahu tuhých adherendů na jednostranně přeplátovaných předem deformovaných tělesech. Základem jsou podmínky z normy ČSN EN 1465, některé však byly modifikovány za účelem názornějších výsledků experimentu. Na tuhé adherendy působí tahová síla, která je odkloněna od plochy lepeného spoje a hlavní osy zkušebního tělesa o úhly 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° a 30°.

Z ocelového plechu byly nastříhány vzorky, které byly poté ohýbány na příslušné úhly, následně mechanicky upraveny otryskáním a dále chemicky očištěny a odmaštěny. Byly použity tři různé druhy lepidla. Tím byla odstraněna chybovost z využití jednoho adherendu. Po vytvrzení spoje byly vzorky trhány na univerzálním zkušebním stroji. V průběhu zkoušky byla zaznamenávána síla, při které došlo k destrukci lepeného spoje zkušebního tělesa.

Cílem experimentu bylo ze získaných hodnot sestavit statistické vyhodnocení a na jeho základě uvést závěry zkoumané oblasti, ve které je posuzován vliv deformace lepených materiálů na pevnost vzniklého spoje.

Veškeré experimenty probíhaly v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty.

### **4.1 Zkušební podmínky**

#### **4.1.1 Norma ČSN EN 1465 (Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech)**

Norma předepisuje metodu pro stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech. Hodnocení se provádí na předepsaných vzorcích za předepsaných podmínek přípravy a zkoušení [8].

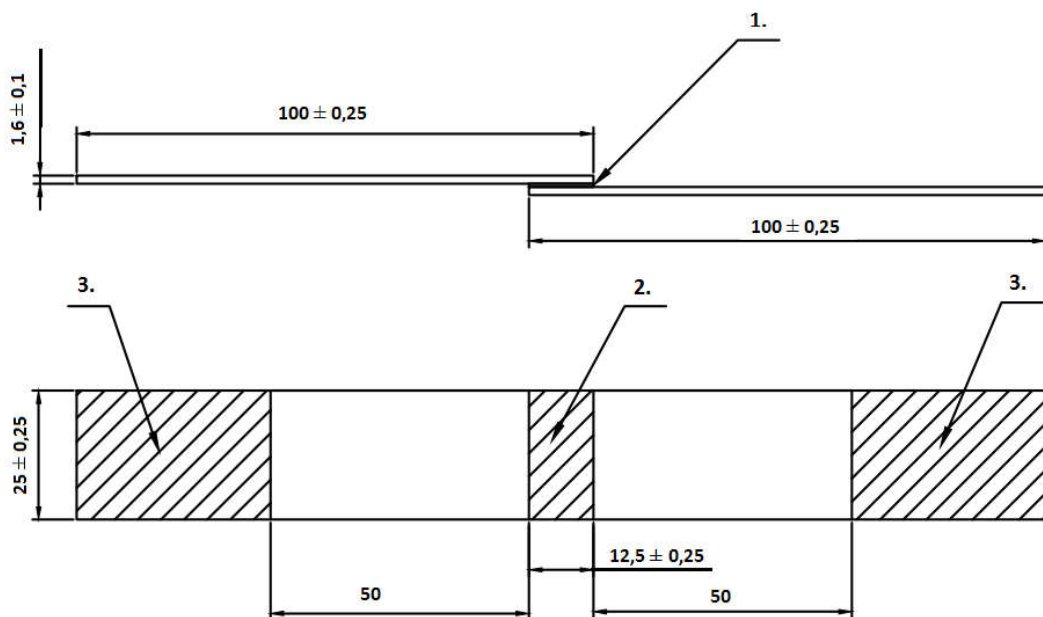
### Podstata metody:

Pevnost lepeného přeplátovaného spoje se stanoví smykovým namáháním jednoduchého spoje mezi tuhými adherendy, které jsou namáhány tahovou silou, ta působí rovnoběžně s lepenou plochou a hlavní osou vzorku. Výsledkem zkoušky je naměřená síla nebo napětí při porušení spoje. Zkušební přístroj musí být zvolen tak, aby k porušení spoje docházelo mezi 10 % až 80 % z celkového měřicího rozsahu přístroje. Zařízení musí vyvíjet rovnoměrnou tahovou sílu s konstantní rychlostí posuvu čelistí. [8]

### Zkušební tělesa:

Zkušební tělesa pro normu ČSN EN 1465 jsou uvedena na obrázku č. 18. Doporučená délka přeplátování je  $(12,5 \pm 0,25)$  mm. Rozměry zkušebních těles jsou  $100 \pm 0,25 \times 25 \pm 0,25 \times 1,6 \pm 0,1$  mm. Dále je stanoveno použití minimálně šesti spojů v jedné sérii. [8]

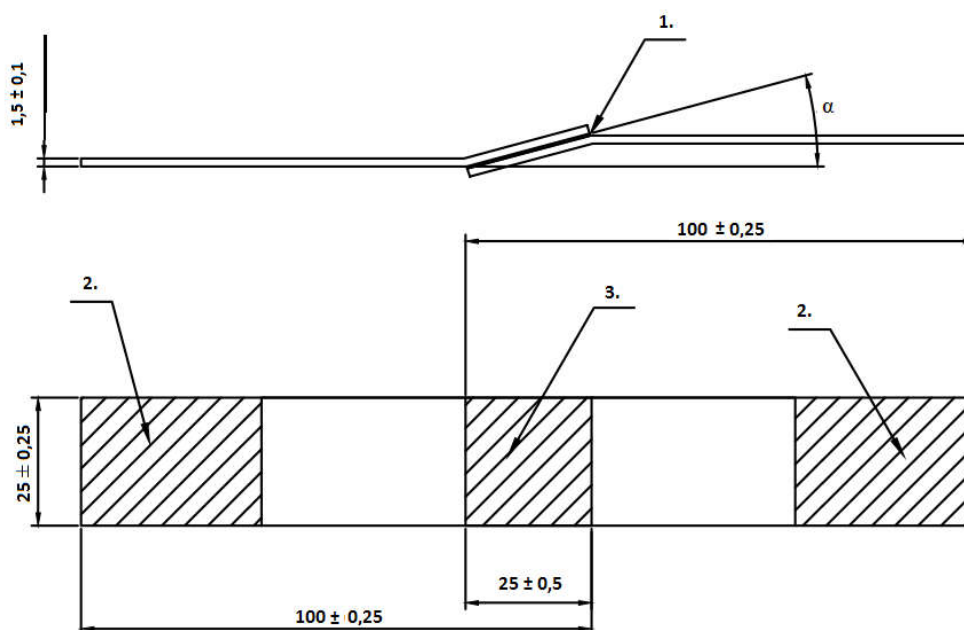
Obrázek č. 18 Zkušební těleso dle normy ČSN EN 1465 [8]



1. vrstva lepidla, 2. plocha smyku, 3. plocha pro upnutí do čelistí stroje

Pro potřeby experimentu byly navíc měřeny vzorky kde tahová síla působící na adherendy byla odkloněna od plochy lepeného spoje a hlavní osy vzorku o úhly  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  a  $30^\circ$ . Tento úhel je znázorněn na obrázku č. 19, je označen jako  $\alpha$ . Délka překlátování byla prodloužena a stanovena na  $(25 \pm 0,5)$  mm z důvodu prokazatelnějších výsledků experimentu. Tloušťka plechu byla zvolena 1,5 mm. V jedné sérii bylo použito 7 spojů.

Obrázek č. 19 Zkušební těleso pro potřeby experimentu [zdroj autor]



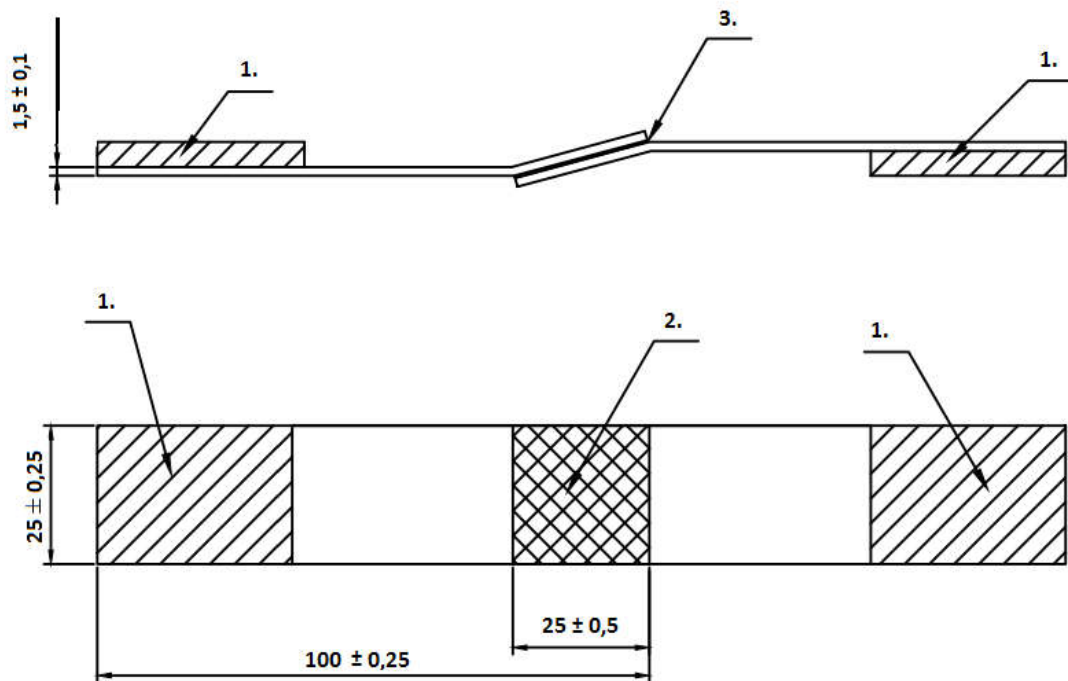
1. vrstva lepidla, 2. plocha pro upnutí do čelistí, 3. plocha smyku,  
 $\alpha$  úhel odklonění od hlavní osy vzorku

### Postup zkoušky:

Zkušební těleso se umístí symetricky do čelistí. Vzdálenost čelistí od bližšího konce překlátování je stanovena na  $(50 \pm 1)$  mm. Při měření se postupuje tak, že se čelisti od sebe oddalují konstantní rychlostí a tím vzrůstá napětí nebo deformace lepeného spoje. Norma stanovuje rychlost trhání na 6 mm/s. [8]

Při experimentu bylo navíc potřeba vyrobit a přidat podložky do čelistí, aby nedocházelo k předpětí při upínání do čelistí. Princip podložek je znázorněn na obrázku č. 20.

Obrázek č. 20 Princip podložek pro uchycení do čelistí [zdroj autor]



1. podložky, 2. plocha smyku, 3. vrstva lepidla

#### Vyjádření výsledků:

Výsledky jednotlivých zkoušek se vyjádří jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení ze všech platných těles v N, nebo jako napětí potřebné k porušení spoje v MPa. Poslední výsledek měření je typ porušení spoje podle normy ČSN ISO 10 365. [8]

Pro lepší přehlednost výsledků a pro potřeby grafů byly navíc v práci dopočítány statistické funkce; směrodatná odchylka a variační rozpětí.

#### 4.1.2 Norma ČSN ISO 10 365 (označení hlavních typů porušení lepeného spoje)

Norma uvádí označení hlavních typů poruch lepeného spoje, a graficky znázorňuje typ porušení podle obrázků. Označení typu porušení se používá za účelem lepšího posouzení výsledků mechanické zkoušky. Uvádí se zde procentuální podíl jednotlivých typů porušení. Označení "AF (50%) + CF (50%)" znamená, že vzniklé porušení je tvořeno z padesáti procent adhezivním a z padesáti procent kohezivním lomem. Znázornění možných typů porušení lepeného spoje je zobrazeno v kapitole "3.2 Základní pojmy". Může se jednat hlavně o tyto druhy poruch: [9]



- kohezní lom
- speciální kohezní lom, označováno též jako lom na hranici substrátu,
- adhezivní lom

#### 4.1.3 Použitá lepidla

Pro experimentální zkoušky byla zvolena tři různá lepidla běžně dostupná na našem trhu. Jedná se o dvousložkové epoxidové pryskyřice, které se před použitím musí mísit s tvrdidlem pro nastartování vytvrzovací reakce. Jedná se o **CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)**, **GLUEPOX RAPID** a **GLUEPOX RAPID F**.

##### CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)

Lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200) je dle technicko-aplikačního listu středněmolekulární epoxidovou pryskyřicí modifikovanou nereaktivním zvláčňovadlem. Neobsahuje ftaláty. Je určená pro zpracování při normální teplotě a tvrdí se polyamidickými tvrdidly (pro účely experimentu tvrdidlem **CHS-Tvrdidlo P11**) Využívá se k lepení kovů, skla, keramiky, porcelánu, dřeva, eternitu, výrobků z močovinoformaldehydových pryskyřic a jiných materiálů, dále k přípravě stěrkových hmot a tmelů. [19] Základní parametry uvádí tabulka č. 1.

**Tabulka 1 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)[19]**

Vzhled	nažloutlá až žlutá čirá silně viskózní kapalina
Hustota (g.cm <sup>-3</sup> )	1,15 (20 °C)
Viskozita (Pa.s)	30–80 (23 °C)
Viskozita (Pa.s)	20–60 (25 °C)
Obsah epoxidových skupin (mol.kg <sup>-1</sup> )	3,0–3,4
Epoxidový hm. ekvivalent (g.mol <sup>-1</sup> )	290–330
Celkový obsah chloru (%)	max. 0,5

Dále je v technicko-aplikačním listu udáván míšící poměr - 100 hmotnostních dílů CHS Epoxy 324 (Epoxy 1200) : 7 hmotnostním dílům tvrdidla P 11. Doba želatiny je při 23 °C udávána v rozmezí 30 až 50 minut v závislosti na připravovaném množství. Se zvyšující se hmotností natužené směsi se zkracuje. K zatuhnutí dochází během 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C a úplnému vytvrzení dochází po sedmi dnech při teplotě 23 ± 5 °C [19].

## GLUEPOX RAPID

Lepidlo GLUEPOX RAPID (složka A) je dle technicko-aplikačního listu nízkomolekulární epoxidová pryskyřice s přidavkem aditiv. Vyznačuje se vysokou tekutostí a zvýšenou rychlostí vytvrzování. Je určena pro zpracování při normální teplotě a tvrdí se speciálním polyamidickým tvrdidlem (složka B). Používá se pro lepení a zalévání široké škály substrátů, např. kovů, dřeva, betonu, přírodního a umělého kamene a keramiky. Je vhodné pro aplikace ve stavebnictví, například pro lepení a zalévání keramických obkladových materiálů nebo konglomerovaného kamene. Oproti polyesterovým lepidlům vykazuje minimální smrštění. Po vytvrzení se lepený spoj vyznačuje vysokou tažností, houževnatostí a je možné vystavit ho teplotnímu zatížení do 60 °C.[20] Základní parametry uvádí tabulka č. 2.

**Tabulka 2 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice GLUEPOX RAPID [20]**

Smyková pevnost v tahu tuhých adherendů	12,9 MPa
Pevnost ve smyku na hliníku, 23 °C	6,0 MPa
Vzhled složka A	nažloutlá viskózní kapalina
Vzhled složka B	světle žlutá kapalina s typickým zápachem po aminech
Hustota složka A	1,14 - 1,16 g/cm <sup>3</sup>
Hustota složka B	1,06 g/cm <sup>3</sup>
Spotřeba	1kg/m <sup>2</sup> při výšce vrstvy 1mm

Dále je v technicko-aplikačním listu udáván míšící poměr - 100 hmotnostních dílů složky A: 45 hmotnostním dílům složky B. Doba želatinace je při 20 °C udávána v rozmezí 6 až 10 minut v závislosti na připravovaném množství. K úplnému vytvrzení dochází po 24 hodinách při teplotě 20 °C [20].

## GLUEPOX RAPID F

Lepidlo GLUEPOX RAPID F (složka A) je dle technicko-aplikačního listu nízkomolekulární epoxidová pryskyřice s přidavkem aditiv. Vyznačuje se vysokou tekutostí a zvýšenou rychlostí vytvrzování. Je určena pro zpracování při normální teplotě a tvrdí se speciálním polyamidickým tvrdidlem (složka B). Konzistence lepidla je speciálně upravena tak, aby byla snížena jeho stékavost ze svislých ploch. Kompozici lze použít jako lepidlo nebo jako tmel. Používá se pro lepení a tmelení široké škály substrátů, např. kovů, dřeva, betonu, přírodního a umělého kamene a keramiky. Je vhodné

pro aplikace ve stavebnictví, například pro lepení keramických obkladových materiálů nebo konglomerovaného kamene. Oproti polyesterovým lepidlům vykazuje minimální smrštění. Po vytvrzení se lepený spoj vyznačuje vysokou tažností a houževnatostí.[21] Základní parametry uvádí tabulka č.3

**Tabulka 3 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice GLUEPOX RAPID F [21]**

Pevnost ve smyku na duralu, 23 °C	16,5 MPa
Pevnost ve smyku na duralu, 60 °C	5,3 MPa
Vzhled složka A	bílá tixotropní pasta
Vzhled složka B	světle tixotropní pasta s typickým zápachem po aminech
Hustota složka A	1,04 - 1,06 g/cm <sup>3</sup>
Hustota složka B	0,92 - 0,94 g/cm <sup>3</sup>
Spotřeba	1kg/m <sup>2</sup> při výšce vrstvy 1mm

Dále je v technicko-aplikačním listu udáván míscí poměr - 100 hmotnostních dílů složky A: 45 hmotnostním dílům složky B. Doba želatinace je při 20 °C udávána v rozmezí 9 až 10 minut v závislosti na připravovaném množství. K úplnému vytvrzení dochází po 24 hodinách při teplotě 20 °C [21].

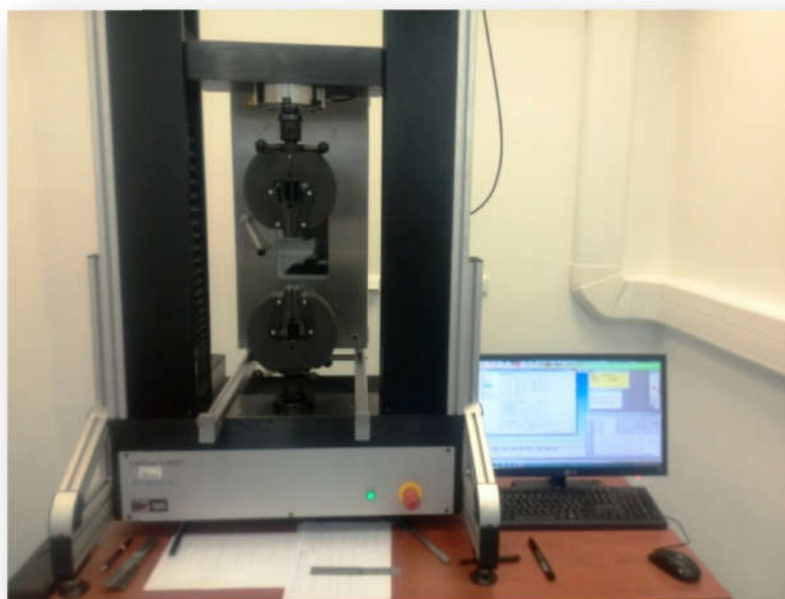
Dále bylo použito jednosložkové sekundové kyanoakrylátové lepidlo s velmi rychlým vytvrzovacím účinkem "Loctite super attak", které bylo využito pro přilepení podložek (viz kapitola "4.5 Proces lepení a fixace"). Jeho využití bylo pouze podpůrné a během experimentu nebylo silově namáháno.[22]

## **4.2 Použité přístroje a pomůcky**

### **Trhací stroji LabTest 5.50ST**

Jde o univerzální digitální elektromechanický dvou-sloupový trhací stroj od českého výrobce LABORTECH umožňující provádět testování materiálu v tahu, tlaku, ohybu, krutu, odlupování, odtrhávání, penetrační a třecí zkoušky ve statickém a dynamickém namáhání vzorků a celých výrobků. Stroj je ve stolním provedení s možností variabilní šířky a výšky. Dodáván je společně se speciálním softwarem Test & Motion, který pomocí počítače slouží jako řídicí program k ovládní stroje. Znázornění pracovní sestavy stroje společně s řídicím programem je na obrázku č. 21.[23]

Obrázek č. 21 Pracovní prostředí [zdroj autor]



Rozsah měření síly je udáván výrobcem v rozsahu od 0,4% do 100% rozsahu snímače, rozlišení polohy příčnicku je s přesností 1  $\mu\text{m}$ . Hlavní technické údaje jsou uvedeny v tabulce č.4. Stroj je možné dovybavit o mnoho doplňků a příslušenství jako například náhradní čelisti, tlačné a ohybové přípravky, průtahoměry, vysekávací a řezací přípravky atd.[23]

Tabulka 4 Technická data trhacího stroje [23]

Typ stroje - model		5.10ST	5.20ST	5.30ST	5.50ST
Jmenovité zatížení tah/tlak	<i>kN</i>	10	20	30	50
Minimální zkušební rychlost	<i>mm/min</i>	0,001	0,001	0,001	0,001
Maximální zkušební	<i>mm/min</i>	1000	600	600	600
Návratová rychlost	<i>mm/min</i>	1000	1000	1000	600
Přesnost řízení rychlosti	%	±0,5			
Rozlišení polohy příčnicku	$\mu\text{m}$	1			
Opakovatelnost změny	$\mu\text{m}$	2			
Rozměry stroje A x B x C	<i>mm</i>	1558x860x 560	1558x860x 560	1558x860x 560	1683x860x 760
Rozměry stroje D x E x F x G	<i>mm</i>	460x1355x 38x1805	460x1355x 58x1805	460x1355x 58x1805	400x1355x 76x1805
Hmotnost stroje	<i>kg</i>	168	208	268	368
Tuhost rámu	<i>mm/N</i>	$1,39 \times 10^{-5}$	$7,35 \times 10^{-6}$	$7,33 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
Barevná úprava	<i>RAL</i>	RAL 9005, eloxovaný hliník			
Teplota pracovního	$^{\circ}\text{C}$	10 až 35			
Vlhkost pracovního	%	20 až 70			
Napájecí napětí	<i>V</i>	230V 50/60Hz			
Příkon stroje	<i>VA</i>	700	800	1000	1200

### 4.3 Příprava vzorků

Před zahájením samotné práce v dílnách a laboratořích byl autor poučen - byly mu vysvětleny bezpečnostní předpisy a pokyny, postupy při úrazech a povinnosti týkající se ochranných pomůcek. Též mu byly vysvětleny principy ovládání a nastavení použitých strojů a zařízení.

#### Stříhání zkušebních vzorků

Vzorky byly získány oddělením z polotovarů na padacích nůžkách znázorněných na obrázku č. 22. Zvoleny byly hutnické polotovary oceli S235J0 ve formě plechů s tloušťkou 1,5 mm. Z těchto plechů byly stříhány v dílně katedry samotné vzorky o rozměrech  $100 \pm 0,25 \times 25 \pm 0,25$ .

Ovládacím kolem byly nastaveny požadované hodnoty. Do nůžek byl vložen plech a usazen k dorazům. Následně sešlápnutím nožního ovladače došlo k aktivaci nůžek a tím k oddělení vzorku od zbylého plechu. Vzorky odpadávaly v prostoru za nůžkami do připravené krabice. Po přeměření zkušebních vzorků posuvným měřítkem byl celý postup opakován do chvíle, kdy bylo dosaženo potřebného množství vzorků včetně dostatečné rezervy. V průběhu stříhání byly rozměry vzorků dále namátkově kontrolovány posuvným měřítkem.

Obrázek č. 22 Padací nůžky [zdroj autor]



## **Ohýbání zkušebních vzorků**

Vzorky byly ohýbány v dílně katedry na manuální ohýbačce (Obrázek č. 23) s možností volby ohnutí po pěti stupních. Manuálním kolem se nastavila požadovaná velikost úhlu, následně se provedla aretace stavěcího mechanismu plochým stranovým klíčem. Po vložení jedné série vzorků se provedlo jejich uchycení ovládacím volantem a následně přitažením pohyblivého mechanismu k dorazům došlo o ohnutí vzorků. Po vyndání vzorků se vždy celý proces opakoval pro další úhly.

**Obrázek č. 23 Ohýbačka [zdroj autor]**



## **4.4 Úprava vzorků před lepením**

Z důvodu možnosti správného posouzení experimentu byly pro všechna tři lepidla použity stejné metody jednak mechanické, tak i chemické úpravy povrchů. U mechanické úpravy vzorků se jednalo o metodu tryskání povrchu abrazivem. Následovala chemická úprava spočívající v ošetření povrchů acetonem.

### **Mechanická úprava**

Otryskání zkušebních vzorků abrazivem bylo prováděno v ruční tryskací komoře PK - ITB 65 s nožním ovladačem tlakového vzduchu (Obrázek č. 24.) v dílnách katedry. Před samotným procesem tryskání byly vždy kompresor i tryskací komora kontrolovány.

**Obrázek č. 24 Tryskací komora [zdroj autor]**



Komora funguje na principu injektorového systému, kdy je do pracovní trysky přiváděn vzduch z kompresoru za stálého tlaku 3,5 MPa. Na dně komory je umístěn směšovač, ze kterého je přisáván trykací prostředek. Trykacím prostředkem byl přírodní granát MESH 80 s velikostí abraziva 0,1 - 0,3 mm. V pracovní trysce je abrazivo urychlováno proudem vzduchu, po dopadu na otryskávaný předmět je abrazivo odráženo a po propadnutí perforovaným dnem komory se opět dostává do směšovače. Tím je docíleno kontinuálního provozu.[25,26]

Každý vzorek byl vždy otryskán z jedné strany na jednom konci do vzdálenosti minimálně 25 mm od otryskávaného konce vzorku. Díky poměrně malé velikosti lepené plochy zabralo tryskání jednoho vzorku méně než 10 sekund. Otryskaný vzorek byl na pohled a na dotek hladký a matný. (Obrázek č. 25 vlevo).

**Obrázek č. 25 Otryskaný (vlevo) a neutryskaný (vpravo) vzorek [zdroj autor]**



Limitujícím faktorem této metody byl tryskací prostředek, který zůstával na stěnách komory a nedostával se v dostatečném množství do směšovače. Odtud jej nemohl kompresor nasát a do trysky se jej proto dostávalo malé množství. Tím se úprava jednoho vzorku mohla prodloužit i trojnásobně a značně se tím snižovala efektivnost celého procesu. Při zjištění této situace bylo vždy tryskání přerušeno a poklepem na tryskací komoru došlo k uvolnění v ní zachyceného tryskacího prostředku.

Tyto otryskané vzorky bylo nutné v krátkém časovém úseku dále použít, v opačném případě dochází ke znehodnocení vznikem oxidací nebo přichycením nečistot a mastnoty. Proto byl stanoven časový interval 30 minut, během kterého byly vzorky následně chemicky očištěny.

### **Chemická úprava**

Všechny zkoušené vzorky byly očištěny a odmaštěny přípravkem Aceton P6401 (Obrázek č. 26). Podle technického listu výrobce [27] jde o výrobek primárně určený jako speciální organické rozpouštědlo. Jedná se o zdraví škodlivou a pro životní prostředí nebezpečnou látku. Z tohoto důvodu bylo nutné při jeho aplikaci na vzorky dbát zvýšené pozornosti a vyvarovat se přímému kontaktu s kůží a vdechnutí par. Pro tuto úpravu byl využit ochranný oděv a byla zajištěna dostatečně větraná místnost.

**Obrázek č. 26 Aceton P6401 [zdroj autor]**





Samotný proces spočíval v potírání znečištěného povrchu každého jednotlivého vzorku štětcem namočeným v acetonu. Pohybem štětín po povrchu vzorku a jejich namáčením v acetonu se dosahovalo dostatečného oddělení ulpělých nečistot. Z důvodu úniku těkavých látek při ošetření byly vzorky odkládány na připravená skla, aby mohlo docházet k odpaření. Chemická úprava odmaštěním je poslední operací před samotným lepením.

#### **4.5 Proces lepení a fixace**

Protože pro lepení vzorků bylo použito tří různých druhů lepidel (podrobněji kapitola "4.1.3 Použitá lepidla") byly všechny vzorky před samotným lepením popsány, aby nedošlo k jejich záměně. Aplikace lepidla probíhala ihned po chemickém čištění, aby nedošlo k oxidaci povrchu a jeho nežádoucímu znečištění. Teplota při nanášení a zároveň při vytvrzování lepidla se pohybovala v rozmezí  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Práce s lepidly je v důsledku aplikace a tvrdnutí náročná na čas. Proto je nutné postup zvolit tak, aby na sebe činnosti bez prostojů navazovaly. Na vzorky bez ohybu byla naměřena ryska ve vzdálenosti 25 mm od okraje pro dodržení délky přeplátování. U ostatních vzorků bylo k dodržení délky přeplátování využito samotného ohybu, kdy hrana ohybu byla 25 mm od okraje.

Využita byla již dříve zmíněná lepidla CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200), GLUEPOX RAPID a GLUEPOX RAPID F. Protože jsou všechna lepidla dvousložková, skládal se proces lepení vždy ze 4 stejných fází – namíchání lepidla, aplikace lepidla, fixace vzorků a vytvrzení lepidla. Nejprve bylo nutné namíchat ve správném poměru lepidlo s tvrdidlem, které zajistilo správné vytvrzení. Poměr byl dán výrobcem na technickém listu. Dle hmotnostního míscího poměru bylo zvoleno pro smíchání lepidel s tvrdidly následujících poměrů:

**CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)** v poměru: lepidlo 23,4 g ku 1,6 g tvrdidla (**CHS-Tvrdidlo P11**)[19]

**GLUEPOX RAPID** v poměru: složka A 17,3 g ku 7,8 g složky B [20]

**GLUEPOX RAPID F** v poměru: složka A 17,3 g ku 7,8 g složky B [21]

Vše bylo váženo na digitální váze s velikostí dílu jedné setiny gramu. Následně se obě složky lepidel důkladně promíchaly dřevěnou špachtlí. Zde bylo nutné dbát na pečlivost, aby se do vzniklé směsi nedostalo vysoké množství vzduchových bublin.

Dalším fází bylo nanesení lepidla. Nanesení i rozprostírání malého množství lepidla se provádělo na čistý a suchý povrch zkušebního vzorku špachtlí. Lepidlo bylo nanášeno v místě přelepu o rozměrech 25 mm  $\pm$  0,5 mm dle modifikace normy ČSN EN 1465.

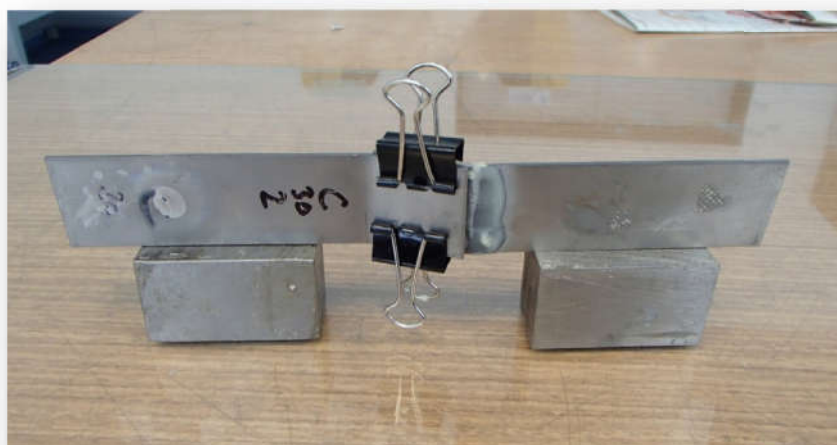
Po nanesení lepidla na jeden vzorek se přiložil druhý vzorek a vzniklý spoj byl v místě spoje opatrným tlakem prsty autora zatížen, díky čemuž došlo k vytečení přebytečného lepidla ze spoje. Poté byl spoj fixován kancelářskými sponkami „Binder klip“ (Obrázek č. 27).

**Obrázek č. 27 Kancelářské sponky Binder klip [zdroj autor]**



Následně byl případný posun vyrovnán přitlačením obou částí na předem připravené podložky tvořené ocelovými hranoly shodných rozměrů (princip znázorněn na obrázku č. 28) Zde bylo nutné dbát na pečlivost a během prvních minut regulovat případný posun.

**Obrázek č. 28 Princip vyrovnání posunu [zdroj autor]**



Následně byl vzniklý vzorek umístěn z jedné strany mezi další dva ocelové hranoly, aby nedocházelo k namáhání nově vzniklého spoje během procesu vytvrzování. Takto zafixované se vzorky ponechaly v laboratoři po dobu 7 dnů, což je dle technicko-aplikačního listu doba nezbytná pro úplné vytvrzení.

### **Příprava podložek**

Během vytvrzování lepidla byly připraveny pomocné podložky (Obrázek č. 29), které byly později použity pro uchycení testovaných vzorků do čelistí trhacího stroje. Bez těchto pomocných podložek by docházelo k nežádoucímu namáhání spojů již během upínání vzorků do čelistí trhacího stroje. Tímto by byly zcela zkresleny veškeré výsledky experimentu, případně by mohlo dojít k úplné destrukci spoje ještě před započítáním samotného měření.

**Obrázek č. 29 Podložky pro upínání do čelistí trhacího stroje [zdroj autor]**



Tyto podložky byly vytvořeny z duralových (AlCu<sub>4</sub>Mg) plechů. Ty byly vrstveny na sebe, dokud nebylo dosaženo potřebné výšky pro jednotlivé úhly. Po dosažení požadovaných rozměrů, byly jednotlivé plechy k sobě slepeny za použití sekundového lepidla Loctite super attack. Toto lepidlo bylo po vytvrzení vzorků použito i k upevnění pomocných podložek k samotným vzorkům. Připevnění podložek na zkušební vzorky je znázorněno na obrázku č. 30.

**Obrázek č. 30 Připevnění podložek na zkušební vzorky [zdroj autor]**



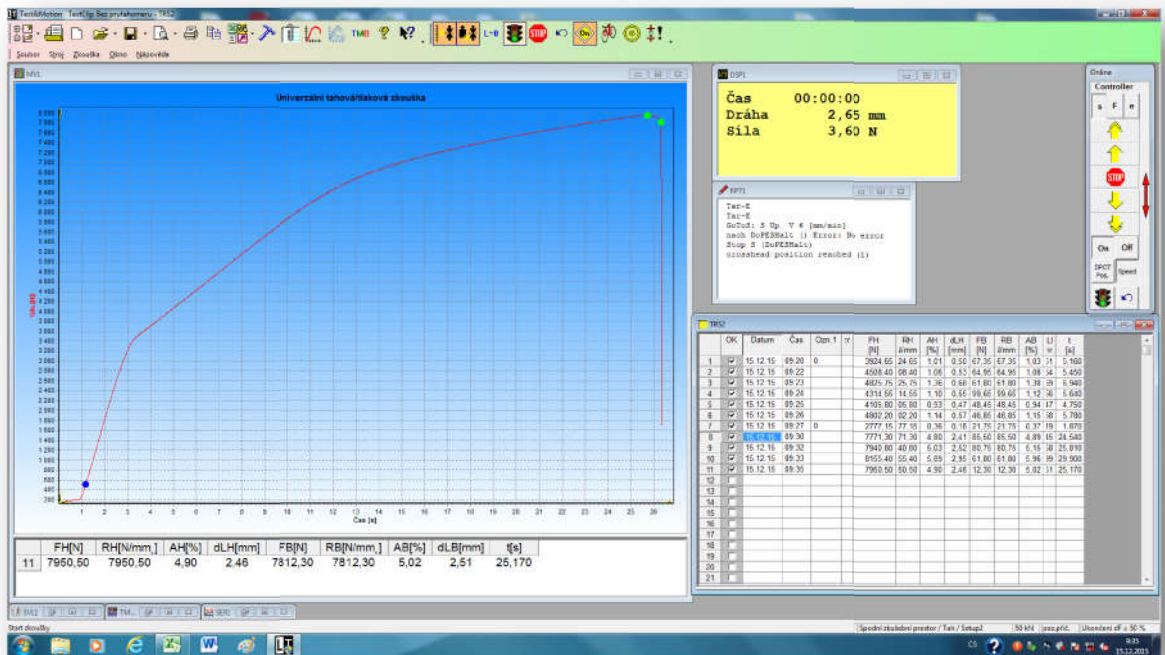
#### **4.6 Destruktivní zkouška**

Destruktivní zkouška byla prováděna po úplném vytvrzení lepených spojů na univerzálním elektromechanickém trhacím stroji LabTest 5.50ST v dílnách katedry.

Před zahájením samotné zkoušky byl autor poučen - byl mu vysvětlen princip stroje, jeho ovládání a nastavení. Dále byl upozorněn na případné faktory, které mohou výsledky měření ovlivnit. Nejčastějšími faktory jsou nesprávné upnutí do čelistí trhacího stroje nebo nesprávně zvolená rychlost zatěžování.

Univerzální trhací stroj byl zkontrolován – v řídicím programu (Obrázek č. 31) byly nastaveny požadované parametry měření, s ohledem na přesnost měření byla nastavena rychlost zatěžování na hodnotu 6 mm.min<sup>-1</sup>. Kontrola byla provedena i u lepených spojů, byly seřazeny dle sérií a pořadových čísel a dále bylo kontrolováno připevnění podložek pro správné uchycení do čelistí. Uchycení vzorku v čelistech je znázorněno na obrázku č. 32

Obrázek č. 31 Uživatelské rozhraní řídicího programu [zdroj autor]



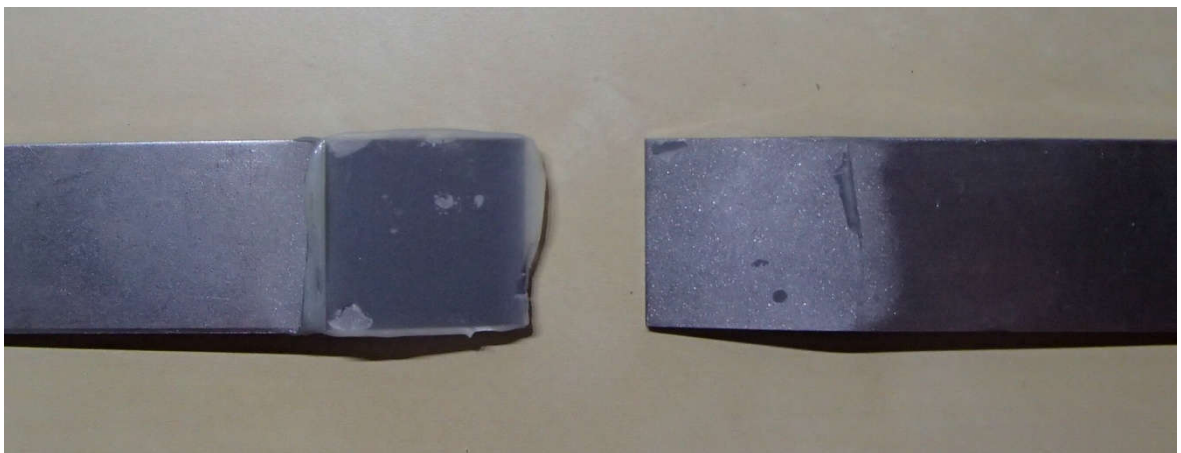
Obrázek č. 32 Uchycení vzorku v čelistech s použitím podložek [zdroj autor]



Všechny zkušební vzorky byly jednotlivě upnuty rovnoměrně k ose a do středu mezi dvě čelisti trhacího stroje. Pomocí řídicího programu byl spuštěn pracovní posuv a vzorek začal být zatěžován postupně se zvyšující silou, která je u tohoto typu stroje vyvozována elektricky. Vzorek byl při testu zatěžován statickou silou bez rázů. Po přetržení vzorku byl pracovní posuv zastaven řídicím programem nastaveným na vypnutí při poklesu takové síly o 50%. Během testu byly měřené hodnoty průběžně zobrazovány v řídicím programu a po skončení měření byla veškerá data přenesena do programu MS Excel. Zároveň si autor v průběhu měření zapisoval měřené hodnoty do připravené tabulky na papír pro případ poruchy přístroje. Po vyjmutí obou částí vzorku byla vždy změřena hodnota skutečné délky přeplátování posuvným měřidlem. Dále bylo provedeno vyhodnocení druhu poškození lepeného spoje - adhezní, kohezní nebo speciálně adhezní (více popsáno v kapitole "3.2 Základní pojmy"). Poté byl celý proces opakován pro další vzorky. Veškeré naměřené hodnoty destruktivní zkoušky jsou uvedeny v příloze. Veškeré výpočty a grafy byly vytvořeny v aplikaci MS Excel ze sady kancelářských nástrojů MS Office verze 2007.

Na obrázku č. 33 je zobrazen jeden z lepených vzorků po zkoušce. V tomto případě se jedná o adhezní lom.

**Obrázek č. 33 Zkušební vzorek po destrukci [zdroj autor]**



## 4.7 Zpracování výsledků

Pro vyhodnocení experimentu, prezentaci výsledků a uvedení závěrů je potřeba stanovit základní matematické vzorce a statistické funkce pro hodnocení výsledků destruktivní zkoušky.

Výsledky experimentu se vyjádří jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení pro všechny měřené vzorky v newtonech (N) případně jako napětí při přetržení v megapascalch (MPa) [8].

Protože vlivem ručního nanášení lepidel, kdy nelze dodržet přesné rozměry plochy přeplátování, se jednotlivé vzorky liší, je nezbytné do výsledků zahrnout jejich skutečné rozměry. V opačném případě by docházelo ke zkreslení výsledků. Tento problém nastává v případě vyjádření výsledků pomocí síly  $F$  [N]. Pokud chceme započítat skutečnou plochu spoje, je potřeba vypočítat mez pevnosti ve smyku  $\tau$  [MPa], která skutečnou plochu obsahuje. Další důležitou součástí interpretování výsledků je i označení typů porušení lepeného spoje. V práci bylo počítáno s existencí adhezního, kohezního a speciálně kohezního porušení [9]. Popsáno v kapitole "3.2 Základní pojmy"

Jak bylo již popsáno výše, pro interpretaci experimentu je vhodné využít následující matematické vzorce:

### Plocha přeplátování

Plocha lepeného spoje  $S$  [mm<sup>2</sup>] se vypočte součinem délky  $l$  [mm] a šířky  $b$  [mm] přeplátování. Délka přeplátování byla měřena posuvným měřítkem vždy po provedení destruktivní zkoušky na univerzálním trhacím stroji. Šířka přeplátování byla dána výrobou vzorků a byla vždy konstantních 25 mm.

$$S = l \cdot b \quad (4)$$

kde je:  $S$  ... plocha přeplátování [mm<sup>2</sup>]  
 $l$  ... délka přeplátování [mm]  
 $b$  ... šířka přeplátování [mm]

## Mez pevnosti ve smyku

Mez pevnosti ve smyku  $\tau$  [MPa] je definována jako podíl zatěžující síly  $F$  [N] a velikosti plochy lepeného spoje  $S$  [mm<sup>2</sup>].

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (5)$$

kde je:  $\tau$  ... mez pevnosti ve smyku [MPa]

$F$  ... zatěžující síla [N]

$S$  ... plocha přeplátování [mm<sup>2</sup>]

Dále je potřeba definovat statistické funkce: aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient a variační rozpětí.

## Aritmetický průměr

Jedná se o statistickou veličinu, která vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor s mnoha hodnotami. Definován je jako součet všech naměřených hodnot, který se vydělí počtem prvků daného souboru. Většinou je označován vodorovným pruhem nad názvem proměnné, nejčastěji  $\bar{x}$ . [28]

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} \quad (6)$$

kde je:  $\bar{x}$  ... hodnota aritmetického průměru

$x_1, x_2 \dots x_n$  ... hodnoty naměřených prvků

$n$  ... počet prvků. [28]

## Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je ve statistice často používanou mírou rozptylu. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných hodnot. Pokud je hodnota směrodatné odchylky malá, potom mají prvky většinou vzájemnou podobnost. Naopak při velké směrodatné odchylce signalizuje velké vzájemné odlišnosti. Nejčastěji je označována jako  $\sigma$ . [29]



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

kde je:  $\sigma$  ... hodnota směrodatné odchylky  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých prvků  
 $\bar{x}$  ... hodnota aritmetického průměru  
 $n$  ... počet prvků [29]

### **Variační koeficient**

Jedná se o charakteristiku variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Je definován jako podíl směrodatné odchylky a absolutní hodnoty ze střední hodnoty, tedy aritmetického průměru. Nejčastěji se označuje  $v$  a jednotkami jsou procenta.[30]

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (8)$$

kde je:  $v$  ... variační koeficient [%]  
 $\sigma$  ... hodnota směrodatné odchylky  
 $\bar{x}$  ... hodnota aritmetického průměru [30]

### **Variační rozpětí**

Jedná se o statistickou charakteristiku, která vyjadřuje míru variability statistického souboru. Vypočítá se jako rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty sledovaného souboru. Ukazuje celkový interval, ve kterém se pohybují hodnoty prvků. Nejčastěji je označován jako  $R$ . [31]

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (9)$$

kde je:  $R$  ... variační rozpětí  
 $x_{max}$  ... prvek s největší hodnotou  
 $x_{min}$  ... prvek s nejmenší hodnotou [31]

## 4.8 Vyhodnocení experimentu

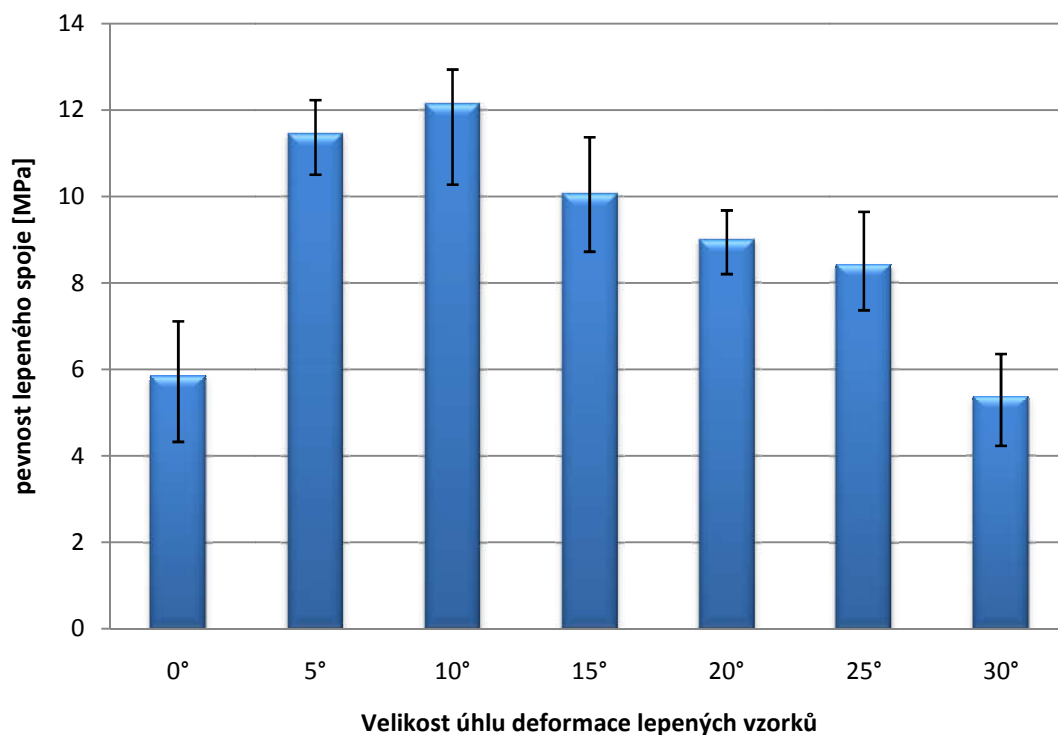
Na základě literární rešerše byl proveden experiment posouzení vlivu deformace lepeného materiálu na výslednou pevnost lepeného spoje. Experiment byl realizován dle modifikované normy ČSN EN 1465 a ČSN ISO 10 365. Získaná data budou v této kapitole pomocí dříve zmíněných matematických výpočtů a statistických funkcí hodnocena. Pro přehlednost budou výsledky výpočtů navíc znázorněny graficky. Veškeré výpočty a grafy byly vytvořeny v programu MS Excel ze sady kancelářských nástrojů MS Office verze 2007.

Pro lepší přehlednost jsou nejprve porovnány vlivy rozdílné deformace lepeného materiálu na pevnost lepených spojů jednotlivě pro každé lepidlo. Následuje celkové porovnání všech tří typů lepidel pro stejné deformace vzorků.

### Hodnocení výsledků pro lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)

Z grafu (Obrázek č. 34) je patrné, že většina deformovaných vzorků dosahovala lepších průměrných hodnot pevnosti než vzorky nedeformované. Tento rozdíl je nejvíce viditelný u vzorků s úhly  $5^\circ$  a  $10^\circ$ , kde v případě deformace  $5^\circ$  byl nárůst pevnosti oproti  $0^\circ$  o 95% vyšší a v případě deformace  $10^\circ$  dokonce o 107%. Pokud bysme posuzovali pouze průměrnou hodnotu, bylo by možné říci, že u deformace  $10^\circ$  je pevnost více jak dvojnásobná oproti nulové deformaci. Zde je však potřeba zmínit, že jak u nulové, tak i u deformace  $10^\circ$  došlo k výraznému rozptylu hodnot. U deformací velikostí  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  a  $25^\circ$  docházelo podle předpokladu k postupnému snižování pevnosti, stále však tato pevnost dosahovala znatelně vyšších hodnot než u nedeformovaných vzorků. Pevnosti v těchto případech dosahovali o 45 až 70 % vyšších hodnot než nedeformované vzorky. Jediným případem kdy bylo dosaženo nižší pevnosti než u nedeformovaných vzorků, byly vzorky s deformací  $30^\circ$ , kde byla pevnost o 8% nižší.

Obrázek č. 34 Znárodnění pevností pro jednotlivé úhly pro lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)



Jak je dále patrné z grafu (Obrázek č. 34) docházelo u tohoto lepidla k poměrně rozdílným rozptylům hodnot pro jednotlivé deformace, kdy v případě deformace 5° a 20° dochází pouze k malému rozptylu hodnot. Tento rozsah hodnot činil pouze okolo 1,5 MPa mezi minimem a maximem. V případě úhlů 0°, 10° a 15°, kde docházelo k nejvyššímu rozptylu hodnot, bylo rozmezí mezi minimem a maximem více než 2,5 MPa.

Při porovnání typů porušení lepených spojů (tabulka č. 5) lze vyčíst, že u tohoto lepidla převažovaly lomy speciálně adhezivní, ke kterým došlo celkem 29 krát nad lomy adhezivními, ke kterým došlo ve 20 případech. K lomu kohezivnímu nedošlo v experimentu ani v jednom případě. Při porovnání typů porušení pro jednotlivé deformace lepených materiálů nelze říci, že by zde docházelo k výrazným rozdílům. U všech deformací docházelo k podobnému množství výskytů lomů adhezivních a speciálně adhezivních.

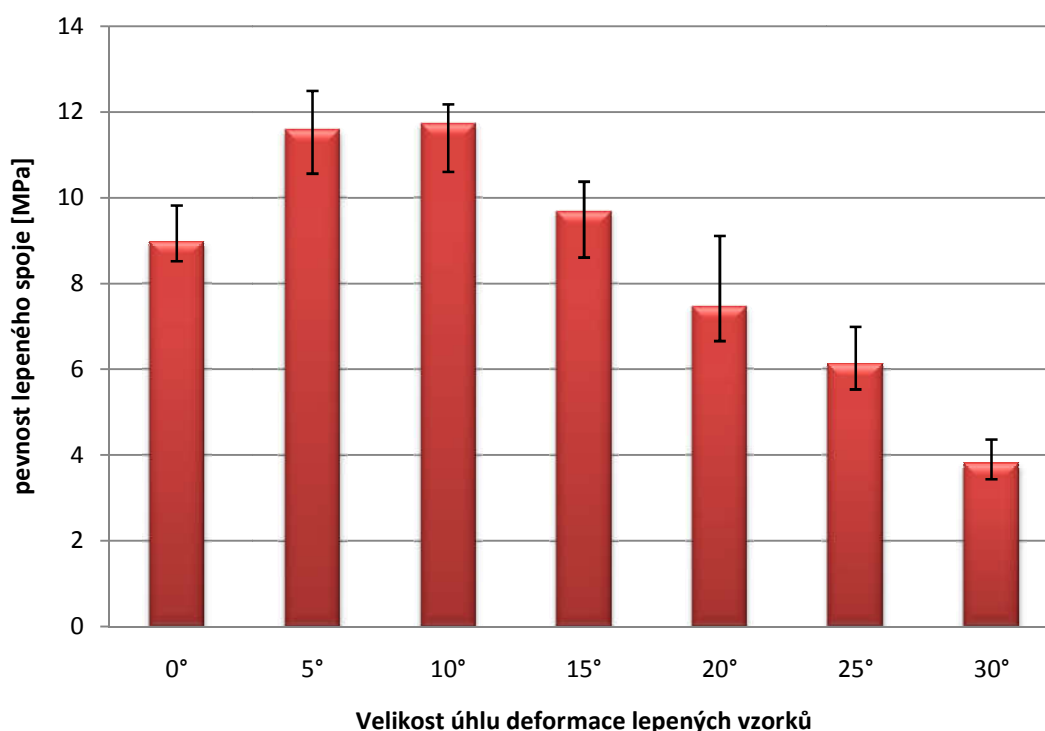
**Tabulka 5 Výsledné hodnoty pro lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)**

Lepidlo	Úhel	aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	max. hodnota	min. hodnota	adhezivní lom	speciálně adhezivní
	[°]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[x]	[x]
A	0	5,857	0,8182	13,970	2,790	7,12	4,33	4	3
A	5	11,457	0,5494	4,795	1,725	12,23	10,51	2	5
A	10	12,157	0,8600	7,074	2,660	12,94	10,28	4	3
A	15	10,077	0,8191	8,128	2,646	11,37	8,73	3	4
A	20	9,003	0,4605	5,115	1,474	9,68	8,21	2	5
A	25	8,439	0,7224	8,560	2,277	9,65	7,37	3	4
A	30	5,382	0,6850	12,726	2,127	6,36	4,23	2	5

### **Hodnocení výsledků pro lepidlo GLUEPOX RAPID**

Z grafu (Obrázek č. 35) je patrné, že u tohoto typu lepidla polovina deformovaných vzorků dosahovala lepších průměrných hodnot pevnosti než vzorky nedeformované. Jednalo se o vzorky s menšími hodnotami deformace s úhly 5°, 10° a 15°. Tento rozdíl je opět nejvíce viditelný u vzorků s úhly 5° a 10°. Oproti předchozímu lepidlu však již nedošlo k tak výraznému rozdílu průměrné pevnosti, v případě deformace 5° byl nárůst pevnosti vyšší oproti 0° o 28% a v případě deformace 10° byl nárůst vyšší o 30%. Při porovnání směrodatných odchylek u těchto dvou případů zjistíme, že u 5° došlo k mnohem většímu rozptylu hodnot než u deformace 10°. Při detailním porovnání dokonce zjistíme, že dvou úplně nejvyšších hodnot bylo dosaženo právě u deformace 5°. U dalších vzorků s deformacemi 15°, 20°, 25° a 30° docházelo podle předpokladu k postupnému lineárnímu snižování pevností. Deformace 15° byla poslední, kde byla pevnost vyšší než u nedeformovaných vzorků avšak s již malým rozdílem 7%. U dalších vzorků byla pevnost deformovaných vzorků nižší než u nedeformovaných, konkrétně o 17% u deformace 20° a o 31% u deformace 25°. U deformace 30° už nedosahovala pevnost ani poloviny pevnosti nedeformovaných vzorků a byla nižší o 57%.

Obrázek č. 35 Znárodnění pevnosti pro jednotlivé úhly pro lepidlo GLUEPOX RAPID



Jak je dále patrné z grafu (Obrázek č. 35) docházelo u tohoto lepidla k nejmenším rozptylům hodnot pro jednotlivé deformace ze všech tří lepidel. V jediném případě došlo k výraznějšímu rozpětí 2,5 MPa mezi minimální a maximální hodnotou pevnosti v případě deformace 20°. U ostatních deformací bylo rozpětí mezi minimem a maximem s podobnými hodnotami okolo 1,5 MPa.

Při porovnání typů porušení lepených spojů (tabulka č. 6) lze vyčíst, že u tohoto lepidla výrazně převažovaly lomy speciálně adhezivní, ke kterým došlo celkem ve 38 případech. Méně potom docházelo k lomům adhezivním, ke kterým došlo pouze v 11 případech. K lomu kohezivnímu nedošlo v experimentu ani v jednom případě. Při porovnání typů porušení pro jednotlivé deformace lepených materiálů nelze říci, že by docházelo k výrazným rozdílům. U všech deformací docházelo ve většině případů k výskytu lomů speciálně adhezivních a pouze maximálně dvěma adhezivním lomům v každé sérii.

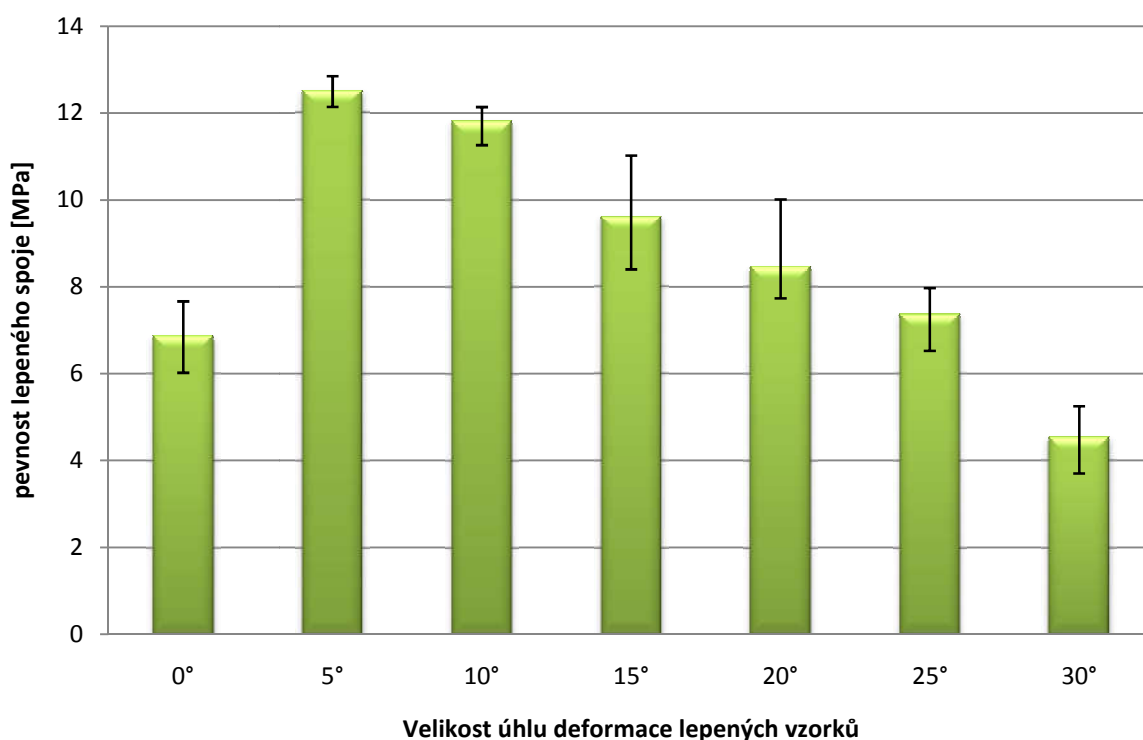
**Tabulka 6 Výsledné hodnoty pro lepidlo GLUEPOX RAPID**

Lepidlo	Úhel	aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	max. hodnota	min. hodnota	adhezivní lom	speciálně adhezivní
	[°]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[x]	[x]
B	0	8,978	0,3964	4,415	1,299	9,82	8,52	2	5
B	5	11,584	0,6694	5,779	1,930	12,49	10,56	1	6
B	10	11,717	0,4873	4,159	1,571	12,18	10,61	1	6
B	15	9,673	0,6898	7,131	1,768	10,38	8,61	2	5
B	20	7,450	0,8244	11,065	2,454	9,11	6,66	1	6
B	25	6,132	0,5087	8,297	1,457	6,99	5,53	2	5
B	30	3,815	0,3432	8,995	0,925	4,36	3,44	2	5

### **Hodnocení výsledků pro lepidlo GLUEPOX RAPID F**

Z grafu (Obrázek č. 36) lze vyčíst, že většina deformovaných vzorků dosahovala lepších průměrných hodnot pevnosti než vzorky nedeformované. Tento rozdíl je nejvíce viditelný u vzorků s úhly 5° a 10°, kde v případě deformace 5° byl nárůst pevnosti oproti 0° o 82% vyšší a v případě deformace 10° vyšší o 71%. U obou těchto deformací došlo pouze k malému rozptylu hodnot. U deformací velikostí 15°, 20° a 25° docházelo podle předpokladu k postupnému snižování pevnosti, stále však tato pevnost dosahovala vyšších hodnot než u nedeformovaných vzorků, konkrétně o 39% u deformace 15°, o 23% u deformace 20° a u deformace 25° o 7%. Jediným případem kdy bylo dosaženo nižší pevnosti než u nedeformovaných vzorků, byly vzorky s deformací 30°, kde byla pevnost nižší o 34%.

Obrázek č. 36 Znárodnění pevností pro jednotlivé úhly pro lepidlo GLUEPOX RAPID F



Dále lze z grafu (Obrázek č. 36) vyčíst, že v případě deformace 5° a 10° došlo pouze k malému rozptylu hodnot. Tento rozsah hodnot činil méně než 1 MPa mezi minimem a maximem. Naopak k největšímu rozptylu došlo v případě úhlů 15° a 20°, kde bylo rozmezí mezi minimem a maximem okolo 2,5 MPa. U ostatních vzorků se rozptyl hodnot pohyboval okolo hodnoty 1,5 MPa.

Při porovnání typů porušení lepených spojů (tabulka č. 7) lze vyčíst, že u tohoto lepidla výrazně převažovaly lomy speciálně adhezivní, ke kterým došlo celkem ve 37 případech. V ostatních případech docházelo k lomům adhezivním, ke kterým došlo ve 12 případech. K lomu kohezivnímu nedošlo v experimentu v ani jednom případě. Při porovnání typů porušení pro jednotlivé deformace lepených materiálů nelze říci, že by docházelo k nějakým rozdílům. U všech deformací docházelo ve většině případů k výskytu lomů speciálně adhezivních a průměrně dvěma adhezivním lomům v každé sérii.

**Tabulka 7 Výsledné hodnoty pro lepidlo GLUEPOX RAPID F**

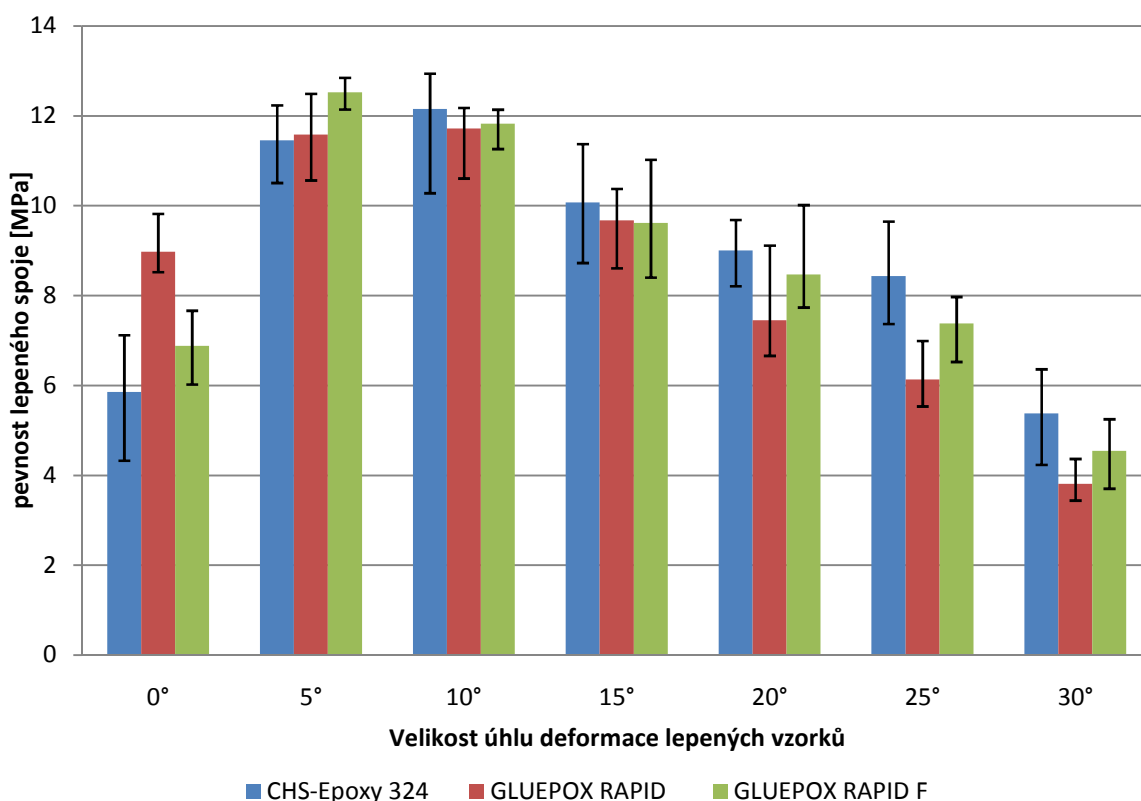
Lepidlo	Úhel	aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	max. hodnota	min. hodnota	adhezivní lom	speciálně adhezivní
	[°]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[x]	[x]
C	0	6,881	0,5774	8,392	1,644	7,66	6,02	2	5
C	5	12,523	0,2341	1,870	0,706	12,85	12,14	3	4
C	10	11,824	0,2925	2,474	0,877	12,14	11,26	1	6
C	15	9,620	0,8969	9,323	2,623	11,02	8,40	2	5
C	20	8,474	0,6963	8,217	2,279	10,01	7,74	1	6
C	25	7,379	0,5510	7,467	1,447	7,97	6,52	2	5
C	30	4,548	0,5237	11,515	1,545	5,25	3,70	1	6

### **Celkové hodnocení výsledků**

Při celkovém porovnání dat v grafu (Obrázek č. 37) všech tří lepidel je jednoznačně patrné, že deformované vzorky s velikostí úhlů 5°, 10° a 15° dosahovaly vyšší pevnosti než vzorky nedeformované. Tento rozdíl je nejvíce viditelný u vzorků s úhly 5° a 10°, kde lze vyčíst, že dosahovaly nejvyšších hodnot. Průměrná pevnost se u těchto vzorků pohybovala v rozmezí přibližně 11 až 12 MPa. U deformace velikosti 15° došlo podle předpokladu ke snížení pevnosti oproti předchozím deformacím, stále se však průměrná pevnosti pohybovala nad hodnotami průměrné pevnosti u nedeformovaných vzorků. Průměrná pevnost u těchto vzorků se pohybovala v rozmezí mezi 9 a 10 MPa. Vzorky s deformací 20° a 25° dosahovali u lepidel CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200) a GLUEPOX RAPID F lepších výsledků než u vzorků nedeformovaných. Hodnoty pevnosti se zde pohybovali okolo 8 MPa. Na druhou stranu tyto vzorky u lepidla GLUEPOX RAPID dosahovali nižších hodnot než nedeformované vzorky, průměrná pevnost se pohybovala okolo 7 MPa. Tento fakt byl také ovlivněn skutečností, že lepidlo GLUEPOX RAPID dosahovalo u nedeformovaných vzorků výrazně vyšší pevnosti než ostatní lepidla, konkrétně o 2 MPa více než u GLUEPOX RAPID F a o 3 MPa více než u CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200). Vzorky s deformací 30° nedosahovali u žádného lepidla lepších výsledků než nedeformované vzorky a pevnost se u nich pohybovala okolo 4 MPa.



Obrázek č. 37 Znárodnění pevností pro jednotlivé úhly pro všechna lepidla



Dále lze z grafu (Obrázek č. 37) vyčíst, že k nejmenšímu rozptylu hodnot docházelo u lepidla GLUEPOX RAPID. Naopak k nejvyšším rozptylům hodnot docházelo u lepidla CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200). Navíc je možné říci, že k největším rozptylům docházelo u vzorků, které dosahovaly nejmenších pevností, naopak nejmenší rozptyly byly většinou u vzorků dosahujících nejvyšších pevností.

To, že pevnost pro deformace 5° a 10° dosahovala nejvyšších hodnot, odpovídá i poznatkům zmíněným v rešeršní části v kapitole "3.3.3. Vhodná konstrukce", kde je uvedeno, že podle teoretického výpočtu neoptimálnějším předem vytvořeným úhlem je úhel s hodnotou 9,98°. Zároveň tyto výsledky odpovídají výsledkům experimentu, který provedli pánové Min You, Zhi Li, Xiao-ling Zheng s kolektivem [o] kdy bylo zjištěno, že neoptimálnější ze zkoumaných úhlů byl úhel o velikosti 7°.

Na druhou stranu je velice zvláštní, že mezi vzorky s nulovou deformací a deformací o velikosti 5° je tak výrazný rozdíl. Po několikanásobném překontrolování veškerých výpočtů a prozkoumání celého postupu se jeví jako jediné možné vysvětlení fakt, že u vzorků s nulovou deformací nebylo během měření využito podložek do čelistí.

Tím pravděpodobně došlo ke vzniku určitého předpětí již během upínání do čelistí. Při následné tahové zkoušce toto předpětí působilo na spoj společně s tahovou silou a pravděpodobně způsobilo, že měřené vzorky byly destruovány předčasně. Tímto zjištěním se tedy ukázalo, že výsledná data nejsou spolehlivá, a proto nelze s naprostou jistotou říci, o jak výrazný rozdíl pevností mezi jednotlivými vzorky jde. Lze předpokládat, že předpětí nebylo tak vysoké, jako napětí vyvolané tahovou silou, proto lze předpokládat, že hlavně u vzorků lepených lepidlem Epoxy 324 (Epoxy 1200) by ani v případě použití podložek nedosahovala pevnost u nedeformovaných vzorků pevnosti vzorků s deformací 5°. S jistotou však toto tvrdit nelze a pro prokázání výsledků by bylo potřeba celý proces opakovat. Přínosem tohoto zjištění by mohlo být pouze dokázání, jak zásadně důležité je dodržení naprosto shodných podmínek pro všechna porovnávaná měření.

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou lepení, jejím hlavním úkolem bylo provedení a vyhodnocení experimentu, kdy byly porovnávány pevnosti lepených vzorků s rozdílnou geometrií.

Práce byla rozdělena do dvou hlavních částí. První část byla vytvořena jako ucelený teoretický přehled, kde jsou popsány nejdůležitější poznatky technologie lepení. Byla zde uvedena stručná historie lepení, dále zde byla popsána celková podstata této technologie. Byly zde popsány jednotlivé fáze probíhající v procesu lepení od volby konstrukčního řešení, přes způsoby přípravy povrchu až k fázi vytvrzování. Dále zde byly popsány faktory ovlivňující pevnost lepených spojů. Následně byly popsány výhody a nevýhody aplikace této technologie. V závěru této části bylo uvedeno rozdělení jednotlivých druhů lepidel společně se stručným popisem jejich základních vlastností.

Experimentální část diplomové práce vycházela z předpokladu, že působ namáhání je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících pevnost lepeného spoje. V práci byl testován jeden z nejtýpčtějších způsobů zatěžování; zatěžování smykem v tahu. Pro tento způsob je nejvíce používán jednostranně přeplátovaný spoj, pro jednoduchou montáž a nízké náklady na zpracování. Velikou nevýhodou je však neaxiální zatížení, které u tohoto spoje vzniká, v jehož důsledku dochází při zatížení k roztržení spoje. Předpokladem práce bylo, že úpravou tvaru lepených materiálů, ještě před lepením, dojde ke snížení působení neaxiálních sil na spoj a tím bude zvýšena únosnost spoje. Prakticky byly zkoušeny vzorky, které byly od hlavní osy zkušebního tělesa odkloněny o úhly  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  a  $30^\circ$ .

V práci bylo využito technologické tahové zkoušky s řízenou deformací. Zkouška probíhala a byla vyhodnocena za podmínek stanovených technickou normou ČSN EN 1465. Bylo měřeno sedm kovových vzorků pro každou jednotlivou deformaci a každé jednotlivé lepidlo. V práci byla využita tři lepidla, pro lepší přehlednost a průkaznost výsledků.

Výsledkem experimentu bylo zjištění, že u všech tří lepidel je jednoznačně patrné, že deformované vzorky s velikostí úhlů  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  a  $15^\circ$  dosahovaly vyšší pevnosti než vzorky nedeformované. Tento rozdíl je nejvíce patrný u vzorků s úhly  $5^\circ$  a  $10^\circ$ , kde pevnost dosahovala nejvyšších hodnot. Toto zjištění odpovídá i poznatkům zmíněným v rešeršní části v kapitole "3.3.3 Vhodná konstrukce", kde je uvedeno, že podle teoretického výpočtu neoptimálnějším předem vytvořeným úhlem je úhel s hodnotou  $9,98^\circ$ . Zároveň tyto výsledky odpovídají výsledkům experimentu, který provedli Min You, Zhi Li, Xiao-ling Zheng a kolektiv, kdy bylo zjištěno, že neoptimálnější ze zkoumaných úhlů byl úhel o velikosti  $7^\circ$ .

Problém práce je zjištění, že mezi vzorky s nulovou deformací a deformací o velikosti  $5^\circ$  je velice výrazný rozdíl. Logickou úvahou lze dojít k závěru, že během experimentu muselo dojít k určité chybě. Jako nejpravděpodobnější vysvětlení se zde jeví nepoužití podložek při upínání do čelistí u vzorků bez deformace. Tento problém je více popsán v kapitole "4.8 Vyhodnocení experimentu". Prokázání zda se skutečně jedná o chybu nebo jsou výsledky správné, by bylo možné pouze opakováním celého experimentu. Při opakování experimentu by bylo vhodné zaměřit se na vzorky s deformací v rozsahu  $0^\circ$  až  $20^\circ$ , zkoumání větších úhlů by pravděpodobně nevedlo k zajímavějším zjištěním.

## 6 ZDROJE

1. PETERKA, J.: *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980. 792 s.
2. POKORNÝ, J.: *Lepení a tmelení v dílně i domácnosti*. Praha: Grada Publishing, profi&hobby, 2000, 104 s, ISBN 80-7169-857-1.
3. OSTEN, M.: *Práce s lepidly a tmely*. Praha: SNTL., 1982, 283 s.
4. BROŽEK, M.: *Základy strojírenské technologie: návody na cvičení*, Praha: ČZU, 2001, 163s, ISBN 80-213-0724-2
5. ZRŮNEK, M.: *Úprava povrchu kovových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 117 s.
6. EBNESAJJAD, S.: *Adhesives Technology handbook. 2nd ed.* Norwich: William Andrew, 2008,363 s. ISBN 978-0-8155-1533-3.
7. BROCKMANN W., GEIß P. L., KLINGEN J., SCHRÖDER B.: *Adhesive bonding: Materials, Applications and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009, 414 s. ISBN 978-3-527-31898-8.
8. ČSN EN 1465. *Lepidla - Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přelátovaných tělesech*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 7 s.
9. ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha: Český normalizační institut, 1995. 8 s.
10. HRÁDEK, Z.: *Metodika modelování lepených spojů v automobilovém průmyslu*. Brno, 2010. 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
11. A numerical and experimental study of preformed angle in the lap zone on adhesively bonded steel single lap joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, číslo vydání 29, 2009, strany 280-285
12. Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, číslo vydání 27, 2007, strany 574-583
13. Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites, *International Journal of Adhesion & Adhesive*, číslo vydání 24, 2004, strany 407-414
14. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, číslo vydání 31, 2011, strany 248-264
15. *Loctite*. [online]. [cit. 2015-11-3]. Firemní prezentace výrobce lepidel. Dostupné z: <[www.moodle.czu.cz.cz](http://www.moodle.czu.cz.cz)>
16. *Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2016-01-25]. Technologie lepení v automobilovém průmyslu. Dostupné z: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/lepeni.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf)>.

17. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2015-12-2]. Lepení materiálů. Dostupné z: <[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_lepeni\\_materialu\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__lepeni_materialu__mrna.pdf)>
18. *Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2015-10-16]. *Technologie II (tváření kovů, zpracování plastů)*, Dostupné z: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12-doplnkove%20technologie/18-smacivost%20lepidel.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12-doplnkove%20technologie/18-smacivost%20lepidel.jpg)>
19. *DCH Sincolor a.s.* [online]. [cit. 2016-1-17]. Technicko-aplikační list. Dostupné z: <[http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13\\_EPOXY\\_324\\_1200.pdf](http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13_EPOXY_324_1200.pdf)>
20. *DCH Sincolor a.s.* [online]. [cit. 2016-1-17]. Technicko-aplikační list. Dostupné z: <[http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13\\_Gluepox\\_Rapid.pdf](http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13_Gluepox_Rapid.pdf)>
21. *DCH Sincolor a.s.* [online]. [cit. 2016-1-17]. Technicko-aplikační list. Dostupné z: <[http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13\\_Gluepox\\_Rapid\\_F.pdf](http://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13_Gluepox_Rapid_F.pdf)>
22. *Loctite.cz* [online]. [cit. 2016-1-9]. Firemní prezentace výrobce lepidel. Dostupné z: < [www.loctite-superattak.cz/cz.html](http://www.loctite-superattak.cz/cz.html) >
23. *LabTest 5.50* [online]. [cit. 2016-1-23]. Firemní prezentace. Dostupné z: <<http://www.labortech.cz/>>
24. *Adhesives.org* [online]. [cit. 2015-11-6]. Webová prezentace historie lepení. Dostupné z: <<http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/fastening-bonding/history-of-bonding>>
25. *Piskovacky.cz* [online]. [cit. 2016-2-10]. Specifikace produktu. Dostupné z: <<http://www.piskovacky.cz/eshop/Piskovacky/Kabinove/Kabiny-obslužne/boxy-Profi/Piskovaci-kabina-box-PK-ITB-TTB65-kombinovana-sdruzena-injektor-tlak.html> >
26. *PKIT.cz* [online]. [cit. 2016-2-19]. Specifikace produktu. Dostupné z: <<http://www.pkit.cz/cs/granat-80-a-120-1/>>
27. *Barvy a laky Hostivař* [online]. [cit. 2016-2-26]. Katalogový list. Dostupné z: <[http://www.bal.cz/media/files/981513dc4f7ffa6f930aaf306139c16/katalogove-listy/kl\\_technicke\\_kapaliny\\_10.8.2015.pdf](http://www.bal.cz/media/files/981513dc4f7ffa6f930aaf306139c16/katalogove-listy/kl_technicke_kapaliny_10.8.2015.pdf) >
28. *WIKIPEDIA* [online]. [cit. 2016-2-3]. Aritmetický průměr. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Aritmetick%C3%BD\\_pr%C5%AFm%C4%9Br](https://cs.wikipedia.org/wiki/Aritmetick%C3%BD_pr%C5%AFm%C4%9Br)>
29. *WIKIPEDIA* [online]. [cit. 2016-2-3]. Směrodatná odchylka. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodavn%C3%A1\\_odchylka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodavn%C3%A1_odchylka)>
30. *WIKIPEDIA* [online]. [cit. 2016-2-3]. Variační koeficient. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Varia%C4%8Dn%C3%AD\\_koeficient](https://cs.wikipedia.org/wiki/Varia%C4%8Dn%C3%AD_koeficient)>

31. *WIKIPEDIA* [online]. [cit. 2016-2-3]. Variační rozpětí. Dostupné z:  
<[https://cs.wikipedia.org/wiki/Varia%C4%8Dn%C3%AD\\_rozp%C4%9Bt%C3%AAD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Varia%C4%8Dn%C3%AD_rozp%C4%9Bt%C3%AAD)>
32. *technickytydenik.cz* [online]. [cit. 2015-2-12]. Ekologické aspekty povrchové přípravy lepených spojů. Dostupné z:  
<[http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/ekologicke-aspekty-povrchove-pripravy-lepenych-spoju\\_12953.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/ekologicke-aspekty-povrchove-pripravy-lepenych-spoju_12953.html)>

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 Znázornění adhezních a kohezních sil [17] .....	7
Obrázek č. 2 Adhezní porušení [zdroj autor] .....	8
Obrázek č. 3 Kohezní porušení [zdroj autor] .....	8
Obrázek č. 4 Speciálně kohezní porušení [zdroj autor] .....	8
Obrázek č. 5 Kapková metoda [18] .....	10
Obrázek č. 6 Druhy povrchu adherendu [10] .....	11
Obrázek č. 7 Základní typy nerovností lepených ploch [1] .....	12
Obrázek č. 8 Vhodné typy namáhání a rozložení napětí ve spoji [15] .....	14
Obrázek č. 9 Nevhodné typy namáhání a rozložení napětí ve spoji [15] .....	15
Obrázek č. 10 Průběh napětí ve spoji (kombinace tah + ohyb) [2] .....	16
Obrázek č. 11 Možnosti konstrukce spojů předcházejících nesouososti sil [15] .....	17
Obrázek č. 12 Vliv délky přeplátování na celkovou pevnost spoje [15] .....	18
Obrázek č. 13 Znázornění konfigurace přeplátovaného spoje [11] .....	18
Obrázek č. 14 Zvlněný přeplátovaný spoj [12] .....	19
Obrázek č. 15 Rozložení napětí u klasického a zvlněného přeplátovaného spoje [12] .....	20
Obrázek č. 16 Deformovaný přeplátovaný spoj s prodlouženým přeplátováním [12] .....	21
Obrázek č. 17 Rozložení napětí při různých technologiích spojování: a.) svařování, b.) nýtování, c.) lepení [15] .....	24
Obrázek č. 18 Zkušební těleso dle normy ČSN EN 1465 [8] .....	30
Obrázek č. 19 Zkušební těleso pro potřeby experimentu [zdroj autor] .....	31
Obrázek č. 20 Princip podložek pro uchycení do čelistí [zdroj autor] .....	32
Obrázek č. 21 Pracovní prostředí [zdroj autor] .....	36
Obrázek č. 22 Padací nůžky [zdroj autor] .....	37
Obrázek č. 23 Ohýbačka [zdroj autor] .....	38
Obrázek č. 24 Tryskací komora [zdroj autor] .....	39
Obrázek č. 25 Otryskaný (vlevo) a neotryskaný (vpravo) vzorek [zdroj autor] .....	39
Obrázek č. 26 Aceton P6401 [zdroj autor] .....	40
Obrázek č. 27 Kancelářské sponky Binder klip [zdroj autor] .....	42
Obrázek č. 28 Princip vyrovnání posunu [zdroj autor] .....	43
Obrázek č. 29 Podložky pro upínání do čelistí trhačického stroje [zdroj autor] .....	43
Obrázek č. 30 Připevnění podložek na zkušební vzorky [zdroj autor] .....	44
Obrázek č. 31 Uživatelské rozhraní řídicího programu [zdroj autor] .....	45



Obrázek č. 32 Uchycení vzorku v čelistech s použitím podložek [zdroj autor] .....	45
Obrázek č. 33 Zkušební vzorek po destrukci [zdroj autor].....	46
Obrázek č. 34 Znázornění pevnosti pro jednotlivé úhly pro lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200) .....	51
Obrázek č. 35 Znázornění pevnosti pro jednotlivé úhly pro lepidlo GLUEPOX RAPID...	53
Obrázek č. 36 Znázornění pevnosti pro jednotlivé úhly pro lepidlo GLUEPOX RAPID F	55
Obrázek č. 37 Znázornění pevnosti pro jednotlivé úhly pro všechna lepidla.....	57

## **8 SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200)[19] .....	33
Tabulka 2 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice GLUEPOX RAPID [20] .....	34
Tabulka 3 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice GLUEPOX RAPID F [21] .....	35
Tabulka 4 Technická data trhačího stroje [23] .....	36
Tabulka 5 Výsledné hodnoty pro lepidlo CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200).....	52
Tabulka 6 Výsledné hodnoty pro lepidlo GLUEPOX RAPID .....	54
Tabulka 7 Výsledné hodnoty pro lepidlo GLUEPOX RAPID F .....	56

## **9 SEZNAM ZKRATEK A JEDNOTEK**

### **Zkratky**

ČSN	- Česká státní norma
EN	- Evropská norma
ISO,	- norma Mezinárodní organizace pro standardizaci
max.	- maximálně
min.	- minimálně
atd.	- a tak dále
Obr.	- obrázek
Tab.	- tabulka

## **Jednotky**

stupně Celsia	°C
gram	g
Newton	N
Megapascal	MPa
milimetr, milimetr čtvereční	mm, mm <sup>2</sup>
minuta	min
milimetr za minutu	mm/min
úhlový stupeň	°
gram na centimetr krychlový	g/cm <sup>3</sup>

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo CHS Epoxy 324

Příloha 2 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo GLUEPOX RAPID

Příloha 3 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo GLUEPOX RAPID F

# **Příloha**

Příloha 1 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo CHS Epoxy 324

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	0	1	2755,5	25,47	SK	636,75	4,33
A	0	2	3320,7	25,3	SK	632,5	5,25
A	0	3	3940,4	25,1	A	627,5	6,28
A	0	4	3784,5	25,36	A	634	5,97
A	0	5	4512,25	25,36	A	634	7,12
A	0	6	3624,45	25,16	SK	629	5,76
A	0	7	3916,35	24,89	A	622,25	6,29
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		5,857	0,818	13,970	2,790	7,117	4,327
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	5	1	7148,2	25,24	SK	631	11,33
A	5	2	7394,35	25,62	A	640,5	11,54
A	5	3	7710,05	25,83	SK	645,75	11,94
A	5	4	7035,75	25,76	SK	644	10,93
A	5	5	6740,3	25,66	A	641,5	10,51
A	5	6	7825,5	25,59	SK	639,75	12,23
A	5	7	7548,05	25,76	SK	644	11,72
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		11,457	0,549	4,795	1,725	12,232	10,507
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	10	1	7427,05	25,34	SK	633,5	11,72
A	10	2	8173,3	25,71	A	642,75	12,72
A	10	3	8269,15	25,83	A	645,75	12,81
A	10	4	8108,8	25,07	SK	626,75	12,94
A	10	5	7821,35	25,76	A	644	12,14
A	10	6	8059,8	25,8	SK	645	12,50
A	10	7	6603,5	25,7	A	642,5	10,28
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		12,157	0,860	7,074	2,660	12,938	10,278

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	15	1	6194,5	25,6	A	640	9,68
A	15	2	6530,4	25,4	SK	635	10,28
A	15	3	6037,2	25,67	SK	641,75	9,41
A	15	4	6742,8	25,01	SK	625,25	10,78
A	15	5	7112,75	25,02	A	625,5	11,37
A	15	6	5627,65	25,8	A	645	8,73
A	15	7	6525,95	25,38	SK	634,5	10,29
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		10,077	0,819	8,128	2,646	11,371	8,725
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	20	1	5516,6	25,2	SK	630	8,76
A	20	2	5645,8	25,79	A	644,75	8,76
A	20	3	5273,75	25,7	SK	642,5	8,21
A	20	4	5772,75	25,57	SK	639,25	9,03
A	20	5	5623,2	24,8	SK	620	9,07
A	20	6	6104,5	25,22	A	630,5	9,68
A	20	7	5981,9	25,14	SK	628,5	9,52
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		9,003	0,461	5,115	1,474	9,682	8,208
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	25	1	4711,35	25,57	SK	639,25	7,37
A	25	2	5526,1	24,94	A	623,5	8,86
A	25	3	5727,35	25,54	A	638,5	8,97
A	25	4	5382,6	25,64	A	641	8,40
A	25	5	6082,35	25,22	SK	630,5	9,65
A	25	6	5185,1	25,8	SK	645	8,04
A	25	7	4922,15	25,29	SK	632,25	7,79
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		8,439	0,722	8,560	2,277	9,647	7,370

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
A	30	1	3185	25,93	A	648,25	4,91
A	30	2	2670,5	25,23	A	630,75	4,23
A	30	3	3942,1	24,79	SK	619,75	6,36
A	30	4	3337,05	24,59	SK	614,75	5,43
A	30	5	3730,25	24,71	SK	617,75	6,04
A	30	6	3072	24,92	SK	623	4,93
A	30	7	3646,05	25,27	SK	631,75	5,77
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		5,382	0,685	12,726	2,127	6,361	4,234

**Příloha 2 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo GLUEPOX RAPID**

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	0	1	5733,5	25,97	SK	649,25	8,83
B	0	2	5636,3	24,94	SK	623,5	9,04
B	0	3	5569,55	25,42	A	635,5	8,76
B	0	4	6285,35	25,6	A	640	9,82
B	0	5	5672,6	24,76	SK	619	9,16
B	0	6	5343,35	25,08	SK	627	8,52
B	0	7	5576,5	25,63	SK	640,75	8,70
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		8,978	0,396	4,415	1,299	9,821	8,522
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	5	1	7645,5	25,56	SK	639	11,96
B	5	2	6459	24,46	A	611,5	10,56
B	5	3	7119	25,74	SK	643,5	11,06
B	5	4	7205,5	25,97	SK	649,25	11,10
B	5	5	7470,5	25,9	SK	647,5	11,54
B	5	6	8066,95	25,83	SK	645,75	12,49
B	5	7	7992,2	25,85	SK	646,25	12,37
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		11,584	0,669	5,779	1,930	12,492	10,563
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	10	1	7552,2	25,43	SK	635,75	11,88
B	10	2	7912,15	25,99	SK	649,75	12,18
B	10	3	7669,05	25,67	A	641,75	11,95
B	10	4	7810	26,1	SK	652,5	11,97
B	10	5	7183,9	24,92	SK	623	11,53
B	10	6	6885,8	25,97	SK	649,25	10,61
B	10	7	7556,05	25,38	SK	634,5	11,91
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		11,717	0,487	4,159	1,571	12,177	10,606

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	15	1	5572,05	25,66	SK	641,5	8,69
B	15	2	5566,8	25,87	A	646,75	8,61
B	15	3	6277,35	25,81	SK	645,25	9,73
B	15	4	6361,25	25,97	SK	649,25	9,80
B	15	5	6678,85	25,76	SK	644	10,37
B	15	6	6666,4	25,7	SK	642,5	10,38
B	15	7	6575,3	25,93	A	648,25	10,14
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		9,673	0,690	7,131	1,768	10,376	8,607
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	20	1	4588,5	25,14	SK	628,5	7,30
B	20	2	5040,7	25,86	A	646,5	7,80
B	20	3	4240,15	25,47	SK	636,75	6,66
B	20	4	4275,6	25,24	SK	631	6,78
B	20	5	5012,85	25,58	SK	639,5	7,84
B	20	6	4303,85	25,83	SK	645,75	6,66
B	20	7	5755,1	25,26	SK	631,5	9,11
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		7,450	0,824	11,065	2,454	9,113	6,659
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	25	1	4173,7	24,85	SK	621,25	6,72
B	25	2	3946,35	26	SK	650	6,07
B	25	3	3565,65	25,78	SK	644,5	5,53
B	25	4	4314,35	24,69	SK	617,25	6,99
B	25	5	3650,1	25,62	A	640,5	5,70
B	25	6	4048,55	26,12	A	653	6,20
B	25	7	3658,1	25,62	SK	640,5	5,71
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		6,132	0,509	8,297	1,457	6,990	5,532



Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
B	30	1	2617,5	25,07	A	626,75	4,18
B	30	2	2235,95	25,15	SK	628,75	3,56
B	30	3	2390,2	25,76	SK	644	3,71
B	30	4	2510,65	25,04	SK	626	4,01
B	30	5	2172,8	25,21	SK	630,25	3,45
B	30	6	2131,55	24,79	SK	619,75	3,44
B	30	7	2722,2	24,95	A	623,75	4,36
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		3,815	0,343	8,995	0,925	4,364	3,439

**Příloha 3 Tabulky naměřených hodnot pro lepidlo GLUEPOX RAPID F**

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	0	1	3924,65	25,19	A	629,75	6,23
C	0	2	4508,4	24,62	SK	615,5	7,32
C	0	3	4825,75	25,19	SK	629,75	7,66
C	0	4	4314,55	25,3	SK	632,5	6,82
C	0	5	4105,8	24,64	SK	616	6,67
C	0	6	4802,2	25,82	SK	645,5	7,44
C	0	7	3777,15	25,1	A	627,5	6,02
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		6,881	0,577	8,392	1,644	7,663	6,019
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	5	1	7771,3	25,6	A	640	12,14
C	5	2	7940,8	25,93	A	648,25	12,25
C	5	3	8155,4	25,39	SK	634,75	12,85
C	5	4	7950,5	25,23	SK	630,75	12,60
C	5	5	8206,05	25,8	SK	645	12,72
C	5	6	8052,4	25,52	A	638	12,62
C	5	7	7917,8	25,39	SK	634,75	12,47
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		12,523	0,234	1,870	0,706	12,848	12,143
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	10	1	7865,2	25,92	SK	648	12,14
C	10	2	7356,2	26,13	A	653,25	11,26
C	10	3	7520,45	26,07	SK	651,75	11,54
C	10	4	7688,25	25,8	SK	645	11,92
C	10	5	7730,6	25,96	SK	649	11,91
C	10	6	7849,4	25,93	SK	648,25	12,11
C	10	7	7636,75	25,69	SK	642,25	11,89
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		11,824	0,293	2,474	0,877	12,138	11,261

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	15	1	6232,5	25,66	A	641,5	9,72
C	15	2	5262,75	25,06	SK	626,5	8,40
C	15	3	6789,9	25,3	A	632,5	10,74
C	15	4	5704,95	25,82	SK	645,5	8,84
C	15	5	6966,6	25,28	SK	632	11,02
C	15	6	6157,45	25,76	SK	644	9,56
C	15	7	5806,65	25,62	SK	640,5	9,07
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		9,620	0,897	9,323	2,623	11,023	8,400
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	20	1	5201,6	25,2	SK	630	8,26
C	20	2	5020,15	25,96	SK	649	7,74
C	20	3	6358,75	25,4	SK	635	10,01
C	20	4	4989,95	25,45	SK	636,25	7,84
C	20	5	5540,2	25,86	SK	646,5	8,57
C	20	6	5564,55	26,02	SK	650,5	8,55
C	20	7	5313,4	25,46	A	636,5	8,35
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		8,474	0,696	8,217	2,279	10,014	7,735
Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	25	1	5073,3	25,46	SK	636,5	7,97
C	25	2	4524,75	25,2	SK	630	7,18
C	25	3	4832,7	24,94	SK	623,5	7,75
C	25	4	4296,55	25,83	A	645,75	6,65
C	25	5	5083	25,86	A	646,5	7,86
C	25	6	4847,1	25,16	SK	629	7,71
C	25	7	4222,65	25,89	SK	647,25	6,52
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		7,379	0,551	7,467	1,447	7,971	6,524

Lepidlo	Úhel	Vzorek č.	Síla	délka přeplátování	typ porušení	plocha přeplátování	pevnost
	[°]		[N]	[mm]		[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
C	30	1	3013,35	25,35	SK	633,75	4,75
C	30	2	3144,3	25,7	SK	642,5	4,89
C	30	3	2319,1	25,05	SK	626,25	3,70
C	30	4	3240,15	25,98	A	649,5	4,99
C	30	5	2618,45	25,53	SK	638,25	4,10
C	30	6	3382,2	25,78	SK	644,5	5,25
C	30	7	2616,25	25,24	SK	631	4,15
Statistické výpočty		aritmetický průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	variační rozpětí	maximální hodnota	minimální hodnota
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		4,548	0,524	11,515	1,545	5,248	3,703