

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301      Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje

Autor:                      **Jakub VESELÝ**

Vedoucí práce:        **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Veselý	Jméno Jakub	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	-------------------------	----	--------------------------	---

<b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce obsahuje obecnou teorii o lepidlech a únavě lepených spojů. Teoretická část se věnuje základnímu rozdělení lepidel, porovnání techniky lepení s jinými technikami a popisu normativních zkoušek prováděných na lepidlech. Praktická část obsahuje zpracované výsledky z jednotlivých zkoušek se třemi různými drsnostmi v kombinaci s kyanoakrylátovým lepidlem a lepidlem na bázi MS polymerů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Lepidlo, adheze, koheze, smáčivost, lepený spoj, pevnost v tahu, pevnost ve smyku, únava

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Veselý	Name Jakub	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>BACHELOR</b>	<del><b>DIPLOMA</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Influence of Surface Condition on the Fatigue and Static Strength of the Bonded Joint		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Material Science and Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Bachelor thesis contains a general theory of glue and fatigue adhesive joints. The theoretical part deals with the basic division of glues, compare bonding technique with other techniques and describe normative tests on glues. The practical part contains the processed results of the individual tests with three different roughness in combination with cyanoacrylate glue and glue based on MS polymer.
<b>KEY WORDS</b>	Adhesive, adhesion, cohesion, wettability, bonded joint, tensile strength, shear strength, fatigue

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za příkladné vedení, podmětné rady a cenné připomínky. Také bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Šimečkovi za pomoc a důležité informace při obsluze stroje na ohybové zkoušky.

## OBSAH

<b>1. OBECNÁ TEORIE O LEPIDLECH</b> .....	<b>10</b>
1.1. Historie lepení.....	10
1.2. Druhy lepidel.....	11
1.2.1. MS Polymery.....	11
1.2.2. Epoxidová lepidla.....	11
1.2.3. Kyanoakrylátová lepidla.....	12
1.2.4. Polyuretanová lepidla.....	12
1.2.5. Tavná lepidla.....	13
1.2.6. Silikonová lepidla.....	13
1.2.7. Montážní lepidla.....	14
1.2.8. Disperzní lepidla.....	14
1.2.9. Chloroprenová lepidla.....	14
1.3. Výhody a nevýhody lepených spojů oproti jiným technikám spojování.....	15
1.3.1. Svařování.....	15
1.3.2. Pájení.....	15
1.3.3. Lepení.....	16
<b>2. SOUČASNÝ STAV LEPENÍ</b> .....	<b>18</b>
2.1. Lepení podlahovin.....	19
2.2. Lepení čalounění.....	20
2.3. Lepení dřeva.....	20
<b>3. TEORIE ADHEZNÍHO SPOJENÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1. Adheze a koheze.....	21
3.1.1. Adheze.....	21
3.1.2. Koheze.....	22
3.2. Smáčivost.....	22
3.3. Teorie lepení.....	23
3.3.1. Mechanická teorie.....	23
3.3.2. Chemická teorie.....	23
3.3.3. Difuzní teorie.....	24
3.3.4. Elektrostatická teorie.....	24
3.3.5. Molekulová teorie (adsorpční).....	24
<b>4. TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY SPRÁVNÉHO LEPENÍ</b> .....	<b>25</b>
4.1. Předpřípravné operace před procesem lepení.....	25
4.1.1. Fyzikální postupy.....	25
4.1.1.1. Broušení.....	25
4.1.1.2. Otryskávání.....	25
4.1.1.3. Kartáčování.....	25
4.1.2. Chemické postupy.....	25
4.1.2.1. Odmašťování.....	25
4.1.2.2. Moření.....	26
<b>5. ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>26</b>
5.1. Vliv teploty na pevnost lepených spojů.....	26
5.1.1. Teplotní roztažnost.....	27

5.2.	<i>Vliv vlhkosti na pevnost lepených spojů</i>	27
5.3.	<i>Vliv drsnosti na pevnost lepených spojů</i>	28
<b>6.</b>	<b>ZKOUŠKA TAHEM LEPIDEL – NORMY, TYPY ZKOUŠENÍ</b>	<b>29</b>
6.1.	<i>Normy</i>	29
6.1.1.	<i>Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav ČSN EN 1465:2009</i>	29
6.1.2.	<i>Stanovení únavy konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem ČSN EN ISO 9664 (66 8513)</i>	29
6.1.3.	<i>Zkouška v odlupování ČSN EN 28510-1</i>	30
6.1.4.	<i>Zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku ČSN EN ISO 9653</i>	31
<b>7.</b>	<b>OBECNÁ TEORIE ÚNAVY</b>	<b>32</b>
7.1.	<i>Fyzikální princip</i>	32
7.2.	<i>Únavový proces</i>	33
7.3.	<i>Cyklické změkčení a zpevnění</i>	33
7.4.	<i>Norma ČSN EN ISO 9664</i>	34
7.5.	<i>Výstupy ze zkoušek únavy</i>	35
<b>8.</b>	<b>ÚNAVA LEPENÝCH SPOJŮ</b>	<b>36</b>
<b>9.</b>	<b>CÍLE EXPERIMENTU</b>	<b>38</b>
<b>10.</b>	<b>LEPIDLA POUŽITÁ V EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI</b>	<b>40</b>
10.1.	<i>Terostat 9220 - vlastnosti</i>	40
10.2.	<i>INSTA-CURE+ - vlastnosti</i>	40
<b>11.</b>	<b>ZKUŠEBNÍ STROJE</b>	<b>41</b>
11.1.	<i>Zkušební stroj Zwick/Roell Z005</i>	41
11.2.	<i>Univerzální tahový stroj pro statickou zkoušku tahem DMG</i>	41
11.3.	<i>Únavový stroj na ohyb Schenck, typ PWYG</i>	42
<b>12.</b>	<b>METODIKA ZKOUŠENÍ</b>	<b>43</b>
12.1.	<i>Statická zkouška v tahu</i>	43
12.2.	<i>Statická zkouška ve smyku</i>	43
12.3.	<i>Zkouška kvazistatické pevnosti v tahu</i>	43
12.4.	<i>Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku</i>	43
12.5.	<i>Únavová zkouška v ohybu</i>	44
<b>13.</b>	<b>PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ</b>	<b>44</b>
13.1.	<i>Příprava vzorků - lepidlo Terostat 9220</i>	45
13.1.1.	<i>Příprava vzorků pro zkoušku tahem</i>	45
13.1.2.	<i>Příprava vzorků pro zkoušku ve smyku</i>	47
13.1.3.	<i>Příprava vzorků pro únavovou zkoušku v ohybu</i>	47
13.2.	<i>Příprava vzorků - lepidlo INSTA-CURE+</i>	48
13.2.1.	<i>Příprava vzorků pro zkoušku tahem</i>	48
13.2.2.	<i>Příprava vzorků pro zkoušku ve smyku</i>	48
13.2.3.	<i>Příprava vzorků pro únavovou zkoušku v ohybu</i>	49

<b>14. Vliv drsnosti kovu na pevnost lepeného spoje - výsledky</b>	<b>50</b>
14.1. Výsledky zkoušek - lepidlo Terostat 9220	50
14.1.1. Statická zkouška v tahu	50
14.1.2. Statická zkouška ve smyku	51
14.1.3. Zkouška kvazistatické pevnosti v tahu	52
14.1.4. Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku	54
14.1.5. Únavová zkouška v ohybu	57
14.2. Výsledky zkoušek - lepidlo INSTA-CURE+	58
14.2.1. Statická zkouška v tahu	58
14.2.2. Statická zkouška ve smyku	59
14.2.3. Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku	60
<b>15. Diskuse výsledků</b>	<b>62</b>
15.1. Diskuse výsledků - lepidlo Terostat 9220	62
15.2. Diskuse výsledků - lepidlo INSTA-CURE+	63
<b>16. Závěr</b>	<b>64</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>65</b>



## Přehled použitých zkratk a symbolů

**R<sub>m</sub> [MPa]:** Mez pevnosti v tahu;

**R<sub>e</sub> [MPa]:** Mez pevnosti v kluzu;

**F<sub>max</sub> [N, kN]:** Maximální síla;

**t [s]:** Čas testu;

**F [N, kN]:** Působící tahová síla;

**S [mm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>]:** Celková plocha spoje;

**S<sub>0</sub> [mm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>]:** Skutečná plocha zpolymerizovaného lepeného spoje;

**Zavadnutí:** Čas nutný pro částečné odpaření rozpouštědel nebo vody z kontaktních lepidel.  
Teprve po zavadnutí je možné spojovat lepené plochy;

**Vysokofrekvenční lepení:** Způsob lepení (hlavně dřeva), při které je sušení a vytvrzování lepidla podstatně urychleno sušením pomocí mikrovln (dochází k ohřevu mokrého lepidla ve spoji);

**Nekontaktní lepení:** Lepení, při kterém se plochy spojují ihned po nánosu lepidla (obvykle jen jednostranný nános), nečeká se na zavadnutí - tzv mokré lepení;

# 1 Obecná teorie o lepidlech

## 1.1. Historie lepení

První lepidla byla vyrobena z přírodní gummy a pryskyřice a první prokázané použití lepidla pochází z doby 4000 př. n. l. Zmínky o lepidle a umění používat jej pocházejí přibližně z roku 2000 př. n. l. Popisují jednoduché způsoby výroby a použití živočišného lepidla. V období 1500 - 1000 př. n. l. se lepidlo stalo metodou montáže. V období prvních 500 let našeho letopočtu Římané a Řekové vyvinuli umění dýchání a intarzie, která spočívají v lepení vrstev dřeva. Z výroby živočišného a rybího lepidla byly vyvinuty další druhy lepidel, jako lepidlo z vaječných bílků používané k úpravě pergamenů se zlatými listy. Římané byli jedni z prvních, kteří použili těr a včelí vosk k utěsnění lodí.

Kolem roku 1700 díky rozšíření používání lepidel nastaly rychlé změny v jeho výrobě. První komerční továrna na lepidla byla otevřena v Holandsku. Lepidlo (klich) se zde vyrábělo ze zvířecí kůže. V roce 1750 byl vydán Británii první patent na výrobu rybího lepidla. Patenty poté byly rychle vydány i pro lepidla vyráběná z přírodního kaučuku, zvířecích kostí, ryb, škrobu, mléčné bílkoviny. Do roku 1900 vyrostlo mnoho továren vyrábějící lepidlo z uvedených materiálů.

Velkým mezníkem ve vývoji lepidel a lepení samotného byl objev nitrace celulózy v letech 1845 až 1846. Roku 1872 vznikla v Americe první továrna na celulooid, ale teprve roku 1912 byl na obuvnické výstavě v Budyšině předveden na svou dobu převratný výrobní postup lepené obuvi, zahrnující i speciální stroje pro nanášení lepidla [8].

Průmyslová revoluce způsobila explozi v zásadních technických objevech, díky nimž mohly být pro výrobu lepidla použity nové materiály. První syntetizovaný polymer byl nitrocelulóza, termoplastický materiál odvozený z celulózy dřeva. Jeho první použití bylo při výrobě kulečnickových koulí, které byly do té doby vyráběny ze slonoviny. Éra plastů začala objevem bakelitu v roce 1910. Během jednoho roku se na trh dostala lepidla používající fenolové pryskyřice. Dále ve 20., 30. a 40. letech bylo syntetizováno mnoho nových plastů a pryží. Ačkoli lepidla jsou známá asi 6000 let, většina technologií pro jejich výrobu byla vyvinuta během posledních 100 let.

Výrazným mezníkem v historii techniky lepení je objev fenolformaldehydové pryskyřice, modifikované polyvinylformalem, která pod názvem Redux umožnila u společnosti de Havilland ve Velké Británii roku 1943 sériovou výrobu letounu typu DH-103 Hornet. Byl to letoun smíšené konstrukce ze dřeva a kovu, kde bylo dosaženo snížení množství dřeva na sklápěcích křídlech lepením duralu na překližku. Kolem roku 1965 přecházejí na techniku lepení i ostatní výrobci letadel a začíná se ve větší míře uplatňovat i v ostatních odvětvích průmyslu. Technologii lepení můžeme v současnosti nalézt například ve stavebnictví, letectví nebo zdravotnictví a v neposlední řadě také v automobilovém průmyslu, kde jsou lepidla používána nejen k lepení části karoserie, ale i k těsnění a tlumení vibrací. V současnosti jsou lepidla vyráběna přesně podle požadavků odběratele a jen těžko by se dnes hledal obor, kde by se nepoužívala. Navzdory jejich rozsáhlé historii mají stále co nabídnout a mají vysokou perspektivu do budoucna [8].

## 1.2. Druhy lepidel

Lepidla lze rozdělit dle několika hledisek. Podle nejobecnějšího hlediska, chemického složení, jsou lepidla rozdělena na přírodní a syntetická. Přírodní jsou dále členěna na organická a anorganická. Syntetická dále na lepidla na bázi elastomerů, reaktoplastů, termoplastů a na lepidla směsná. Dle fyzikálního hlediska jsou lepidla členěna na pevná, polopevná a tekutá. Tekutá jsou členěna na roztoková, disperzní, pěny a pasty. Níže uvedená lepidla jsou pouze některá. Jsou to lepidla, která jsou ve strojírenství nejhojněji používána.

### 1.2.1. MS Polymery

Tato lepidla jsou vyráběna bez použití rozpouštědel a jiných nebezpečných přísad. Neobsahují isokyanáty, což jsou vysoce reaktivní a nebezpečné látky pro živé tkáně. Vyznačují se vysokou přilnavostí ke kovům a smaltům. Po aplikaci chrání proti mechanickému poškození a poškození korozí. Tato lepidla díky své vysoké pružnosti redukuje přenos zvuku v případě akustických vibrací. Mezi charakteristické vlastnosti dále patří: dobrá přilnavost, dlouhodobá stabilita, snadná zpracovatelnost, odolnost proti UV záření, rychlost vytvrzování a možnost zpracování při nízkých teplotách, malé smrštění, odolnost vůči stárnutí a vysoká pružnost. Hlavní výhodou je možnost aplikovat MS polymery na vlhké podklady [3].

### 1.2.2. Epoxidová lepidla

Epoxidová lepidla se vyrábějí jako jednosložková, dvousložková či vícesložková. Těmito lepidly se lepí pouze tvrdé materiály, protože po ztuhnutí epoxidu se z něj stává tvrdý a křehký materiál. Z důvodu vysoké pevnosti (až  $300 \text{ kg/cm}^2$ ) se používají tam, kde je namáhání na tah a smyk. Pracovní teplota těchto lepidel se pohybuje mezi  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tato lepidla se vyskytují v různých barevných modifikacích. Dvousložková lepidla mohou být čirá, nažloutlá nebo tmavě zbarvená (např. epoxid s ocelovým práškem nebo jiným kovovým plnivem, které výrazně zvyšuje tepelnou odolnost). Tato dvousložková lepidla mají vysokou pevnost. Doba na zpracování lepených dílů, během které lze se spojem manipulovat, než spoj ztuhne, se pohybuje od 3 do několika desítek minut. Maximální pevnost ve smyku je v případě adhezního spoje mezi ocelovými díly až  $40 \text{ MPa}$ . Pracovní teplota jednosložkových epoxidových lepidel je  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$  s pevností v tahu  $44 \text{ MPa}$ . Vyznačují se vysokou odolností vůči odlupování a vysokou pevností ve smyku až  $30 \text{ MPa}$  [4].



*Obr. 1 Dvousložkové epoxidové lepidlo*

### 1.2.3. Kyanoakrylátová lepidla

Kyanoakryláty je třída organických sloučenin označovaných jako rychle tvrdnoucí nebo sekundová lepidla. Vytvrzují se vzdušnou vlhkostí a člení se na nízkoviskozní, středněviskozní, vysokoviskozní, gelové a pro porézní a kyselé povrchy. Nejvyšší pevnosti se dosáhne lepením neporézních materiálů. Jejich popularita spočívá v jejich univerzálnosti použití. Rychlost polymerizace je ovlivněna i množstvím naneseného lepidla a pohybuje se do desítek sekund. Vzniká spoj s vysokou pevností, odolný vodě, alkoholu, benzinům, olejům, UV záření a vlivům počasí. Slepovat můžeme: kovy, většinu umělých hmot, sklo, keramiku, gumu, kůži, porcelán, dřevo, balsu. Lepené součásti mohou být tvrdé, měkké, porézní i neporézní. V případě savých materiálů proniká lepidlo do hloubky materiálu. Lepená místa musí být v každém případě odmaštěna, bez prachu a musí k sobě přiléhat.



*Obr. 2 Sekundové lepidlo*

### 1.2.4. Polyuretanová lepidla

Těmito lepidly se vytváří trvale pružný spoj nanášením štětcem nebo stříkáním. Spojovat by se měly především nesavé materiály jako je plast, kov, sklo, beton nebo dřevo. Při lepení porézních materiálů se lepidlo nanese pouze na jeden díl, u neporézních na oba díly. Odolává horké vodě, čistícím prostředkům, ředěným louhům, i kyselinám. Doba zpracovatelnosti je přibližně 10 až 15 minut a k úplnému vytvrzení dochází po sedmi hodinách. Jsou zpracovatelná i za nízkých teplot. Lepené spoje jsou pevné, pružné a odolné vůči dynamickému namáhání. Teplota, při které má lepený spoj vyhovující vlastnosti se pohybuje mezi -20 °C a +90 °C. Tato lepidla nemají oproti MS polymerům lepidlivý povrch, který by bylo možné povrchově znečistit. Další výhodou je nižší cena.



*Obr. 3 Příklad aplikace polyuretanového lepidla*

### 1.2.5. Tavná lepidla

Tavná lepidla se používají pro konstrukční spojování materiálů, jako jsou plasty, papír, dřevo, textil a kovy. Neobsahují žádná rozpouštědla a jsou hygienicky i zdravotně nezávadná. Charakteristickou vlastností těchto lepidel je vysoká dotyková lepivost za horka a vysoká teplotní odolnost. Teplota, při které lepidlo měkne a je možné ho nanést se pohybuje od 80 °C do 190 °C. Manipulační pevnosti se dosáhne asi po 30 sec. Viskozita a doba potřebná k úplnému vytvrzení a dosažení plné pevnosti se značně liší. Nejčastěji se tato lepidla nanášejí pomocí tavných pistolí, mohou být ale nanášena pomocí rotačních válcových nanášecích strojů (pro plošnou aplikaci lepidel). Tavná lepidla mohou být na bázi polyetylenvinylacetátu, amorfního polyelefinu, nebo na bázi termoplastického kaučuku.



*Obr. 4 Válečky z tavného lepidla pro tavnou pistoli*

### 1.2.6. Silikonová lepidla

Tato lepidla vytváří trvale pružný spoj kvůli vulkanizaci za pomoci vzdušné vlhkosti na silikonovou pryž. Nejčastějším použitím je lepení sanitární techniky, lepení a těsnění olejových van, vodních čerpadel, převodovek ve strojírenství a v automobilovém opravárenství. Jsou dostatečně odolná vůči UV záření. Velmi dobrá je přilnavost ke kovům, sklu, smaltu a k některým plastickým hmotám (PVC, polykarbonáty). Teplotní odolnost se pohybuje v rozmezí -50 °C až +250 °C, krátkodobě až +300 °C. Základní vlastnosti silikonových lepidel jsou: hustota 1,35 g/cm<sup>3</sup>, tažnost 220 %, pevnost 1,3 MPa.



*Obr. 5 Nanášení silikonového lepidla*

### 1.2.7. Montážní lepidla

Jde o rychlá lepidla určená pro spojování široké škály materiálů. Charakteristická je okamžitá přilnavost a vysoká konečná odolnost spojů. Lze použít i na nerovné povrchy. Montážní lepidla jsou odolná proti vlhkosti. Vhodnými materiály jsou: dřevo, sádra, cement, beton, cihla, kov, plast. Naopak montážní lepidla nejsou vhodná pro lepení polystyrenu, polypropylenu, teflonu a velmi jemných plastů, např. vinylových.

### 1.2.8. Disperzní lepidla

Jedná se o lepidla na bázi disperze umělých pryskyřic, nebo akrylátové disperze s dobrou adhezí nejen k papíru, ale i k různým foliím a dřevu. Zaschlá vrstva bývá měkká a jen slabě lepivá. Uplatnění disperzních lepidel je především v kartonážním průmyslu, lepení podlahových krytin, keramických obkladů nebo při lepení nábytku. Disperzní lepidla se nepoužívají na kov ani jiné nesavé materiály.



*Obr. 6 Disperzní lepidlo*

### 1.2.9. Chloroprenová lepidla

Chloroprenová kontaktní lepidla jsou určena především k lepení PVC, kaučukových, linoleových krytin, korku, kůže, pryže a textilních krytin na předem připravený podklad. Nejsou vhodná k lepení polystyrenu a měkčeného PVC. Tato lepidla charakterizuje vysoká počáteční lepivost, konečná pevnost. Jedná se o pružný a poměrně odolný spoj. Princip vytvrzování spočívá v odpaření rozpouštědel a ve vulkanizaci kaučuku přítomnými aditivami [2].



*Obr. 7 Chloroprenové lepidlo*

### 1.3. Výhody a nevýhody lepených spojů oproti jiným technikám spojování

Mezi konvenční způsoby spojování materiálů patří bezpochyby nýtování, šroubování svařování a pájení. Ačkoliv jsou lepidla známá již 6000 let a jejich největší rozmach a vývoj nových technologií pro jejich výrobu proběhl ve 20. století, lze považovat jejich použití za zcela běžné až dnes. U spojovaných materiálů se vyžaduje, aby spoj vydržel namáhání k němuž je určen, aby byl houževnatý a samozřejmě nepohyblivý.

#### 1.3.1. Svařování

Svařováním se vytvářejí nerozebíratelná spojení na principu místního roztavení spojovaných částí za působení tepla nebo tlaku a to bez použití nebo s použitím přídavného materiálu. Svařování se člení na tavné a tlakové. Tavným svařováním lze spojit materiály jejich roztavením bez působení vnějšího tlaku. Tlakové svařování se od tavného liší tím, že se navíc na spojované materiály musí působit vnější silou [1].

#### Výhody svarových spojů:

- Přenos všech druhů zatížení.
- Celková tuhost konstrukce.
- Nulové provozní náklady [1].

#### Nevýhody svarových spojů:

- Spolehlivost je ovlivněna náchylností na vnitřní pnutí a vrubové účinky.
- Náročnost na provedení.
- Náchylnost svarového spoje k trhlinám.
- Velké množství potřebné tepelné i tlakové energie.
- Změna vlastností v TOO díky tepelně deformačnímu procesu.
- Vnitřní pnutí a deformace.
- Značné náklady na demontáž [1].

#### 1.3.2. Pájení

Pájením se vytvářejí pevná nerozebíratelná spojení dvou kovových částí pomocí kovu, který je při spojování roztaven a difuzí přilne ke spojovaným částem, aniž by se materiály roztavily. Pájení se člení na měkké (do 450 °C) a tvrdé (nad 450 °C). Při vytváření spojů pájením je zde značné materiálové omezení. Měkkým pájením lze spojit například: měď, zinek, měkkou i tvrdou ocel, olovo a jejich slitiny, hliník, šedou litinu a sklo. Tvrdé pájení se používá většinou tam, kde je spoj vystaven tahovému namáhání. Toto rozdělení je pouze obecné. Není striktně dáno, které materiály pájet tvrdým, nebo měkkým pájením. Například ocel i měď lze pájet tvrdě i měkce.

### **Výhody pájených spojů:**

- Těsnost.
- Odolnost proti korozi za vyšších teplot.
- Nulové provozní náklady [1].

### **Nevýhody pájených spojů:**

- Přenos jen malých zatížení.
- Dostatečná pevnost jen při namáhání na smyk.
- Náročnost na provedení (očištění povrchů).
- Znehodnocení pájek při likvidaci [1].

### **1.3.3. Lepení**

Lepením se vytváří pevná nerozebíratelná spojení pomocí přídavného tekutého materiálu, který při tuhnutí přilne adhezí ke spojovaným částem. Využití najdou především tam, kde nevyhovují nebo nejsou možné klasické způsoby spojení. Množství materiálů, jenž lze slepit pomocí lepidel s jejich vývojem stále roste. Nejčastěji se lepí dřevo, papír, kovy, keramika, sklo, kůže, termoplasty, pryž, PU pěny, textil, beton, nebo stavební keramika.

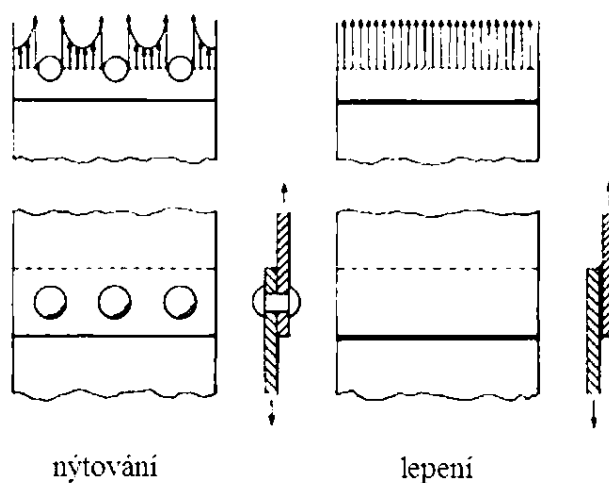
### **Výhody lepených spojů:**

- Možnost spojovat materiály různého druhu a tloušťky, které nelze svařovat ani pájet (např. kov - pryž).
- Menší nebo žádné tepelné namáhání materiálu.
- Nedochozí k ovlivnění struktury spojovaných materiálů.
- Nedochozí k deformacím spojovaných částí.
- Snadná zpracovatelnost.
- Rovnoměrnost rozdělení zatížení (Obr. 8).
- Vodotěsnost a plynotěsnost spojů.
- Elektrický izolant.
- Snížení hmotnosti konstrukce.
- Tlumení vibrací, chvění a hluku.
- Vysoká pevnost ve smyku a v tahu.
- Spojení dvou nesvařitelných materiálů.
- Spojení tenkých plechů, které nelze svařovat ani nýtovat.
- Spojení materiálů zcela odlišných vlastností.
- Bez tepelného deformačního účinku, vnitřních pnutí, struktury a deformací.
- Bez změn mechanických, fyzikálních, chemických vlastností ve spoji [1, 6].
- Zvýšená bezpečnost při poruše (Obr. 9) [8].

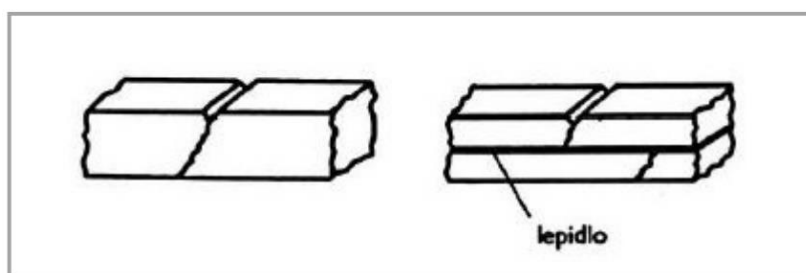


### Nevýhody lepených spojů:

- Nutnost (tvarové) úpravy stykových ploch před lepením.
- Čištění od hrubých nečistot a oxidů, odmaštění.
- Reaktivní lepicí směsi mají omezenou životnost.
- Obtížná demontáž lepených spojů.
- Malá pevnost při zkoušce odlupu lepených spojů.
- Maximální pevnosti se dosáhne až po určité době.
- Menší odolnost vůči velmi vysokým teplotám.
- Nevhodnost do dlouhodobě agresivního prostředí.
- Stárnutí.
- Nemožná recyklace [1].



*Obr. 8 Rozložení napětí u nýtování a lepení [8]*

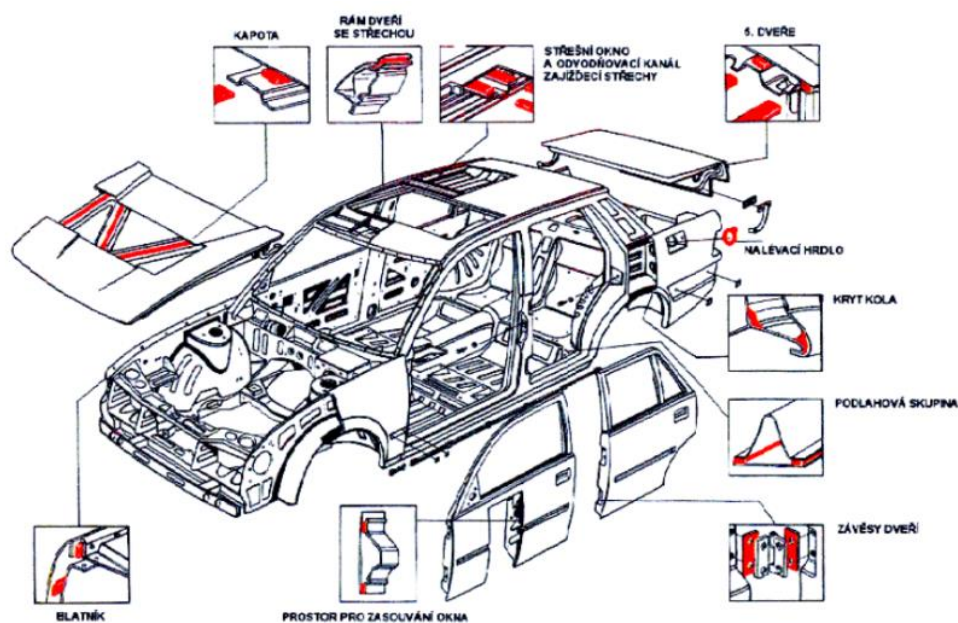


*Obr. 9 Zmírnění vrubových účinků vrstvou lepidla*

V dnešním světě moderních technologií a miniaturizace je kladen velký tlak na všechny moderní průmyslové podniky, které by se měly snažit jít cestou minimálních nákladů na výrobu, maximálně využívat materiál, počínat si ekonomicky, efektivně a provozovat svoji činnost s minimálním dopadem na životní prostředí. Jedním z cílů nejen v automobilovém, ale i leteckém, lodním či jiném dopravním průmyslu by mělo být snížení hmotnosti dopravních prostředků a s tím spojené snížení spotřeby paliva. K tomu velkou měrou přispívá právě konstrukce dopravních prostředků a technologie, jakou jsou díly spojovány. Lepené spoje právě zde nacházejí své největší uplatnění. Přes všechny výhody závisí pevnost a únosnost lepeného spoje především na jeho vhodném umístění.

## 2 Současný stav lepení

V dnešní době se lepení nejčastěji vyskytuje v oblasti lepení dřeva, kovů, plastů a pryže. Konkrétnější aplikace lze sledovat u lepení vnějších ploch letadel, mostů, střešních a okenních konstrukcí a části automobilů. Dalším příkladem je lepení trubek, nalepování brzdového nebo umělohmotného obložení na kovové součásti, břitových destiček na řezné nástroje. Zvláštní výhody skýtá lepení při spojování různých materiálů (hliník na ocel nebo ocel na sklo). Vznikají přitom hladké povrchy, švy bez štěrbin, stejná hodnota pevnosti po celém průřezu, dochází k izolačnímu působení a úsporám na hmotnosti.



*Obr. 10 Přehled lepených spojů karoserie automobilu [9]*

Druh lepeného spoje	Příklady	Používaná lepidla	Požadované vlastnosti lepeného spoje
drážkové přírubové lepení	kapota	epoxidové pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu, ochrana před štěrbínovou korozi
výztuhové lepení	dveře, kapota	např. polyuretany, PVC, synt. kaučuky	neohebnost, nesmí se deformovat vzhledový díl
lepené nosné struktury	sloupky, profily, přírubové švy	epoxidové pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu
těsnící lepení	hrdlo nádrže, utěsnění švu	např. PVC, synt. kaučuky	těsnost, odolnost vůči korozi
přímé zasklívání	přední, zadní a pevné boční tabule	např. polyuretany	tuhost karoserie, těsnost, nepropustnost

*Obr. 11 Typy lepených spojů na karoserii automobilu [9]*

## 2.1. Lepení podlahovin

### **(PVC, linolea, koberců) na savé podklady**

Zde se používají výhradně disperzní lepidla, protože jsou nehořlavá a nezapáchají. Rychlý vznik lepené vazby umožní savý podklad (beton, dřevo), který odvádí vodu z lepeného spoje. Rozlišují se lepidla kontaktní a nekontaktní. Při nekontaktním lepení se lepidlo nanese zubovou stěrkou na podklad, krytina se položí a několikrát přitlačí do mokrého lepidla. Naopak při kontaktním lepení je důležité zavaznutí ploch. Po určité době následné spojení a přitisknutí. Kontaktní lepidla mají počáteční pevnost hned po přilepení, takže umožňují lepit na šikmé nebo zakřivené plochy.

### **(PVC, linolea, koberců) na nesavé podklady**

Zde se používají pouze kontaktní lepidla. Disperzní kontaktní lepidla jsou nejvýhodnější z hlediska ekologie, požární bezpečnosti i ceny. Z hlediska teplotní odolnosti a pevnosti spoje pak rozpouštědlová (hořlavá) kontaktní lepidla. Tato lepidla se používají proto, že před spojením ploch většina vody nebo rozpouštědla odtéká během zavaznutí a neuzavře se tedy mezi neprodyšnými materiály.

### **Parkety**

Pro lepení parket se musí použít speciální parketářská lepidla. Klasická kontaktní lepidla použít nelze, protože parketa je nepoddajný materiál, a proto musí být celoplošně uložena v lůžku tvořeném lepidlem s výplňovou schopností. Při použití například chemoprénu se po vyschnutí lepidlo smrští a nebude plnit svoji funkci. Používají se tedy speciální disperzní, lihová nebo polyuretanová lepidla. Jednosložková polyuretanová lepidla zajišťují totiž velikou pevnost spoje, nezapáchají při lepení, jsou bez rozpouštědel a bez vody [2].

## 2.2. Lepení čalounění

Mezi čalounění patří především polyuretanové pěny (molitan), latexová pěna, polyethylenová pěna, netkané textilie, potahové látky, kůže a samozřejmě nosné kostry (kov, dřevo, dřevotříska, plasty).

### Výroba matrací

Používají se lepidla stříkatelná, rozpouštědlová, speciální jednosložkové disperze pro automatické výrobní linky, tavná lepidla nanášená nástřikem nebo housenkou. Lepidlo se nanáší stříkáací pistolí s tryskou o určitém průměru oboustranně a bez zavadnutí se plochy spojují. Výbornou životnost a hlavně ekologický provoz mají disperzní a tavná lepidla. Tavná lepidla se hodí jak pro sériovou výrobu na automatických linkách, tak pro ruční malosériovou výrobu. Vyznačuje se zcela ekologickým provozem bez nutnosti odsávání emisí, velkou životností spoje a dlouhou skladovatelností (až 2 roky). Nanášet lze jak v podobě housenky, tak sprejem. Nanáší se výhradně oboustranně [2].

## 2.3. Lepení dřeva

Výběr lepidel pro dřevo se provádí na základě požadavků na vodovzdornost spoje, rázuvzdornost spoje a pevnost spoje. Pro lepení tenkých vrstev dřeva se osvědčila močovinoformaldehydová lepidla (UF lepidla). Jejich hlavní výhodou je cena. Nanáší se podobně jako disperze na jednu plochu a lisují se při 80 °C - 120 °C. UF lepidla mají malou vodovzdornost kategorie D1.

Vrchol mechanické, tepelné a chemické odolnosti a vodovzdornosti představují drahá polyuretanová lepidla. Stavební sendviče (hliník - dřevo, hliník - izolační pěna) se lepí např. jednosložkovým polyuretanem. Ten se nanáší na jednu z ploch a během několika minut se přiloží druhá plocha a pevně se zafixuje svorkami. Tímto způsobem lze lepit také dva dřevěné plošné díly k sobě.

Pro lepení nábytku se osvědčila disperzní lepidla kategorie D2 s rychlým vznikem lepené vazby. Jsou vyžadovaná lepidla s nízkou viskozitou, která umožňuje vstříknutí lepidla do kolíkového otvoru. Lepení kuchyňského nábytku vyžaduje použití lepidel kategorie D3 a pro lepení zahradního nábytku kategorii D4 [2].

Kategorie voděodolnosti lepidel uvádí evropská norma EN 204. V níže uvedené tabulce je stručný přehled těchto kategorií.

Normalizovaná skupina	Příklady klimatických podmínek a typických oblastí použití
D1	Interier, kde teplota činí jen příležitostně a krátkodobě více než 50 °C a vlhkost dřeva je maximálně 15 %. Např. nábytek, truhlářské výrobky.
D2	Interier s příležitostným krátkodobým působením tekoucí nebo kondenzované vody anebo občasnou vysokou vlhkostí vzduchu, jestli-že nárůst vlhkosti dřeva přesáhne 18%. Např. kuchyňský nábytek, výroba dřevěných materiálů, montážní spoje.
D3	Interier s častým krátkodobým působením tekoucí vody nebo kondenzované vody anebo dlouhodobým působením vysoké vlhkosti vzduchu. Exterier chráněný před povětrnostními vlivy. Např. koupelnový nábytek, dřevěné podlahy, vnější okna a dveře.
D4	Interier s častým silným působením tekoucí nebo kondenzované vody. Exterier vystavený povětrnostním vlivům, který je opatřený přiměřenou povrchovou ochranou. Např. zahradní nábytek, pergoly, sauny, dřevěné schodiště, vnější montážní spoje, vrstevné lepení dřeva.

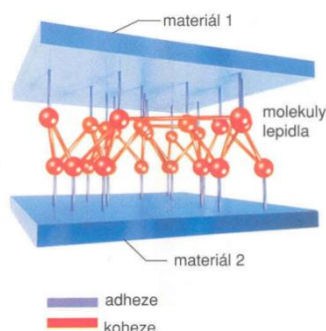
**Obr. 12 Typy normalizovaných skupin v typických oblastech použití [9]**

## 3 Teorie adhezního spojení

### 3.1. Adheze a koheze

Pevnost lepeného spoje závisí na třech parametrech:

- Přílnavosti lepidla k lepenému povrchu (adheze).
- Soudržnosti hmoty lepidla neboli vnitřní pevnosti lepidla (koheze).
- Smáčivosti lepeného povrchu [2].



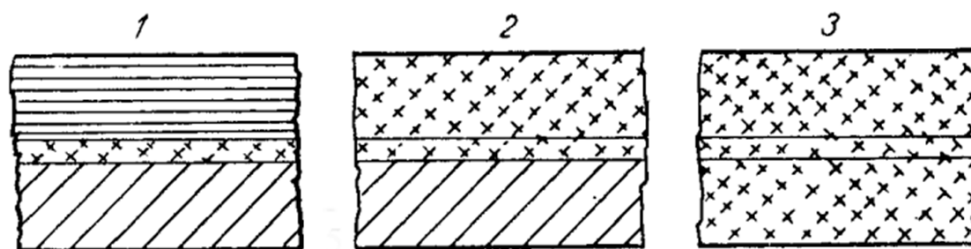
*Obr. 13 Adheze a koheze v lepeném spoji [19]*

#### 3.1.1. Adheze

Adheze je vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Vyvolání vzájemné přitažlivosti mezi dvěma tuhými materiály bez lepidla je velmi obtížné, jelikož by se spojované plochy musely k sobě přiblížit na molekulární vzdálenost, což je méně než  $3 \cdot 10^{-8}$  m. Toto vlastně technicky není možné splnit, protože spojované plochy by musely být absolutně rovné, souběžné a čisté. Další problém, který může nastat i když je povrch spojovaných součástí ideálně hladký a čistý, je znečištění povrchu stopami plynů a vodních par absorbovaných v jeho mikropórech.

Po jakékoli úpravě povrchu před lepením povrch kovu okamžitě chemicky reaguje a vzniká složitá mezivrstva. Tato mezivrstva brání vzniku pevných kovových vazeb. Při stlačení dvou vzorků určitou silou se tenká vrstva plynů protrhne a okamžitě se tak vytvoří předpoklady pro vznik kovových vazeb a působení adheze. Po odlehčení vzorků se ale uvolní elastická napětí vzniklá při stlačení a adhezní síly se dramaticky snižují. U málo tažných kovů adheze zmizí úplně. U měkkých a tažných kovů, např. u india, které má malou mez pružnosti se adhezní síla po odlehčení rovná přibližně síle počátečního stlačení [15].

Adheze se dá snadněji dosáhnout mezi povrchy pevných a tekutých nebo měkkých látek. Kapalná látka se snadno přizpůsobí nerovnostem povrchu a dokáže odstranit většinu pohlcených par a plynů z mikropórů povrchu. Kapalina se stane lepidlem za předpokladu, že bude lepený povrch dobře smáčat a za určených podmínek přejde do pevného stavu. Podle složení spojovaných materiálů a lepidla mohou nastat různé způsoby adheze. Je-li spojovaný materiál a lepidlo stejného složení, jedná se o autoadhezi jednostranné nebo oboustranné (Obr. 14) [11].



- 1 - složení lepidla je odlišné od složení lepených dílců, běžný adhezní vztah
- 2 - lepidlo a jedna z lepených ploch mají shodné chem. složení, částečná autoadheze
- 3 - lepidlo a oba lepené materiály mají shodné chem. složení, úplná autoadheze

**Obr. 14** Vztah autoadheze k lepenému materiálu

### 3.1.2. Koheze

Koheze neboli soudržnost představuje vlastní pevnost vrstvy lepidla. Velikost koheze charakterizuje tzv. kohezní energie. Tato energie je definována jako velikost energie potřebná k odtržení jedné částice od ostatních. Síly, které v materiálu působí jsou mezimolekulární přitažlivé síly (síly Van der Waalsovy) a síly od vzájemného propletení molekul polymerů mezi sebou. Jestliže se lepený spoj roztrhne ve vrstvě lepidla, znamená to, že adheze i pevnost lepeného materiálu je vyšší než koheze. Kohezní pevnost závisí na charakteru lepidla a na tepelném namáhání lepeného spoje (většina jednosložkových lepidel jsou termoplasty - měknou při zvyšující se teplotě). Velmi vysokou kohezi mají dvousložkové epoxidy. Naopak nízkou kohezi se vyznačují měkké akryláty například pro výrobu samolepících etiket [2].

### 3.2. Smáčivost

Smáčivost kapaliny je vlastnost vyjadřující schopnost přilnout k povrchu pevných látek. Jinými slovy řečeno, smáčivost je schopnost kapaliny udržovat kontakt s pevným povrchem vyplývající z mezimolekulární interakce. Stupeň smáčení je určen projevem adhezních a kohezních sil, což jsou přitažlivé a odpuzivé síly mezi částicemi povrchových vrstev dvou stýkajících se látek. Smáčivost je důležitá při lepení nebo přilnavosti dvou materiálů. Smáčivost a povrchové síly, které řídí smáčení, jsou rovněž odpovědné za další související efekty, včetně tak zvaného kapilárního efektu (Obr. 15) [12].



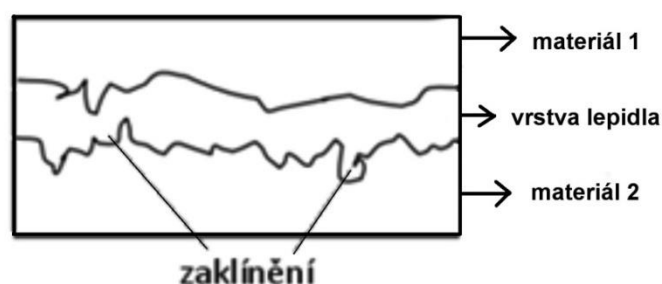
**Obr. 15** Smáčivost a nesmáčivost kapaliny

### 3.3. Teorie lepení

V teorii lepení se uplatňují fyzikální síly, chemické vazby a mezimolekulární síly.

#### 3.3.1. Mechanická teorie

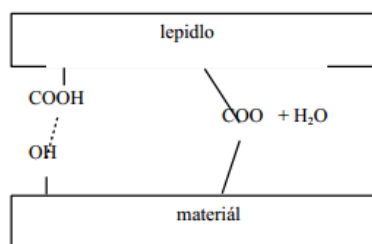
Tato teorie se uplatňuje jen u členitých nebo porézních povrchů. Kapalné lepidlo zatéká při lepení do pórů, prohlubní a kavit lepeného povrchu. Po jeho ztuhnutí se vytvoří jakýsi "pevný zámek" mezi hmotou lepidla a adherendem. Mechanická vazba je velmi důležitá při lepení materiálu jako je dřevo, papír, keramika nebo pěnové pasty. Při lepení leštěných hladkých ploch je mechanická vazba zanedbatelná (Obr. 16) [2].



*Obr. 16 Mechanická vazba lepidla s povrchem  
(vznik mechanického "zámku")*

#### 3.3.2. Chemická teorie

Chemická teorie se uplatňuje u porézních i zcela hladkých povrchů. Tato teorie je založena na působení kovalentních vazeb mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu. Proto se dobře lepí materiály, které mají reaktivní povrch nebo povrch chemicky upravený tak, aby mohla proběhnout chemická reakce mezi lepidlem a povrchem za vzniku kovalentní vazby. Oba atomy, které se účastní kovalentní vazby mají společnou dvojici elektronů čili elektronový pár, k němuž každý atom přispívá jedním elektronem. Dochází ke společnému sdílení elektronového páru, které odpovídá jednoduché kovalentní vazbě. Velmi dobře se lepí oxidované povrchy (kovy, oxidované plasty), povrchy přírodních polymerů (dřevo, papír, celulóza) s volnými chemickými skupinami oxy-, hydroxy-, karbonyl-, karboxymethyl-, amino- (-O, -OH, -CO, -COCH<sub>3</sub>, -NH<sub>2</sub>) a jinými. Správně zvolené lepidlo musí obsahovat volné skupiny, schopné reakce s povrchem lepeného materiálu. Jako vysoce reaktivní skupiny se u lepidel vyskytují například skupiny epoxy-, hydroxy-, karboxy- (kyseliny), isokyanáto- a další (Obr. 17) [11].



*Obr. 17 Chemická vazba lepidla s povrchem*

### 3.3.3. Difuzní teorie

Základem této teorie je tvrzení, že některé látky (např. polymery) mohou navzájem mezi sebou difundovat napříč rozhraním. Pevnost spoje závisí na průběhu difuze. Průběh difuze závisí především na čase, teplotě, viskozitě, relativní molekulové hmotnosti polymerů, kompatibilitě adherendu a adheziva. Tato teorie však nevysvětluje spojení materiálů, které vzájemně nedifundují, ale normálně se lepí jako např. kov - sklo [11].

### 3.3.4. Elektrostatická teorie

Podstatou této teorie je, že ve spoji se vytváří dvojvrstva, která je vytvořena dotykem jedné hraniční vrstvy s více elektrony a druhou vrstvou s méně elektrony. Spoj se mění na kondenzátor, u kterého se rozdílně nabitě desky přitahují. Při oddálení se vzniklý potenciálový rozdíl buď vybije, nebo vyzáří jako elektronová emise. Souvislost mezi velikostí povrchového elektrostatického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení nebyla ani při podrobnějších studiích prokázána [11].

### 3.3.5. Molekulová teorie (adsorpční)

Vychází z jevů smáčení, adsorpce a adheze. Základem adheze je vzájemné působení molekul adherendu a adheziva, proto musí mít oba druhy molekul polární funkční skupiny schopné vzájemného působení. Proces vzniku adhezního spoje se člení na dvě stadia. První je transport molekul lepidla (adheziva) k povrchu adherendu. V druhém stádiu po přiblížení molekul adheziva na vzdálenost menší než 0,5 nm působí Van der Waalsovy mezimolekulární síly. Toto trvá až do dosažení adsorpční rovnováhy [21].



## **4 Technologické podmínky správného lepení**

### **4.1. Předpřípravné operace před procesem lepení**

Rozdíl pevnosti ve smyku je ovlivňován kvalitou povrchu spojovaných součástí. Nevhodná povrchová úprava před lepením může naprosto znehodnotit lepený spoj. Úprava ploch je jedním z hlavních faktorů ovlivňující pevnost lepeného spoje, a proto je této problematice věnována patřičná pozornost. Mezi běžně prováděné úpravy povrchů patří fyzikální a chemické postupy, jejichž účelem je zlepšování adhezivních vlastností, zbavování všech nečistot z povrchu a také zbavování koroze a vnitřních pnutí. Nejčastější předpřípravné operace kovových adherendů jsou broušení a odmašťování [6].

#### **4.1.1. Fyzikální postupy**

##### **4.1.1.1. Broušení**

Broušení se provádí proto, aby se lepená plocha zbavila hrubých nečistot, případně barvy nebo rzi, a aby byla přítomna po celém povrchu požadovaná drsnost. Zároveň je nutné, aby byl povrch zbaven mastnoty.

##### **4.1.1.2. Otryskávání**

Mezi běžné tryskací prostředky patří: křemičitý písek, brusné materiály, ocelový nebo litinový granulát, sekaný ocelový drát, balotina (skleněné kuličky), polyuretanová pěna s abrazivem. Mezi tzv. "čistší" prostředky patří plastový granulát, obilná drť nebo voda s přísadkou bikarbonátu.

##### **4.1.1.3. Kartáčování**

Kartáčování také patří do významné skupiny abrazivní přípravy povrchu. V porovnání s brusným kotoučem je při této metodě dosaženo menší drsnosti a to především díky skutečnosti, že kartáče jsou relativně pružné. Opět je důležité, aby byl povrch předem odmaštěn. Úhel natočení kartáče je 90°, tedy kolmo k povrchu. Tlak, který je kartáčem vyvíjen na upravovaný povrch je nižší než u broušení nebo tryskání. Nehrozí tedy riziko deformace. Kartáčování je proto vhodné pro úpravu citlivých dílů [14].

#### **4.1.2. Chemické postupy**

##### **4.1.2.1. Odmašťování**

Pro chemické odmašťování kovů za pomoci rozpouštědel se používá metyletylketonu, technického acetonu, éteru, toluenu nebo trichlóretylénu. Lze použít i běžný denaturovaný etylalkohol (líh), který je šetrný k pokožce a z ekologického hlediska patří k nejpříjemnějším rozpouštědlům. Nesmí se používat benzin a laková rozpouštědla.

#### 4.1.2.2. Moření

Mezi prostředky k běžnému chemickému čištění moření patří: roztoky kyselin (sírové, chlorovodíkové, fosforečné, fluorovodíkové, dusičné), roztoky alkálií (hydroxidy), mořící přísady (inhibitory). Alternativní rozpouštědla (náhrada halogenových) – vodné roztoky, emulze a disperze, uhlovodíková rozpouštědla, chlorfluoruhlovodíky, různá organická rozpouštědla, zkapalněné plyny, tuhý oxid uhličitý, čištění absorpčním médiem, odmašťování nízkotlakou plazmou [13].

## 5 Činitelé ovlivňující pevnost lepených spojů

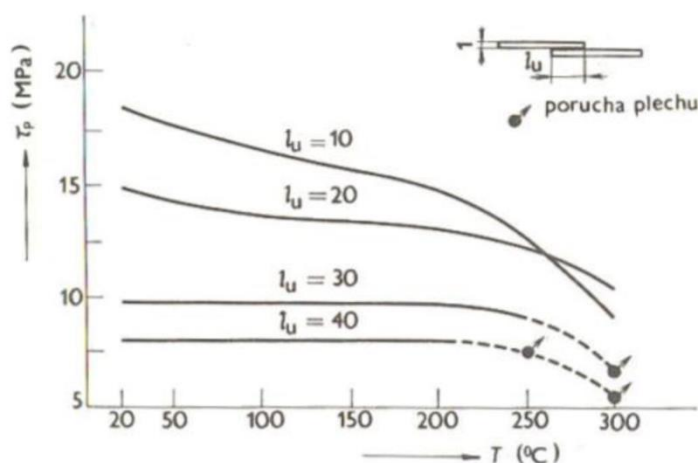
### 5.1. Vliv teploty na pevnost lepených spojů

Není možné obecně zhodnotit vliv teploty na pevnost lepených spojů. Je ale účelné uvést alespoň přibližná pravidla platná pro běžná konstrukční lepidla určená do nízkých teplot.

Pevnost ve smyku mezi teplotami od 20 °C až do 50 °C u většiny lepidel nejprve stoupá, a teprve poté začíná klesat. Kritický interval teplot, kde u většiny lepidel klesá pevnost, je mezi 60 °C až 100 °C. Pevnost v odlupování obvykle zpočátku se stoupající teplotou roste. Pod teplotou 20 °C se ale zpravidla snižuje.

Maxima rázové pevnosti epoxidových a fenolformaldehydových lepidel se obvykle dosahuje při teplotách 20 °C až 40 °C. U odolnějších metakrylátových lepidel pak při teplotě 80 °C. U všech lepidel dochází k významnému poklesu této pevnosti a to v rozmezí 20 °C až -10 °C. Obecně ale nelze říci, zda se vliv zvýšené teploty na rázovou pevnost spojů projevuje příznivě, či nikoliv. Velmi záleží na druhu použitého lepidla.

Bylo zjištěno, že pevnost ve smyku je při zvyšující se teplotě závislá na délce přeplátování. Zatímco u malých délek přeplátování pevnost ve smyku s rostoucí teplotou klesá, u větších délek přeplátování tomu tak být nemusí [15].



Obr. 18 Vliv zkušební teploty na pevnost ve smyku spojů při různé délce přeplátování.  
(Lepidlo Hidux 1197 A, kovový materiál AlCuMg2)

### 5.1.1. Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je děj, během kterého se dodáním tepla určitému tělesu změní délkové rozměry a objem tělesa. Většina materiálů se při zahřívání rozpíná. To má za následek, že jejich molekuly se pohybují rychleji, a že rovnovážné polohy molekul jsou dále od sebe. Při zpětném ochlazení se ale může stát, že se materiál nevrátí do svého původního rozměru. Slepáním dvou různých materiálů o různé tepelné roztažnosti může vzniknout ve spoji vnitřní pnutí, které má zpravidla za následek deformaci, odlupování nebo praskání lepeného spoje. Tomuto jevu se můžeme částečně vyvarovat použitím lepidla, které vytváří pružný film.

## 5.2. Vliv vlhkosti na pevnost lepených spojů

Ve zdroji [15] byla zkoumána závislost koncové pevnosti na době ponoření lepeného spoje ve vodě. Při ponoření lepeného spoje do vody pokládáme její vliv za difúzní. Po určité době se v lepidlu ustaví rovnováha, tedy maximální nasycení. V tomto případě poměr délky obnažené hrany spoje k jeho ploše má význam pouze v určitém časovém období. Při porovnání pevnosti ve smyku u normalizovaných vzorků se vzorky širšími, byla po 18 měsících změna pevnosti na velikosti tohoto poměru nezávislá. Ovšem do doby 18 měsíců vzorky s menší délkou obnažené hrany (při stejném přeplátování, ale větší šířkou vzorku) vykazovaly větší pevnost. Z výše uvedeného vyplývá, že při použití lepených spojů v prostředí s podstatným vlivem vlhkosti při atmosférickém stárnutí těchto spojů, bude mít délka obnažené hrany rozhodující vliv.

Dojde-li u lepeného spoje vlivem difúzního pronikání vody do vrstvy lepidla k poklesu pevnosti, je tato změna nevratná, a nelze ji odstranit ani vysoušením spoje. Při tomto ději se porušují mezimolekulární a chemické vazby uvnitř lepidla a koheze spoje se snižuje, což má za následek právě snižování únosnosti celého spoje.

Často ale nastává situace, kdy při působení středoevropského klimatu dojde ke korozi adherendu a vlhkost tak proniká i do mezifázového rozhraní lepidlo - adherend. V tomto případě dochází k adheznímu lomu spoje, protože snižování pevnosti spoje difúzí vlhkosti do vrstvy lepidla má v tomto případě podružný význam.

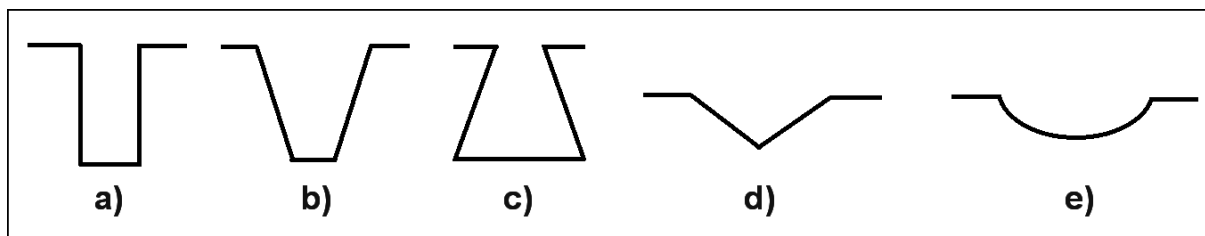
At' už k poruše spoje dojde difúzí vody do vrstvy lepidla, nebo podkorodováním této vrstvy, je délka obnažené hrany zřejmá. Vliv vlhkosti je tedy na životnost a pevnost lepených spojů v dlouhodobém horizontu jednoznačný [15].

### 5.3. Vliv drsnosti na pevnost lepených spojů

Obečně známým argumentem vhodnosti zdrsňení lepených ploch je zvětšení povrchu lepené plochy a z toho odvozená vyšší pevnost spoje. Vhodnost určitého tvaru nerovnosti se určuje dle druhu zatěžování. Například při smykovém zatěžování jsou hluboké nerovnosti o malém průměru nevýhodné, protože mohou být snadno "odstřiženy". Při zatížení tahem je situace sice příznivější, ale i zde může docházet k "utrhávání" vrcholů nerovností a tím k poklesu pevnosti spoje.

Důvod, proč jsou lepidla při spojování materiálů používána, je ten, že plochy nikdy nemohou dosáhnout dokonalé hladkosti. Při nulové hloubce dochází k samovolné adhezi bez použití lepidla. Molekulárně hladký povrch je tedy nejvýhodnější. Nerovnosti najdeme ale i u leštěných ploch. Dosahují zde velikosti  $10^{-8}$  až  $10^{-7}$  m, tedy desetiny až setiny nanometru. Tyto nerovnosti musí lepidlo vyplnit a přiblížit se k povrchu adherendu na molekulární vzdálenost.

Z výše uvedeného vyplývá, že nemá smysl povrch zdrsňovat, ale naopak se snažit o co nejmenší drsnost. Praktické zkušenosti však mluví jinak. Nejvýhodnější hloubka zdrsňení bývá uváděna 1 až 6  $\mu\text{m}$ . Při této drsnosti se zpravidla dosahuje největší pevnosti spoje. Hluboké nerovnosti, zejména pak první tři tvary nerovností na obr. 19 mají s pronikáním lepidla až na jejich dno problém. Poměr mezi účinným povrchem a mikropovrchem je pak nevýhodný a pevnost spoje klesá. Tento problém lze částečně vyřešit ozvučením nevytvrzeného lepidla ultrazvukem. Lepidlo se tak snáze zatlačí do prohlubní. Tento krok pak vede k vyšší pevnosti spoje [15].<sup>1</sup>



*Obr. 19 Základní typy nerovností lepených ploch [a) válcová, b) kónická otevřená, c) kónická uzavřená, d) kónická plochá, e) kónická misková]*

<sup>1</sup> Mikropovrch je povrch jednotlivých nerovností a účinný povrch je skutečný (celý) povrch vzorku.

## 6 Zkouška tahem lepidel – normy, typy zkoušení

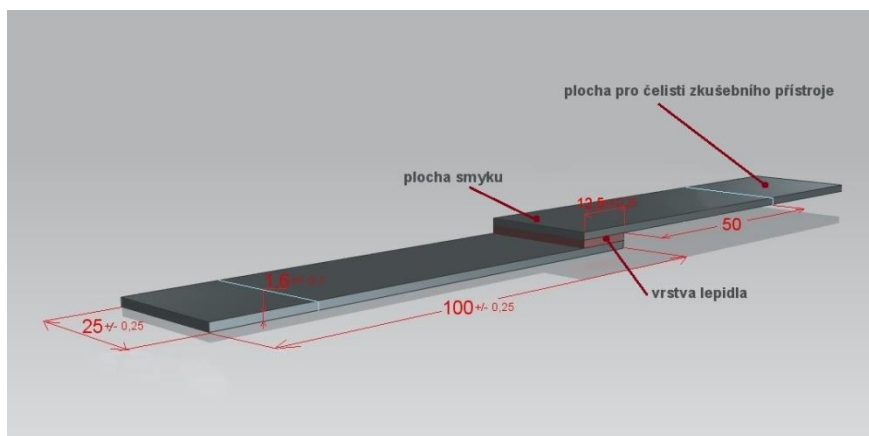
### 6.1. Normy

Nejčastěji používané současné zkoušky lepidel a lepených spojů dle ČSN EN.

#### 6.1.1. Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav ČSN EN 1465:2009

Tato norma nahrazuje dříve platnou normu z října roku 1997 ČSN 66 8510. Podstatou zkoušky je zjistit pevnost přeplátovaného lepeného spoje ve smyku, které se stanoví smykovým namáháním mezi adherendy, na které působí tahová síla, která je rovnoběžná s plochou lepeného spoje.

Výsledkem zkoušky je síla nebo napětí zjištěné při poruše spoje, a pokud není uvedeno jinak, tělesa musí vyhovovat tvarem, rozměry a uspořádáním dle obr. 20 [17].



*Obr. 20 Standardní zkušební panel*

#### 6.1.2. Stanovení únavy konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem ČSN EN ISO 9664 (66 8513)

Cílem je charakterizace konstrukčních lepidel na daném kovovém adherendu s definovanou povrchovou úpravou. Únavové vlastnosti jsou funkcí geometrie zkušebního tělesa.

Podstatou zkoušky je cyklické zatěžování zkušebního tělesa pulzujícím napětím. Počet cyklů při porušení zkušebního tělesa se stanoví při dané amplitudě napětí a středním napětí kmitu. Tyto hodnoty se použijí k sestrojení únavových křivek, což potom dovoluje odhad oblasti spolehlivosti, vztahující se k únavové odolnosti slepu.

Únavový zkušební přístroj musí být schopný vyvíjet sinusoidní napětí tak, aby se maximální zatížení pohybovalo v rozmezí 10 - 80 % rozsahu stupnice. Frekvence i typ zařízení mohou ovlivnit výsledek zkoušky, proto pokud není určeno jinak, frekvence musí být 30 Hz a maximální frekvence musí být 60 Hz, aby nedocházelo k nadměrnému zahřátí slepu. Zkušební vzorky mají stejnou geometrii jako na obr. 20.

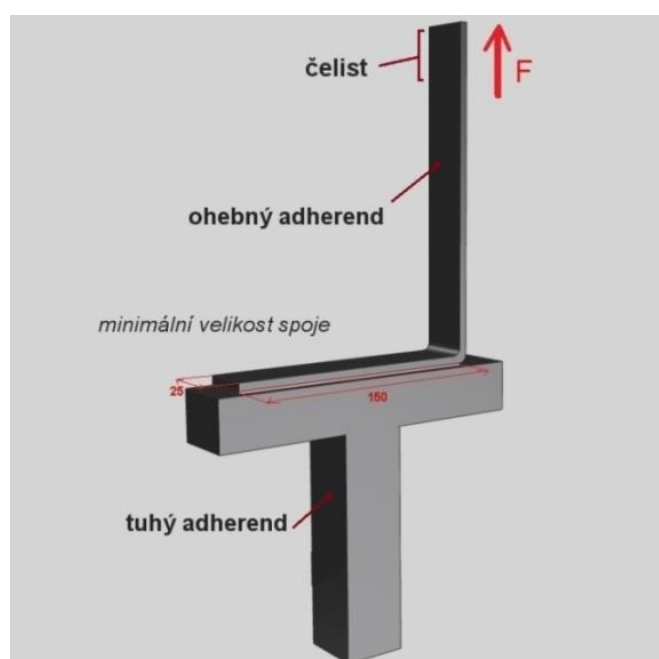
Požadovaná přesnost výsledku závisí na počtu těles, přičemž minimální počet je 4. Hodnotí se při třech různých hodnotách střídavého napětí tak, aby k porušení spoje došlo mezi  $10^4$  a  $10^6$  cyklů. Zkušební tělesa musí být uložena a zkoušena ve standardním prostředí  $23 \pm 2$  °C a  $50 \pm 5$  % relativní vlhkosti vzduchu [16].

### 6.1.3. Zkouška v odlupování ČSN EN 28510-1

Lepený spoj ke zkoušce se připraví ze dvou adherendů a hodnoceného lepidla. Adherendy jsou potom od sebe oddělovány téměř rovnoměrnou rychlostí tak, že odlupování začíná od otevřené části spoje a postupuje po délce lepeného spoje. Síla působí přibližně kolmo k rovině spoje prostřednictvím odlupované části ohebného adherendu.

Adherendy musí mít takovou tloušťku, aby odolávaly předpokládané tahové síle, a jejich rozměry musí být uvedeny v protokolu o zkoušce (doporučená tloušťka pro kovy je 1,5 mm). Lepený povrch tuhého adherendu musí mít šířku 25 mm a minimální délku 150 mm. Ohebný adherend musí být schopen ohnutí do úhlu o něco většího než 90°, bez nevratné změny a musí mít rozměry 250 x 25 mm. Všechny rozměry jsou s přesností  $\pm 0,5$  mm.

Doporučuje se použití pneumatického nebo hydraulického lisu, ovládaného ručně nebo strojně, schopného vyvíjet tlak do 1 MPa. Hodnocené lepidlo se používá, nanáší a v případě potřeby vytvrzuje, podle pokynů výrobce. Doporučovaná rychlost posuvu čelisti je 50 mm/min [18].

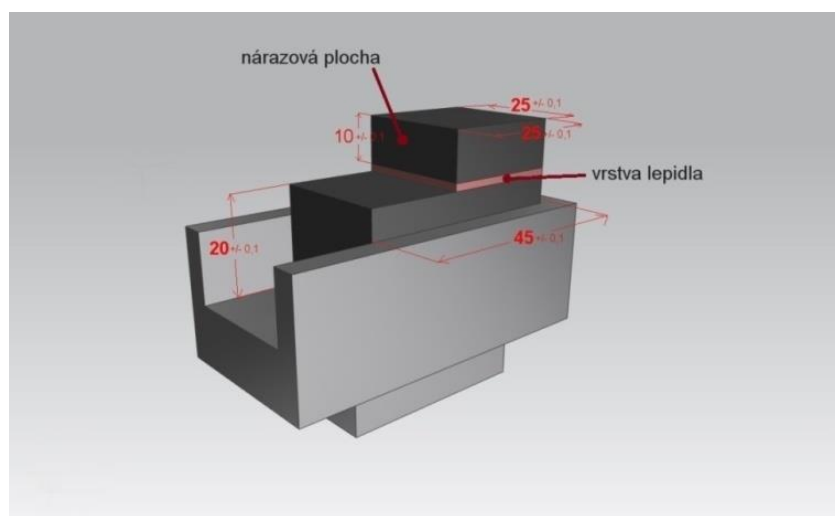


**Obr. 21** Schematické uspořádání zkoušky v odlupování lepeného spoje z ohebného a tuhého adherendu pod úhlem 90°

#### 6.1.4. Zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku ČSN EN ISO 9653

Spoj je namáhán kladivem stroje ve směru podélné osy zkušebního vzorku. Výsledky jsou vyjádřeny na stupnici v jednotkách  $\text{J/m}^2$ .

Zkouška se provádí při vlhkosti vzduchu  $50 \pm 5 \%$  a teplotě  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . V případech, kdy vzorek po zkoušce zůstane neporušen se zkouška opakuje s menšími rozměry vzorku. Minimální počet vzorků pro tuto zkoušku je 10 pro kovové vzorky a 20 vzorků pro zkoušení lepidel na dřevo [20].



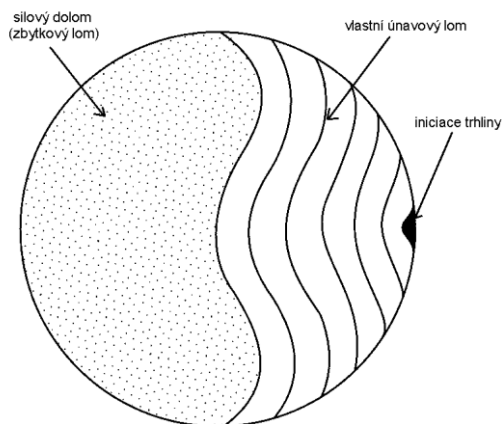
*Obr. 22 Schematické uspořádání a uložení vzorku ve zkušebním zařízení pro rázovou zkoušku*

## 7 Obecná teorie únavy

Únavové poškození je předmětem výzkumu už více jak 150 let. Přesto, že bylo nahromaděno velké množství experimentálních i teoretických výsledků, zůstává zde stále řada problémů, které vyžadují další detailní studium. Důvodem tohoto studia jsou stále rostoucí požadavky na konstrukční materiály a vývoj zcela nových materiálů. Nebezpečí únavového porušení je zde tedy patrné. Nechájí-li se na strojní součást nebo konstrukci působit časově proměnlivé vnější síly, po určité době dojde k jejímu lomu, který je výsledkem mikroskopických procesů probíhajících ve struktuře materiálu. Postupné rozrušování kovu při proměnlivém zatěžování má nevratný a kumulativní charakter, který se projeví až v závěru samotného procesu růstem makroskopické trhliny a lomem. První únavové lomy byly sledovány např. u os železničních vagónů nebo u součástí parních strojů [23].

### 7.1. Fyzikální princip

Únavou materiálu se nazývá proces změn, při kterém se mění strukturní stav materiálu a jeho vlastnosti. Je vyvolána cyklickým zatížením, kdy nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti materiálu v tahu  $R_m$  a bývá ve většině případů menší než mez kluzu  $R_e$ . Následkem tohoto zatížení dochází v materiálu k hromadění vad, které následně způsobují makroskopické trhliny a únavový lom, který se zpravidla iniciuje na povrchu zatěžované součásti. Trhliny se od povrchu postupně rozšiřují do celého průřezu, až se následně materiál přelomí náraz. Lom v pásmu dolomení se nazývá štěpný lom.



**Obr. 23 Únavový lom**

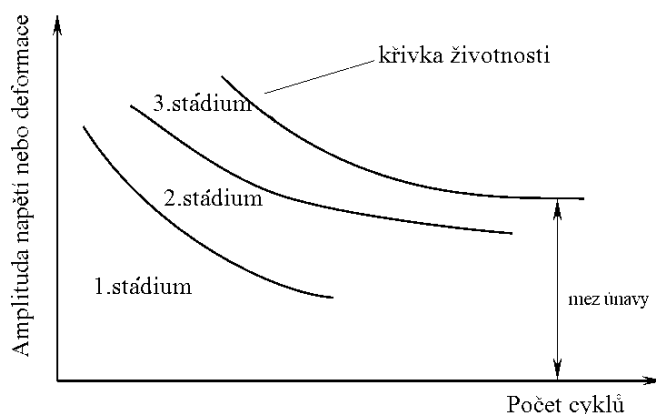
K únavovému lomu dojde tehdy, pokud napětí překročí určitou hodnotu. Tato hodnota se nazývá mez únavy. Mez únavy lze také definovat jako největší výkmit napětí, po který materiál vydrží teoreticky nekonečný počet cyklů, aniž by se porušil. Pokud materiál vydrží tento počet cyklů, při dalším zatěžování k poruše již nedojde. U ocelí, litiny a mědi se dle ČSN používá hodnota  $10^7$  cyklů. Pro lehké kovy a jejich slitiny se používá hodnota  $10^8$  cyklů.

Mezi nejdůležitější činitele, které ovlivňují únavové vlastnosti patří: druh zatěžování, vliv vrubů, velikostní faktor, stav povrchu, chemicko-tepelné zpracování a pnutí v povrchové vrstvě.



## 7.2. Únavový proces

Únavový proces se dělí na tři stádia. Tato stádia na sebe plynule navazují. V prvním stádiu dochází ke změnám mechanických vlastností. Vlivem kumulace plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu a materiál tak mění svoje mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti mohou být dvojího druhu a to cyklické zpevnění, nebo cyklické změkčení. V druhém stádiu vznikají únavové trhliny a důsledku velké plastické deformace dochází na povrchu vzorku ke koncentraci napětí a vzniku prvních mikrotrhlin. Ve třetím stádiu se šíří únavové trhliny, vzniklé v předchozím stádiu. Tyto trhliny navíc neustále rostou, až vlivem nerovnoměrného rozložení napětí a deformace vznikne trhlinka řídicí. Zatímco řídicí trhlinka roste a prorůstá do materiálu, u ostatních trhlin je růst potlačen. Nakonec dojde k závěrečnému dolomení z důvodu překročení kritického napětí ve zbylé části vzorku [22].



Obr. 24 Schematicky zobrazená stádia únavového procesu

## 7.3. Cyklické změkčení a zpevnění

V důsledku cyklického zatěžování kovů dochází ke změnám v mikrostrukturu materiálu. Tyto změny mohou být mechanické, elektrické, magnetické nebo jiné fyzikální povahy. Z konstruktérského hlediska se za nejzávažnější změny považují změny mechanických vlastností, například odpor materiálu proti deformaci. Tento odpor proti cyklické deformaci může v průběhu únavového procesu růst, klesat nebo mít nemonotónní průběh v závislosti na typu zkoušeného materiálu, podmínkách zatěžování a na teplotě. U řady kovů výrazné změny po určitém počtu cyklů končí, respektive jsou velmi pomalé. Dle tohoto hlediska se materiály dělí na saturující a nesaturující.

Saturující – na začátku zatěžování dochází ke značným změnám. Po jistém počtu cyklů jsou již změny velmi malé a lze je zanedbat. Typickým příkladem je vyžíhaná měď, nikl, nebo nízkouhlíková ocel.

Nesaturující – ke změnám mechanických vlastností dochází v průběhu celé životnosti. Typickým příkladem jsou kovy s planárním skluzem, například  $\alpha$ -mosaz s vyšším obsahem zinku, která se po celou životnost zpevňuje. Typickým příkladem trvale změkčujících materiálů jsou například 9% chromové oceli. U těchto materiálů dochází na počátku zatěžování obvykle k menším změnám a teprve po určitém počtu cyklů se změny stanou výraznějšími.

## 7.4. Norma ČSN EN ISO 9664

Jediná norma, která se věnuje únavě lepidel, je uvedená norma ČSN EN ISO 9664.

### Definice a symboly použité v této normě

$\tau$  [MPa]: **Smykové napětí** - napětí určené podílem síly a lepené plochy

$\tau_R$  [MPa]: **Statická smyková pevnost** - průměrné statické smykové napětí při porušení spoje

$\tau_{\max}$  [MPa]: **Maximální napětí** - nejvyšší algebraická hodnota napětí kmitu

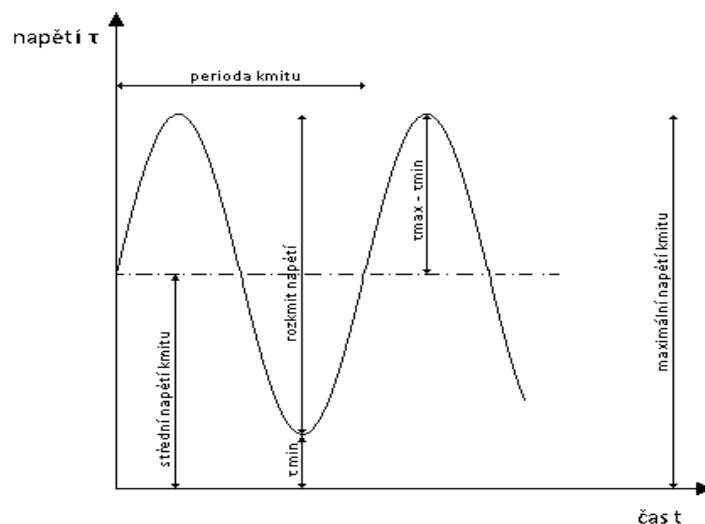
$\tau_{\min}$  [MPa]: **Minimální napětí** - nejnižší algebraická hodnota napětí kmitu (toto napětí musí mít vždy kladnou hodnotu)

$\tau_m$  [MPa]: **Střední napětí** - střední hodnota maximálního a minimálního napětí kmitu

$\tau_a$  [MPa]: **Amplituda napětí** - střídavé napětí odpovídající polovině rozdílu  $\tau_{\max}$  a  $\tau_{\min}$

$R_\tau$ : **Součinitel nesouměrnosti kmitu** - podíl algebraických hodnot  $\tau_{\min}$  a  $\tau_{\max}$

$\tau_D$  [MPa]: **Mez únavy** - mezní hodnota horního a dolního napětí kmitu  $\tau_m \pm \tau_a$ , při němž ještě nedošlo k lomu nebo jinému únavovému poškození do základního počtu kmitů zvoleného pro stanovení meze únavy



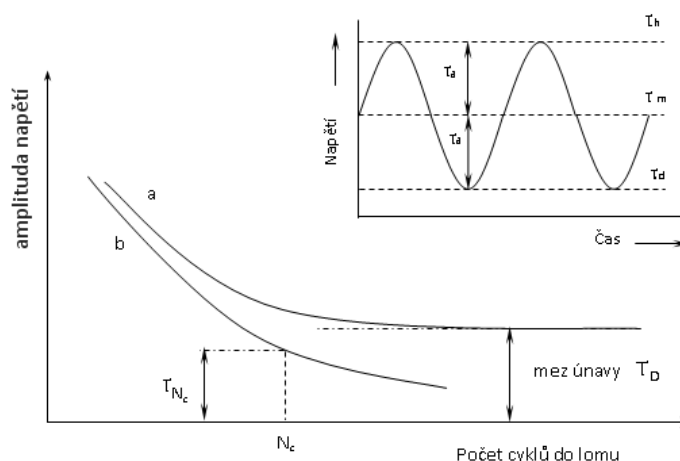
Obr. 25 Únavový cyklus

## 7.5. Výstupy ze zkoušek únavy

August Wöhler definoval v letech 1850 - 1870 zkoušení únavové životnosti a sestrojil křivku únavové životnosti neboli Wöhlerovu křivku. Tato křivka se zobrazuje ve Wöhlerově diagramu a udává závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu. Tento diagram slouží k určení provozního napětí pro daný počet cyklů nebo naopak.

Výsledky slouží nejen ke vzájemnému porovnávání vhodnosti jednotlivých druhů lepidel pro spoje namáhané proměnlivým namáháním, ale také k určení optimální délky přeplátování u těchto spojů a získané výsledky porovnat se závislostmi pro spoje namáhané staticky. Únavová pevnost lepeného spoje musí být vyšší než únavová pevnost nosného průřezu. Jinými slovy řečeno, při dynamickém namáhání musí porucha vzniknout v adherendu, ne ve spoji.

Tyto zkoušky jsou charakteristické poměrně značným rozptylem naměřených hodnot, proto je potřeba Wöhlerovu křivku stanovovat alespoň z 10 identických vzorků. První vzorek se zatíží největším napětím, které je blízké mezi kluzu materiálu. U dalších vzorků se napětí postupně snižuje, než se dosáhne takové velikosti napětí, při které vzorek vydrží předepsaný počet cyklů bez porušení [23].



Obr. 26 Wöhlerova křivka,  $\tau_d$  - dolní napětí,  $\tau_h$  - horní napětí,  $\tau_m$  - střední napětí

Křivka *a* na obr. 26 je charakteristická tím, že po klesající části nastává část vodorovná a blíží se tedy mezní hodnotě  $\tau_D$  (mez únavy). Tento tvar křivky je typický pro nízkouhlíkové oceli a další intersticiální slitiny, které deformačně stárnou. Křivka *b* nemá asymptotickou část a s rostoucím počtem cyklů klesá, takže k porušení dochází při konečném počtu cyklů pro všechny hodnoty amplitud napětí. Takto se chovají kovy a slitiny s kubickou plošně centrovanou mřížkou, zejména hliník, hořčík, nebo měď. U tohoto typu křivky nelze stanovit mez únavy standardním způsobem, životnost materiálů je stanovena smluvně určitým počtem cyklů do lomu např.  $N_c = 10^7$  cyklů odpovídající příslušné amplitudě napětí, která se pak nazývá časová mez únavy [23].


## **8 Únava lepených spojů**

Při rešeršní studii bylo zjištěno, že není k dispozici vhodný literární zdroj, který by se hlouběji danou problematikou zabýval.

# Experimentální část

## 9 Cíle experimentu

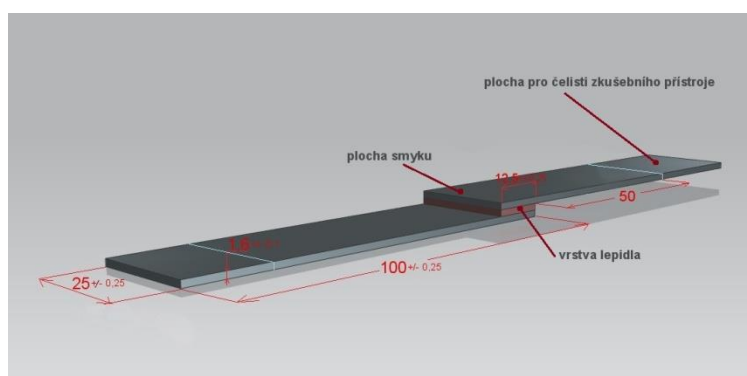
V experimentální části bude cílem objasnit únavové chování dvou typů lepidel na třech površích o různé drsnosti. K tomu budou sloužit níže popsané stroje. Budou použity testy únavy a to únavy v ohybu a únavy kvazistatické.<sup>2</sup> Zjišťována bude také klasická tahová pevnost a pevnost ve smyku.

Druh lepidla	Typ zkoušky	Druh vzorku	Drsnost Ra[ $\mu$ m]	Typ stroje
<b>Terostat 9220</b>	Statická v tahu	$\varnothing$ 40 mm	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Statická ve smyku	Plochý	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Nízkocyklová v tahu	$\varnothing$ 40 mm	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Nízkocyklová ve smyku	Plochý	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Únavová zkouška v ohybu		1,12 ; 0,01	Únavový stroj na ohyb Schenck
<b>INSTA-CURE+</b>	Statická v tahu	$\varnothing$ 40 mm	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Univerzální tahový stroj DMG
	Statická ve smyku	Plochý	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Nízkocyklová v tahu	Nebyla provedena <sup>3</sup>		
	Nízkocyklová ve smyku	Plochý	1,12 ; 0,1 ; 0,01	Zwick/Roell Z005
	Únavová zkouška v ohybu	Nelze z technologických důvodů provést		

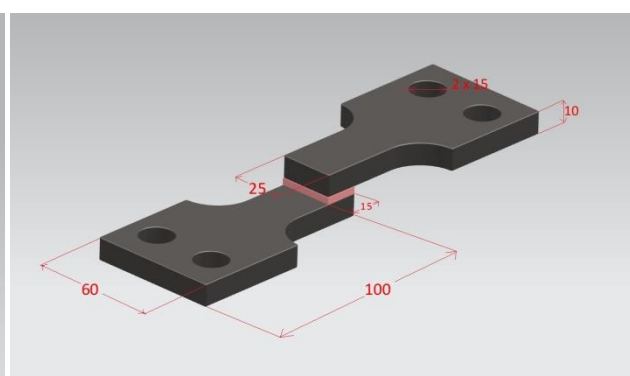
Pozn.: Všechny spoje s lepidlem Terostat 9220 obsahovaly distanční podložku.

**Tab. 1 - Souhrn provedených měření**

Veškerá měření byla prováděna na třech různých vzorcích. Geometrie vzorku pro smykové zkoušky je vyobrazen na obr. 27 a vzorek pro únavovou zkoušku v ohybu je na obr. 28. Vzorky pro statickou tahovou zkoušku měly průměr 40 mm a výšku 60 mm.



**Obr. 27 Geometrie plochého vzorku**



**Obr. 28 Geometrie vzorku pro únavovou zkoušku v ohybu**

<sup>2</sup> Zkouška kvazistatické pevnosti = nízkocyklová zkouška únavy.

<sup>3</sup> Kvazistatická zkouška v tahu pro lepidlo INSTA-CURE+ nemohla být provedena ani na univerzálním tahovém stroji DMG kvůli vysoké nepřesnosti stroje.

Hlavním cílem bude zjistit jaká je nejvhodnější povrchová úprava pro lepidla Terostat 9220 a pro kontaktní lepidlo INSTA-CURE+ a to především pro zkoušky kvazistatické pevnosti v tahu a zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku. K tomu budou sloužit i výsledky ze statických zkoušek.<sup>4</sup> Dále se bude vyhodnocovat chování vzorků při únavové zkoušce v ohybu.

---

<sup>4</sup> Z obou statických zkoušek bude zjištěna referenční hodnota, ze které budou spočítány horní meze pro nízkocyklové zkoušky.

## 10 Lepidla použitá v experimentální části

### 10.1. Terostat 9220 - vlastnosti

Jedná se o vysoce stabilní lepidlo na bázi MS – polymeru. Používá se při konstrukci karoserií automobilů, autobusů, i jiných dopravních prostředků.

Technické údaje:

Barva:	černá
Hustota:	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Konzistence:	tixotropní pasta
Typ vytvrzování:	vytvrzování pomocí vlhkosti
Rychlost vytvrzení:	cca 3,5 mm/24 hodin
Provozní teplota:	-40 až 100 °C (120 °C max. 3 hodiny)
Pevnost v tahu:	3,3 MPa (DIN 53 504)
Pevnost ve smyku:	4,4 MPa (DIN EN 1465)
Aplikační teplota:	15 až 35 °C [24]



Obr. 29 Terostat 9220

### 10.2. INSTA-CURE+ - vlastnosti

Jde o kyanoakrylátové lepidlo firmy BSI. Lepidlo INSTA-CURE+ je nejlepší volbou pro lepení plastových dílů. Lepí ale také laminát, tvrdé dřevo, kovy i gumu. Dokáže velmi dobře vyplňovat mezery i chybějící části materiálu. Pro aplikování tlustších vrstev lepidla je vhodné použít aktivátor INSTA-SET dodávaný spolu s lepidlem. Aktivátor zvýší okolní pH a tím způsobí rychlejší polymeraci i tlustých vrstev lepidla. Aktivátor začne účinkovat do 8 vteřin. Výrobce udává úplnou funkční pevnost po 24 hodinách [25].



Obr. 30 Kyanoakrylátové lepidlo INSTA-CURE+



## 11 Zkušební stroje

### 11.1. Zkušební stroj Zwick/Roell Z005

Výroba i montáž těchto strojů probíhá výhradně v sídle společnosti Zwick v německém Ulmu. Jedná se o dvousloupový zkušební stroj pro jednoduché zkoušení materiálů. Maximální síla, kterou stroj dokáže vyvinout je 5 kN. Veškeré výsledky vyhodnocoval originální software TestXpert II. Na tomto stroji byla prováděna většina zkoušek. Pouze statická zkouška v tahu s kontaktním lepidlem INSTA-CURE+ a dynamická zkouška v ohybu byly prováděny na jiných stojích.



*Obr. 31 Statický stroj pro zkoušku tahem Zwick/Roell Z005*

### 11.2. Univerzální tahový stroj pro statickou zkoušku tahem DMG

Tento stoj disponuje maximální silou 500 kN a byl použit pouze pro tahovou zkoušku lepidla INSTA-CURE+.



*Obr. 32 Univerzální tahový stroj DMG s maximální tahovou silou 500 kN*

### 11.3. Únavový stroj na ohyb Schenck, typ PWYG

Stroj pro zkoušky na únavu s rovinným ohybem. Zkušební stroj slouží ke stanovení meze únavy materiálů při kmitavém napětí na základě dynamické zkoušky ohybem.

Před začátkem každé zkoušky bylo nutné zaznamenat stav měřiče otáček, aby se dal určit celkový počet kmitů.

Vzhledem ke specifickému upínání vzorků do upínacích hlav docházelo při utahování vzorků s lepidlem INSTA-CURE+ pomocí průvlekových šroubů k destrukci spoje. Tím bylo znemožněno provedení zkoušky. Nepodařilo se tedy umístit žádný z devíti slepených vzorků do stroje a to ani po zvětšení děr pro upínací šrouby a sražení hran. Z důvodu tloušťky naneseného lepidla a vzhledem k jeho povaze bylo lepidlo Terostat 9220 na působení tohoto napětí necitlivé a při upínání vzorků nedocházelo k ovlivnění vzorku.



*Obr. 33 Únavový stroj na ohyb Schenck*

Upínací zařízení se skládá ze dvou upínacích hlav, které jsou upevněny svými přírubami na připojovacích přírubách torsní hřídele a měřícího zařízení. Upínací hlavy jsou upevněny tak, aby dosedací plochy ležely vodorovně proti sobě. Zkušební vzorek se na jedné straně vyrovnává příložkou, jejíž tloušťka se rovná tloušťce vzorku a tloušťce dřevěné distanční podložky. Upevnění se pak docílí utahením 4 průvlekových šroubů.



*Obr. 34 Uložení vzorku pro únavovou zkoušku ohybem*

## 12 Metodika zkoušení

Cílem práce bylo zjistit, co se děje při přetěžování lepených spojů a jaké jsou reakce lepeného spoje v důsledku přetěžování.

### 12.1. Statická zkouška v tahu

Úkolem této zkoušky bylo získat referenční hodnotu maximální síly pro lepidlo Terostat 9220, ze které se poté určily horní meze maximální síly pro zkoušku kvazistatické pevnosti v tahu. Tato zkouška pro lepidlo INSTA-CURE+ byla z důvodu nízké kapacity stroje Zwick/Roell Z005 prováděna na univerzálním tahovém stroji DMG s maximální trhací silou 500 kN. Zkouška byla zopakována 6x pro každou drsnost.

### 12.2. Statická zkouška ve smyku

Stejně jako u předchozí zkoušky i zde tato zkouška sloužila k získání referenční hodnoty pro obě lepidla, se kterou se dále pracovalo při zkoušce kvazistatické pevnosti ve smyku.

### 12.3. Zkouška kvazistatické pevnosti v tahu

Úkolem této zkoušky bylo zhodnotit spoj z hlediska jeho pevnosti v důsledku jeho únavového přetěžování. Z tohoto důvodu byly pro lepidlo Terostat 9220 zvoleny hodnoty 40, 70 a 85 % z referenční hodnoty maximální síly, získané při statické zkoušce tahem (viz kap. 12.1.), která činila 2 kN, což odpovídá průměrné síle potřebné na přetržení všech vzorků při statické zkoušce tahem.

Zkušební tělesa byla namáhaná cyklicky tak, že zatěžovací síla pulzovala mezi 80 N a zvolenou procentuelní hodnotou. Rychlost zatěžování byla nastavena na 10 mm/min. Výdrž na maximální síle byla 1 s. Počet cyklů byl u toho testu nastaven na 500. V případě, že během cyklování nedošlo k poruše, cyklování se automaticky po 500 cyklech přerušilo a stroj vyvíjel konstantě zvyšující se sílu, dokud nedošlo k porušení zkušebních těles. Tímto byla zjišťována tzv. zbytková pevnost.<sup>5</sup>

### 12.4. Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku

I zde bylo úkolem zhodnotit lepený spoj z hlediska jeho pevnosti v důsledku jeho únavového přetěžování. Horní meze pro lepidlo Terostat 9220 zde byly zvoleny dvě: a to 75 a 90 % z referenční hodnoty maximální síly získané ze statické zkoušky smykem, která zde činila 0,6 kN. Pro lepidlo INSTA-CURE+ byly zvoleny tři. 20, 40 a 60 % z průměrného výsledku maximální síly spočítaného ze sedmi hodnot změřených při statické zkoušce ve smyku. Průběh testu, počet cyklů i výdrž na maximální síle byla shodná jako u předchozí zkoušky. Rychlost zatěžování byla nastavena stejně jako u zkoušky kvazistatické pevnosti v tahu na 10 mm/min a výdrž na maximální síle byla 1 s. Počet cyklů byl u toho testu nastaven opět na 500.

---

<sup>5</sup> Pro lepidlo INSTA-CURE+ nebyla z technologických důvodů tato zkouška provedena.

## 12.5. Únavová zkouška v ohybu

Cílem této zkoušky bylo zjistit vhodnost drsnosti povrchu pro cyklické zatěžování. Zkušební vzorek byl namáhán po dobu 8 nebo 16 hodin. Na únavovém stroji na ohyb Schenck nebylo možné zajistit konstantní otáčky v průběhu celého testu. Toto testování bylo provedeno pro 4 vzorky s drsností Ra 1,12  $\mu\text{m}$  a pro 7 vzorků s vyleštěným povrchem o drsnosti Ra 0,01  $\mu\text{m}$ . Zátěžný moment byl zvolen 14 Nm. Žádný ze vzorků nebyl během tohoto testu porušen, a proto byla následně u všech vzorků změřena zbytková pevnost v tahu na trhacím stroji Zwick/Roell Z005.

## 13 Příprava experimentálních vzorků

Jako základový materiál byla použita běžná uhlíková ocel ČSN 11 375. Pro únavovou zkoušku v ohybu byly zvoleny dvě drsnosti. Pro ostatní typy zkoušení byly zvoleny drsnosti tři. Nejhrubší povrchy byly připravovány brusným papírem s hustotou 80 částic/cm<sup>2</sup>. Zde byla naměřena hodnota drsnosti Ra 1,12  $\mu\text{m}$ . Na přípravu středně drsného povrchu bylo použito brusného papíru o zrnitosti 600 částic/cm<sup>2</sup> a hodnota drsnosti byla Ra 0,1  $\mu\text{m}$ . Nejjemnější povrch byl připravován pomocí brusného papíru o zrnitosti 1200 částic/cm<sup>2</sup> a následně byl tento povrch ještě leštěn diamantovou pastou na leštičce. Zde byla hodnota drsnosti Ra 0,01  $\mu\text{m}$ .<sup>6</sup>

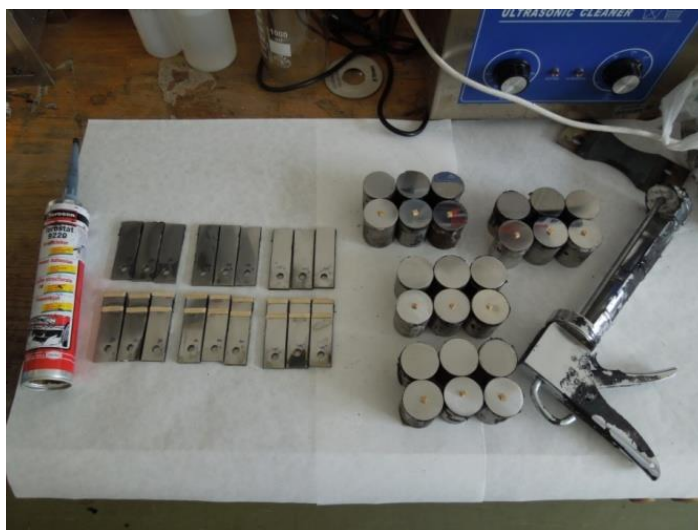
Brousící médium	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
80 částic/cm <sup>2</sup>	1,12
600 částic/cm <sup>2</sup>	0,1
Diamantová pasta	0,01

*Tab. 2 - Dosažené hodnoty drsností*

<sup>6</sup> Drsnosti povrchů byly změřeny profilometrem Homel.

### 13.1. Příprava vzorků - lepidlo Terostat 9220

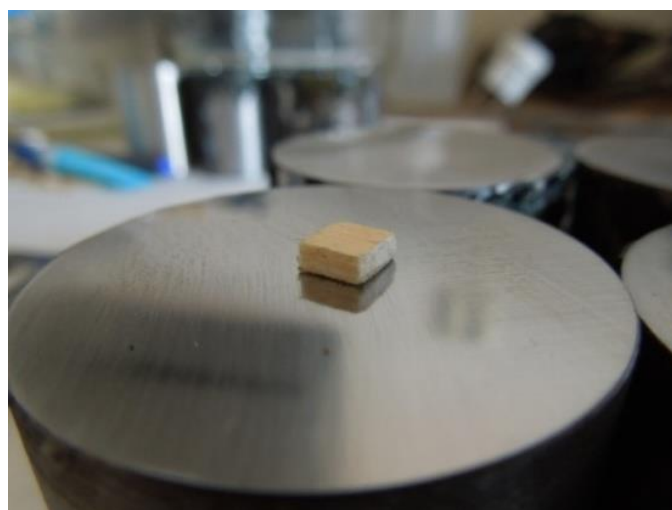
Na obr. 35 jsou zobrazeny vzorky pro měření pevnosti ve smyku, vzorky pro měření pevnosti v tahu a lepicí pistole s lepidlem Terostat 9220.



*Obr. 35 Vzorky pro měření pevnosti ve smyku (vlevo)  
a vzorky pro měření pevnosti v tahu (vpravo)*

#### 13.1.1. Příprava vzorků pro zkoušku tahem

Při přípravě vzorků pro tuto zkoušku byly všechny plochy obroušeny do požadovaných drsností a poté očištěny technickým lihem. Na upravené vzorky pak byly do středu přilepeny kontaktním lepidlem dřevěné distanční podložky o výšce 2 mm, za účelem dosažení konstantní tloušťky lepidla.



*Obr. 36 Vzorek pro měření pevnosti v tahu o tloušťce lepeného spoje 2 mm ( $Ra\ 1,12\ \mu m$ )*



*Obr. 37 Vzorky pro měření pevnosti v tahu s protikusy ( $Ra\ 1,12\ \mu m$ )*



*Obr. 38 Vzorek s naneseným lepidlem bezprostředně před slepením*

Lepidlo bylo nanášeno pomocí lepicí pistole na vzorky s distanční podložkou a následně byly spojeny s protikusy. Doba vytvrzování lepidla byla vždy minimálně 7 dní. Tyto vzorky nebyly žádným způsobem zatíženy. Důvodem byla nemožnost zatížení vzorku, aniž by nedocházelo k znerovnoměření tloušťky lepidla.



*Obr. 39 Slepěné vzorky lepidlem Terostat 9220 a připravené ke zkoušce v tahu*

### 13.1.2. Příprava vzorků pro zkoušku ve smyku

Při přípravě vzorků pro zkoušku pevnosti ve smyku byly opět všechny plochy obroušeny do daných drsností a poté očištěny technickým lihem. Na upravené vzorky pak byly přilepeny kontaktním lepidlem dřevěné distanční podložky o tloušťce 2 mm tak, aby celková lepená plocha spoje byla 300 mm<sup>2</sup>. Po slepení s protikusy byly spojené vzorky zatíženy závažím, jehož hmotnost byla 9,6 kg. Materiál vzorků je uhlíková ocel ČSN 11 375.



*Obr. 40 Vzorek s protikusem pro měření pevnosti ve smyku o tloušťce lepeného spoje 2 mm (Ra 1,12 μm)*

### 13.1.3. Příprava vzorků pro únavovou zkoušku v ohybu

Tato zkouška byla prováděna na únavovém stroji na ohyb Schenck. Příprava povrchů se prováděla analogicky jako se vzorky pro zkoušku ve smyku. Zde vzhledem k časové náročnosti testu byla zjišťována únavová pevnost pouze u dvou drsností. Hrubé vzorky s drsností Ra 1,12 μm a vzorky leštěné s drsností Ra 0,01 μm. Celková slepená plocha byla 500 mm<sup>2</sup> (20 X 25 mm). Tloušťka lepeného spoje byla 2 mm.



*Obr. 41 Vzorky pro únavovou zkoušku v ohybu před slepením*



*Obr. 42 Vzorek po provedené zkoušce v ohybu*

## 13.2. Příprava vzorků - lepidlo INSTA-CURE+

### 13.2.1. Příprava vzorků pro zkoušku v tahu

Vzhledem k předpokládané vysoké pevnosti těchto spojů musel být experiment proveden na tahovém stroji DMG. Stroj Zwick/Roell Z005 byl schopen vyvinout sílu o velikosti pouze 5 kN, což bylo pro tento test nedostačující.<sup>7</sup>



*Obr. 43 Spleené vzorky lepidlem INSTA-CURE+*

### 13.2.2. Příprava vzorků pro zkoušku ve smyku

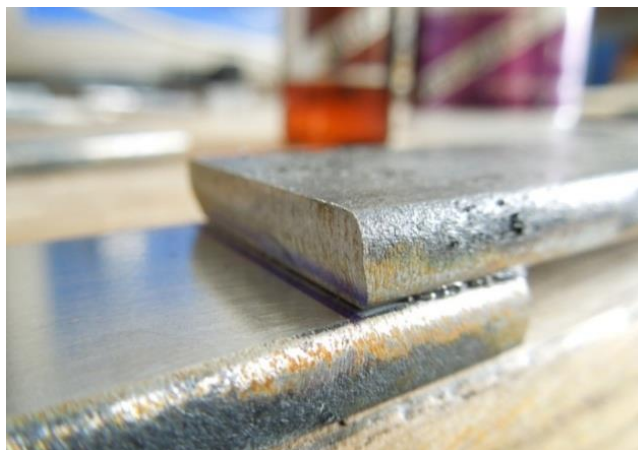
U tohoto měření nebyla vymezena tloušťka lepidla distančními podložkami, protože kyanoakrylátové lepidlo INSTA-CURE+ bylo nanášeno pouze ve velmi tenkých vrstvách. Nanášení lepidla probíhalo tak, že na jednu plochu bylo rovnoměrně naneseno lepidlo a po 5 vteřinách byl aplikován aktivátor INSTA-SET pomocí spreje ze vzdálenosti přibližně 25 cm (dle doporučení výrobce). Poté došlo ke spojení s protikusem. Při lepení byl kladen důraz na podélnou rovnoběžnost lepených vzorků. Lepidlo je po zaschnutí velmi neelastické, na rozdíl od předchozího lepidla Terostat 9220, a proto by při této zkoušce docházelo při upnutí vzorku k nesouososti. Tato nesouosost by vlivem přidaného napětí zapříčinila pokles zjišťované pevnosti.

<sup>7</sup> V jednom případě bylo potřeba síly až 71,2 kN na přetržení vzorku. Tedy více než 14x větší síla.





*Obr. 44 Připravené vzorky pro zkoušku ve smyku s vyznačenou plochou o velikosti 300 mm<sup>2</sup>*



*Obr. 45 Vzorek před provedením zkoušky pevnosti ve smyku*

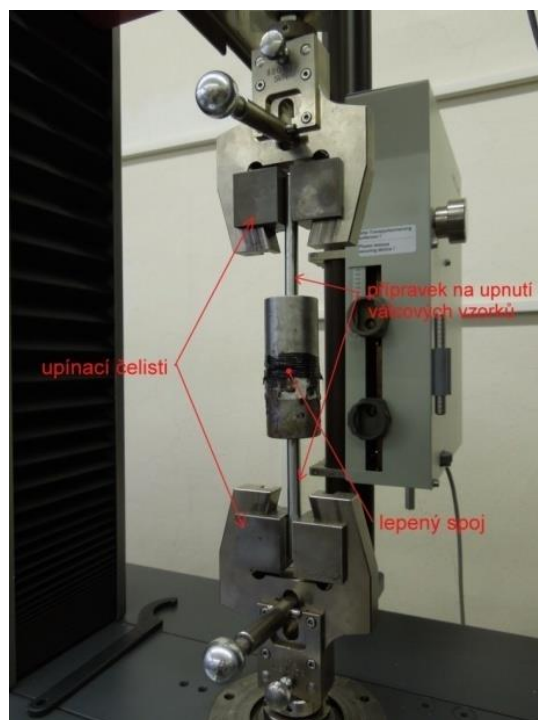
### **13.2.3. Příprava vzorků pro únavovou zkoušku v ohybu**

Tato zkouška nemohla být pro lepidlo INSTA-CURE+ provedena, protože napětí, které se při upínání vzorků vnášeno do lepeného spoje bylo větší, než byl spoj schopen přenést. Napětí byla vytvářena utahováním upínacích šroubů. Z devíti pokusů o upevnění vzorku do stroje nebyl úspěšný ani jeden.

## 14 Vliv drsnosti kovu na pevnost lepeného spoje - výsledky

### 14.1. Výsledky zkoušek - lepidlo Terostat 9220

#### 14.1.1. Statická zkouška v tahu



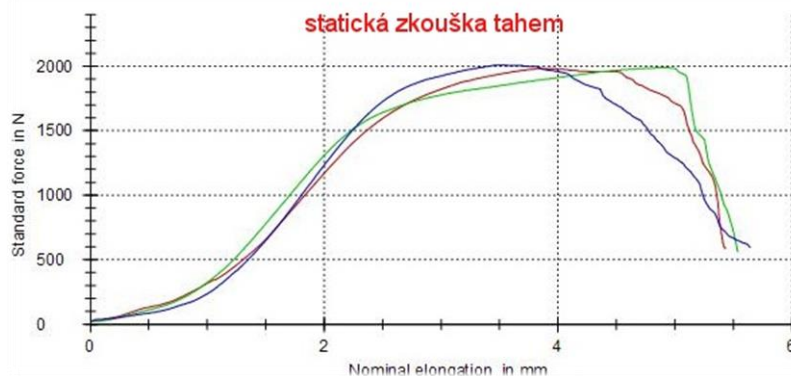
Obr. 46 Upnutí vzorků v trhacím stroji pro zkoušku pevnosti v tahu

Tato zkouška měla za cíl zjistit maximální sílu potřebnou na přetržení vzorku a následně mez pevnosti v tahu. U všech vzorků byla maximální síla při přetržení rovna 2 kN. Z této hodnoty se pak vycházelo při dalších měřeních. Pro zjištění pevnosti spoje byl použit níže uvedený vzorec.

$$R_m = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	Síla F [N]	Plocha $S_0$ [ $\text{mm}^2$ ]
1,12	1,973	2009	1018
0,1	2,035	1988	977
0,01	1,926	1982	1029

Tab. 3 - Výsledky ze statické zkoušky tahem při použití lepidla Terostat 9220



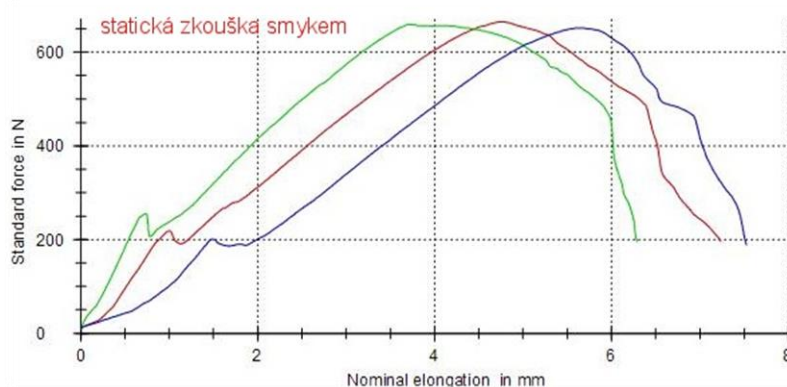
**Obr. 47 Průběh ze statické zkoušky tahem**

#### 14.1.2. Statická zkouška ve smyku

Při zkoušce statické smykové nebylo u žádného vzorku zjištěno neproschnutí lepidla jako v případě vzorků pro zkoušku tahem. U všech vzorků bylo po 7 dnech lepidlo v celém svém objemu proschlé. Průměrná síla na přetržení vzorku zde byla  $639 \pm 66$  N, proto se horní meze pro zkoušku kvazistatické pevnosti určovaly z hodnoty 600 N.

Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Mez pevnosti ve smyku Rm [MPa]	Síla F [N]	Lepená plocha S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
1,12	2,01	603	300
0,1	2,44	732	300
0,01	1,94	581	300

**Tab. 4 - Výsledky ze statické zkoušky ve smyku při použití lepidla Terostat 9220**



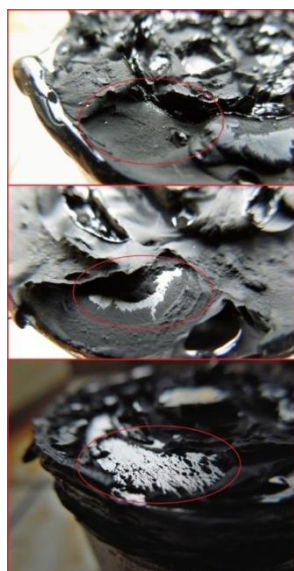
**Obr. 48 Typický průběh zkoušky ve smyku**

### 14.1.3. Zkouška kvazistatické pevnosti v tahu

Terostat 9220 je lepidlo vytvrzující se na základě vlhkosti. Výrobce daná doba prosychání je 3,5 mm/24 hodin. Při průměru vzorku 39 mm by teoretická doba úplného proschnutí lepidla měla být cca 5 dní. Z obr. 49 je ale patrná neproschlá oblast, kde nedošlo vlivem absence vzdušné vlhkosti, ani zbytkové vlhkosti z dřevěné distanční podložky k polymeraci lepidla. Tento jev nastal u všech vzorků pro tahovou zkoušku. Pro stanovení výsledné pevnosti v tahu byla proto potřeba od celkového povrchu vzorku toto neproschlé mezikruží (včetně plochy distanční podložky) odečíst. Velikost lepené plochy byla 1200 mm<sup>2</sup>. Průměrná velikost zpolymerizované plochy byla 1012,5 mm<sup>2</sup> ( $\pm 33,2$ ).



*Obr. 49 Vzorek pro zjištění meze pevnosti v tahu s vyznačenou nezpolymerizovanou oblastí*

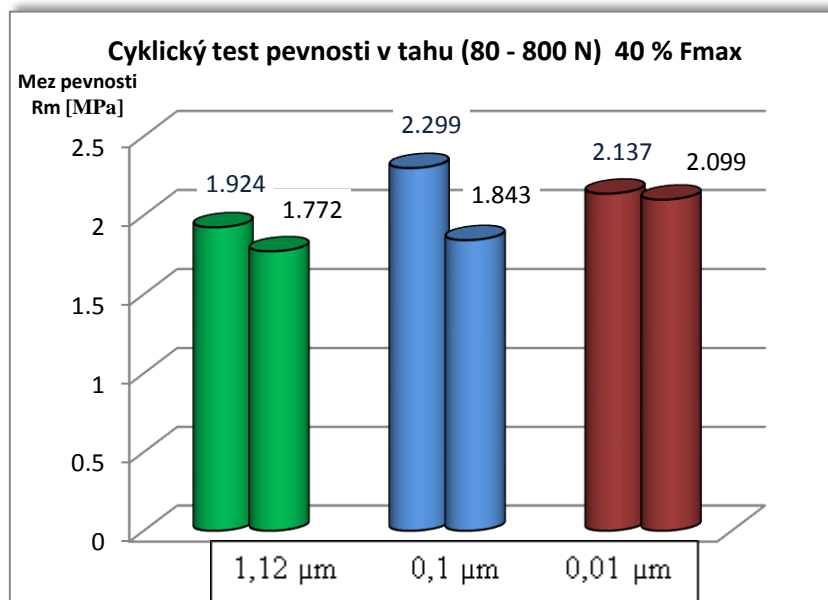


*Obr. 50 Vliv drsnosti na typ porušení lepeného spoje  
(od shora: Ra 0,01 μm, Ra 0,1 μm, Ra 1,12 μm)*

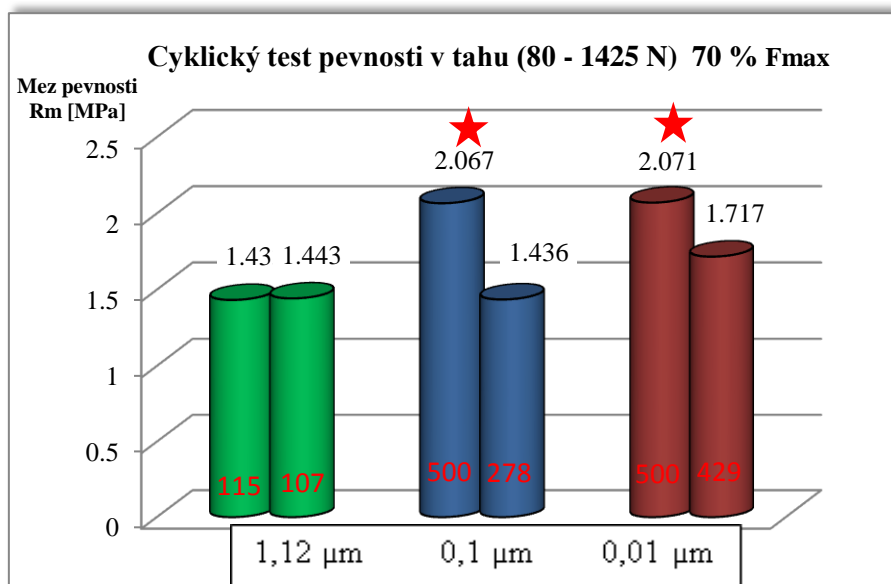
Na obr. 50 jsou lomové plochy lepených spojů. Na horní fotografii je lomová plocha vzorku s vyleštěným povrchem a je patrné, že došlo pouze ke kohezivnímu porušení. Prostřední snímek vyobrazuje vzorek o drsnosti Ra 0,1 μm. Zde již na malé ploše došlo k adhezivnímu porušení. Na posledním snímku je vzorek s drsností Ra 1,12 μm a opět převládá kohezivní porušení, ovšem s největší plochou adhezivního porušení.

Z výše uvedeného vyplývá, že u lepidla Terostat 9220 se zvyšující se drsností lepené plochy, se zmenšuje pravděpodobnost kohezního porušení lepeného spoje a poškození přechází do adhezivního typu.

Níže jsou uvedeny získané výsledky naměřených pevností a zbytkových pevností.<sup>8</sup>



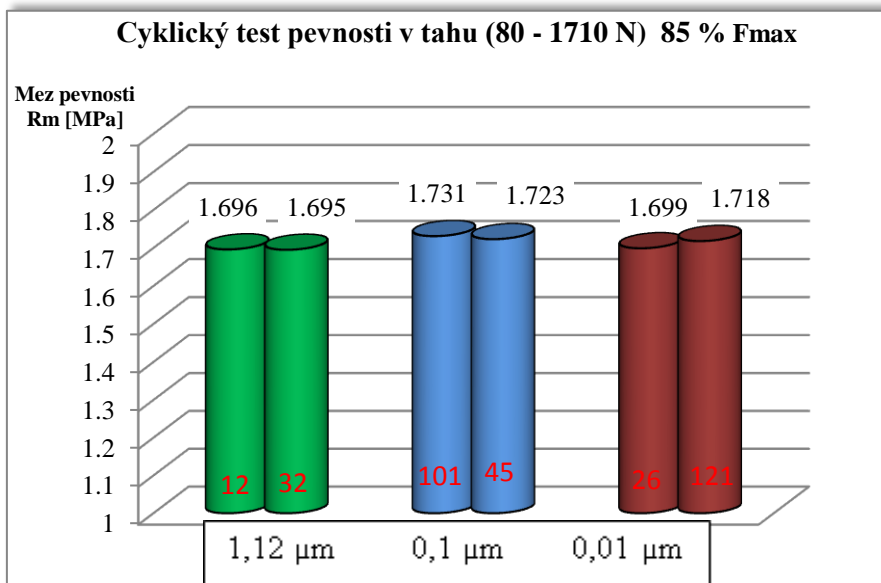
**Obr. 51 Zbytková pevnost z cyklického únavového testu s  $F_{max} = 800\text{ N}$  (ve všech případech se jedná o zbytkovou pevnost)**



**Obr. 52 Výsledky z cyklického únavového testu s  $F_{max} = 1425\text{ N}$  (symbol ★ označuje vzorky, u kterých po 500 cyklech nedošlo k porušení lepeného spoje, tj. vyjadřují tzv zbytkovou pevnost)<sup>9</sup>**

<sup>8</sup> Zbytková pevnost se určuje jako pevnost, která byla změřena po uplynutí 500 cyklů.

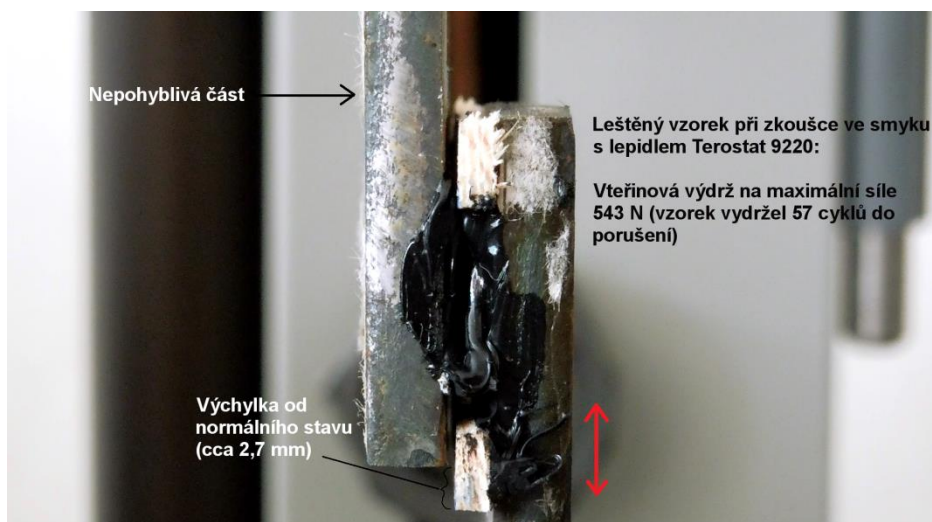
<sup>9</sup> Červeně vepsaná hodnota uvnitř grafů vyjadřuje počet cyklů, které daný vzorek vydržel.



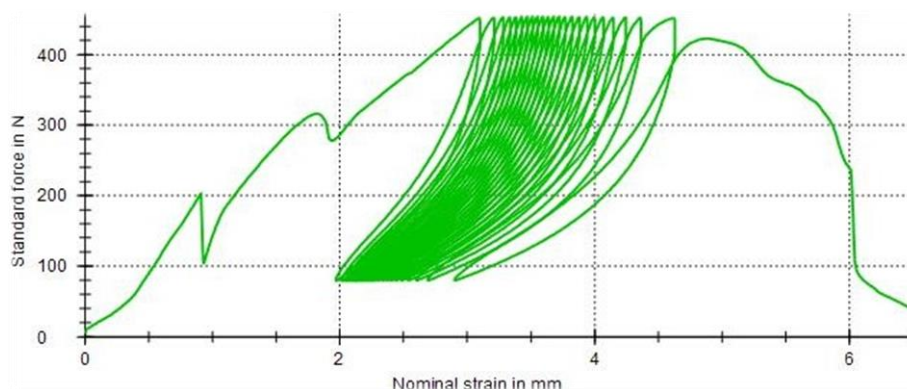
**Obr. 53** Pevnost z cyklického únavového testu s  $F_{max} = 1710 \text{ N}$   
(žádný vzorek nevydržel předepsaný počet 500 cyklů)

#### 14.1.4. Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku

Jak již bylo uvedeno, horní meze při zkoušce kvazistatické pevnosti ve smyku byly zvoleny jako 75 a 90 % z 600 N.



**Obr. 54** Fotografie pořízená v momentu největšího vychýlení lepeného spoje  
(celkové prodloužení po 57 cyklech bylo 6,7 mm)



**Obr. 55** Typický průběh zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku<sup>10</sup>  
(drsnost vzorku  $R_a 0,1 \mu\text{m}$ ,  $F_{\text{max}} = 75 \%$ )

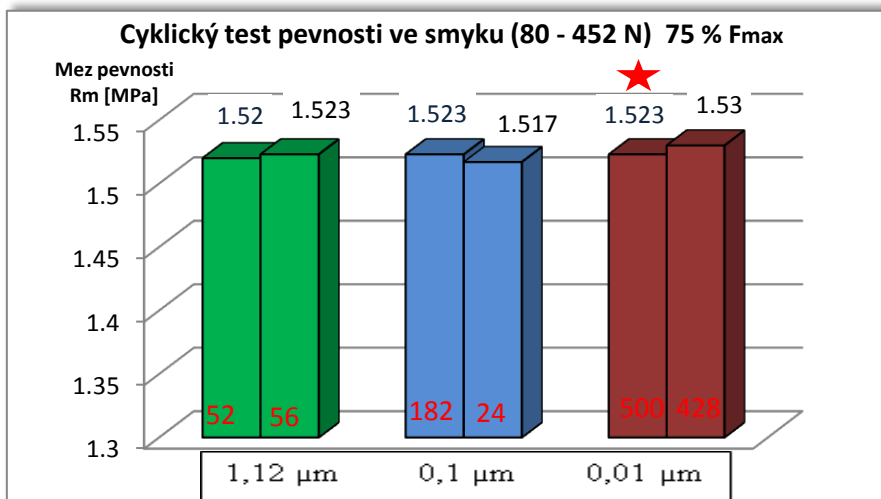
Obr. 55 ilustruje typický průběh zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku, ze kterého je patrné, že celkové absolutní prodloužení bylo 6,5 mm. Dále je zřejmé že došlo k 24 cyklům. Dva zřetelné "zuby" na začátku zatěžování znázorňují oddělení distančních podložek, které byly přilepeny obyčejným kontaktním lepidlem. I přes to, že se jedná o elastomer, je zde vidět velký podíl plastické deformace celého spoje.

U všech vzorků pro tuto zkoušku bylo lepidlo v celém svém objemu, tedy i ve středu proschlé. U vzorků použitých pro tahovou zkoušku bylo zjištěno, že vlhkost proniká do hloubky přibližně 8 mm od povrchu, který je v kontaktu s atmosférou. U těchto vzorků je nejvzdálenější bod od atmosféry 6,25 mm. Maximální vzdálenost distančních podložek potřebná k úplnému proschnutí tohoto lepidla je tedy 16 mm.

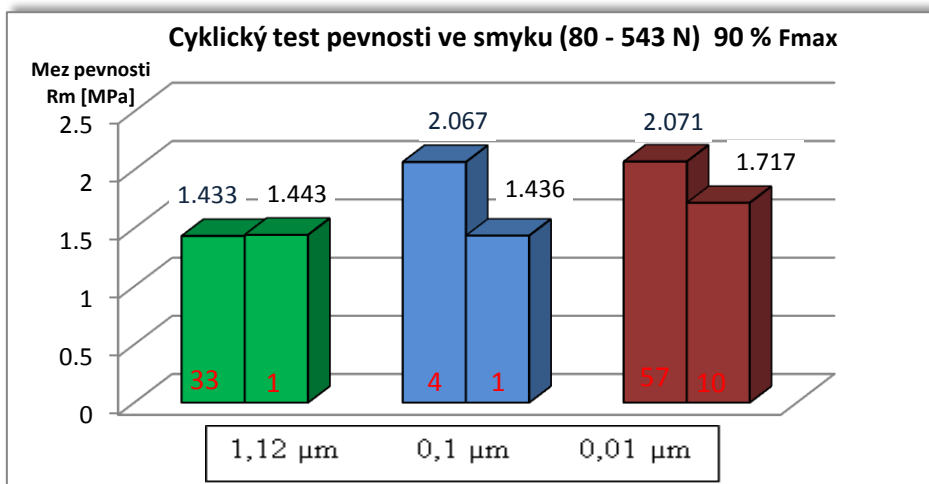


**Obr. 56** Ideálně proschlý vzorek po zkoušce ve smyku tahem

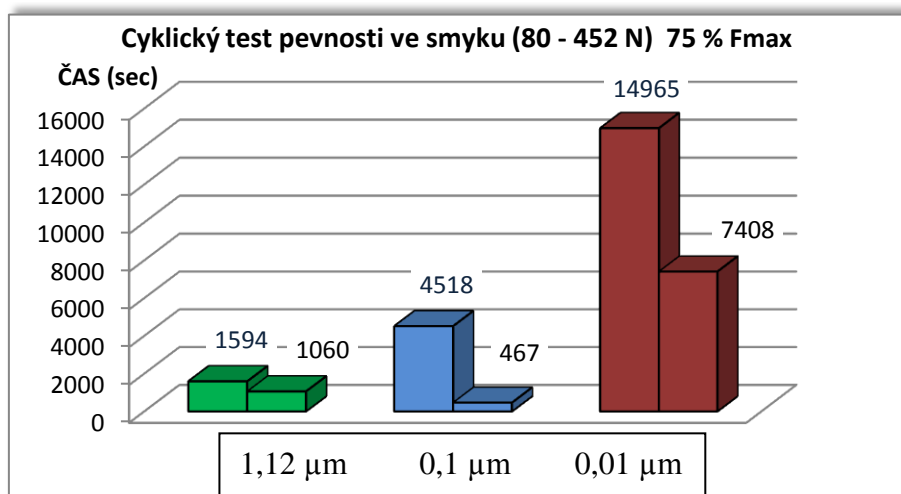
<sup>10</sup> Graf byl výstupem z originálního software TestXpert II.



**Obr. 57** Výsledky cyklického únavového testu ve smyku s  $F_{max} = 452\text{ N}$  (pouze jeden vzorek označený hvězdičkou vydržel předepsaný počet 500 cyklů)



**Obr. 58** Výsledky cyklického únavového testu ve smyku s  $F_{max} = 543\text{ N}$



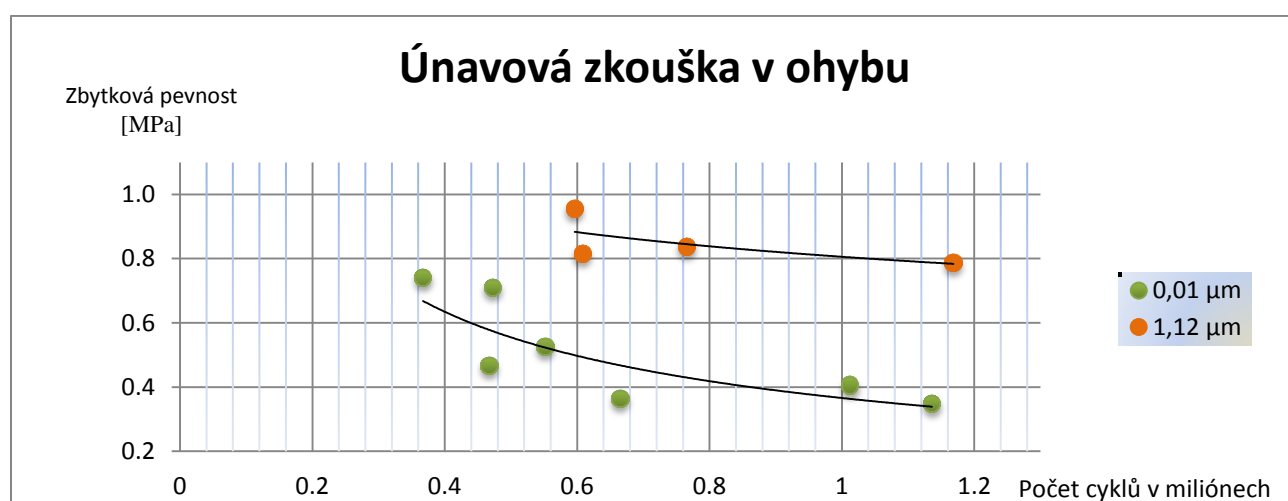
**Obr. 59** Graf znázorňující čas potřebný na porušení vzorků



### 14.1.5. Únavová zkouška v ohybu

Ačkoliv byla tato zkouška časově i technicky nejnáročnější, lze všechny výsledky z této zkoušky shrnout do jediného grafu. Obr. 60 zobrazuje závislost počtu cyklů na zbytkové pevnosti lepeného spoje. V průběhu testu nedošlo k poruše u žádného z testovaných vzorků, a proto výsledná zbytková pevnost v tahu byla zjišťována na stroji Zwick/Roell Z005. Konkrétní hodnoty byly vypočteny podle níže uvedeného vztahu.<sup>11</sup> Z grafu je patrné, že hrubší povrch dosahoval značně lepších výsledků.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (2)$$



Obr. 60 Graf naměřených hodnot zbytkových pevností pro vzorky s drsnostmi Ra 0,01 μm a Ra 1,12 μm lepidla Terostat 9220

Drsnost Ra [μm]	Čas [hod]	Počet cyklů [n]	Fmax [N]	Zbytková pevnost Rm [MPa]
0,01	8	466.700	234	0,468
0,01	8	472.300	355	0,710
0,01	8	665.000	182	0,364
0,01	8	552.000	263	0,526
0,01	8	367.200	371	0,742
0,01	16	1.136.000	174	0,348
0,01	16	1.012.000	203	0,406
1,12	8	596.100	478	0,956
1,12	8	765.300	419	0,838
1,12	8	608.200	408	0,816
1,12	16	1.168.200	394	0,788

Tab. 5 Naměřené výsledky únavové zkoušky lepidla Terostat 9220

<sup>11</sup> Lepidlo bylo vždy v celém svém objemu proschlé, a proto byla skutečná slepená plocha S<sub>0</sub> vždy 500 mm<sup>2</sup>.

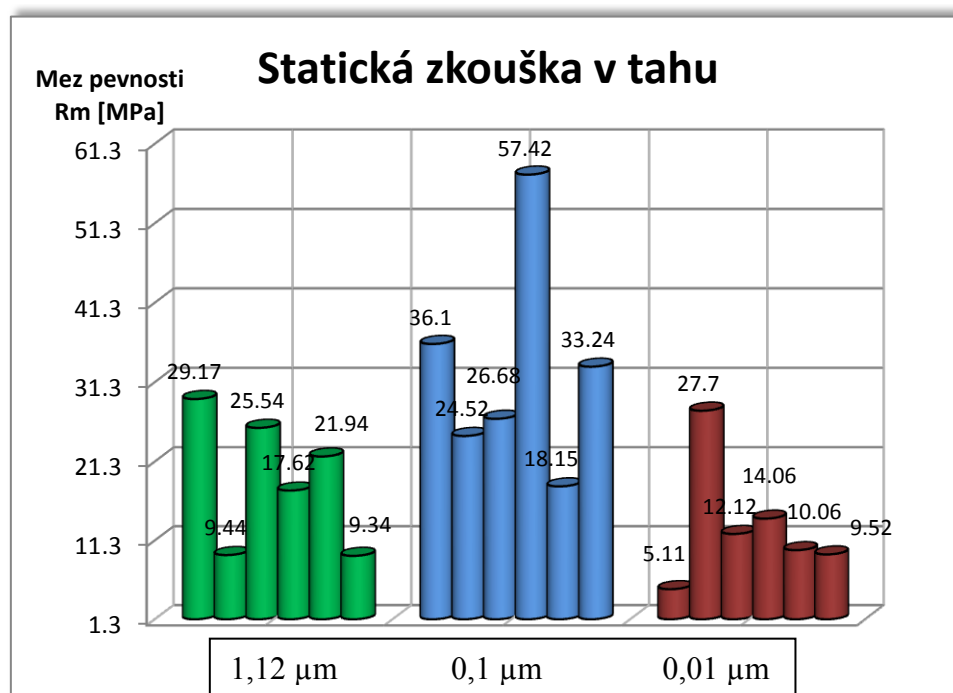


Obr. 61 Spoj po provedené cyklické zkoušce v ohybu a zjištěné pevnosti

## 14.2. Výsledky zkoušek - lepidlo INSTA-CURE+

### 14.2.1. Statická zkouška v tahu

Měření bylo provedeno pro drsnosti lepeného spoje Ra 1,12  $\mu\text{m}$ , Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , a Ra 0,01  $\mu\text{m}$ . Výsledky jsou znázorněny v grafu (viz Obr. 62).



Obr. 62 Výsledky ze statické zkoušky v tahu

Absolutně nejlepšího výsledku bylo dosaženo se vzorkem o drsnosti Ra 0,1  $\mu\text{m}$  a to 57,42 MPa. Naopak nejmenší pevnost v tahu byla naměřena s leštěným povrchem a to 5,11 MPa. Lepidlo bylo vždy v celém svém objemu proschlé.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Povrch spoje měl vždy velikost 1240 mm<sup>2</sup>. Za pomoci tohoto údaje byla zjištěna maximální pevnosti v tahu.

Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	F <sub>max</sub> [N]	Pevnost v tahu [MPa]
1,12	23,36 ± 9,4	18,84 ± 7,5
0,1	40,53 ± 15,5	32,69 ± 12,5
0,01	16,24 ± 8,7	13,1 ± 7,1

**Tab. 6 - Průměrné hodnoty a směrodatné odchytky ze statické zkoušky tahem**

Nejlepších výsledků dosahoval povrch s drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , a to s průměrnou pevností v tahu 32,7 MPa. Naopak nejhorší povrch pro toto namáhání je povrch leštěný s výslednou pevností v tahu 13,1 MPa.

#### 14.2.2. Statická zkouška ve smyku

Za účelem přesnějšího vyhodnocení byl tento test proveden na větším souboru vzorků (9 vzorků pro každou drsnost). Takto velký soubor naměřených dat sloužil k přesnějšímu výpočtu a stanovení horní hranice pro zkoušku kvazistatické pevnosti ve smyku. Největší a nejmenší naměřená hodnota nebyla do průměrného výsledku započtena.

Drsnost Ra	1,12 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$	0,01 $\mu\text{m}$
Naměřené hodnoty [N]	1790	1062	1094
	1240	2270	965
	2070	2104	290
	1871	1708	2357
	2307	3454	1651
	1961	1405	1895
	2441	2331	1150
Největší hodnota	4376	4665	2666
Nejmenší hodnota	678	967	167
$\Sigma$ [N]	1954 ± 362	2048 ± 718	1343 ± 630
Pevnost ve smyku [MPa]	6,51 ± 1,2	6,83 ± 2,4	4,48 ± 2,1

**Tab. 7 - Výsledné hodnoty ze statické zkoušky ve smyku**

V této zkoušce nejlepších výsledků dosahoval středně drsný povrch s průměrnou hodnotou pevnosti ve smyku 6,83 MPa. Nejdrsnější povrch dosahoval jen nepatrně menších hodnot. Nejmenší pevnost ve smyku pak byla zjištěna u leštěného povrchu a to 4,48 MPa. Charakter lomových ploch byl stejný u všech tří drsností a byl vždy adhezní.



*Obr. 63 Lomová plocha po provedení zkoušky pevnosti ve smyku*

### 14.2.3. Zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku

Při tomto měření bylo opět nutno vždy stanovit horní mez zatěžování. Zde bylo zvoleno 20, 40, a 60 % z průměrného výsledku maximální síly spočítaného ze sedmi hodnot změřených při statické zkoušce ve smyku (viz předchozí podkapitola).

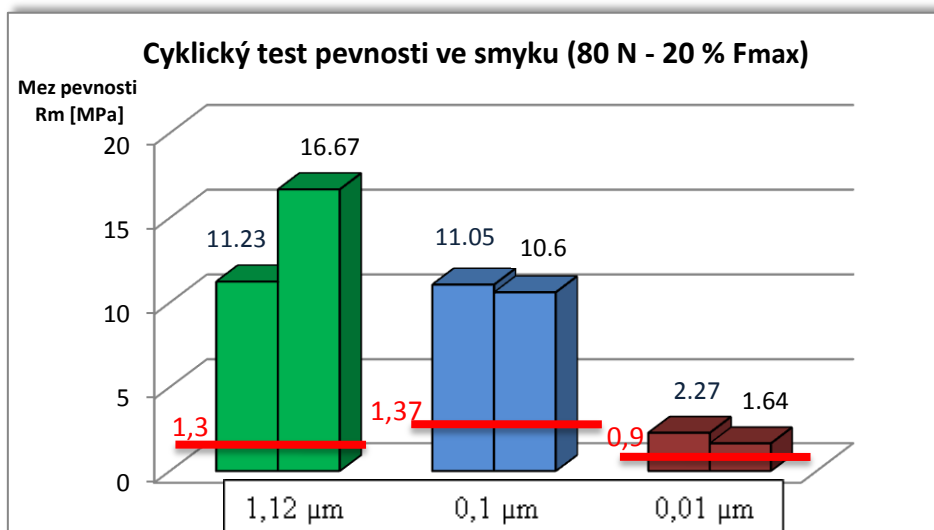
Drsnost Ra	1,12 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$	0,01 $\mu\text{m}$
$F_{\text{max}}$ [N]	1954 $\pm$ 362	2048 $\pm$ 718	1343 $\pm$ 630
20 % $F_{\text{max}}$ [N]	<b>391</b>	<b>410</b>	<b>269</b>
40 % $F_{\text{max}}$ [N]	<b>782</b>	<b>819</b>	<b>537</b>
60 % $F_{\text{max}}$ [N]	<b>1172</b>	<b>1229</b>	<b>806</b>

*Tab. 8 Tabulka s vypočtenými horními mezemi zatěžování pro zkoušku kvazistatické pevnosti ve smyku*

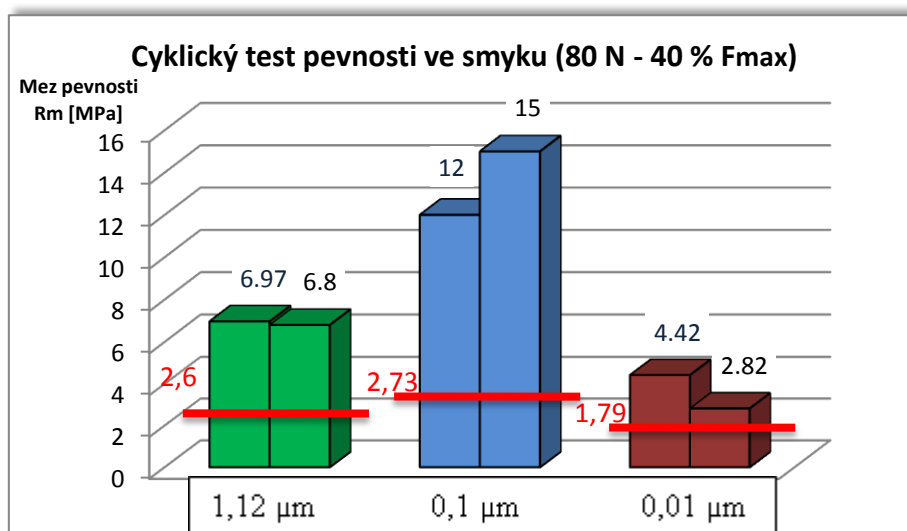
Při této zkoušce nebyl v průběhu zatěžování žádný ze vzorků porušen během 500 cyklů. Proto následující níže uvedené grafy vyjadřují vždy zbytkovou pevnost, která byla zjištěna bezprostředně po uplynutí 500 cyklů. Červené úsečky v grafech ilustrují dané horní meze vyjádřené v MPa.<sup>13</sup> Hodnoty uvedené v grafech jsou výsledné zbytkové pevnosti ve smyku.

V tomto testu podávaly nejhorší výsledky leštěné povrchy. Výsledky u drsností Ra 1,12  $\mu\text{m}$  a Ra 0,1  $\mu\text{m}$  se podobaly a nelze proto tedy udělat jednoznačný závěr.

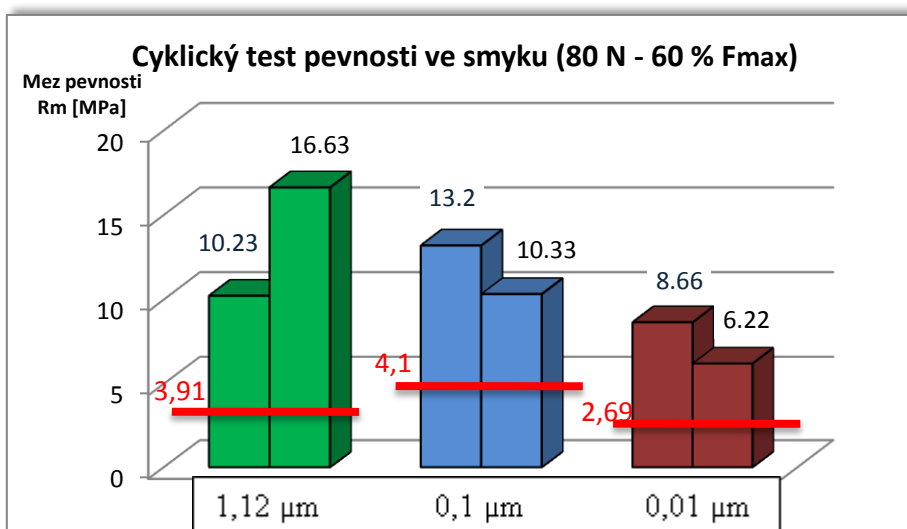
<sup>13</sup> Zatěžování vždy probíhalo v mezích 80 N až do hodnoty (uvedené v MPa) vyjádřené červenou úsečkou. Na této hodnotě byla již zmiňovaná jednosekundová prodleva.



Obr. 64 Výsledky ze zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku s horní mezí 20 % Fmax



Obr. 65 Výsledky ze zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku s horní mezí 40 % Fmax



Obr. 66 Výsledky ze zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku s horní mezí 60 % Fmax

## 15 Diskuse výsledků

### 15.1. Diskuse výsledků - lepidlo Terostat 9220

Při statické zkoušce tahem byl průběh testu téměř identický u všech tří povrchů a síla potřebná na destrukci spoje byla ve všech případech 2 kN. U tahových zkoušek s tímto lepidlem docházelo vlivem velkého objemu lepeného spoje k nezasychání lepidla, a proto bylo potřeba provést přepočet pevnosti na skutečnou plochu lepeného spoje. Po jejím zjištění byla stanovena hodnota pevnosti v tahu na 2 MPa pro povrch s drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$ . Nejhrubší a nejjemnější povrchová úprava se od této hodnoty lišila v řádech jednotek procent. Výrobce udávaná hodnota pevnosti v tahu je 3,3 MPa. Tato rozdílnost byla pravděpodobně způsobena odlišnou tloušťkou lepeného spoje.

Statickou zkouškou ve smyku byla zjištěna průměrná pevnost ve smyku 2,1 MPa. Stejně jako v případě tahové statické zkoušky dosáhl nejlepšího výsledku lepený spoj s povrchovou drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$  a to 2,4 MPa, přičemž výrobcem udávaná hodnota pevnosti ve smyku je 4,4 MPa. Ani zde nebylo dosaženo výrobcem stanovené hodnoty.

Povrchová úprava s drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$  dosáhla absolutně nejlepšího výsledku i u zkoušky kvazistatické pevnosti v tahu. Téměř shodných výsledků dosahoval i povrch s drsností 0,01  $\mu\text{m}$ . U vyleštěných vzorků docházelo při tomto typu namáhání pouze ke koheznímu typu porušení, které je obecně pro lepidla nejvýhodnějším žádoucím typem poškození. Proto spolu se středně drsným povrchem (který obsahoval jen velmi malou oblast adhezního porušení) bylo dosahováno znatelně lepších výsledků. Při drsnostech Ra 1,12  $\mu\text{m}$  se již objevovaly výrazné oblasti nežádoucího adhezivního typu porušení. Nejdrsnější povrchová úprava se tedy pro tento typ namáhání hodila nejméně.

U zkoušky kvazistatické pevnosti ve smyku je jednoznačně nejlepší povrchovou úpravou leštěný povrch s drsností Ra 0,01  $\mu\text{m}$ . Tento povrch jako jediný vydržel 500 cyklů střídavého zatěžování s horní mezí 75 %  $F_{\text{max}}$ . Zatěžování s touto horní mezí tak dokázal odolávat delší čas než nejlepší výsledek s drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$  a dokonce zhruba desetkrát déle než nejlepší výsledek s nejhrubší úpravou povrchu. Nejlepšího výsledku 57 cyklů dosáhl leštěný povrch i při zatěžování s horní mezí 90 %  $F_{\text{max}}$ . Drsnost povrchu Ra 1,12  $\mu\text{m}$  je pro tento typ zkoušky zcela nevhodná.

Zatímco u všech statických zkoušek vykazoval povrch s nejvyšší povrchovou drsností nejnižší pevnost, při únavové zkoušce v ohybu byly výsledky protichůdně nejlepší. Protože se únavová zkouška v ohybu nejvíce blíží reálným aplikacím, je nejvhodnější povrchovou úpravou drsnost Ra 1,12  $\mu\text{m}$ .

## 15.2. Diskuse výsledků - lepidlo INSTA-CURE+

S tímto lepidlem byly provedeny pouze 3 typy zkoušek a to statická zkouška v tahu, ve smyku a zkouška kvazistatické pevnosti ve smyku. Při těchto zkouškách nebyla vyzorována žádná závislost mezi drsností povrchu a charakterem lomové plochy.

U statické zkoušky v tahu byly rozdíly mezi jednotlivými povrchy velmi značné. Průměrná nejmenší pevnost v tahu činila 13,1 MPa a byla naměřena u lepených vzorků s vyleštěným povrchem. Se vzorky o drsnosti Ra 1,12  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo průměrné pevnosti v tahu 18,8 MPa. Nejlepších výsledků v tomto testu dosahoval povrch s drsností Ra 0,1  $\mu\text{m}$  a to 32,7 MPa. S touto drsností bylo také dosaženo absolutně nejlepšího výsledku tohoto testu a to 57,42 MPa. Naopak nejmenší pevnost v tahu 5,11 MPa byla naměřena s leštěným povrchem.

Nejlepším povrchem pro statickou zkoušku ve smyku byl středně drsný povrch o hodnotě Ra 0,1  $\mu\text{m}$  s průměrnou hodnotou pevnosti ve smyku 6,83 MPa. Pevnost ve smyku u nejdrsnějšího povrchu činila 6,51 MPa a nejnižší hodnota pevnosti 4,48 MPa byla zjištěna opět u leštěného povrchu.

Zkouškou kvazistatické pevnosti ve smyku nebylo dosaženo přesvědčivého výsledku při určování nejlepší úpravy povrchu. Je však patrné, že leštěný povrch dosahoval vždy nejnižších hodnot.

Kontaktní lepidlo INSTA-CURE+ je vzhledem ke své povaze velmi citlivé na rázy, a je náchylné na přídavná namáhání. Tato skutečnost např. znemožňovala upnutí vzorků do únavového stroje Schenck, neboť vždy došlo k poruše před zahájením testu.

## 16 Závěr

V této práci byla zjišťována vhodnost úpravy povrchu pro dvě lepidla různého charakteru pro různé typy statického, nebo dynamického zatěžování. Na základě provedeného měření bylo zjištěno, že pro lepidlo INSTA-CURE+ je nejvhodnější povrchová drsnost o velikosti  $R_a 0,1 \mu\text{m}$ . Tento závěr potvrzují všechna provedená měření. Nejméně vhodný povrch je leštěný povrch s drsností  $0,01 \mu\text{m}$ . Křanoakrylátové lepidlo INSTA-CURE+ se nejvíce hodí pro tahové namáhání, protože mez pevnosti v tahu je až třikrát vyšší než mez pevnosti ve smyku.

Kontaktní lepidlo INSTA-CURE+ je velmi závislé na způsobu a množství naneseného aktivátoru, proto může být při stejném testu a stejné drsnosti získán odlišný výsledek a to i přes skutečnost, že byl kladen velký důraz na identický postup při celém procesu lepení. Důraz byl kladen zejména na stejnou drsnost povrchů, velikost lepených ploch, dobu vytvrzování, způsob nanášení obou lepidel a na vzdálenost, ze které byl aktivátor aplikován. Nespornou výhodou tohoto lepidla je jednoduchý způsob aplikace i aktivátoru a vysoká rychlost vytvrzování.

U lepidla Terostat 9220 byly výsledky ze statické zkoušky v tahu a statické zkoušky ve smyku velmi podobné a nelze tedy určit nejvhodnější povrchovou úpravu. Při zkoušce kvazistatické pevnosti v tahu bylo nejhorších výsledků dosahováno s nejhrubšími vzorky o drsnosti  $1,12 \mu\text{m}$ . Zbývající dva povrchy vykazovaly přibližně podobné výsledky. Velkou nevýhodou tohoto lepidla je příliš dlouhá doba vytvrzování, která se pohybuje v řádech dní.

Lze tedy prokazatelně konstatovat, že existuje značný vliv drsnosti povrchu na pevnost lepených spojů. Byly naplněny stanovené cíle experimentu.



## Seznam použité literatury

- [1] STANISLAV HOSNEDL, JAROSLAV KRÁTKÝ *Příručka strojního inženýra, Obecné strojní části 1*. Plzeň: ZČU, 1998
- [2] *Abclepidla* [online]. 2006. vyd. [cit. 2012-09-11]. Dostupné z: [http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady\\_teorie\\_lepeni.pdf](http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady_teorie_lepeni.pdf)
- [3] *Isokyanáty* [online]. Dostupné z: <http://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php/Isokyan%C3%A1ty>
- [4] *Epoxidová lepidla* [online]. Dostupné z: <http://loskutak.nova.cz/clanek/hobby/epoxidova-lepidla.html>
- [5] JAREŠOVÁ, Ing. Miroslava. LUČEBNÍ ZÁVODY A.S. *Akrylátové tmely a zásady pro jejich použití* [online]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/akrylatove-tmely-a-zasady-pro-jejich-pouziti/>
- [6] CAKL, Z. *Bakalářská práce: Mechanické vlastnosti lepených spojů používaných pro kolejová vozidla*. Plzeň: ZČU, 2011
- [7] *Lepidlo* [online]. [cit. 14.9.2012]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lepidlo>
- [8] HRÁDEK, Z. *Bakalářská práce: Metodika modelování lepených spojů v automobilovém průmyslu*. Brno: VUT, 2010
- [9] *Technologie lepení v automobilovém průmyslu* [online]. [cit. 14.9.2012]. 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)
- [10] OSTEN, M. *Práce s lepidly a tmely*. Vydání třetí, upravené. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1986
- [11] HAVELKA, Š. *Bakalářská práce: Lepení sendvičových střešních panelů při výrobě autobusů v podmínkách SOR Libchavy*. Pardubice: UPCE, 2011
- [12] *Smáčivost* [online]. [cit. 15.9.2012]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wetting>
- [13] *Čistění a odmašťování povrchu kovů* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupné z: [http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=160&category\\_id=15&option=com\\_virtuemart&Itemid=67](http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=160&category_id=15&option=com_virtuemart&Itemid=67)
- [14] Walter Brockmann, Paul Ludwig Gei, Jürgen Klingen, Bernhard Schröder: *Adhesive Bonding*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2009
- [15] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1980. 788 s.

- [16] ČSN EN ISO 9664. Lepidla - Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem. Pardubice: SYNPO, 1997. Dostupné z: <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=26113>
- [17] ČSN EN ISO 1465. Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. 2. dopl. vyd. Zlín: TNK 52 Plasty, 2009. Dostupné z: <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=84221>
- [18] ČSN EN 28510-1. Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adhérendu. Pardubice: SYNPO, 1996. Dostupné z: <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=19559>
- [19] TRHOŇ, V. *Bakalářská práce. Analýza lepidel ve všeobecném strojírenství*. Brno: VÚT 2009
- [20] ČSN EN ISO 9653. Lepidla – zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku, 2001. Dostupné z: <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=60601>
- [21] *Lepení* [online]. [cit. 2012-11-27]. 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)
- [22] *Únava materiálu* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materialy/7tUnava.doc>
- [23] *Únava kovových materiálu* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.fme.vutbr.cz/prdetail.html?pid=2589>
- [24] *Terostat – 9220: Product Information* [online]. [cit. 2013-23-3]. Dostupné z: <http://www.praktikloziska.cz/admin/uploaded/image/e-shop/technicke%20listy/TEROSTAT9220-EN.pdf>
- [25] *BSI Maxi-Cure Extra Thick 14g* [online]. [cit. 2013-23-3]. Dostupné z: <http://www.modelarka.cz/bsi-vter-lep-maxi-cure-extra-thick-14g>