

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



**Výzkum vlivu tvrdidla na vlastnosti dvousložkových
systémů lepidel**

Diplomová práce

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

Autor: Bc. Jiří Maleček

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Maleček Jiří

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Výzkum vlivu tvrdidla na vlastnosti dvousložkových systémů lepidel

Anglický název

Research of hardener influence on properties of two-component adhesive systems

Cíle práce

Shromáždit literární podklady o problematice technologie lepení s důrazem na dvousložkové systémy lepidel. Experimentální výzkum vlivu poměru lepidla a tvrdidla na výsledné mechanické vlastnosti.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Osnova práce

- Úvod.
- Cíl práce a metodika.
- Faktory ovlivňující tvorbu lepených spojů.
- Možnosti a limity dvousložkových lepidel.
- Výzkum vlivu tvrdidla na vlastnosti dvousložkových systémů lepidel.
- Závěr.
- Seznam literatury.

Rozsah textové části

cca 60 stran

Klíčová slova

dvousložková lepidla, mechanické vlastnosti, poměr tvrdidla, proces vytvrzování, výzkum

Doporučené zdroje informací

BROCKMANN, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley – VCH, 2009. 414 s.
EBNESAJJAD, S.: Adhesives technology handbook. Norwich: William Andrew, 2008. 363 s.
DUCHÁČEK, V.: Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: VŠCHT Kanag – tisk, 2006. 278 s.
GARDON, P.: Analysis and testing of adhesive bonds. New York: Academic Press 1977. 255 s.
HABENICHT, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. Berlin: Springer 2002. 921 s.
LANCASTER, J. F.: Metallurgy of welding. Cambridge: Abington Publishing, 2001. 446 s.
LOCTITE: Der Loctite. Worldwide Design Handbook. München: Loctite European Group, 1998. 452 s.
MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004. 790 s.
MITTAL, K. L.: Contact angle, wettability and adhesion. Boston: Brill Academic Publisher, 2003, 532 s.
PACKHAM, D. E.: Handbook of adhesion. Chichester: John Wiley and Sons, 2005. 638 s.
PIZZI, A., MITTAL, K. L.: Handbook of adhesive technology. New York: Dekker, 2003. 1024 s.
POKORNÝ, J.: Lepení a tmelení v dílně i v domácnosti. Praha: Grada Publishing, 2000. 104 s.

Časopis:

International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, The journal of adhesion, Journal of material science, The Journal of Physical Chemistry, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology.

Vedoucí práce

Müller Miroslav, doc. Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2011

Termín odevzdání

duben 2013

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 6.2.2012

Prohlášení:

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D., a s použitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze

dne 4.4.2013



Jiří Maleček

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Miroslavovi Müllerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, odborné vedení i ochotnou spolupráci, kterou mi poskytl při tvorbě diplomové práce.

Výzkum vlivu tvrdidla na vlastnosti dvousložkových systémů lepidel

Abstrakt: Tato práce se zaměřuje na technologii lepení, s důrazem na dvousložkové systémy lepidel. Teoretická část je souborem informací popisujícím faktory ovlivňující tvorbu lepených spojů, výhody i nevýhody technologie lepení a také charakteristiku epoxidových lepidel. V praktické části byly provedeny zkoušky mechanických vlastností v závislosti na poměru použité pryskyřice a tvrdidla., konkrétně zkouška pevnosti ve smyku, zkoušky tvrdosti a zkoušky tahových vlastností. V závěru pak byly vyhodnoceny naměřené výsledky.

Klíčová slova: Dvousložková lepidla, mechanické vlastnosti, poměr tvrdidla, proces vytvrzování, výzkum.

Research of hardener influence on properties of two-component adhesive systems

Abstract: Bonding technology with the edge on two-part systems of adhesive is the main topic of this thesis. The theoretical part of the thesis inform about influences on bonded joints and their creation, advantages and disadvantages of bonding technology and properties of epoxy-adhesives. Tests of mechanical properties and their quality dependence of the ration of hardener to synthetic resin were executed in the practical part. Specifically it was determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies, determination of hardness and determination of tensile properties. Every detected results were evaluated at the end of this thesis.

Key words: Two-component adhesives, mechanical properties, ration of hardener, hardening process, research.

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika	2
2.1	Cíl práce	2
2.2	Metodika práce.....	2
2.2.1	Příprava vzorků.....	2
2.2.2	Testování zkušebních vzorků, postupy měření.....	10
3	Faktory ovlivňující tvorbu lepených spojů	18
3.1	Požadované vlastnosti lepených spojů:.....	18
3.2	Problematika lepení.....	19
3.2.1	Lepidlo.....	19
3.2.2	Lepené materiály	23
3.2.3	Provozní prostředí	25
3.2.4	Konstrukce a zatížení	28
3.2.5	Technologický postup	35
3.3	Specifické faktory ovlivňující pevnost epoxidových lepidel	36
3.3.1	Příprava lepicí směsi.....	36
3.3.2	Proces vytvrzování	37
4	Možnosti a limity dvousložkových lepidel	39
4.1	Obecné výhody a nevýhody technologie lepení.....	39
4.2	Vlastnosti dvousložkových lepidel	40
4.2.1	Charakteristika epoxidových lepidel	41
4.2.2	Výhody a nevýhody epoxidových lepidel	41
5	Výzkum vlivu tvrdidla na vlastnosti dvousložkových systémů lepidel	42
5.1	Vyhodnocení zkoušky pevnosti ve smyku.....	42
5.2	Vyhodnocení zkoušky tvrdosti podle SHORE.....	49
5.3	Vyhodnocení zkoušky tvrdosti podle BRINELLA	51
5.4	Vyhodnocení tahových vlastností	54
6	Závěr	58
7	Seznam literatury	61

Přílohy

1 ÚVOD

Lepení je technologický postup spojování stejných i odlišných materiálů, který nabízí nejen mnoho výhod, ale současně je omezen i řadou limitujících faktorů. Z tohoto důvodu je důležité stále brát na vědomí znalosti týkající se technologie lepení a funkce lepeného spoje, popřípadě dodržovat specifické požadavky či pracovní postupy. Obecně je známo, že lepené spoje velice dobře snášejí namáhání v tahu či tlaku, ještě lépe namáhání ve smyku, a naopak nejcitlivěji reagují na namáhání v odlupování, s čímž by mělo být počítáno už od samotného návrhu konstrukce.

Lepení jako takové je velmi známá technologie, kterou používali již staří Římané a Egypťané ke klížení dřeva a dřevěných výrobků. O používání technologie lepení v evropském průmyslu jsou pak první zmínky z Holandska a Anglie ze 17. století, v dnešní době se však tato technologie stala naprosto běžnou záležitostí.

Rozvoj lepidel byl způsoben v minulém století zejména světovými válkami – především tou druhou – kdy se se zvětšujícími se nároky na úroveň konstrukcí musela zvyšovat jejich úroveň, což vedlo k vývoji hlavně lepidel syntetických. Největší rozmach však byl zaznamenán v posledních 50 letech, kdy šla technologie lepení výrazně dopředu.

Oproti ostatním metodám spojování lepení vyniká nejen již zmiňovanou možností aplikace na různé materiály, ale především dosažením takových vlastností, které ostatní metody neumožňují. Lepené spoje dovedou být na rozdíl od jiných metod pružné, avšak stále dostatečně pevné. Za optimální je pak lepený spoj považován, dosahuje-li jeho pevnost pevnosti materiálu.

Lepení však není, jak se říká „hojení na všechna bolení“, a je k němu nutné přistupovat pouze jako k doplňkové technologii ostatních. Současně by bylo chybné myslet si, že nějaké lepidlo může být univerzální pro všechna použití. Vždy je totiž nutné brát v úvahu nejen spojovaný materiál, jeho pórovitost a strukturu, ale také povahu lepidla, či okolní podmínky. Obecně vzato, s konkrétním lepidlem je vždy možné spojit pouze konkrétní materiály, za konkrétních podmínek lepení i následného využití.

Obsahem této diplomové práce je snaha objasnit technologie lepení především z hlediska dvousložkových systémů lepidel, a to se zaměřením na faktory ovlivňující tvorbu lepených spojů a jejich možnosti i limity. Experimentální část simulovaná na epoxidu ChS 1200 pak vyhodnocuje vliv tvrdidla na vlastnosti dvousložkových lepidel.

2 CÍL PRÁCE A METODIKA

2.1 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této práce bylo zaměřit se na problematiku lepení, a to s důrazem na dvousložkové systémy lepidel. Celou práci by pak současně bylo možné rozdělit na dvě části, z nichž jedna je tvořena literární rešerší, a druhá se zaměřuje na výzkum.

Literární rešerše je zde de facto souborem informací o technologii lepení, zdůrazňující faktory, které ovlivňují tvorbu lepených spojů, a to ať z hlediska požadované pevnosti, tak z hlediska vhodnosti použití této technologie. Zároveň jsou zde uceleny veškeré výhody i nevýhody použití lepidel, kde je opět kladen důraz na aplikaci dvousložkových systémů.

Cílem experimentálního výzkumu bylo posoudit vliv tvrdidla na výsledné mechanické vlastnosti, jimiž je myšlena především únosnost lepených spojů ve smyku a tvrdost lepidla současně s jeho pevností.

2.2 METODIKA PRÁCE

Zatímco tvorba literární rešerše spočívala ve shromažďování a třídění informací z odborné literatury, publikací a webových stránek, popřípadě v práci s textem, tabulkami a grafy či obrázky, experimentální část byla podstatně členitější, a časově náročnější.

V první řadě bylo zapotřebí stanovit postup práce pro přípravu zkušebních vzorků, provést měření zkoumaných veličin, a na závěr tyto naměřené hodnoty zpracovat, vyhodnotit a stanovit mechanické vlastnosti lepidla.

Experiment byl simulován na vzorcích vytvořených za pomoci epoxidového lepidla a zmiňované vlastnosti pak posuzovány rozmanitými metodami. Ve všech případech měření se pak vycházelo z předepsaného množství tvrdidla výrobcem, tedy 6,5 gramu tvrdidla na 100 gramů pryskyřice, kde 6,5 gramu tvrdidla bylo považováno za 100 %.

2.2.1 Příprava vzorků

Vzhledem k rozdílnostem mezi zvolenými měřicími metodami bylo nutné pořídit zkušební tělesa odlišné povahy. Jednak jsou to přeplátované spoje, jednak víceúčelová zkušební tělesa a jednak zkušební tělesa obdélníkového tvaru určená k měření tvrdosti lepidla.

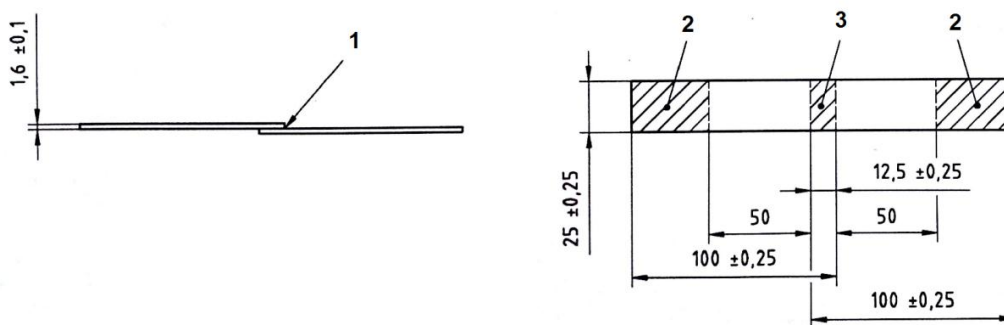
Překlátované spoje

Překlátované spoje byly vyráběny slepením nastříhaného ocelového plechu S235J0. Tento materiál odpovídá dle ČSN oceli 11378. Jedná se o konstrukční ocel, nelegovanou, jakostní, jemnozrnnou, která je vhodná pro lisování a tenké plechy. Tato ocel je také vhodná pro svařované mostní i jeřábové konstrukce, strojní součásti, tlakové nádoby s omezeným přetlakem, a to do teploty 300 °C. Svařitelnost je zaručená. Chemické složení materiálu je viditelné v tabulce 1. [1]

Tab. 1: Chemické složení použitého plechu S235J0. Zdroj: [2]

Chemické složení hotového výrobku							
C v % max. pro výrobek			Mn max.	Si max.	P max.	S max.	N max.
jmenovité tloušťky v mm							
≤16	>16≤40	>40					
0,19	0,19	0,19	1,50	-	0,040	0,040	0,014

Veškeré připravené překlátované spoje, potřebné k výzkumu, byly vytvořeny v souladu s normou ČSN EN 1465, jež udává kromě podstaty zkoušky i předepsaný tvar, rozměry i uspořádání zkušebních vzorků, což je znázorněno na obrázku 1.



Obr.1: Tvar a rozměry zkušebních vzorků dle ČSN EN 1465. Zdroj: [3]

1 – vrstva lepidla, 2 – plocha pro čelisti zkušebního přístroje, 3 – plocha smyku.

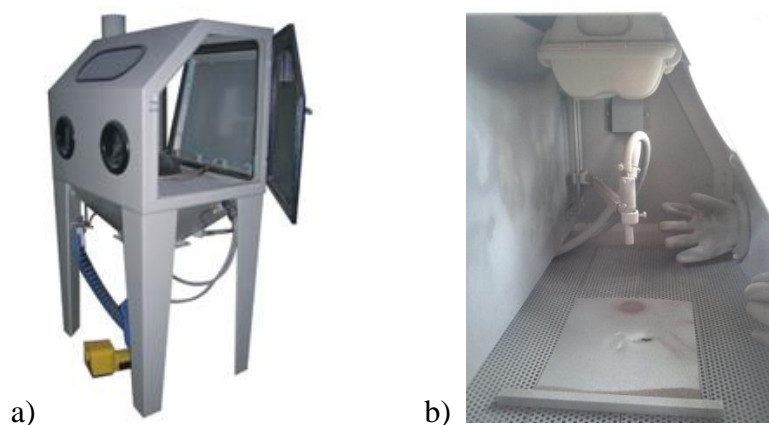
Z předchozího textu a obrázku je tedy patrné, že připravované vzorky byly vytvořeny slepením dvou ocelových plechů délky 100 mm, šířky 25 mm a tloušťky 1,6 mm. Délka překlátování přesně 12,5 mm stanovená normou nebyla bohužel možná ve většině případů zajistit, ale téměř vždy se pohybovala ± 1 mm v okolí této hodnoty.

Aby byly nejen odstraněny hrubé nečistoty, ale i zajištěn přímý kontakt lepidla s mikropovrchem adherendů, což je jedním z hlavních předpokladů pro vznik kvalitního

soudržného spoje, bylo zapotřebí adhérendy náležitě očistit. Z tohoto důvodu bylo zvoleno tryskání. Po této úpravě povrchu bylo nutné vzorky ještě odmastit s cílem zvýšit smáčivost lepeného povrchu.

Tryskání:

Povrch veškerých adhérendů byl upraven tryskáním umělým korundem F80 za účelem zbavení nečistot a oxidů bránících kvalitnímu spojení. Tato metoda byla zvolena po doporučení školitele, na základě předchozích výzkumů katedry a vhodnosti použití pro aplikovaný druh lepidla. Samotné tryskání bylo provedeno za pomoci tryskací kabiny ITB 65L, jež je určena a vybavena především pro injektorové tryskání. Kabina je vyobrazena na obrázku 2, v tabulce číslo 2 jsou pak shrnuty její vlastnosti.



Obr. 2: Tryskací kabina. Zdroj: [4, vlastní]

a) pohled zvenku, b) pohled do tryskací kabiny.

Tab. 2: *Technické parametry tryskací kabiny.* Zdroj: [5]

<i>Technické parametry tryskací kabiny:</i>
Typ: injektorový i tlakový
Boční křídlové dveře s vysokou těsností
Průzor s dvojitým sklem
Pracovní vstup pro ruce s vinylovými rukavicemi
Ovládání: nožním pedálem
Pracovní tlak: 2,5 – 7,5bar
Vnitřní osvětlení: 2 x 20W/230V
Vnitřní rozměry: 650 x 500 x 500 mm

Adherendy byly tryskány pouze v místě přeplátování spoje, a jejich drsnost poté v těchto místech činila $2,11 \pm 0,26 \mu\text{m}$, tj. s odchylkou 12,2%.

Odmašťování:

K odmaštění povrchu adherendů a především k čištění lepených ploch byl použit Aceton P6401, ve kterém byly pomocí štětce vzorky nejprve omývány a následně otírány bavlněným hadrem lehce namočeným v přípravku.

Charakteristika produktu výrobcem:

Použití: jako speciální rozpouštědlo, vhodné například pro nitrocelulózoová lepidla.

Hustota v kg/m^3 : cca 789.

TOC v kg/kg produktu: 0,62.

Klasifikace: Flam.Liq.2, EyE Irrit.2, STOT SE 3.

Označení výstražným symbolem: GHS02, GGHS07.

Signální slovo: Nebezpečí.

Hořlavá kapalina I. třídy nebezpečnosti. [6]

Lepení:

K vytváření spojů sloužilo lepidlo ChS Epoxy 1200/371 spolu s tvrdidlem P11. Jedná se o středně molekulární viskózní epoxidové lepidlo, modifikované nereaktivním zvláčňovadlem. Po smísení s tvrdidlem vytvrzuje při normální nebo zvýšené teplotě. Při použití zmiňovaného tvrdidla výrobce udává dobu zpracování 26 minut, dobu gelatace 60 minut, a mez pevnosti po 7 dnech při 23 °C 18 MPa. Lepidlo ChS Epoxy 1200/371 se používá k přípravě lepicích kompozic pro lepení kovů, skla, porcelánu, keramiky, a jiných materiálů, popřípadě k přípravě stěrkových hmot a tmelů.

Příprava lepidla zahrnovala nejprve přesné navázení množství pryskyřice pomocí laboratorních vah CL 501, s nejmenším dílkem 0,1 g. Tato hodnota nebyla pro navázení přesného množství tvrdidla dostačující, a proto bylo nutné množství menší než 0,1 g dokapat pomocí injekční stříkačky. K důkladnému promíchání pryskyřice s tvrdidlem sloužil plastový kelímek a dřevěná špachtle, pomocí které bylo možné lepidlo i nanášet.

Tento postup byl aplikován na všechna lepení při každé koncentraci. Jednotlivé koncentrace pak byly po sériích označovány římskými číslicemi od I do XV, a při lepení vzorků pro výzkum vytvrzování číslicemi arabskými od 1 do 7.

K základnímu výzkumu byly připraveny vzorky, u kterých se nejprve množství tvrdidla snižovalo a navyšovalo s krokem 5 %, ale během experimentu bylo nutné tento krok vzhledem ke zjištěným průběžným výsledkům změnit na 10%.

Označení vzorků a jejich koncentrace:

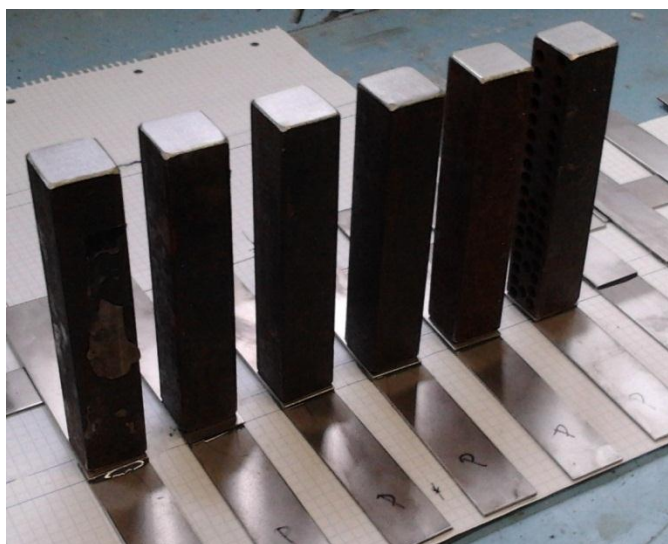
- I - 100 % tvrdidla P11 (množství předepsané výrobcem)
- II - 95 % tvrdidla P11
- III - 105 % tvrdidla P11
- IV - 90 % tvrdidla P11
- V - 110 % tvrdidla P11
- VI - 85 % tvrdidla P11
- VII - 115 % tvrdidla P11
- VIII - 75 % tvrdidla P11
- IX - 125 % tvrdidla P11
- X - 70 % tvrdidla P11
- XI - 130 % tvrdidla P11
- XII - 60 % tvrdidla P11
- XIII - 140 % tvrdidla P11
- XIV - 50 % tvrdidla P11
- XV - 150 % tvrdidla P11

K výzkumu vytvrzování pak bylo připraveno pouze několik koncentrací.

Označení vzorků:

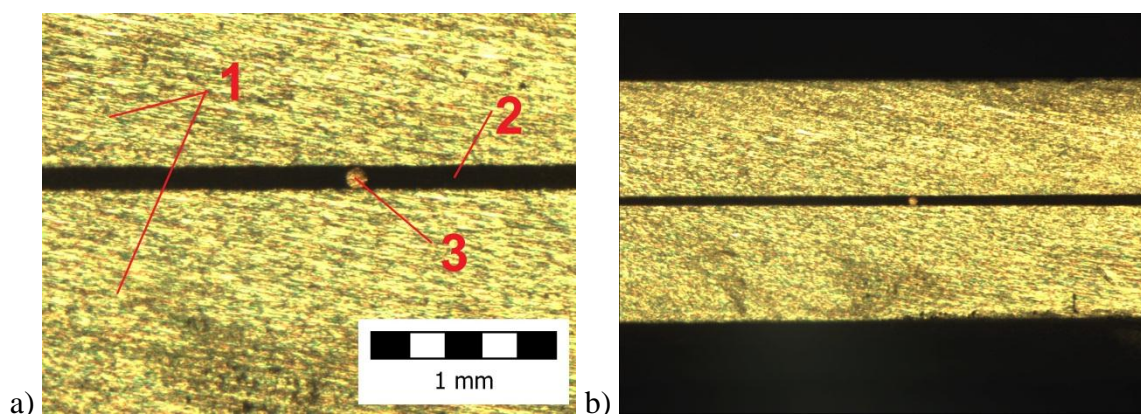
- 1 - 100 % tvrdidla P11
- 2 - 90 % tvrdidla P11
- 3 - 110 % tvrdidla P11
- 4 - 80 % tvrdidla P11
- 5 - 120 % tvrdidla P11
- 6 - 70 % tvrdidla P11
- 7 - 130 % tvrdidla P11

Lepidlo bylo vždy nanášeno pouze na jeden z adherendů, a aby byla zajištěna souměrná tloušťka vrstvy lepidla, byly použity distanční drátky z mědi o průměru 0,10 mm, které byly vkládány po nanesení lepidla vždy dva mezi oba adherendy rovnoběžně se směrem budoucího zatížení. Lepidlo bylo vytlačeno přiměřeným tlakem a každý spoj byl zatížen nejméně po dobu 24 hodin závažím o hmotnosti 603 gramů. Tento proces probíhal za normální teploty (23 °C). Hotové zatížené spoje jsou patrné na obrázku 3.



Obr. 3: Konečná fáze přípravy lepených spojů. Zdroj: [vlastní]

Tloušťka vrstvy lepidla zajištěná distančními drátky je dobře viditelná na obrázku číslo 4. Jedná se o příčný řez lepeným spojem, přiblížený pomocí mikroskopu. Při měření tloušťky této vrstvy pod mikroskopem byly naměřeny hodnoty blízké velikosti průměru distančních drátků. Naměřená tloušťka vrstvy se pohybovala v průměru na hodnotě 0,10 mm s odchylkou 5,03 %.



Obr. 4: Příčný řez lepeným spojem. Zdroj: [vlastní]

a) 1 – adherend, 2 – lepidlo, 3 – distanční drátek

b) celkový pohled na spoj

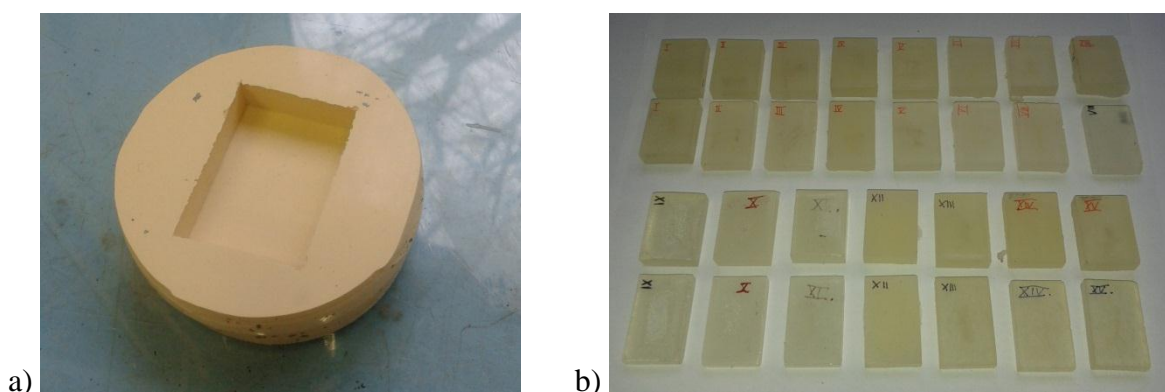
Pro hlavní výzkum, spočívající v měření pevnosti ve smyku, bylo od každé koncentrace tímto způsobem vyrobeno 20 zkušebních vzorků, čímž bylo vyhověno normě, která udává vzorků 6. Pro výzkum vytvrzování byla tělesa připravována v dílčích sériích, kdy každých 10 minut byly slepeny tři vzorky označované kromě čísla ještě písmeny abecedy, a to až do fáze, kdy lepidlo nebylo možné nanášet. Během tohoto postupu byla ve stejném časovém intervalu, za pomoci infračerveného teploměru TESTO 845, měřena teplota lepidla.

Příprava zkušebních těles pro měření tvrdosti a stanovení tahových vlastností

Ve fázi přípravy lepidla bylo nutné dbát na dostatečné množství připravované směsi, neboť kromě vytvoření lepených spojů bylo zapotřebí vyrobit zkušební tělesa pro měření tvrdosti a pro zkoušku pevnosti v tahu. K odlití sloužily formy vyrobené z Lukoprenu N1522 s použitím modelových těles.

Zkušební tělesa pro měření tvrdosti

Zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti byla vždy odlita 2, jedno rozměru 25 x 35 x 8 mm a druhé 24,5 x 39 x 6,5 mm. Při plnění forem polymerem bylo zapotřebí minimalizovat množství vzniklých bublin, a to především pomalým litím a důkladným pěchováním. Tato zkušební tělesa byla označována opět římskými číslicemi od I do XV, a po vytvrzení broušena na brusném plátně s označením P120 kvůli zajištění rovinnosti pro budoucí zkoušky tvrdosti. Lukoprenová forma a zkušební tělesa jsou vidět na obrázku číslo 5.



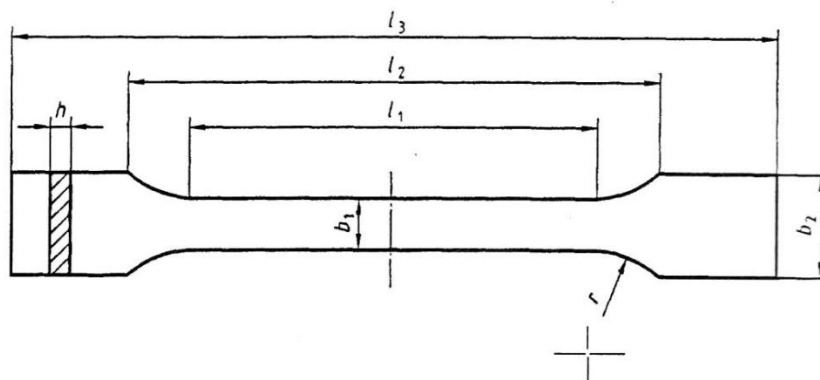
Obr. 5: *Výroba obdélníkových zkušebních těles. Zdroj: [vlastní]*

a) forma pro výrobu těles

b) hotové vzorky připravené k měření

Víceúčelová zkušební tělesa

Víceúčelová zkušební tělesa byla vyrobena až na závěr experimentální části práce, jelikož během měření tvrdosti došlo k odhalení elastické deformace u vzorků s menším podílem tvrdidla oproti základnímu poměru. Tato zkušební tělesa jsou charakteristická rozměry danými normou ČSN EN ISO 3167, které jsou podrobněji uvedeny na obrázku 6.



Obr. 6: Víceúčelové zkušební těleso. Zdroj: [7]

kde $l_1 = 55 \pm 2 \text{ mm}$, $l_2 = 75 \text{ mm}$, $l_3 = 135 \text{ mm}$, $b_1 = 10 \pm 0,2 \text{ mm}$, $b_2 = 20 \pm 0,2 \text{ mm}$,
 $h = 4 \pm 0,2 \text{ mm}$, $r = 12,5 \text{ mm}$.

Tělesa byla odlita opět velmi pomalu do připravených forem (obr. 7) z důvodu omezení vzniku bublin, a to v počtu dvě tělesa pro každou koncentraci. Kromě základního poměru pryskyřice a tvrdidla se množství tvrdidla snižovalo a navyšovalo s krokem 10 % až na hodnoty 50 a 150 %. Rovněž tato tělesa musela být zbrušena na brusném plátně P120. Výsledná tloušťka by se dle zmiňované normy měla blížit k hodnotě 4 mm.



Obr. 7: Forma pro odlévání univerzálních plochých zkušebních těles. Zdroj: [vlastní]

2.2.2 Testování zkušebních vzorků, postupy měření

Za účelem objektivního stanovení vlastností lepidla bylo provedeno více druhů zkušebních metod rozmanitého charakteru, během kterých se zkoumaly rozdílné veličiny. Podle těchto naměřených veličin pak v závěru docházelo k vyhodnocení zmiňovaných vlastností lepidla s důrazem na vliv množství přidaného tvrdidla právě na tyto vlastnosti.

Výše jmenované vzorky pak byly testovány a vyhodnocovány těmito zkušebními metodami:

- stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených soustav dle normy ČSN EN 1465,
- stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru dle normy ČSN EN ISO 868,
- stanovení tvrdosti metodou vtlačení kuličky dle normy ČSN EN ISO 2039-1,
- stanovení tahových vlastností dle normy ČSN EN ISO 527-1.

Stanovení pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465

Tato norma obecně udává, že se pevnost přeplátovaného lepeného spoje ve smyku stanoví smykovým namáháním tohoto spoje, na jehož tuhé adherendy působí tahová síla rovnoběžná s plochou lepeného spoje a hlavní osou zkušebního tělesa. Výsledkem této zkoušky je pak síla nebo napětí zjištěné při porušení spoje. [3]

Zkušební tělesa, o nichž pojednává kapitola 2.2.1, byla zkoušena na univerzálním zkušebním stroji ZDM 5 znázorněném na obrázku číslo 8. Tento mechanický zkušební stroj je schopný měřit sílu v rozsahu 0 – 50 000 N v závislosti na použitém typu závaží, přičemž pro zkoušku přeplátovaných lepených spojů bylo zvoleno závaží typu A, a hodnoty pak byly odčítané na stupnici od 0 do 10 000N, kde velikost nejmenšího dílku odpovídala síle 20 N.

Před začátkem měření byly instalovány čelisti pro zkoušení plechů a přeplátovaných spojů a rychlost zkoušení nastavena na hodnotu 6 mm/min⁻¹.

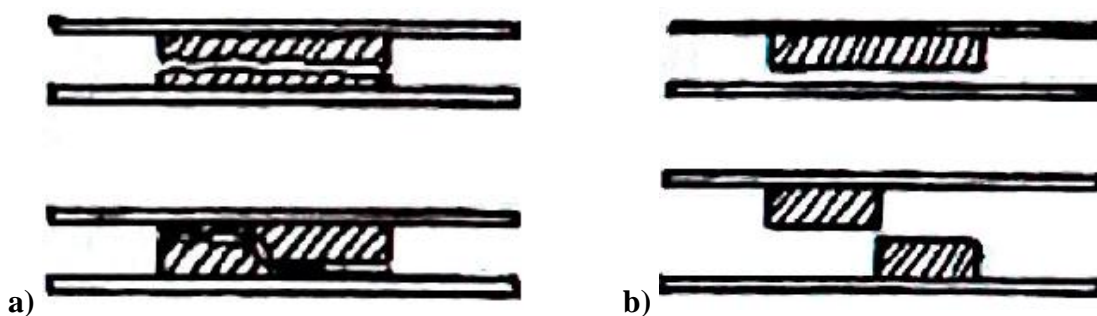
Každý již dříve vytvořený lepený spoj řady I – XV i řady 1 – 7 byl pak zkoušen na tomto zkušebním zařízení a to s pevně stanoveným postupem. Zkušební těleso bylo nejprve vloženo mezi horní upínací čelisti a pomocí pákového mechanismu upevněno takovým způsobem, aby podélná osa zkušebního tělesa byla rovnoběžná s osou budoucího zatížení. Teprve poté mohl být stroj spuštěn a spoj zatěžován narůstající silou. Po destrukci spoje bylo nutné nejen zaznamenat hodnotu maximální síly, která odpovídala mezi pevnosti, ale rovněž

bylo nutné posoudit, zda se jedná o porušení adhezní nebo kohezní, a pro budoucí výpočet napětí změřit a zaznamenat délku překlátování spoje.



Obr. 8: Univerzální zkušební stroj ZDM 5. Zdroj: [vlastní]

Typy porušení byly posuzovány na základě normy ČSN EN 10365, která uvádí označení hlavních typů porušení lepeného spoje. Normu lze použít bez ohledu na povahu adherendů na veškeré mechanické zkoušky lepených spojů. Adhezní porušení je normou definováno jako prasknutí lepeného spoje, jež se zjevně projeví oddělením na rozhraní lepidla a adherendu, a porušení kohezní jako takové porušení, při kterém se oddělení projeví buď v lepidle nebo v adherendu. Na obrázku číslo 9 jsou znázorněny nákresy obou typů porušení. Tyto obrázky mají být nápomocny při rozeznávání.



Obr. 9: Porušení lepených spojů. Zdroj: [8]

a) typy kohezního porušení

b) typy adhezního porušení

Z naměřených hodnot byly následně pomocí programu Microsoft Excel a STATISTICA zpracovány tabulky a grafy, které mají vypovídající hodnotu při posuzování vlastností spojů a lepidla.

Výpočet napětí spočíval v podílu naměřené síly a plochy přeplátování, což je patrné v následujícím vztahu (1)

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

τ je hodnota tahového napětí [MPa],

F je naměřená hodnota síly [N],

S je plocha přeplátování [mm²].

Plocha přeplátování spoje S , je dána součinem šířky plechu, která je pevně stanovena normou, a délky přeplátování, jež by se dle normy měla blížit hodnotě 12,5 mm. Délka přeplátování však byla u každého vzorku měřena zvlášť a ve výsledcích je s ní počítáno.

Stanovení tvrdosti podle Shore v souladu s normou ČSN EN ISO 868

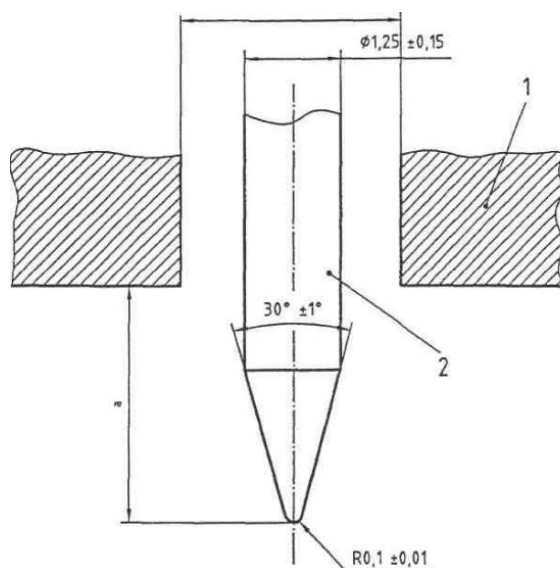
Princip stanovení tvrdosti touto metodou je založen na hloubce vtlačení předem specifikovaného hrotu měřicího zařízení. Hrot je vtlačován do zkoušeného materiálu za předem definovaných podmínek, a hodnota tvrdosti, která závisí na viskoelastických vlastnostech a na modulu pružnosti materiálu je nepřímou úměrná hloubce vtlačení. Norma ČSN EN ISO 868 specifikuje metodu Shore pro stanovení tvrdosti plastů. Tvrdoměr typu A slouží pro měření tvrdosti měkkých materiálů, tvrdoměr typu D materiálů tvrdších. [9]

V laboratorních podmínkách Technické fakulty ČZU byl k dispozici ruční měřicí přístroj SHITO HT-6510 sloužící k měření tvrdosti SHORE A/C/D viz obrázek 10.



Obr. 10: *Digitální tvrdoměr SHITO HT-6510. Zdroj: [vlastní]*

Digitální tvrdoměr je opatřen hrotem z kalené oceli, jehož průměr činí $1,25 \pm 0,15$ mm a jeho tvar i kótování jsou znázorněny na obrázku 11. Pod číslem 1 je zde vyobrazena opěrná patka tvrdoměru, pod číslem 2 samotný hrot. [9]



Obr. 11: Zkušební hrot pro tvrdoměry typu D. Zdroj: [9]

Obroušené vzorky byly nejprve umístěny na rovném povrchu a po zapnutí a vynulování tvrdoměru ve svislé poloze došlo k měření tvrdosti. Tvrdoměr byl přitom nastaven v režimu snímání maximální hodnoty. V průběhu měření bylo nutné dbát na kolmost tvrdoměru ke zkušebnímu tělesu, a současně na vzdálenost zkušební hrotu od okrajů zkušební tělesa, která je normou stanovena minimálně na 9 mm.

Tvrdost byla zkoumána na vzorcích obdélníkového tvaru, o nichž byla zmínka v kapitole 2.2.1, které svou tloušťkou vyhovují předepsané normě, a na každém z obou vzorků označených pro příslušnou koncentraci čísly I – XV bylo naměřeno 10 hodnot.

Výsledných 20 hodnot tvrdosti pro každou koncentraci bylo opět zaznamenáno a zpracováno pomocí programu Microsoft Excel a STATISTICA do tabulek a z vypočítaných průměrných hodnot sestaven graf.

Stanovení tvrdosti metodou vtlačení kuličky dle normy ČSN EN ISO 2039-1

Jako zkušební tělesa při této metodě byla použita tělesa shodná s tělesy pro měření tvrdosti vtlačováním hrotu, tedy vzorky I – XV, jež svojí tloušťkou splňovala doporučení normy. Podstata metody pak spočívá ve stanovení tvrdosti na základě vtlačení zatížené kuličky do povrchu materiálu. Toto zatížení musí být přesně specifikováno. Tvrdost lze pak odvodit jednoduše jako podíl použitého zatížení a plochy vtlačení. [10]

Vzorky byly testovány na zkušebním zařízení HP 3000 viditelném na obrázku 12, které je součástí vybavení laboratoří ČZU. V průběhu měření zkušební kulička o průměru 10 mm působila na zkušební těleso zatěžovací silou 1839 N po dobu 30 s.



Obr. 12: Zařízení HP 3000 pro měření tvrdosti podle Brinella. Zdroj: [vlastní]

Měření probíhalo následujícím postupem. Obroušené těleso bylo vždy umístěno na opěrnou desku zkušebního přístroje tak, aby na ní spočívalo celým povrchem a aby jeho plochy byly kolmé ke směru působení zátěže. Po vysunutí desky do polohy, kdy se těleso dotýkalo měřicí kuličky a opěrných patek, se spustila zatěžovací síla, jež působila na povrch tělesa po výše uvedené době. Po odlehčení se postup opakoval na všech vzorcích takovým způsobem, že na každém zkušebním tělese byly provedeny tři vtisky, tedy 6 vtisků pro každou koncentraci lepidla.

K vyhodnocení tvrdosti bylo zapotřebí ihned po zatěžování změřit dva na sebe kolmé průměry vtisků, k čemuž sloužila cejchovaná lupa s velikostí nejmenšího dílku odpovídající hodnotě 0,1 mm viditelná na obrázku 13. Průměry byly následně zaznamenány do připravené tabulky a pomocí programu Microsoft Excel a STATISTICA byly vypočítány tvrdosti a sestaveny grafy.



Obr. 13: Brinellova lupa. Zdroj: [vlastní]

Nejprve bylo nutné spočítat střední průměr vtisku, a následně vypočítat hodnotu tvrdosti podle Brinella pomocí vztahu (2)

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

HBW je tvrdost materiálu [-],

F je zkušební zatížení [N],

D je průměr kuličky [mm],

d je střední průměr vtisku [mm].

Střední průměr d je pouhým aritmetickým průměrem dvou na sebe kolmých průměrů vtisků měřených bezprostředně po odlehčení zatížení.

Stanovení tahových vlastností dle normy ČSN EN ISO 527-1

Předmětem normy uvedené v nadpisu kapitoly je vyhodnocování chování zkušebních těles při tahovém namáhání a stanovování meze pevnosti v tahu, což je v případě stanovení tahových vlastností použitého lepidla demonstrováno na univerzálních zkušebních tělesech popsanych rovněž v předchozím textu. Zkušební těleso je v tomto případě protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí až do fáze porušení. [11]

Pro případ této metody byl použit univerzální zkušební stroj Lab.Test 5.50ST spolu s počítačovým vyhodnocovacím softwarem.

Zkouška proběhla na univerzálních zkušebních tělesech, a její vyhodnocení spočívalo ve stanovení tahového napětí při jejich porušení a dále jejich jmenovitého poměrného prodloužení.

Výpočet tohoto napětí je dán vztahem (3)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

σ je hodnota tahového napětí [MPa],

F je naměřená hodnota síly [N],

A je plocha příčného průřezu zkušebního tělesa [mm²].

Plocha příčného průřezu A zkušebního tělesa je v tomto případě dána součinem šířky tělesa b a jeho tloušťky h .

Výpočet jmenovitého poměrného prodloužení je závislý na počáteční a výsledné délce tělesa, respektive na vzdálenosti mezi upínacími čelistmi před začátkem měření, a po jeho ukončení. Toto prodloužení lze vypočítat aplikací vztahu (4)

$$\varepsilon_t = 100 \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

ε_t je jmenovité poměrné prodloužení [%],

ΔL je zvětšení vzdálenosti mezi čelistmi [mm],

L je počáteční vzdálenost mezi čelistmi [mm].

Výsledky zkoušky byly zpracovány pomocí vyhodnocovacího softwaru zkušebního zařízení, a programu Microsoft Excel a STATISTICA.

Z veškerých naměřených výsledků během jednotlivých zkoušek tedy byly spočítány aritmetické průměry, směrodatné odchylky a variační koeficienty, jež se počítají ze vztahů (5), (6) a (7)

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

\bar{x} je aritmetický průměr,

x_i je soubor vypočtených hodnot,

n je počet naměřených výsledků.

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

s je směrodatná odchylka [MPa],

\bar{x} je aritmetický průměr smykového napětí [MPa],

x_i je soubor vypočtených hodnot smykového napětí [MPa],

n je počet naměřených výsledků.

Variační koeficient:

$$v = s / \bar{x} \cdot 100 \quad (7)$$

3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU LEPENÝCH SPOJŮ

Lepení je metoda spojování, jejíž použití v praxi vyžaduje značné znalosti nejen technologie lepení jako takové, ale i vlastnosti používaných lepidel. [12]

Během lepení jsou jednotlivé části (adherendy) spojovány pomocí lepidel (adheziv). Slepáním dvou součástí dojde k nerozebíratelnému spoji, který využívá adhezivní síly vznikající mezi lepidlem a adherendem, a také kohezi lepidla. Pro vytvrzování lepidla nám pak slouží známé parametry a to teplota [$^{\circ}\text{C}$], tlak [MPa] a doba [min]. [13]

Ne vždy je však možné vyhovět veškerým nárokům ohledně mechanické pevnosti, tepelné odolnosti, chemické stálosti, vodovzdornosti či odolnosti spoje vůči povětrnostním vlivům současně. Z tohoto důvodu je tedy nutné uvážit, které z těchto nároků jsou v dané situaci důležitější, a potom je třeba navrhnout nejlepší - kompromisní - řešení. [14]

3.1 POŽADOVANÉ VLASTNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ:

- **Mechanické vlastnosti** – zátěž staticky nebo dynamicky. Pevnost staticky zatíženého spoje zde může být snadno definována potřebnými minimálními hodnotami pro pevnost v tahu, smyku či odlupování. Oproti tomu vyhodnocení spoje namáhaného dynamicky je poměrně složité. Obvykle se totiž jedná o namáhání časově a amplitudově nepravidelné. Z tohoto důvodu je dobré celý problém napodobit vhodnou zkušební metodou.
- **Tepelná odolnost** – tepelné namáhání spoje je zpravidla definováno minimální a maximální teplotou, časovým průběhem, a spodními limity mechanických vlastností za těchto podmínek. Z běžně používaných lepidel se dají označit jako nejodolnější lepidla fenolická, polyurethanová a lepidla epoxidová, jejichž trvalá tepelná odolnost se pohybuje v rozmezí od 100 do 150 $^{\circ}\text{C}$. Tepelně nejodolnější jsou pak lepidla polyimidová a polybenzimidazolová, jež jsou schopny odolávat teplotám od 250 do 350 $^{\circ}\text{C}$.
- **Odolnost vůči vodě a vlhkosti** – na základě této odolnosti lze rozlišit lepidla vyloženě neodolná, lepidla s omezenou či dočasnou odolností a lepidla s dobrou odolností. K neodolným lepidlům patří především lepidla na bázi přírodních surovin, tedy lepidla škrobová, glutinová a podobně. Střední odolnost pak mají lepidla na bázi

polyvinylalkoholu, polyvinylacetátu, kaseinu či některých pryskyřic. Do lepidel odolných pak patří lepidla fenolitická, polyuretanová, samovulkanizující ze syntetických kaučuků a lepidla z oblasti lineárních polymerů.

- **Chemická odolnost spoje** – ovlivnění spoje chemickými výpary a kapalinami, k němuž může docházet například difúzí přes adherendy nebo okraji spáry. Tyto případy je nutné řešit na základě údajů o složení a odolnosti polymeru obsaženého v lepidle. [15]

3.2 PROBLEMATIKA LEPENÍ

Pokud se rozhodneme použít technologii lepení, je velice důležité znát veškeré zásady a celou tuto problematiku. Velice často je totiž možné setkat se faktem, že příčinou selhání lepeného spoje není nízká pevnost lepidla, ale nedostatečná příprava povrchu, volba nevhodného druhu lepidla nebo špatně navržená konstrukce lepeného spoje. [16]

Pro vytvoření kvalitního lepeného spoje je proto nutné řídit se pěti základními body, kdy všech pět těchto bodů má velký vliv nejen na pevnost, ale i na trvanlivost spoje, a to jak v případě jednosložkových, tak i dvousložkových lepidel. Lze jimi označit:

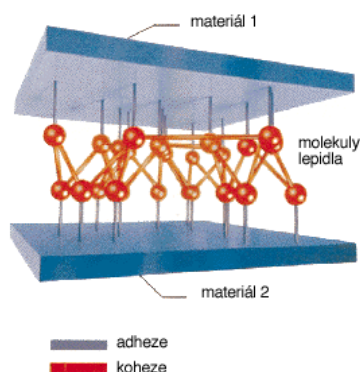
- Lepidlo
- Lepené materiály
- Provozní prostředí
- Konstrukci spoje a zatížení
- Technologický postup [17]

3.2.1 Lepidlo

Je možné říci, že celková pevnost lepených spojů je nejvíce ovlivňována dvěma činiteli, ze kterých se odvíjejí další vlastnosti, tedy adhezí a kohezí (obr. 14).

- **Adheze** = přilnavost lepidla. Přilnavost souvisí s molekulovou strukturou lepidla a jedná se o vzájemné přitahování lepených povrchů adhezními silami. Jednu složku adheze tvoří takzvané Van der Waalsovy síly, jimiž je možné označit přitažlivé interakce mezi molekulami, druhá složka je tvořena mechanickými zatíženími v mikronerovnostech povrchu lepeného spoje.

- **Koheze** = pevnost lepidla. Koheze charakterizuje stav lepidla a závisí na velikosti energie, která je potřebná k odtržení jedné částice od ostatních. Částice lepidla drží pohromadě vlivem mezimolekulárních valenčních sil (Van der Waalsovy síly) a propletením polymerních řetězců lepidla. [18]



Obr. 14: *Spojovací síly v lepeném spoji. Zdroj: [17]*

Aby mohly být popsány vlastnosti jednotlivých lepidel a dále navrhnuty lepené díly, je třeba:

- a) určit, které druhy pevností spojů jsou těmi nejdůležitějšími při výběru lepidla,
- b) objasnit, které technologické vlastnosti jsou z hlediska použití rozhodující,
- c) shrnout nejdůležitější charakteristické vlastnosti lepidel na základě zmíněných kritérií. [19]

Pevnost v odlupování

Přestože se změna pevnosti v odlupování nemusí vždy při statických a dokonce ani dynamických zkouškách pevnosti lepených dílů projevit, je její hodnota pro výběr lepidla velmi důležitá. Nízké hodnoty pevnosti v odlupování mohou mít nepříznivý vliv především při místním zatížení vznikajícím například při montáži. Dá se říci, že s výjimkou trubkových spojů by měl konstruktér volit vždy lepidlo s co možná největší pevností v odlupování. [19]

Pevnost ve smyku a při dlouhodobém zatížení za zvýšené teploty

O použitelnosti lepidla v konkrétních konstrukcích rozhoduje velmi často jejich tepelná odolnost při zatížení, která je charakterizována pevností ve smyku při požadované teplotě a statickou pevností ve smyku při této teplotě. Například u dílů vystavených slunečnímu záření jsou rozhodující hodnoty pevnosti při teplotě 80 °C. [19]

Nutná je podotknout i únavová pevnost, popřípadě pevnost rázová. Nižší pevnosti při únavových zkouškách jsou pak obvykle spojeny s hodnotami získanými zmiňovanými zkouškami dlouhodobým statickým zatížením. Během zkoušek rázové pevnosti se potom nedostatky lepidel projevují nejvíce okolo teploty $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. [19]

Rozdělení lepidel na základě technologických vlastností

Klasifikace lepidel jako takových je poměrně velký problém, přesto však je lze rozdělit do několika skupin. Lepidla se tak dělí podle několika hledisek, avšak není možné vystihnout úplně přesně jejich povahu. Mnoho nových lepidel umožnilo nová uplatnění, čímž došlo k vynucení nových klasifikací. Nejstarší dělení lepidel podle účelu, původu či způsobu zpracování se tak rozrostlo o dělení na základě způsobu dosažení pevnosti spoje, chemického složení, koncentrace vodíkových iontů či obsahu rozpouštědel. Pomocí těchto kritérií rozlišujeme například lepidla disperzní a roztoková, lepidla citlivá na tlak, tavná lepidla a lepidla, jež vytvrzují chemickou reakcí. Dále je možné lepidla dělit na základě formy, v níž jsou dodávány, a to tedy na lepidla jednosložková, dvousložková či vícesložková. [20, 21]

Nelze opomenout ani rozdělení lepidel takzvaně na studená (vytvrzující do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), teplá (od 22 do $144\text{ }^{\circ}\text{C}$) a horká (vytvrzující nad teplotou $145\text{ }^{\circ}\text{C}$), lepidla tavná, popřípadě lepidla beztlaková a tlaková, pro které je limitní tlak $0,3\text{ MPa}$. [13, 22]

V této oblasti jsou rovněž nutná podotknout i lepidla vytvrzující na základě UV záření vyznačující se vysokou pevností, lepidla kyanoakrylátová vytvrzující pomocí relativní vlhkosti, a v neposlední řadě lepidla pružná, jež jsou zpravidla na bázi silikonů, polyuretanů či MS polymerů. [17]

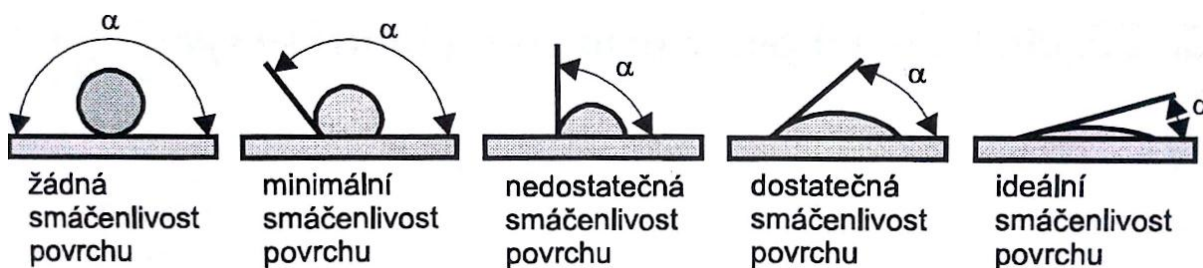
Všechna tato lepidla vykazují rozdílné vlastnosti, a přesto je v hojném množství možné setkat se s požadavky na jejich všestranné využití. Jako příklad je možné zmínit lepidla používaná v opravářské praxi. Tato lepidla totiž často spojují odlišné materiály, velikosti lepených ploch jsou velmi rozmanité, jejich zatížení bývá často kombinací několika druhů zatížení, a rovněž tyto lepené díly bývají vystaveny maximálním provozním teplotám. V tomto případě se volba značně omezuje především na lepidla akrylátová. Ta se dále dělí buď na základě chemického složení, nebo podle způsobu nanášení. K polymerizaci těchto lepidel pak dochází kontaktem s aktivátorem, s kterým se lepidlo mísí ještě před jeho nanesením, anebo během lepení. Akrylátová lepidla dosahují nejen vysoké pevnosti, ale mezi jejich mnohé výhody patří také jejich částečná pružnost. [17]

Volba lepidel

Aby měl spoj požadované vlastnosti, při výběru lepidla je nutné zohlednit určitá kritéria. Prvním kritériem, které je nutno uvažovat, je lepený materiál, jejich kombinace, případně stav jeho povrchu. Velmi záleží i na velikosti součástí a s tím spojenou velikost lepené plochy či požadovaná velikost spáry. Na výběr lepidla má vliv rovněž druh a průběh přenášeného zatížení, popřípadě provozní či maximální teplota a rychlost jejích změn. Jedna z následujících kapitol rovněž bude obsahovat pojednání o vlivu prostředí z hlediska koncentrace plynů, kapalin či chemikálií na lepený spoj, a v neposlední řadě je při výběru lepidla nutné brát zřetel na proces výroby. Tím je myšlena zejména viskozita, způsob a rychlost vytvrzení, nebarvitelnost, zdravotní nezávadnost, popřípadě i cena. [17]

Rozdíl ve výběru lepidel by měl být značný i z hlediska potřeby tuhého nebo pružného spoje. V případě předpokladu tuhého spoje, jež se vyznačuje vysokou pevností, vysokou tuhostí a požadavkem na přesnou vzájemnou polohu dílů, je vhodné volit lepidla vteřinová, akrylátová, epoxidová či UV lepidla. Oproti tomu lepidla silikonová, polyuretanová či MS polymery jsou schopny zajistit spojení pružná. [17]

K určení vhodnosti použitého lepidla a rozhodování o něm nám může pomoci takzvaná kapková zkouška, díky níž je možné zjistit smáčivost lepidla. Na základě velikosti úhlu, který svírá okraj kapky zkoušeného lepidla se základním materiálem, lze určit, zda je konkrétní typ lepidla pro daný druh materiálu vhodný či naopak. Na obrázku 15 je znázorněno pravidlo, že čím menší je tento úhel, tím vhodnější je lepidlo pro vytvoření kvalitního spoje. [22]



Obr. 15: Kapková metoda k určení vhodnosti lepidla. Zdroj: [22]

Tuto smáčecí účinnost samotných lepidel je pak možné zvýšit například přidávkou tenzidů (smáčedel), které snižují jejich povrchové napětí. Zároveň lze smáčení zlepšit za pomoci zvýšené teploty. Pro lepidla je totiž charakteristické, že snížení jejich povrchového napětí je tím intenzivnější, čím je nižší jeho viskozita. Zvýšení smáčivosti lepidla při zvýšení

teploty pak způsobí dokonalejší molekulový kontakt lepidla a adherendu, s čímž velmi úzce souvisí i vzrůst pevnosti spojů při lepení za tepla. [23]

3.2.2 Lepené materiály

V předchozím textu je uvedeno, jaké druhy lepidel se v praxi běžně používají. Rovněž bylo řečeno, že klasifikování lepidel jako celku je velice nesnadné. K tomu, aby byl při technologii lepení zvolený správný druh lepidla je zapotřebí seznámit se i s problematikou vlivu lepeného materiálu na výsledné vlastnosti spojů.

Pokud má být dosaženo kvalitního spojení adherendů, co se týče jejich materiálového složení, je třeba zohlednit několik faktorů. Jsou jimi:

- Geometrie povrchu
- Složení a chemická účinnost
- Smáčivost
- Čistota povrchu
- Propustnost pro plyny
- Tloušťka a tuhost
- Soudržnost povrchu
- Rozpustnost a bobtnavost
- Teplotní délková roztažnost [14]

Geometrie povrchu

V případě geometrie povrchu záleží především na tom, jak moc je mikropovrch adherendu pokrytý lepidlem. Výpočtem bylo zjištěno, že na základě vztahu smáčivosti s hloubkou a průměrem nerovností smáčivost roste s klesající velikostí nerovností povrchu. Pro spoj je pak tedy výhodnější, když jsou plochy adherendů hladce či ostře opracované – například frézované, hoblované nebo tryskané – nikoliv leštěné či hrubě zdrsňované.[15]

Složení a chemická účinnost

Co se týče chemického složení, adherendy mohou optimálně ovlivnit soudržnost spoje, jsou-li dány podmínky pro vznik přímých chemických vazeb. Oproti tomu jsou ale známy případy, kdy vlivem chemického složení může dojít ke zpomalení či dokonce zastavení tuhnutí lepidla. Tímto často vznikají potíže s lepením mědi, popřípadě jejích slitin.[15]

Smáčivost

Pokud má lepidlo adherend smáčet, musí být jeho povrchové napětí menší, než povrchové napětí smáčené hmoty. Smáčivost povrchu pak tedy můžeme zkoušet například v předchozí kapitole zmiňovanou kapkovou zkouškou. Při hodnocení smáčivosti je nutné uvažovat cizí látky na povrchu adherendů (vzduch, prach, tuky, vlhkost,...), jež podstatně mění povrchové napětí materiálu. Příznivě můžeme smáčivost ovlivnit odmaštěním povrchu, a nebo hydrofilací či oxidací chemickými a fyzikálními prostředky. [15]

Čistota povrchu

Z předchozího odstavce vyplývá, že smáčivost je značně závislá na čistotě povrchu. Jedním z hlavních předpokladů pro dosažení kvalitního a soudržného spoje je maximální kontakt lepidla s mikropovrchem adherendu. V případě, že jsou povrchy znečištěny například korozí, zbytky nátěrových hmot či mastnotou, lepidlo se nedostane k povrchu lepeného materiálu, ale pouze k povrchu nečistoty. Pevnost spoje je pak značně snížena, protože závisí a soudržnosti nečistoty. V praxi je obvyklé, že každý povrch je nutné považovat za znečištěný, přestože to pouhým okem člověka nemusí být viditelné. Hrubé nečistoty se odstraňují mechanicky například broušením či tryskáním, a k dalšímu čištění lze využít například alkalická odmašťovadla, tamponování rozpouštědly, popřípadě odmašťování v parách rozpouštědla. V případě hliníku a jeho slitin se pak často používá moření v různých kyselinách. [15, 24]

Propustnost plynů

Důležitým aspektem, který ovlivňuje výběr lepidla a pracovního postupu je propustnost plynů obou adherendů, jež je ovlivněna četností, velikostí a propojením pórů. U plastů pak molekulární struktura hmoty. Za materiály nepropustné pro plyny lze označit například kovy, porcelán, sklo či některé plasty, oproti tomu dobře propustnými materiály jsou materiály textilní, kůže, dřevo či papír. Na základě propustnosti a nepropustnosti je nutné uvažovat i kombinace těchto materiálů. [15]

Soudržnost lepeného materiálu

Kromě těchto činitelů je pro vznik spolehlivého spoje důležitá i soudržnost lepeného materiálu, která se odvíjí od složení materiálu, jeho struktury i povrchové úpravy. Obecně platí podmínka, že s rostoucí objemovou hmotností materiálu roste soudržnost jeho povrchu.

V případě některých lehkých a porézních materiálů lze soudržnost alespoň částečně zvýšit impregnací zředěnými pojivy. [15]

Tepelná roztažnost

V případě lepení materiálů s odlišnými koeficienty tepelné roztažnosti [K^{-1}] vzniká značné namáhání. Je tedy vhodné používat nízko modulová lepidla, která dokážou vyrovnávat pnutí mezi jednotlivými adherendy. Při volbě lepidla by pak mělo být zvoleno takové, jež vytvrzuje při teplotách, při kterých bude lepený soubor používán. [25]

V tabulce číslo 3 je základní rozdělení materiálů spolu s jednotlivými druhy lepidel vhodnými k jejich lepení.

Tab. 3: *Kombinace materiálů a výběr lepidla. Zdroj: [22]*

Kombinace materiálů a lepidla vhodná k jejich lepení					
druhy lepidel	roztoková a disperzní	kyanakrylátová (vteřinová)	epoxidová dvousložková	silikonová	tavná
podklad	lepený materiál				
dřevo	dřevo dýha kůže koženka	dřevo kůže pryž kov plast	dřevo kov	sklo	dřevo dýha kůže koženka
kov	kůže koženka	kov plast pryž	kov dřevo	sklo	-
plast	plast kůže koženka	plast kov pryž	plast kov	-	plast
pryž	pryž kůže koženka	pryž plast kov	-	-	-
sklo	-	-	sklo kov dřevo	sklo kov dřevo	-

3.2.3 Provozní prostředí

Provozní prostředí, kterému má lepený spoj odolávat a zachovávat si v něm požadované vlastnosti, úzce souvisí s takzvanou trvanlivostí spoje. Už u samotného výběru lepidla by měl být brán zřetel na okolní podmínky, jímž bude lepený spoj vystaven. Základním ovlivňujícím faktorem je však stále síla působící na spoj. Lepený spoj tak musí být

schopen odolávat maximálnímu předpokládanému zatížení a zároveň čelit únavě cyklickým zatížením, a to nejen na počátku, ale také poté, co byl spoj vystaven i těm nejhorším vlivům okolí. [17]

Právě proto je nutné při výběru lepidla uvažovat nejen provozní teplotu, ale zároveň i vlhkost, popřípadě přítomnost jakýchkoliv rozpouštědel či ultrafialového světla. Toto jsou zpravidla ty neškodlivější faktory pro převážnou většinu lepených spojů. [25]

Provozní teplota

V případě provozní teploty závisí spolehlivost lepených spojů na jejich odolnosti proti zvýšeným nebo naopak sníženým teplotám. V praxi to znamená schopnost spoje zachovat si požadované vlastnosti nejen při dlouhodobém působení zvýšené teploty včetně odolnosti proti tepelnému stárnutí, ale i odolnosti proti nízkým teplotám, popřípadě mrazu, a neposlední řadě také odolnosti proti náhlým změnám teplot (tepelným nárazům). Rozdílné podmínky využití mohou ovlivňovat chemický i fyzikální mechanismus destrukce spoje. Při krátkodobém působení vysokých teplot (700 - 900 °C) většina lepidel podléhá tepelnému rozkladu, při dlouhodobém působení nižších teplot (100 – 300 °C) probíhá zejména termooxidační destrukce. Změnou teplot pak mohou v lepidlech nastávat fázové přeměny a může docházet ke změnám jejich struktury. Nutné je zde podotknout i tepelné namáhání spoje, ke kterému dochází v důsledku rozdílných koeficientů tepelných roztažností jak lepených materiálů, tak i lepidel. [23]

Při volbě lepidla je tedy vhodné předem zjistit nejen maximální, ale i minimální teplotu, při níž lepidlo zaručuje kvalitní spoj. V tabulce 4 jsou patrně vybrané druhy lepidel a jejich maximální hodnoty teplot využití, které jsou velice odlišné.

Tab. 4: *Teplota využití lepidel. Zdroj: [23]*

Druh lepidla	Maximální provozní teplota [°C]
Epoxidové	150
Fenolkaučukové	150
Polyaromatické	200 až 400
Organokovové (křemíkové)	200 až 400
Anorganické	až 2000

Vliv vody a chemických prostředí

Pevnost lepených spojů se do určité míry snižuje, pokud jsou spoje vystavovány vodě, jejím parám, ale i jinému prostředí. Ve většině případů nastává oslabení přímo ve spoji. [23]

Působení vody na lepidlo může v některých případech vést k hydrolyze, popřípadě k rozpouštění lepidla. Napětí, které vzniká ve spoji při jeho zvlhnutí nebo naopak vysušování působí jako dlouhodobé zatížení, které způsobuje únavu spoje. [23]

V případě mnoha konstrukcí jsou lepené spoje vystavovány působení agresivních prostředí a to zpravidla kapalným. Tímto prostředím jsou například anorganické i organické kyseliny, zásady, oxidovadla, paliva či oleje, organická rozpouštědla, chladicí kapaliny a podobně. Poměrně odolnými lepidly lze v tomto případě označit lepidla termoreaktivní, především fenolformaldehydová, epoxidová, organokřemičitá a podobně. [23]

Vliv atmosférických podmínek

Vzhledem k tomu, že se lepené spoje často využívají v atmosférických podmínkách, je nutné uvažovat i vliv atmosféry. Tento vliv je dán současným působením čtyř základních faktorů, kterými jsou teplota, voda a vodní pára, kyslík a ultrafialové záření. Pokud jsou lepené konstrukce využívány v průmyslových oblastech, je třeba zohlednit, že okolní vzduch je značně nasycený agresivními plyny (SO_2 , H_2S a podobně). V přímořských oblastech je pak podnebí charakterizováno zvýšenou vlhkostí, popřípadě přítomností solí ve vodních parách. [23]

Vliv atmosférických podmínek na lepené spoje je poměrně odlišný od jejich působení na ostatní druhy spojů. Lepené spoje jsou totiž vystavené celou svou plochou působení teploty, avšak na odkrytých koncích zde může působit i ultrafialové záření, kyslík, popřípadě voda. Na základě této skutečnosti potom například americká norma ASTM D1828 – 70T určuje, že jsou lepeny velké díly, které se teprve po vytvrnutí lepidla rozřezávají na standardní vzorky, a teprve ty jsou zkoušeny. Dále je třeba podotknout, že teplota šířící se v lepených konstrukcích při působení slunečního záření kolísá v širokém rozmezí, a to v závislosti na klimatické oblasti, poměru mezi odražením a pohlcováním sluneční energie, a v neposlední řadě také charakteru povrchu celé lepené konstrukce. [23]

Působení atmosférických podmínek na lepené spoje má cyklický charakter, kdy je možné definovat například cykly denní, sezonní, cykly spojené se změnami počasí a další. Ve spojích tak vzniká působením atmosféry tepelně-vlhkostní napětí cyklického charakteru.

Obecně zde platí, že čím větší jsou hodnoty tohoto napětí a čím rychleji dochází k jeho změnám, tím rychleji dochází k únavě spoje, čímž je limitována jeho životnost. [23]

Aby bylo možné alespoň přibližně určit a porovnat vlastnosti rozličných lepených spojů, používají se urychlené zkušební metody, jež jsou založené na urychleném stárnutí lepidla. Dá se říci, že je to jakási simulace, kdy na spoj cyklicky působí vlhkost a teplota v takovém intervalu, který se přibližuje skutečným atmosférickým podmínkám. [23]

3.2.4 Konstrukce a zatížení

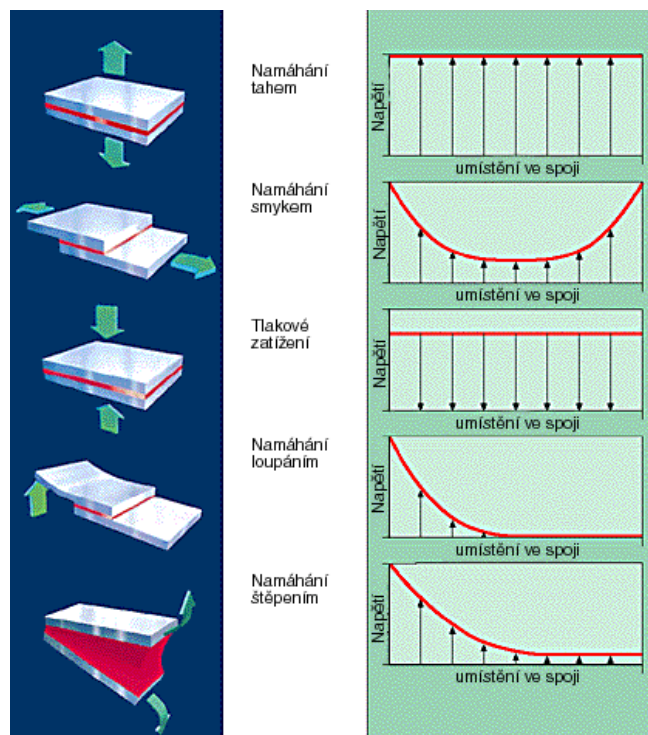
Aby bylo lepidlo schopno pracovat co nejdéle, důležitým faktorem, jež tuto skutečnost ovlivňuje je správně navržená konstrukce spoje. Obecně lze tedy říci, že konstrukce musí být optimalizována tak, aby bylo zabráněno nevhodným způsobům zatížení, jakými jsou odlupování nebo štěpení. [17]

Napětí, které vzniká zatížením lepeného spoje, se obvykle udává v N/mm^2 , což odpovídá jednotce jednoho MPa. K jeho výsledné hodnotě lze dojít pouhým podílem působící síly v Newtonech a lepené plochy v milimetrech čtverečních. [17]

Je známo, že namáhání lepených spojů se hodnotí na tah, tlak, smyk, odlupování, rázovou pevnost, kroucení a podobně. Lepidla však některým těmto vlivům odolávají lépe, některým hůře. Většina lepidel je například na odlupování a kroucení velmi citlivá, a proto musí být konstrukce spojů upravovány tak, aby byl spoj namáhán především na tlak či smyk. V opačném případě se namáhání soustřeďuje jen do určitých míst, což vede k lokálnímu přetížení a poruše spoje. [15]

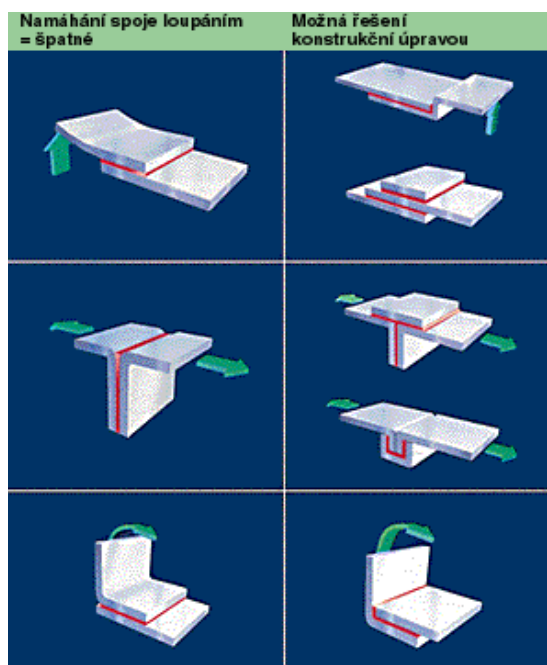
Nutné je však podotknout, že čistý tah či tlak ve skutečnosti existuje pouze zřídka. Mnohem častěji se lze setkat se zatížením smykem, loupáním či štěpením. Rozložení napětí ve spoji je pak méně rovnoměrné, a jeho výpočet je velmi složitý. Nerovnoměrné bývá zejména napětí smykové, jež tvoří napětíové špičky, a je-li spoj namáhán loupáním, napětí se koncentruje pouze na jediné straně spoje. [17]

Z tohoto důvodu je cílem optimálního rozložení spoje, aby bylo napětí rozloženo co možná nejrovnoměrněji. Na obrázku 16 je patrné, že například zatížení loupáním a štěpením by mělo být při návrhu lepeného spoje pokud možno vyloučeno.



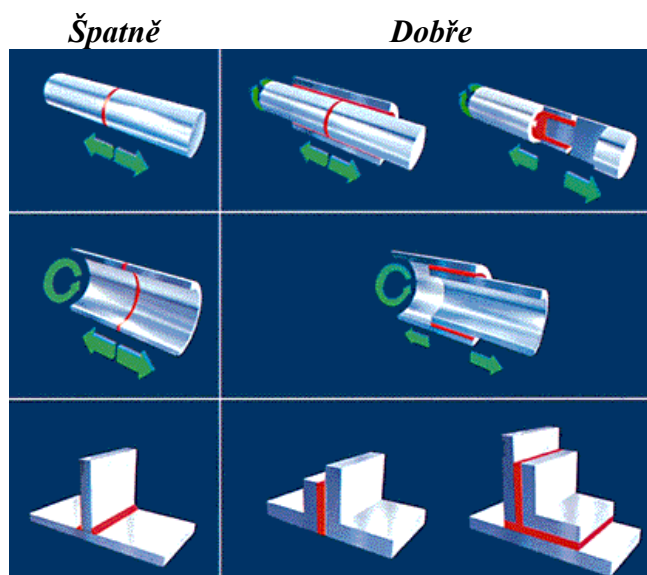
Obr. 16: Nejobvyklejší druhy zatížení a rozložení napětí v lepeném spoji. Zdroj [17]

Avšak i zmiňované loupání a štěpení je možné za pomoci vhodné konstrukční úpravy přeměnit na mnohem příznivější způsob namáhání. Možné konstrukční úpravy jsou vidět na obrázku 17.



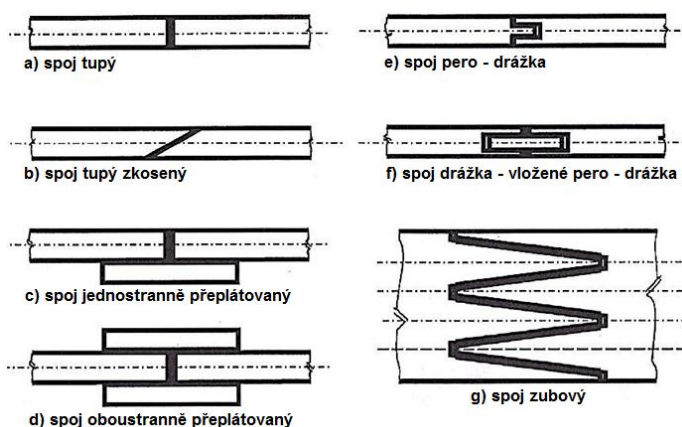
Obr. 17: Namáhání spoje loupáním a jeho změna konstrukční úpravou. Zdroj: [17]

Pokud jsou lepené plochy příliš malé, snadno vzniká velké namáhání loupáním nebo štěpením. Jednoduchým, a přesto velmi důležitým a efektivním způsobem, jak lepený spoj vhodně konfigurovat pro lepení, a zároveň zvýšit jeho tuhost a celkově jej zpevnit, je zvětšení lepené plochy. Obrázek 18 představuje možné konstrukční úpravy lepených soustav pro zvýšení jejich pevnosti.



Obr. 18: *Nepříznivá zatížení lepených sestav. Zdroj: [17]*

Spoje čelních ploch („natupo“), jsou namáhány převážně v tahu nebo lámání. Z tohoto důvodu je možné je volit pouze v případě dostatečně velké spojovací plochy. Optimálních hodnot mechanické pevnosti lze dosáhnout i použitím příložek, použitím spojů s uměle zvětšenou spárou jednostranným či oboustranným přeplátováním, u spojů čelních ploch tzv. V spárou, a podobně. Těmito úpravami se zvětší geometrický povrch dotykových ploch, a síly se rozloží tak, že je spoj namáhán převážně ve smyku. Příklady těchto spojů jsou znázorněny na obrázku 19. [15]

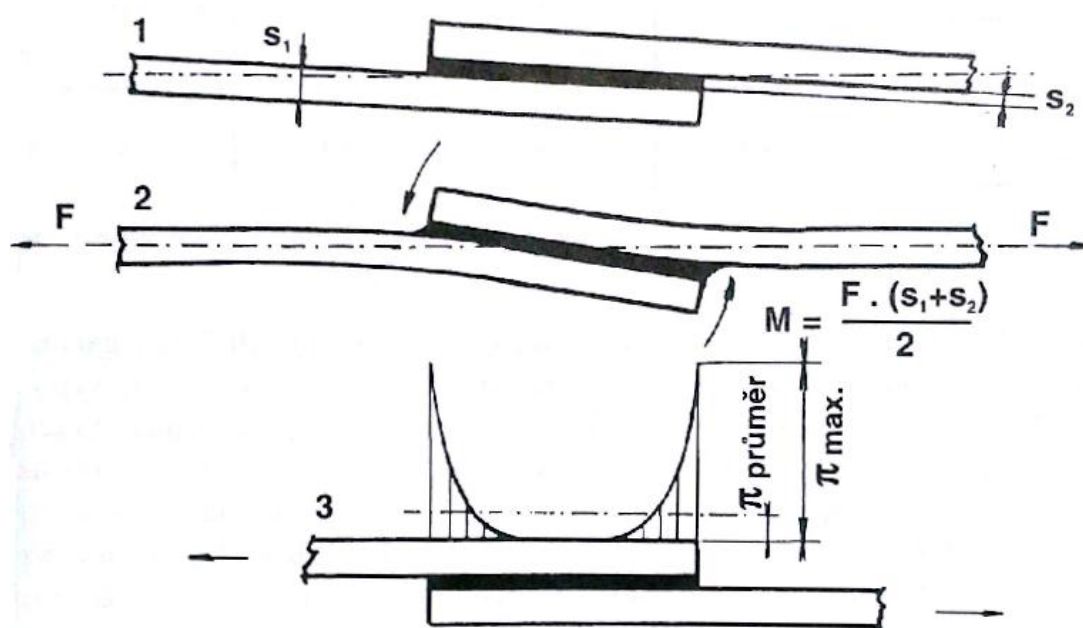


Obr. 19: *Příklady konstrukčních provedení spojů. Zdroj: [22]*

Z technologického hlediska je při tvorbě lepených spojů nutné brát na vědomí i skutečnost, že by dotykové plochy lepených materiálů měly být co nejméně členité, a po slepení by neměly vyžadovat další úpravy. Lepení souborů by zároveň mělo probíhat během jediné operace, aby se zamezilo časovým ztrátám, a aby předchozí spoj nebyl dodatečně zatěžován větším tlakem či vyšší teplotou. [15]

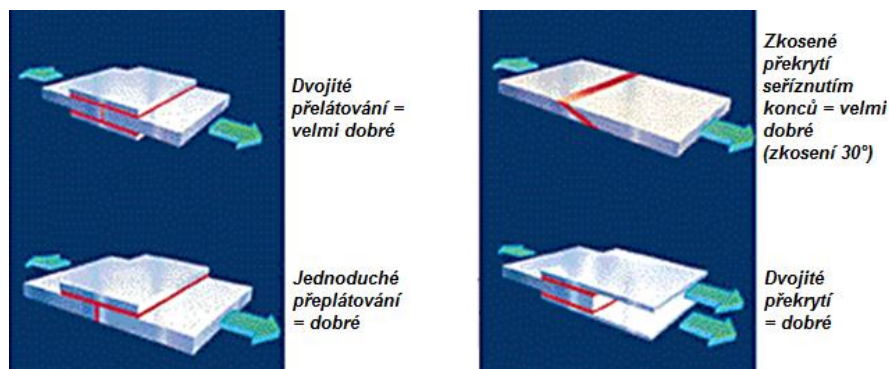
Překlátované spoje

Jednostranně překlátované spoje jsou plošné spoje, jež se využívají převážně při lepení tenkých materiálů, jako jsou folie, papír nebo plechy. V těchto případech je totiž možné zanedbat vliv ohybového momentu, který vzniká následkem excentricky zatíženého spoje při lepení silnějších adherendů, kde se soustřeďuje napětí zejména na obou koncích překlátování a působí zde jako síla podporující odlupování. Čím větší je deformace takového spoje, tím dříve se spoj roztrhne. Průběh napětí je znázorněn na obrázku 20. [15, 17]



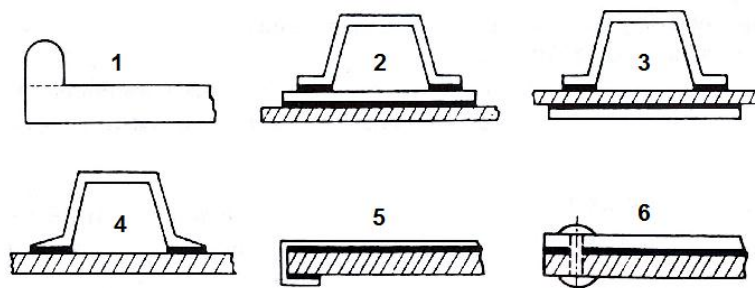
Obr. 20: Deformace jednostranně překlátovaného spoje způsobená nesouosostí působících sil. Zdroj: [14]

Znázorněná nesouosost sil způsobuje značný ohybový moment, který vyvolává další napětí v tahu, a to obzvláště na koncích spoje. Několik možností, jak snížit negativní vliv tohoto ohybového momentu je viditelný na obrázku 21.



Obr. 21: Různé úpravy k překonání potíží způsobených nesouosostí vnějších sil. Zdroj: [17]

Délka přelátování se pak odvíjí nejen od druhu materiálů, ale i tloušťky lepených dílů. V praxi se často využívá pravidlo, že délka přelátování by měla být nejméně pětinasobkem tloušťky lepených dílů. U přelátovaných spojů je žádoucí počítat s možností rizika odlupování některých okrajových ploch. Odlupování však lze zabránit kromě zvětšení kontaktní plochy, rozdělením napětí souboru, zvýšením tuhosti souboru či snížením tuhosti dílců, i například zalemováním nebo úpravou lepeného spoje na spoj kombinovaný. Možnosti řešení jsou znázorněny na obrázku 22. [15]



Obr. 22: Možné varianty zajištění spoje proti odlupování. Zdroj: [14]

1 – zvětšení lepené plochy; pohled shora, 2 – rozdělení napětí souboru, 3 – zvýšení tuhosti souboru, 4 – snížení tuhosti dílců, 5 – zalemování konců, 6 – pronýtování okraje

Velkoplošné spoje

Tento typ lepeného spoje je spojením nejjednodušším. Lze se s ním setkat především při povrchových úpravách deskových materiálů a sendvičových konstrukcí pomocí nábytkových krytin, tapet, plechů a dalších. V případě, že jsou spojovány materiály s rozdílnou délkovou roztažností a materiály objemově nestálé závislé například na změně teploty či vlhkosti, je nutné respektovat požadavek materiálové symetrie. Dále se velkoplošné spoje využívají při výrobě vícevrstvých materiálů. Kombinací syntetických pojiv s plnivý pak vznikají nové

materiály s novými, často vynikajícími vlastnostmi. Jednotlivé vrstvy jsou schopny rozvádět dynamické namáhání konstrukce takovým způsobem, že se destrukční vlivy omezují pouze na vrstvy přilehlé silovému zatížení. [15]

Spoje čelních ploch

Spoj čelních ploch lze také nazývat spojem natupo a lze ho využívat především pro spojování dostatečně tlustých materiálů. V případě spojování tenčích adherendů musí být spoje natupo vhodně upraveny zvětšením geometrického povrchu. Takového zvětšení je možné dosáhnout například různě tvarovanými drážkami, či úkosi. Nejúčinnějším spojem je pak možné označit spoj s úkosem, odpovídá-li poměr rozměrů vztahu (8)

$$s : D = 1 : 15,6 \quad (8)$$

s zde představuje tloušťku adherendu,
 D je délka přeplátování spoje. [15]

Násuvné spoje

Tento druh spojů se osvědčuje zejména při spojování trubek z lehkých kovů a plastů, kde se spoje dělají navzájem přesunutě a to s vnitřní vložkou, popřípadě s vnějším návlekm. Známé je například lepení trubek z PVC, u kterých se minimální hloubka nasunutí určuje na základě vztahu (9)

$$0,6 \cdot d + 6 \text{ mm} \quad (9)$$

d je vnější průměr trubky.

Toto doporučení však platí především pro spojování trubek do průměru 75 mm. [15]

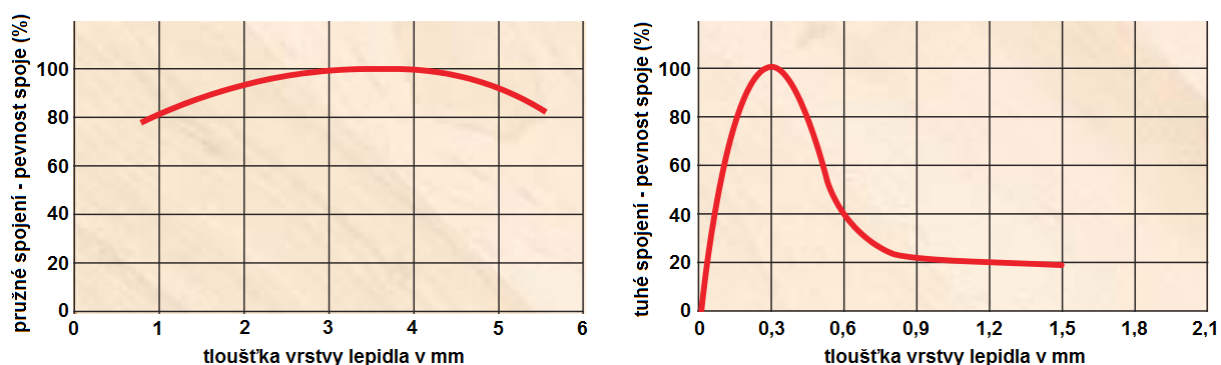
Vliv tloušťky vrstvy lepidla na pevnost lepeného spoje

Velmi důležitým faktorem, ovlivňujícím jakost lepeného souboru je tloušťka nanesené vrstvy lepidla. Ta má být na základě charakteristiky použitého druhu lepidla co možná nejtenčí. [20]

Omezujícím parametrem nánosu lepidla je tloušťka, pórovitost a struktura obou adherendů. Zjednodušeně je však možné říci, že při lepení tenkých porézních materiálů musí

být nános lepidla co nejušpornější z důvodu možného prosakování, avšak na tolik dostatečný, aby dobře smácel obě kontaktní plochy. U materiálů s většími nerovnostmi povrchu lze nanášet vrstvu relativně tlustší. Vrstva lepidla by měla být dostatečně tlustá, aby v souladu s ostatními činiteli lepení umožňovala tloušťku ve spáře 0,05 až 0,25 mm. Podstatně silnější nános i tloušťka filmu je příhodná při použití lepivých tmelů. [20]

Požadované tloušťky lze dosáhnout například vhodným tlakem, či použitím distančních drátků příslušného průměru. S rozdílnou tuhostí lepidla je pak rozdílná i požadovaná tloušťka jeho vrstvy, což je viditelné i z grafů na obrázku 23. [13]



Obr. 23: Vliv tloušťky vrstvy lepidla na pevnost spoje. Zdroj: [26]

Pevnostní výpočet lepených spojů

Stejně tak, jako je tomu u tradičních metod spojování, i u lepených spojů je možné spočítat pevnost. Dosažitelná pevnost lepeného spoje se v praxi počítá pomocí následujícího vzorce (10)

$$F = S \cdot \tau_{D2} \cdot f_{celk} \quad (10)$$

F je axiální síla [N],

S odpovídá velikosti lepené plochy [mm²],

τ_{D2} je pevnost ve smyku zjištěná podle DIN 54452 [MPa],

f_{celk} je celkový faktor. [21]

Celkový faktor f_{celk} je poznamenán všemi dílčími faktory konkrétního případu lepení. Tyto faktory zohledňují odchylky hodnot získaných v laboratorních podmínkách od hodnot dosažitelných v praxi. Platí potom vztah (11)

$$f_{celk} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8 \quad (11)$$

- f_1 je druh lepeného materiálu,
 f_2 je tloušťka vrstvy lepidla (velikost spáry),
 f_3 je drsnost povrchu adherendů,
 f_4 je velikost lepené plochy a její tvar,
 f_5 je směr zatížení spoje,
 f_6 je způsob zatížení,
 f_7 je provozní teplota,
 f_8 je způsob vytvrzení lepidla. [21]

3.2.5 Technologický postup

Pro dosažení co nejkvalitnějšího lepeného spoje nelze zanedbávat ani dodržování správného technologického postupu, který by měl vypadat následovně:

- **Příprava spojovaných materiálů** – důkladným očištěním například broušením, tryskáním či kartáčováním, a následným odmašťováním nebo mořením, které mají zajistit co největší smáčenlivost obou lepených povrchů lepidlem. [18]
 Zbytky nečistot se odstraňují odmašťováním organickými rozpouštědly nebo vodnými roztoky saponátů. Podmínkou volby vhodného prostředku je, aby nerozpouštěl upravovaný materiál. [14]
- **Příprava lepidla** – zvolení vhodného druhu lepidla na základě jeho chemické struktury či počtu jeho složek, zvážení nejvhodnějšího způsobu nanášení v závislosti na velikosti i tvaru lepených součástí, a v neposlední řadě je nutné zvážit rovněž způsob vytvrzování (např. na základě teploty či tlaku). [18]
- **Nanášení lepidla** – snaha vytvořit rovnoměrnou a souvislou vrstvu dané tloušťky. Lepidlo musí být nanášeno v takovém stavu, aby v momentu zpracování vytvořilo tekutou rozplývavou vrstvu, která dokonale smáčí póry povrchu. [14]
- **Montáž spoje** – kdy je nutné obě lepené části vhodně zajistit a to pod předepsaným tlakem tak, abychom vytvořili vhodné podmínky pro vznik pevných vazeb a vytvoření adhezního spojení. [18]

3.3 SPECIFICKÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PEVNOST EPOXIDOVÝCH LEPIDEL

Epoxidová lepidla jsou vyrobena z epoxidových pryskyřic, které vznikají reakcí vícemocných fenolů s epichlorhydrinem nebo dichlorhydrinem. Na základě vzájemného poměru těchto dvou složek a současně podmínek reakce pak dojde ke vzniku pryskyřic, jež mají různou velikost makromolekul. A je to právě velikost makromolekul, která ovlivňuje jejich vlastnosti. [15, 20]

3.3.1 Příprava lepicí směsi

Epoxidová lepidla jsou dodávána jako kapalné i pevné látky, a v nevytvrzeném stavu bývají rozpustná v ketonech, esterech, vyšších alkoholech (od 5 uhlíků), a v aromatických a chlorovaných uhlovodících. K jejich vytvrzení dochází až po smíchání s tvrdidly, a to od normální – pokojové – teploty až po teploty do 200 °C. [15]

Pro vytvrzování epoxidových pryskyřic se používá mnoho typů tvrdidel. Na základě zvoleného tvrdidla, ale i jeho množství pak vznikají lepidla s odlišnými vlastnostmi, které se projevují především rozdílnou strukturou a smáčivostí v nevytvrzeném stavu, nebo pevností či tepelnou odolností ve stavu vytvrzeném. [27]

Množství přidaného tvrdidla je obvykle pevně dané váhovým poměrem přímo výrobcem, a je nutné ho dodržovat. Například v případě Epoxy 1200 se přidává 6,5 gramu tvrdidla na 100 gramů pryskyřice. Výrobce zde připouští odchylku od 5,5 do 8 gramů, přičemž obecně platí, že nižší obsah tvrdidla prodlužuje životnost lepicí směsi a zároveň umožňuje vytvrzování za zvýšené teploty. Naopak v případě přebytku tvrdidla jeho část nevstupuje vůbec do reakce a tím snižuje pevnost spoje současně se zvyšujícím se rizikem vzniku koroze. [20]

V tabulce číslo 5 na následující straně jsou podrobněji uvedeny typy tuzemských epoxidových lepidel řady ChS Epoxy, spolu s příslušnými tvrdidly a mísicími poměry.

Tab. 5: Epoxidová lepidla ChS Epoxy. Zdroj: [20]

Lepidlo	Tvrdidlo	Množství tvrdidla (% hmotn.)	Vhodný režim vytvrzení	
			(°C)	hodin
ChS Epoxy 14	P 1	10	a) 20 b) 120 -	24 0,5
ChS Epoxy 15	P 1	10	a) 20 b) 20 50 c) 20 100	24 4 5 4 1
	KP 1 L 190	22 110—140	20 20	48 96
ChS Epoxy 110	P 1	11—13	a) 20—25 b) 60—70	48 1,5
	KP 1 L 190	21—23 140—160	a) 20 b) 100 20	96—120 1,5 96
ChS Epoxy 1 001	—	—	a) 145 b) 180	8 1
ChS Epoxy 1 005	(Komaxit E 1141)	—	160	40 min
ChS Epoxy 1 200	P 1	7	a) 20 b) 50 c) 80 d) 100	50 10 5 1
	KP 1 L 190	11—13 80—90	a) 20 b) 50 c) 100 a) 20 b) 100	96 24 1,5 96 2—3
ChS Epoxy 1 210	P 1 KP 1 L 190	7,5—8 11—13 80—90	20 jako ChS Epoxy 1200 jako ChS Epoxy 1200	70
ChS Epoxy 1 100	P 1	9	a) 20 b) 70	48 2
ChS Epoxy 1505	P 1	10	20	48
ChS Epoxy 1530	P 1 S6A	10 25	20 20	48 24

3.3.2 Proces vytvrzování

Jak již bylo řečeno, aby mohlo dojít k procesu vytvrzování, je zapotřebí smíchat pryskyřici s patřičným tvrdidlem. Z chemického hlediska je rozhodující především schopnost epoxidové skupiny reagovat s látkami, jež obsahují aktivní - pohyblivý - vodíkový atom, a to za vzniku sekundárního hydroxyly. Nejčastěji používanými tvrdidly jsou aminoskupiny, karboxylové a thiolové skupiny, popřípadě hydroxylové skupiny alkoholů. [19]

V předchozí podkapitole zmiňovaná tvrdidla se dají dělit mnoha způsoby. Nejobvyklejší způsob dělení je však na základě vytvrzovací teploty. Při vytvrzování do teploty 100 °C je vhodné použití polyaminů, reprezentovaných zejména diethylentriaminem či triethyltetramin a další. Pro vytvrzování při teplotě nad 100 °C je vhodný například dikyandiamin či ftalanhydrid. [19]

Vedle způsobu vytvrzování epoxidových pryskyřic látkami s pohyblivým vodíkem se uplatňuje i vytvrzování polymerací. K takovému vytvrzování lze použít například terciální aminy (triethylamin), alkylkovy, oxid boritý, fluorid boritý a další. [19]

Tato tvrdidla zde působí jako katalyzátory. V případě použití jejich nadměrného množství dochází k výrazně rychlejšímu vytvrzení, což je často na úkor tepelné stability i některých fyzikálních vlastností. Takto rychle vytvrzené epoxidy jsou velice křehké. [28]

Zmiňovaná křehkost je dána vysokou tvrdostí, která je pro vysoce zesíťovaná lepidla charakteristická, stejně jako dobrá tepelná i chemická odolnost, popřípadě odolnost proti vlhkosti. [29]

Proces vytvrzování je kromě typu tvrdidla závislý i na době, či teplotě. Obecně je možné říci, že vytvrzovací doba a teplota spolu úzce souvisí. Doba vytvrzování se totiž se zvýšením teploty výrazně zkracuje. Současně je lepidlo při vyšší teplotě méně viskózní a proto lépe vyplní nerovnosti povrchu adherendů. Nepříznivě se však v tomto případě projevují rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti, které po ochlazení vedou ke značnému pnutí ve spojích. Závislost teploty a doby vytvrzení je patrná v tabulce číslo 6.

Tab. 6: *Vytvrzování za zvýšené teploty. Zdroj: [20]*

Teplota [°C]	Doba vytvrzování [h]
20	50
50	10
80	5
100	0,75 – 1
120	0,5

4 MOŽNOSTI A LIMITY DVOUSLOŽKOVÝCH LEPIDEL

Tak jako ostatní zpracovatelské metody, i lepení má své určité možnosti a vyznačuje se mnoha výhodami. Z druhé strany je však zároveň limitováno některými svými zápornými vlastnostmi. [14]

4.1 OBECNÉ VÝHODY A NEVÝHODY TECHNOLOGIE LEPENÍ

Hlavní výhodou lepených spojů lze označit možnost spojování různých materiálů, a to i bez ohledu na jejich tloušťku. Hlavní nevýhodou jsou pak vysoké požadavky na rovinnost a čistotu lepených ploch. [14]

Možnosti lepení, jeho přednosti

- zabezpečuje rovnoměrné rozložení zatížení,
- má univerzální použití,
- v materiálu nevzniká napětí, a proto nedochází k deformacím,
- sníží se počet součástí,
- aplikováním lepidla se nenaruší celistvost spojovaných dílů a není narušen ani profil, ani estetický vzhled lepeného souboru,
- lepení umožňuje vytvářet spoje, které jsou vodotěsné a plynotěsné, a zároveň elektricky a tepelně nevodivé, popřípadě lepidla vytváří naopak spoje s dobrou elektrickou vodivostí,
- lepené spoje mohou vytvořit dobrou tepelnou izolaci,
- lepený spoj tlumí vibrace a zvyšuje tuhost i vzpěrnou pevnost lepeného souboru,
- použitím této technologie je možné uspořit náklady na výrobu,
- lepený spoj často zabraňuje vzniku elektrolytické koroze,
- nanesením lepidla se nijak zásadně nezvýší hmotnost souboru,
- spoje mohou být průhledné, případně ale i barevně přizpůsobené,
- je možné dosáhnout vysoké pevnosti ve smyku a rázové houževnatosti. [14, 17, 21]

Limity lepení, jeho nevýhody

- při špatných adhezivních vlastnostech materiálů jsou nutné speciální úpravy povrchu (aktivace),
- u mnohých lepidel je třeba před samotným lepením použít vytvrzovací přípravky a připravit lepicí směs (vícesložková lepidla),
- spoje jsou prakticky nerozebíratelné,
- převážná většina spojů je citlivá vůči namáhání v odlupování,
- reaktivní směsi mají omezenou životnost,
- spoje dosahují maximální pevnosti až po určité době, nikoliv po vytvrzení,
- vůči vysokým teplotám mají lepené spoje omezenou odolnost,
- termoplastická lepidla jsou citlivá na dlouhodobé statické namáhání (tečení lepidla),
- v průmyslovém měřítku je technologie lepení náročná na vybavení pracovišť,
- skladovatelnost lepidel je poněkud omezená,
- při nízkých teplotách není možné lepení provádět. [14, 21]

4.2 VLASTNOSTI DVOUSLOŽKOVÝCH LEPIDEL

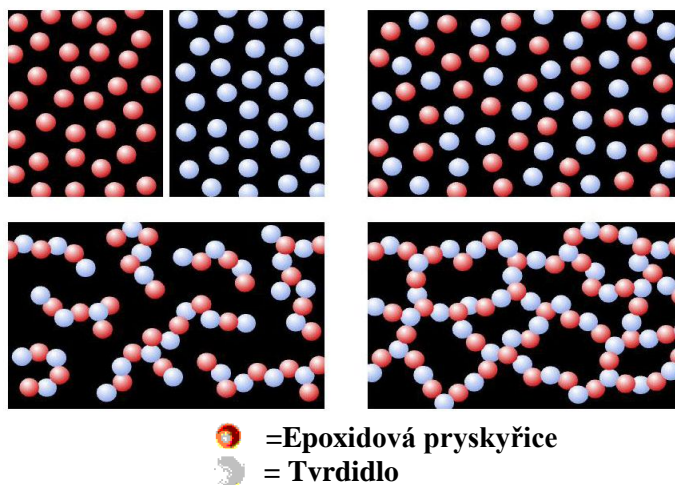
Dvousložková lepidla obecně vytváří velmi pevná spojení široké škály materiálů. Používají se nejen pro spojování hliníku a oceli, ale uplatnění najdou i u kompozitních materiálů. Zároveň jsou často aplikovány na místa s obtížnými podmínkami, kde jiná lepidla často selhávají. [30]

K lepení těmito lepidly je vždy nutné připravit lepicí směs tvořenou lepidlem a příslušným tvrdidlem. Funkcí tvrdidel je zde zabezpečit vytvrzení lepeného spoje za předepsané teploty a s daným časovým limitem. Vlivem tvrdidla se například u lepidel močovinoformaldehydových upravuje kyselost roztoku lepidla na hodnotu, při které dojde k vytvrzení lepidla za normální, popřípadě zvýšené teploty. U polymethakrylátových lepidel či polyesterových pryskyřic jsou tvrdidla katalyzátory polymerace. Přidáním polyaminového tvrdidla do epoxidové pryskyřice pak dochází ke tvrdnutí vlivem chemické reakce právě s pryskyřicí. [15]

V případě, že není dodržen správný poměr obou složek, změní se doba potřebná k vytvrzení lepidla, ale zároveň se zhorší vlastnosti. Obvykle platí, že se sníží pevnost a zvýší křehkost a vnitřní pnutí. Pokud je pak poměr složek výrazně narušen, nemusí k vytvrzení lepidla vůbec dojít. [15]

4.2.1 Charakteristika epoxidových lepidel

U epoxidových lepidel dochází k polymeraci po kontaktu pryskyřice s tvrdidlem. Obě složky musí být velmi dobře promíchány ve správném míšicím poměru a platí pravidlo, že čím vyšší je okolní teplota, tím rychleji dochází k vytvrzení. Vytvrzování epoxidových lepidel je patrné na obrázku 24.



Obr. 24: Proces vytvrzení. Zdroj: [17]

V případě epoxidových lepidel se jedná o velmi jakostní lepidla vhodná pro spojování mnoha materiálů, zejména kovů, skla a keramiky. Nepoužitelné jsou naopak k lepení plexiskla, PVC, polyethylenu a dalších termoplastů. Nejčastěji používanými tvrdidly, jež se používají ke zpracování lepicí směsi, jsou diethylentriamin (P11) a aminoamidy (AMINOAMID D 190). [14]

Na základě modifikování epoxidových lepidel je možné zajistit dobrou tepelnou odolnost, která se pohybuje od -50 až do 150 °C. Neplněné systémy však mohou ztrácet pevnost již při 60 až 70 °C. Doba zpracovatelnosti se pohybuje obvykle v rozmezí 30 minut až 3 hodiny a manipulační pevnosti lepidlo dosahuje po 1 až 5 hodinách. Pevnost těchto lepidel se pak pohybuje okolo 15 až 20 MPa. [22]

4.2.2 Výhody a nevýhody epoxidových lepidel

Mezi hlavní výhody epoxidových lepidel patří dobrá odolnost proti prostředí, výborná adheze, možnost měnit vlastnosti lepidla různými modifikacemi, malé smrštění, dobrá tepelná odolnost a dlouhá skladovatelnost. Do výhod lze také zařadit fakt, že vytvrzují v celém objemu rovnoměrně. Nevýhodou je pak poměrně nízká pevnost v odlupování a nutnost dodržet přesný poměr pryskyřice a tvrdidla. [14, 17, 19, 22]

5 VÝZKUM VLIVU TVRDIDLA NA VLASTNOSTI DVOUSLOŽKOVÝCH SYSTÉMŮ LEPIDEL

Výzkum vlivu tvrdidla je v této kapitole vyhodnocen pomocí grafů, vypočítaných hodnot a vypovídajících tabulkových hodnot. Veškeré naměřené hodnoty jsou k nahlédnutí v přílohách. Vyhodnocení se týká zkoušky přeplátovaných spojů a to konkrétně jejich pevnosti ve smyku, dále pak vyhodnocení tvrdosti podle SHORE a BRINELLA, a na závěr statické zkoušky v tahu.

5.1 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY PEVNOSTI VE SMYKU

Cílem této zkoušky bylo vyhodnotit, jak ovlivňuje množství přidaného tvrdidla pevnost přeplátovaného spoje zatíženého ve smyku. Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN 1465, a hodnocení typu porušení na základě normy ČSN ISO 10365.

Na univerzálním zkušebním stroji ZDM 5 bylo odzkoušeno 20 vzorků od každého připraveného poměru pryskyřice a tvrdidla při rychlosti posuvu 6 mm/min, a výstupní hodnotou této zkoušky byla vždy síla uváděná v jednotkách [N]. Tyto naměřené hodnoty síly byly spolu se změřenými délkami přeplátování, zjišťovanými za účelem výpočtu plochy spoje, následně použity pro výpočet tahového napětí v jednotkách [MPa].

Získané výsledky:

Pevnost přeplátovaných spojů je jedním ze základních ukazatelů, pomáhajících hodnotit mechanické vlastnosti lepidel. Během experimentální části byly získány hodnoty uvedené v tabulce 7, spolu s vypočtenými směrodatnými odchylkami s a variačními koeficienty v .

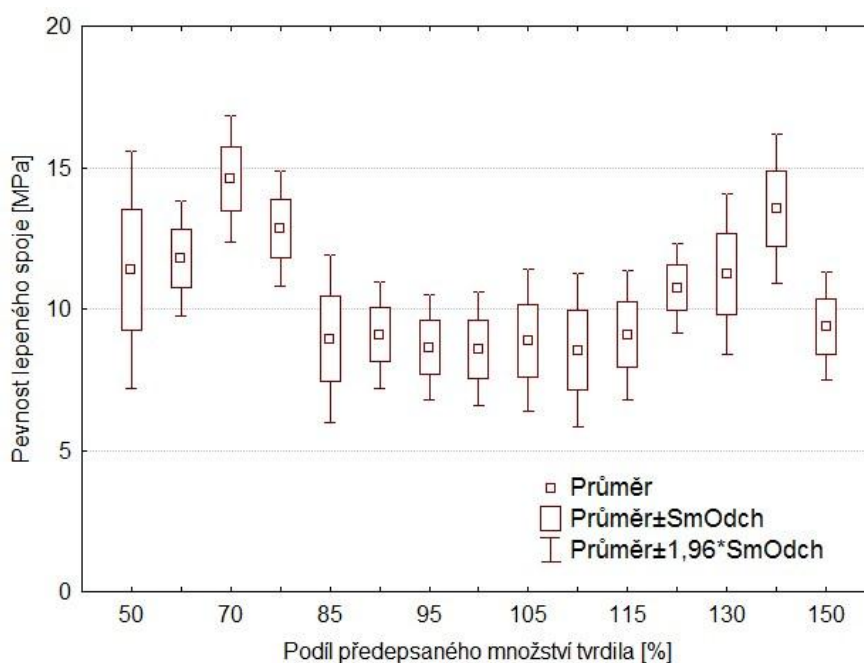
Úkolem experimentu tedy bylo stanovit, zda existuje závislost pevnosti přeplátovaného spoje na množství tvrdidla použitého při přípravě lepicí směsi. Z tabulky je patrné, že maximální pevnosti, tedy $14,61 \pm 1,11$ MPa, tj. s odchylkou 7,58 %, bylo dosaženo při 70% množství tvrdidla z předepsaného poměru a naopak nejnižších hodnot pevnosti dosahovaly spoje připravené ze směsi s podílem tvrdidla 110 %, tedy pevnost $8,55 \pm 1,35$ MPa, tj. odchylka 15,85 %. Zarážející je skutečnost, že pevnost spojů při použití lepicí směsi s předepsaným množstvím tvrdidla činí $8,57 \pm 1,00$ MPa, tj. s odchylkou 11,66 %, což je druhá nejnižší zjištěná hodnota.

Tab. 7: Výsledné hodnoty zkoušek pevnosti ve smyku. Zdroj: [vlastní experiment]

Podíl předepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	τ [MPa]	s [MPa]	ν [%]
50	3,25	11,38	2,08	18,25
60	3,9	11,78	1,00	8,49
70	4,55	14,61	1,11	7,58
75	4,875	12,84	1,00	7,83
85	5,525	8,95	1,48	16,55
90	5,85	9,07	0,93	10,24
95	6,175	8,63	0,92	10,70
100	6,5	8,57	1,00	11,66
105	6,825	8,88	1,24	14,01
110	7,15	8,55	1,35	15,85
115	7,475	9,09	1,14	12,50
125	8,125	10,74	0,78	7,26
130	8,45	11,23	1,41	12,54
140	9,1	13,55	1,32	9,73
150	9,75	9,38	0,95	10,12

Vzhledem k variačnímu koeficientu pohybujícímu se v hodnotách od 7,26 do 18,25 % je možné říci, že ze statistického hlediska probíhal experiment s přípustnou chybovostí. Průběh pevnosti zjištěný u vzorků spojovaných lepicí směsí s 85 až 115 % předepsaného množství tvrdidla lze označit prakticky za neměnný, což je dobře viditelné v grafu číslo 1.

Graf 1: Pevnost přeplátovaných spojů. Zdroj: [vlastní experiment]



Z grafu lze zřetelně posoudit závislost pevnosti spojů na množství přidaného tvrdidla. Na první pohled je zřejmé, že nejnižší pevnosti dosahovaly spoje při použití množství tvrdidla

blízkém množství předepsanému (100 %). Výchozí myšlenkou výzkumu bylo, že přidáním menšího množství tvrdidla, proběhne reakce vytvrzování pomaleji, přičemž se vytvoří stabilnější a pevnější vazby, lepidlo se stane houževnatějším, a do mezního stavu poroste pevnost spoje. Toto se částečně potvrdilo. Oproti tomu však bylo předpokládáno, že použitím většího množství tvrdidla reakce proběhne bouřlivěji a vzniklý polymer nezesítuje úplně dokonale. Takto rychle vytvořené vazby by nebyly dostatečně kolmé, a tím by byla ovlivněna pevnost spoje. Je tedy zajímavostí, že získané hodnoty měly stoupající charakter v obou případech změny množství přidaného tvrdidla. Mezními hodnotami pevnosti je pak možné označit množství tvrdidla, odpovídající hodnotě 70 a 140 %, od nichž už hodnota pevnosti přeplátovaných spojů začala klesat. Porušení spojů mělo ve všech případech adhezivní charakter, pouze u vzorků koncentrací 50 % tvrdidla bylo po destrukci spoje pozorováno částečné porušení struktury lepidla.

Během tohoto výzkumu došlo zároveň k dalšímu poznatku, a to konkrétně při výrobě lepených spojů. Množství 20 přeplátovaných spojů bylo připravováno vždy po 5 kusech, a při nanášení lepidla na dalších 5, mělo nanášené lepidlo vždy trochu odlišnou viskozitu, čímž bylo jeho nanášení obtížnější. Mezi spojováním každých 5 vzorků byl rozdíl řádově 5 až 10 minut, které byly potřebné k aplikování distančních drátů, přitlačení druhého adherendu, kontrolu souososti spoje a v neposlední řadě i zatížení závažím. Tento fakt vedl k potřebě dodatečného výzkumu, jehož cílem bylo ověřit rychlost vytvrzování lepidla.

Zmiňovaný dílčí výzkum byl proveden pouze na 7 koncentracích odstupňovaných s krokem 10%. Vždy po 10 minutách byly slepeny 3 vzorky dané koncentrace, a to až do doby, kdy bylo lepidlo možné nanášet. V tabulce 8a) a 8b) jsou k nahlédnutí hodnoty zjištěných pevností spojů pořízených v desetiminutových odstupech.

Tab. 8: *Průměrná pevnost přeplátovaných spojů v závislosti na době uplynulé od přípravy lepicí směsi. Zdroj: [vlastní experiment]*

8a)

Podíl tvrdidla [%]	100		110		120	
	τ [MPa]	s [MPa]	τ [MPa]	s [MPa]	τ [MPa]	s [MPa]
0	9,81	0,18	8,83	0,73	11,09	0,23
10	8,71	0,41	9,74	0,50	8,51	1,05
20	8,61	0,71	9,81	1,11	10,25	0,88
30	8,93	0,21	9,18	0,39	9,45	0,58
40	8,24	0,50	7,96	0,37	9,58	1,64
50	6,8	0,82	4,32	0,41	5,53	0,28

8b)

Podíl tvrdidla [%]	70		80		90		130	
	τ [MPa]	s [MPa]	τ [MPa]	s [MPa]	τ [MPa]	s [MPa]	τ [MPa]	s [MPa]
0	14,96	1,38	11,41	0,69	9,93	0,12	11,48	0,36
10	15,12	0,51	11,58	1,68	9,99	0,25	10,62	0,83
20	14,67	0,94	12,88	0,97	9,8	0,37	10,79	0,31
30	14,25	0,89	11,52	0,17	9,62	0,05	10,89	0,17
40	13,99	0,52	11,83	0,34	9,3	0,38	10,19	0,44
50	14,39	0,68	11,34	0,69	8,81	0,42	10,17	0,48
60	13,3	0,24	10,86	0,22	8,24	0,50	9,57	0,23
70	13,3	0,21	9,2	0,89	6,6	0,58	9,63	0,15
80	12,12	0,28	8,84	0,62	-	-	8,37	0,19
90	10,58	1,20	8,13	0,99	-	-	6,99	0,62
100	8,61	0,42	-	-	-	-	-	-

V tabulce je možné pozorovat, jak se s rostoucím časem v převážné většině případů snižovala hodnota pevnosti spojů. Malý nárůst pevnosti byl pouze v několika případech, a to především v prvních 10 minutách přípravy spojů. Zároveň v porovnání s tabulkou číslo 7 je možné ověřit správnost naměřených výsledků, kdy se průměr hodnot pevností v prvních 30 minutách přibližuje průměru hodnot zjištěných v hlavním výzkumu. Ze získaných hodnot je též ve většině případů patrné, že i přes nemožnost dalšího nanášení lepidla byly spoje vyrobené lepidlem s menším množstvím tvrdidla v konečné fázi pevnější, než spoje vyrobené lepidlem s množstvím tvrdidla větším. Toto je možné přisoudit pomalejší reakci při použití menšího množství tvrdidla, což souvisí s vytvoření stabilnějších vazeb.

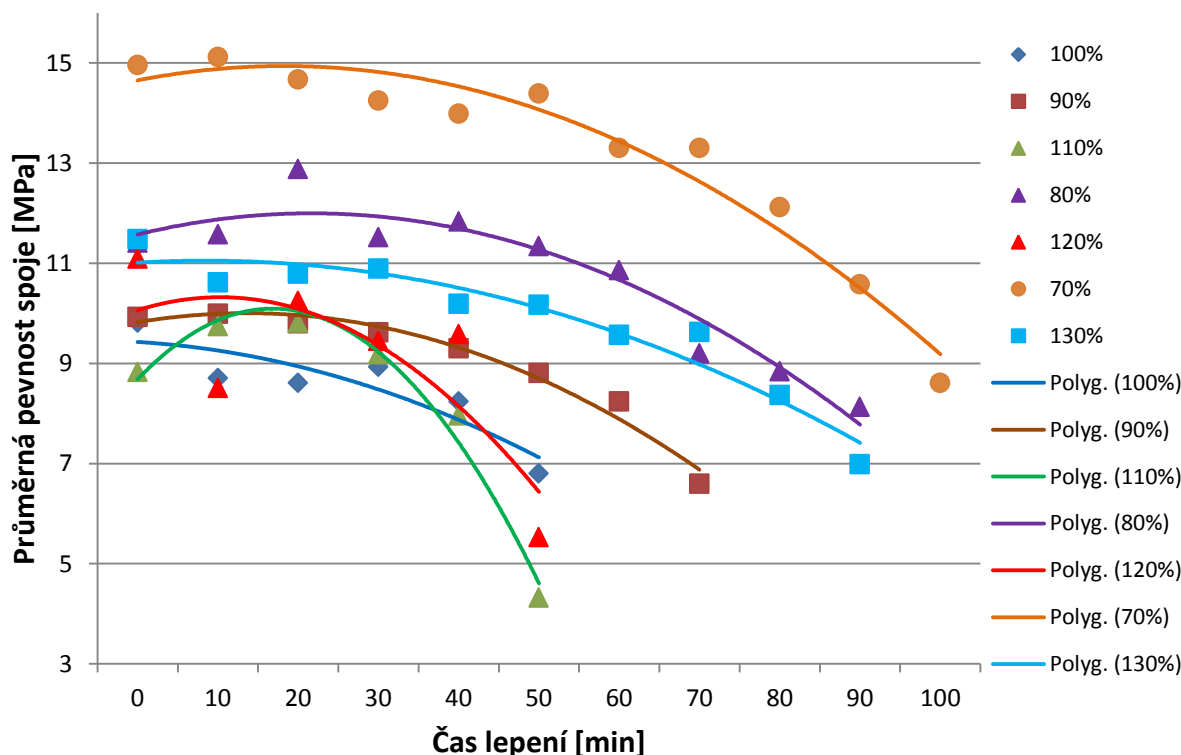
Doba zpracovatelnosti lepidla se u prvních 6 koncentrací pohybovala v rozmezí, jež by se dalo předpokládat. S ubývajícím množstvím tvrdidla se doba prodlužovala, přičemž ubráním 30 % tvrdidla pak dokonce z původních 50 na 100 minut (výrobce udává dobu zpracovatelnosti 26 minut). Překvapující však byla doba zpracovatelnosti u poslední série vzorků (130 % předepsaného množství tvrdidla), která i přes větší množství tvrdidla trvala v porovnání se zpracovatelností směsi vytvořené dle předepsaných parametrů o 30 minut déle, a spoje po celou dobu vykazovaly dobrou pevnost. Zmiňovaná závislost je dobře viditelná i z grafu číslo 2.

Z grafu je možné snadno vyčíst, že proces vytvrzování je skoro ve všech případech pozvolný. Z řady zde vybočují pouze vzorky lepené směsí se 110 a 120 % předepsaného množství tvrdidla, kde je současně možné pozorovat prudký pokles pevnosti spojů

vytvořených v posledních 10 minutách zpracovatelnosti směsi. Hodnoty pevností jsou v grafu proloženy polynomicou funkcí 2. stupně.

Graf 2: Pevnost přeplátovaných spojů v závislosti na době uplynulé od přípravy lepicí směsi.

Zdroj: [vlastní experiment]



Rovnice vyobrazených funkcí jsou dány následujícími vztahy pro jednotlivé koncentrace lepicích směsí a charakterizovány též koeficientem spolehlivosti R^2 :

70 %	-	$y = -0,0861x^2 + 0,486x + 14,251;$	$R^2 = 0,9525,$
80 %	-	$y = -0,0902x^2 + 0,5709x + 11,093;$	$R^2 = 0,9164,$
90 %	-	$y = -0,0982x^2 + 0,4626x + 9,4577;$	$R^2 = 0,9715,$
100 %	-	$y = -0,0725x^2 + 0,0464x + 9,454;$	$R^2 = 0,7974,$
110 %	-	$y = -0,4984x^2 + 2,6739x + 6,507;$	$R^2 = 0,9779,$
120 %	-	$y = -0,2463x^2 + 0,9983x + 9,309;$	$R^2 = 0,6128,$
130 %	-	$y = -0,0547x^2 + 0,202x + 10,865;$	$R^2 = 0,9265.$

V průběhu zpracování lepidla při lepení vzorků byla také sledována změna teploty, způsobená reakcí vedoucí k vytvrzení spoje. Teplota je sekundárním parametrem charakterizujícím proces vytvrzování a díky ní je možné lépe se v procesu orientovat.

V tabulce číslo 9a) a 9b) jsou zaznamenány průměrné hodnoty teplot t , které byly zjištěny bezkontaktním měřením pomocí infračerveného teploměru TESTO 845.

Tab. 9: Teploty naměřené v průběhu zpracování lepicí směsi. Zdroj: [vlastní experiment]

9a)

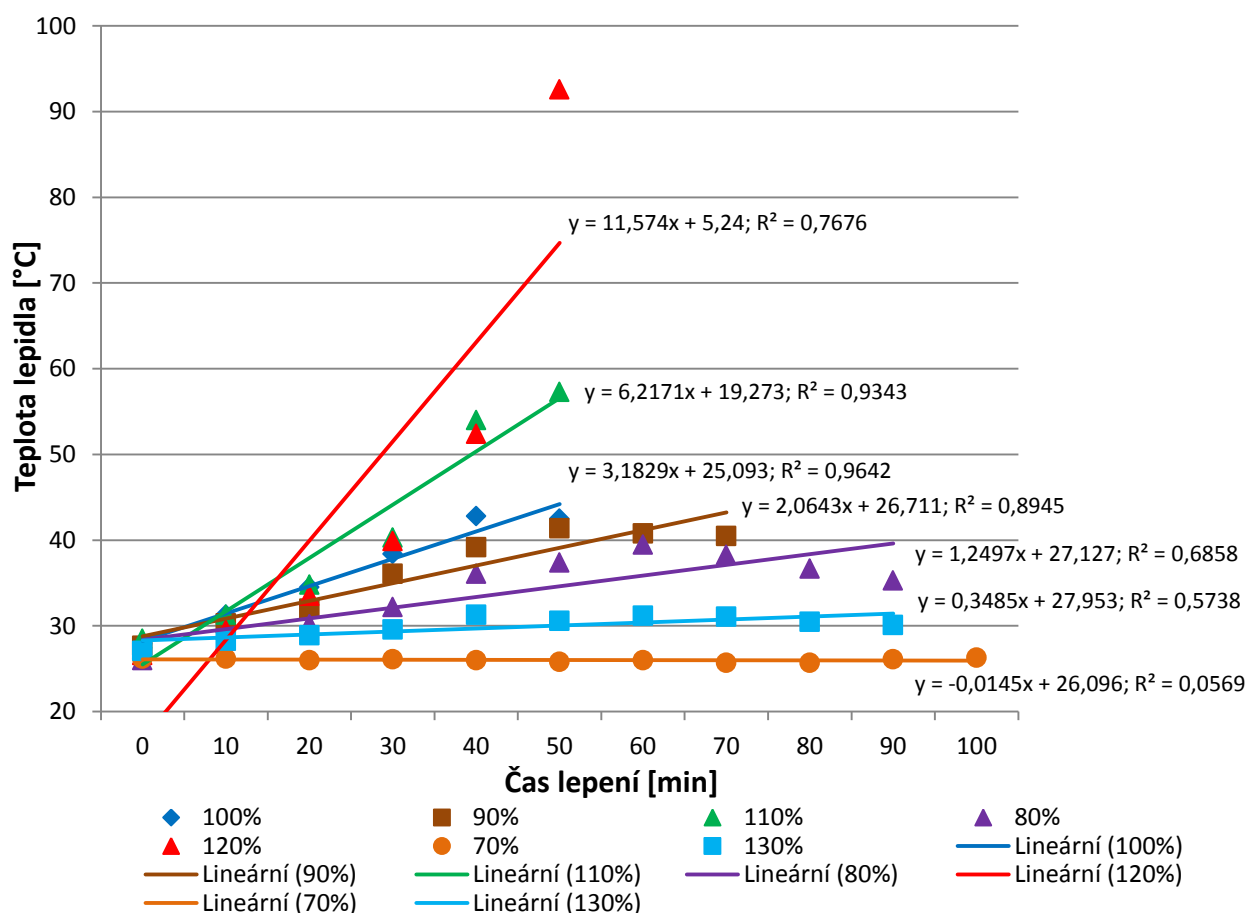
Podíl tvrdidla [%]	100		110		120	
	t [°C]	s [MPa]	t [°C]	s [MPa]	t [°C]	s [MPa]
0	27,9	0,33	28,5	0,22	26,6	0,51
10	31,3	0,45	31,3	0,51	29,5	0,22
20	34,5	0,38	34,8	0,37	33,5	0,43
30	38,4	0,34	40,3	0,14	39,9	0,33
40	42,8	0,42	54	0,62	52,4	0,31
50	42,5	0,58	57,3	0,75	92,6	0,45

9b)

Podíl tvrdidla [%]	70		80		90		130	
	t [°C]	s [MPa]	t [°C]	s [MPa]	t [°C]	s [MPa]	t [°C]	s [MPa]
0	26,2	0,29	26	0,57	27,7	0,43	27,1	0,91
10	26,2	0,38	28,3	0,22	30,3	0,73	28,3	0,49
20	26	0,50	30,2	0,22	32	0,86	28,9	0,74
30	26,1	0,16	32,2	0,14	36,1	0,37	29,6	0,80
40	26	0,14	36,1	0,16	39,2	0,22	31,3	0,51
50	25,8	0,22	37,4	0,22	41,4	0,31	30,6	0,37
60	26	0,19	39,5	0,43	40,8	0,37	31,2	0,64
70	25,7	0,22	38,3	0,51	40,5	0,51	31,1	0,43
80	25,7	0,08	36,7	0,45	-	-	30,5	0,43
90	26,1	0,08	35,3	0,51	-	-	30,1	0,37
100	26,3	0,37	-	-	-	-	-	-

Počáteční hodnoty teplot u jednotlivých koncentrací byly v rozmezí od 26 do 28,5 °C a během zpracování bylo předpokládáno, že bude docházet k jejich nárůstu. Tento předpoklad byl splněn při koncentracích v rozmezí od 80 do 120 % předepsaného množství tvrdidla, přičemž u koncentrace 120% došlo mezi 40. a 50. minutou ke skokovému nárůstu teploty, a lepidlo pak už bylo obtížně zpracovatelné. Špachtle na nanášení byla v lepidle zatvrdlá a nerovnoměrně ztvrdlé lepidlo bylo nanášeno špachtlí jinou. Velmi obtížné bylo i zajištění požadované tloušťky vrstvy lepidla, která byla vymežována drátky o průměru 0,10 mm, a celkově šlo lepidlo velmi špatně ze spoje vymáčkout. Průběh teplot, jejichž hodnoty jsou proloženy lineární funkcí lze sledovat v následujícím grafu číslo 3.

Graf 3: Změna teploty v průběhu zpracování lepicí směsi. Zdroj: [vlastní experiment]



Již bylo řečeno, že teplota je při vytvrzování chápána jako sekundární parametr. Z grafu je zřetelně vidět především strmější nárůst teploty při použití většího množství tvrdidla. Naopak při menším množství použitého tvrdidla je tento nárůst teploty pozvolnější. Tuto skutečnost je možné sledovat zejména na grafickém vyjádření nárůstu teploty pro koncentraci 120 % tvrdidla, kdy průměrná teplota stoupla během deseti minut řádově o 40 °C. Poměrně strmý nárůst teploty byl zaznamenán i u koncentrace 110 %. Při porovnání s grafem číslo 2, kde je zaznamenán průběh pevností v závislosti na čase, lze pozorovat, že právě u těchto dvou hodnot koncentrací byl nejvýraznější pokles pevnosti spojů v závěrečné fázi zpracování.

V průběhu vytvrzování lepidla se 70% množstvím tvrdidla pak byly rozdíly teplot tak nevýrazné, že lze jeho teplotu v průběhu vytvrzování považovat za neměnnou. Paradoxem se v tomto případě stává i použití 130 % tvrdidla, kde se průběh změny teploty blížil průběhu teploty u koncentrace 70%.

V době přípravy vzorků byly též poznamenávány postřehy vztahující se k práci s lepidlem. Obecně by bylo možné tyto poznatky shrnout v několika větách. Během prvních

30 minut se výrazně měnila viskozita lepidla, avšak lepidlo bylo stále možné dobře nanášet. Až na výjimku se 70% a 130 % množstvím tvrdidla, kde rozdíl teplot nebyl příliš znatelný, začala být práce s lepidlem obtížná vždy ve chvíli, kdy bylo dosaženo maximální teploty lepicí směsi. V tuto chvíli se lepidlo začalo táhnout, a bylo nesnadné vytvořit souvislou vrstvu. Přes tento fakt byly v některých případech slepeny další vzorky, kdy už lepidlo velmi špatně smáčelo adherendy, a zároveň bylo jeho vymáčknutí velice obtížné, až nemožné. Smáčivost lepidla v tomto stavu byla natolik omezená, že lepidlo vyteklé nesmáčelo ani nalinkovaný papír, který byl používán pro snadnější dodržování sousostí adherendů, a vzorky se k tomuto papíru nelepily, jako tomu bylo ve všech předchozích případech.

5.2 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE SHORE

Úkolem zkoušky tvrdosti nebylo pouze stanovit tvrdost připravených odlitků lepidla, ale především prozkoumat závislost této tvrdosti na množství přidaného tvrdidla. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 868.

Pomocí ručního digitálního tvrdoměru SHITO HT-6510 byla zkoušena tvrdost vzorků, jež byly připravovány spolu s přeplátovanými spoji a jejichž koncentrace jsou tedy shodné s koncentracemi použitými při výrobě lepených spojů. Od každé koncentrace byly připraveny 2 zkušební tělesa, přičemž na každém z nich bylo provedeno 10 měření, konkrétně 5 měření z každé strany. Po dobu měření byl kladen důraz na předepsanou vzdálenost zkušebního hrotu od okrajů těles, která musí být dle normy minimálně 9 mm. Vzhledem k počtu zkušebních těles bylo tedy celkem naměřeno 300 různých hodnot tvrdosti, příslušejících jednotlivým koncentracím, a tyto hodnoty byly zapsány do tabulek dle sérií, u nichž byl dále vypočítán aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Aritmetické průměry spolu s odchylkami byly následně vyneseny do grafu.

Získané výsledky:

Tvrdot jako taková je dalším parametrem vypovídajícím o vlastnostech lepidla. V tabulce číslo 10 jsou uvedeny vypočítané průměrné hodnoty tvrdosti všech zkoušených vzorků, společně s dalšími statistickými veličinami těmto hodnotám příslušejícím.

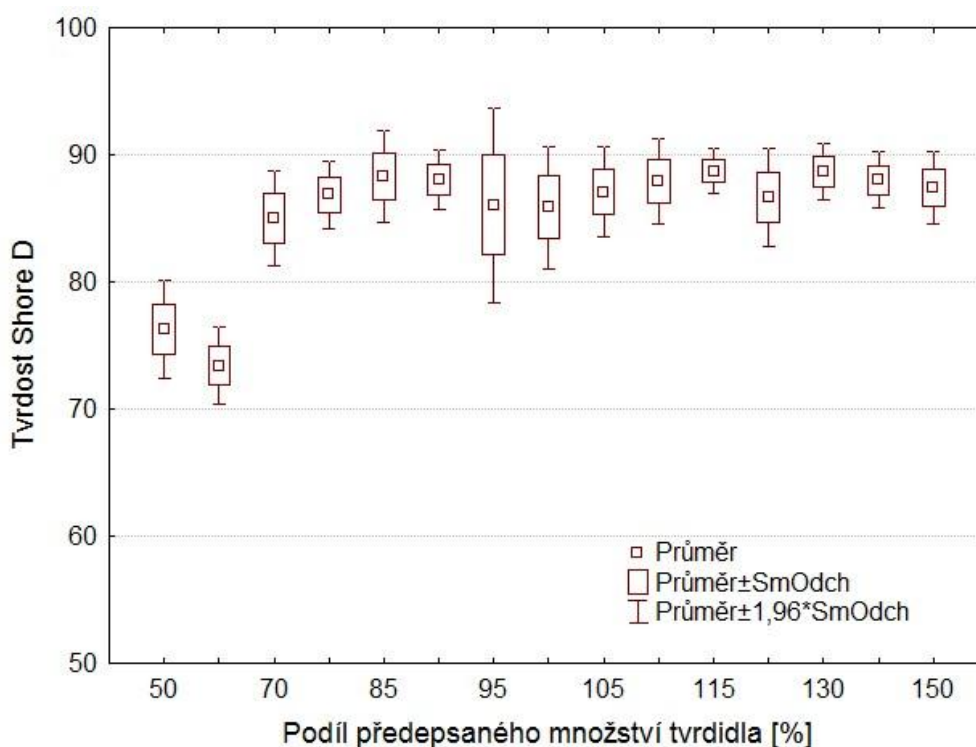
Při pohledu na naměřené hodnoty je na první pohled patrné, že vlivem snižování množství tvrdidla použitého na přípravu lepicí směsi se tvrdost lepidla nijak výrazně nemění. Významnější rozdíl vzniká až ubráním 30 % tvrdidla, tedy při 70 % z předepsaného množství, a dalším ubíráním pak hodnota tvrdosti lepidla klesá, řádově o více než 10 %.

Tab. 10: Tvrdost podle SHORE. Zdroj: [vlastní experiment]

Podíl předepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	Tvrdost Shore D	<i>s</i>	<i>v</i> [%]
50	3,25	76,29	1,91	2,51
60	3,9	73,41	1,49	2,03
70	4,55	85,00	1,86	2,19
75	4,875	86,88	1,33	1,53
85	5,525	88,30	1,82	2,06
90	5,85	88,09	1,17	1,32
95	6,175	86,07	3,81	4,43
100	6,5	85,88	2,39	2,78
105	6,825	87,07	1,74	2,00
110	7,15	87,88	1,67	1,90
115	7,475	88,70	0,89	1,00
125	8,125	86,68	1,93	2,22
130	8,45	88,68	1,12	1,26
140	9,1	88,01	1,09	1,24
150	9,75	87,41	1,42	1,63

Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků s větším množstvím tvrdidla, než je množství předepsané výrobcem, však vůbec neodpovídá předpokladu, že s přibývajícím množstvím tvrdidla poroste tvrdost lepidla. Tvrdosti lepidla v závislosti na množství přidaného tvrdidla lze pozorovat v grafu číslo 4.

Graf 4: Závislost tvrdosti lepidla dle Shore na množství tvrdidla. Zdroj: [vlastní experiment]



Z tohoto grafu je velmi dobře patrný především jakýsi zlomový bod v hodnotě 70 % tvrdidla. Od tohoto bodu dalším snížením množství tvrdidla tvrdost klesala výrazněji, a vzorky samy o sobě jsou už při pouhém pohmatu měkké a plastické.

Naopak naměřené hodnoty tvrdosti v rozsahu koncentrace 75 až 150 % množství tvrdidla jsou ze statistického hlediska prakticky neměnné.

5.3 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE BRINELLA

Z důvodu výsledků předchozí zkoušky bylo přistoupeno k měření tvrdosti ještě metodou vtlačení kuličky. Stejně jako tomu bylo u zkoušky předchozí, i při zkoušce tvrdosti podle Brinella bylo úkolem zjistit, zda existuje závislost mezi tvrdostí lepidla a množstvím přidaného tvrdidla. Tato zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 2039-1 a jejím cílem bylo porovnat závislost tvrdosti se závislostí zjištěnou podle Shore.

Na vzorcích použitých v předešlé zkoušce byly zkoumány vždy 2 na sebe kolmé průměry jednotlivých vtisků, měřeny pomocí Brinellovy lupy, a jejich hodnoty zaznamenávané do tabulek podle příslušných koncentrací byly následně použity k výpočtu středního průměru, což je hodnota potřebná pro dosazení do vzorce pro výpočet tvrdosti HBW. Získáno touto metodou bylo 90 hodnot tvrdosti, jejichž aritmetické průměry příslušející vzorkům jednotlivých koncentrací pak byly dále vyneseny do grafu.

Získané výsledky:

V tabulce číslo 11 jsou uvedeny vypočtené průměrné hodnoty tvrdosti všech zkušebních vzorků, seřazené vzestupně podle množství tvrdidla použitého k přípravě lepicí směsi.

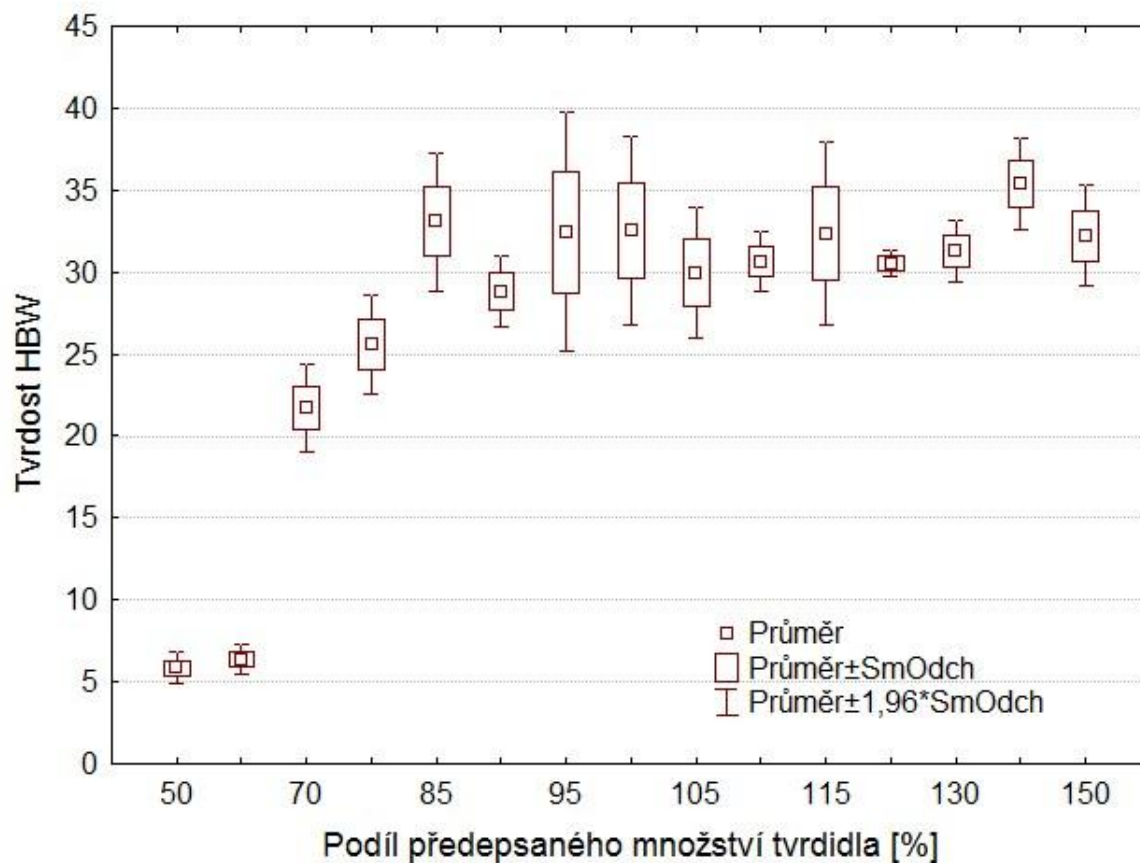
Oproti předchozímu případu je ze zjištěných hodnot patrné, že v závislosti na snižujícím se množství tvrdidla ve většině případů rovnoměrně klesá tvrdost lepidla již od základního poměru. Výrazný rozdíl je v tabulce viditelný při snížení množství tvrdidla o 25 % na hodnotu 75 % z předepsaného množství. Předpokládaný vzestup tvrdosti s přibývajícím množstvím tvrdidla však ani v tomto případě nebyl potvrzen. V tabulce nad ostatní hodnoty vyčnívá pouze hodnota tvrdosti naměřená u koncentrace se 140 % tvrdidla, která se v porovnání s ostatními vypočtenými hodnotami liší řádově o více než 10 %.

Tab. 11: Tvrdost podle BRINELLA. Zdroj: [vlastní experiment]

Podíl předepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	HBW	s	ν [%]
50	3,25	5,83	0,45	7,69
60	3,9	6,35	0,43	6,71
70	4,55	21,72	1,23	5,67
75	4,875	25,56	1,40	5,48
85	5,525	33,08	1,96	5,93
90	5,85	28,84	1,01	3,49
95	6,175	32,44	3,40	10,49
100	6,5	32,53	2,68	8,25
105	6,825	29,95	1,84	6,15
110	7,15	30,63	0,85	2,78
115	7,475	32,31	2,60	8,06
125	8,125	30,52	0,39	1,26
130	8,45	31,30	0,86	2,76
140	9,1	35,35	1,29	3,65
150	9,75	32,22	1,42	4,42

Vypočtená tvrdost lepidla v závislosti na množství přidaného tvrdidla je pro lepší orientaci rovněž vynesena do grafu číslo 5.

Graf 5: Závislost tvrdosti lepidla na množství tvrdidla dle Brinella. Zdroj: [vlastní experiment]



Z grafu je možné vidět, že ubíráním tvrdidla z hodnoty 75 % na hodnotu 50 % tvrdost lepidla skutečně klesá. Avšak v rozmezí 85 % až 150 % jsou ze statistického hlediska rozdíly v tvrdostech lepidla při jednotlivých koncentracích velmi malé, až zanedbatelné.

Při porovnání s předchozí metodou měření je však nutné podotknout, že nejnižší naměřené hodnoty tvrdosti jsou oproti těm nejvyšším výrazně menší. Zatímco při metodě SHORE byly hodnoty tvrdosti naměřené u koncentrací s 50 a 60 % řádově pouze o 15 % nižší než byla tvrdost výchozího vzorku se 100 % předepsaného množství tvrdidla, při zkoumání tvrdosti metodou BRINELL byly tyto hodnoty nižší o více než 80 %.

Elastická deformace:

Jelikož bylo v průběhu měření tvrdosti také zjištěno, že je polymer schopen při nízkém podílu tvrdidla (50 a 60 % předepsaného množství) elastické deformace, bylo žádoucí provést dílčí výzkum, který by tuto deformaci pomohl specifikovat. Na vzorcích se zmiňovaným podílem tvrdidla byl proveden pokus, který spočíval v provedení vtisku a následném měření času potřebného k navrácení povrchu zkušebního tělesa do původní polohy. Pro obě koncentrace byly provedeny a měřeny tři vtisky, a záznamy času spolu s vypočtenými aritmetickými průměry, směrodatnými odchylkami a variačními koeficienty jsou uvedeny v tabulce číslo 12. K tomuto měření byly použity moderní optické metody.

Tab. 12 *Doba potřebná k navrácení deformovaného povrchu do původní polohy.*

Zdroj: [vlastní experiment]

Podíl tvrdidla		Vtisk 1	Vtisk 2	Vtisk 3	\bar{x} [min]	s [min]	v [%]
50%	Čas po konci zatížení	9:52:30	10:11:45	10:30:52	16min 50s	0,21	1,22
	Vrácení do původní polohy	10:09:03	10:28:40	10:47:54			
	Doba vrácení do původního tvaru [min]	16,55	16,92	17,03			
60%	Čas po konci zatížení	9:50:15	10:07:37	10:24:10	15min 29s	0,61	3,92
	Vrácení do původní polohy	10:05:40	10:22:24	10:40:26			
	Doba vrácení do původního tvaru [min]	15,42	14,78	16,27			

V tabulce lze snadno odečíst, že u vzorků s nižším podílem tvrdidla (50 %) trvalo navrácení povrchu do výchozí polohy v průměru o 1 minutu a 21 sekund déle než u vzorků s podílem tvrdidla 60 % základního množství.

5.4 VYHODNOCENÍ STATICKÉ ZKOUŠKY V TAHU

Na základě předešlého zjištění byla v závěru experimentální činnosti provedena ještě zkouška tahových vlastností. K této zkoušce sloužila připravená univerzální zkušební tělesa. Cílem tohoto měření bylo zjistit tahové napětí a jmenovité poměrné prodloužení, což jsou další parametry potřebné k hodnocení vlastností polymerů. Použitím univerzálního zkušebního stroje Lab.Test 5.50ST a záznamového zařízení došlo k velmi přesnému změření zmiňovaných hodnot.

Tahové napětí:

V tabulce číslo 13 jsou shrnuty aritmetické průměry hodnot naměřeného tahového napětí u jednotlivých hmotnostních koncentrací a jejich směrodatné odchylky a variační koeficienty.

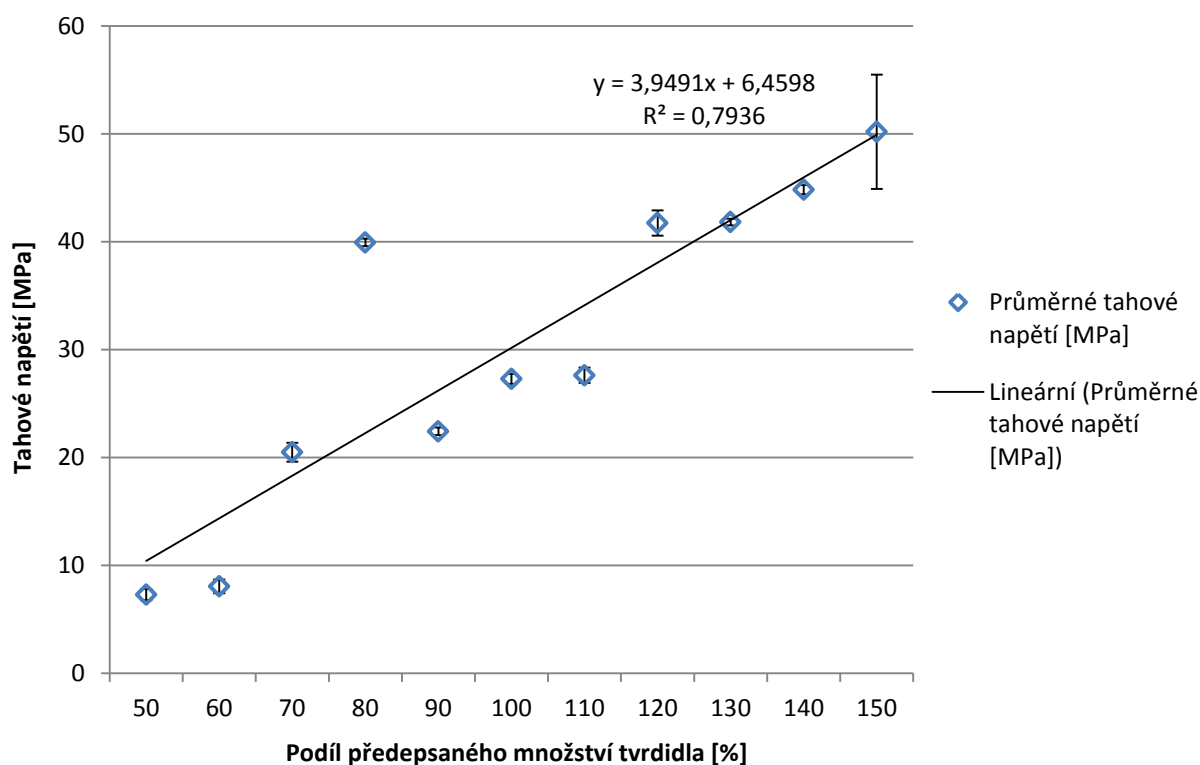
Tab. 13 *Pevnost v tahu. Zdroj: [vlastní experiment]*

Podíl přeepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	σ [MPa]	s [MPa]	v [%]
50	3,25	7,29	0,52	7,09
60	3,9	8,05	0,63	7,86
70	4,55	20,49	0,87	4,25
80	5,2	39,94	0,37	0,92
90	5,85	22,43	0,36	1,62
100	6,5	27,30	0,46	1,69
110	7,15	27,62	0,71	2,56
120	7,8	41,73	1,18	2,84
130	8,45	41,83	0,32	0,76
140	9,1	44,81	0,43	0,95
150	9,75	50,20	5,29	10,55

Hodnoty uvedené v tabulce porovnávají tahová napětí naměřená u všech poměrů pryskyřice a tvrdidla, přičemž hodnota $27,30 \pm 0,46$ MPa odpovídá tahovému napětí zjištěnému na vzorcích s množstvím tvrdidla přeepsaným výrobcem (100 %). Tato hodnota je brána de facto za výchozí hodnotu a mimo jiné tedy slouží k porovnání.

Závislost tahového napětí je současně možné pozorovat i v grafu číslo 6, který odpovídá předpokladu a má v rozsahu použití 50 až 150 % přeepsaného množství tvrdidla stoupající charakter.

Graf 6: Závislost pevnosti v tahu na množství tvrdidla. Zdroj: [vlastní experiment]



Vypustíme-li hodnotu 39,94 MPa naměřenou na vzorcích s 80 % tvrdidla, lze říci, že s ubývajícím množstvím tvrdidla pevnost v tahu oproti základnímu poměru klesá. Naměřené hodnoty také jasně ukazují, že se zvětšujícím se množstvím tvrdidla pevnost v tahu roste. Minimální naměřená hodnota tahového napětí činila $7,29 \pm 0,52$ MPa, tj. odchylka 7,09% při 50 % přeepsaného množství tvrdidla, hodnota maximální $50,20 \pm 5,29$ MPa, tj. odchylka 10,55 % při použití 150 % tvrdidla. Do grafu jsou vloženy chybové úsečky, které však v některých případech téměř zanikají, protože hodnoty směrodatných odchylek jsou v těchto případech velmi malé. Zároveň vzhledem k charakteru získaných hodnot jsou vynesena tahová napětí proložena lineární funkcí, přičemž koeficient spolehlivosti činí 79 %.

Jmenovité poměrné prodloužení:

Během měření tahového napětí bylo možné sledovat nejen rozdíly v silách potřebných k přetržení vzorků, nýbrž také rozdíly v době potřebné právě k přetržení. S rychlostí zkoušení 6 mm/min tato doba byla u vzorků s menším podílem tvrdidla výrazně delší, u koncentrace 50 % se blížila téměř k hodnotě 6 minut, naopak u koncentrací s větším množstvím tvrdidla se doba zkracovala. Nejkratší doba potřebná k přetržení pak odpovídala hodnotě přibližně 8 sekund. Tato doba je prakticky také ukazatelem schopnosti prodloužení vzorku související

s deformací. Jak je již popsáno v kapitole 5.3, i v tomto případě se u některých koncentrací jednalo o deformaci alespoň částečně elastickou, což lze usoudit ze skutečnosti, že přetržená zkušební tělesa měla tendenci se zkracovat.

V tabulce číslo 14 jsou zaznamenány vypočtené aritmetické průměry hodnot jmenovitého poměrného prodloužení, spolu s hodnotami směrodatných odchylek a variačních koeficientů.

Tab. 14 *Jmenovité poměrné prodloužení. Zdroj: [vlastní experiment]*

Podíl předepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	ϵ_t [%]	s [%]	v [%]
50	3,25	61,54	2,16	3,50
60	3,9	45,55	2,88	6,31
70	4,55	6,83	0,18	2,56
80	5,2	5,76	0,04	0,69
90	5,85	1,48	0,04	2,37
100	6,5	1,71	0,03	1,75
110	7,15	1,75	0,11	6,02
120	7,8	4,53	0,32	6,96
130	8,45	4,48	0,40	8,83
140	9,1	4,89	0,13	2,66
150	9,75	5,12	0,11	2,05

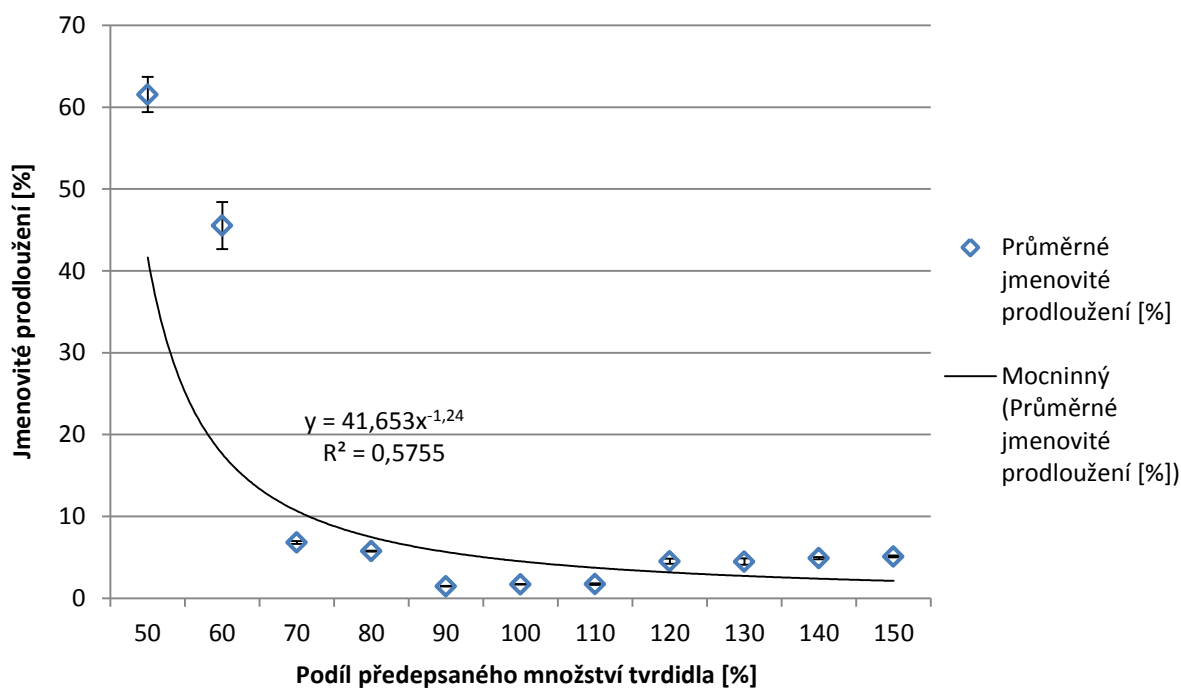
Jmenovité poměrné prodloužení zjištěné na vzorcích se 100 % tvrdidla odpovídalo hodnotě $1,71 \pm 0,03$ %, tj. odchylka 1,75 %. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u koncentrace s 50 % tvrdidla, tedy $61,54 \pm 2,16$ %, tj. s odchylkou 3,5 %, naopak hodnotu $1,48 \pm 0,04$ %, tj. s odchylkou 2,37 % zjištěnou u zkušebních těles s 90 % tvrdidla lze považovat za nejnižší.

Závislost jmenovitého poměrného prodloužení lze současně sledovat i v grafu číslo 7, jehož hodnoty jsou proloženy mocninnou funkcí. Délka chybových úseček je až na výjimky velmi malá a v grafu proto tyto úsečky téměř zanikají. Použitá funkce, kterou jsou hodnoty proloženy, pak plně vyhovuje, neboť závislost takto odpovídá původnímu předpokladu.

Výchozí hodnotou grafu funkce je opět podíl předepsaného množství tvrdidla 100 %, od kterého mocninná funkce vyjadřující jmenovité poměrné prodloužení výrazně roste se zmenšujícím se podílem použitého tvrdidla. Naopak v případě použití většího množství tvrdidla funkce pozvolna klesá.

Graf 7: *Závislost jmenovitého poměrného prodloužení na množství tvrdidla.*

Zdroj: [vlastní experiment]



Jmenovité prodloužení současně vypovídá o houževnatosti polymerů. Jeho zjištěná závislost na použitém množství tvrdidla by se proto dala využít při výrobě kompozitních materiálů, kde je právě houževnatost často velmi důležitá a vyhledávaná.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zaměřit se na technologii lepení, přičemž primárně na lepení dvousložkovými lepidly. V literární rešerši jsou vyjmenovány důležité a podstatné faktory ovlivňující tvorbu a pevnost lepených spojů, a současně zhodnoceny výhody a nevýhody této technologie.

Prakticky celý soubor informací o faktorech ovlivňujících lepené spoje vychází z častokrát slychaného rčení, že spoj je pouze tak pevný, jak je pevný jeho nejslabší článek. Kvalitní a spolehlivý lepený spoj totiž není závislý pouze na kvalitním lepidle, což se lidé často mylně domnívají, nýbrž také na opracování lepených povrchů, provozním prostředí, konstrukci spojů a v neposlední řadě i na technologickém postupu. Nutné je tedy brát vždy na vědomí, že většinou lepidel lze kvalitního spoje dosáhnout pouze při spojování určitých materiálů, a že i přes stálý vývoj a zdokonalování žádné lepidlo není a ani nemůže být všestranné. Soupis možností a limit dvousložkových lepidel zároveň může sloužit jako zdroj informací či podnět při rozhodování o volbě technologie spojování. Mnohé technologie může lepení zcela nahrazovat či některé z nich alespoň vhodně doplňovat, a to bez rozdílu, zda se jedná o lepidla jednosložková či dvousložková.

Experimentální část práce zkoumající vliv množství tvrdidla na pevnost dvousložkových systémů lepidel je provedena na zkušebních vzorcích, vytvořených v souladu s normami ČSN, s použitím epoxidového lepidla ChS Epoxy 1200 vytvrzovaným pomocí tvrdidla P11. Každá série vzorků se od sebe lišila podílem přidaného tvrdidla při přípravě lepicí směsi o 5 až 10 %, přičemž mezní hodnoty podílu činily ± 50 % předepsaného množství tvrdidla výrobcem. Připravené vzorky byly podrobovány zkouškám, které rovněž podléhají technickým normám ČSN, a jejichž účelem bylo vyhodnotit výsledky popisující vlastnosti lepidla.

Zkouškou pevnosti lepeného spoje ve smyku byla naměřena nejvyšší průměrná hodnota tahového napětí u vzorků se 70 % množství tvrdidla, konkrétně 14,61 MPa. V porovnání se vzorky lepenými směsí o koncentraci předepsané výrobcem je zde v pevnosti výrazný rozdíl, a to více než 6 MPa. Tato zjištěná hodnota tahového napětí je současně druhou nejnižší naměřenou hodnotou. Nejnižší průměrná naměřená hodnota pak byla zjištěna u vzorků se 110 % tvrdidla, jejichž pevnost činila 8,55 MPa. Zvláštností výzkumu je skutečnost, že pevnost ve smyku u spojů vytvořených lepicí směsí s různým obsahem tvrdidla ve většině případů s přidáváním i ubíráním množství tvrdidla roste. Mezní váhové množství pak zde odpovídá hodnotám 70 a 140 % předepsaného množství tvrdidla výrobcem, od

kterých následným ubíráním v prvním případě a přidáváním v případě druhém pevnost spoju začala výrazně klesat.

Společně s tímto bylo zjištěno, že v případě ubírání množství tvrdidla podstatně roste doba zpracovatelnosti lepidla, přičemž extrémní se zde stala doba 100 minut při ubrání 30 %. S přidáváním tvrdidla tato doba mírně klesá, respektive vzorky byly i přes obtížné nanášení slepeny, což se ale výrazně projevilo na poklesu jejich pevnosti. Tomuto předpokladu neodpovídá pouze koncentrace 130 %, kde se naměřená doba prodloužila na 90 minut. Při použití této koncentrace se nijak výrazně neměnila ani teplota, jež je sekundárním parametrem vytvrzování, rozdíl její nejvyšší a nejnižší hodnoty byl pouze 4 °C. Průměrná teplota měřená u zbývajících koncentrací se během vytvrzování postupně zvyšovala, s ubíráním tvrdidla naopak klesala.

Při hodnocení tvrdosti lepidla vtlačováním hrotu tvrdoměru jsem dospěl k závěru, že tvrdost lepidla se snižováním podílu tvrdidla klesá, avšak až s ubíráním od hodnoty 70 % předepsaného množství. Se zvyšujícím se množstvím tvrdidla se tvrdost prakticky nemění. Nejnižší průměrná hodnota tvrdosti Shore D byla naměřena u vzorků se 60 % předepsaného množství tvrdidla, konkrétně hodnota 73,41, nejvyšší hodnoty 88,7 pak bylo dosaženo u vzorků se 115 % tvrdidla. Průměrná tvrdost u základního poměru odpovídala hodnotě 85,88. Tvrdost hodnocená metodou vtlačení kuličky víceméně potvrdila předpoklad, a ve většině případů klesá se snižujícím se podílem tvrdidla již od základního poměru. Nárůst tvrdosti se zvyšujícím se množstvím tvrdidla však ani v tomto případě měření není nijak výrazný. Hodnota HBW pro základní koncentraci 100 % činí průměrně 32,53 a maximální průměrná hodnota 35,35 přísluší koncentraci 140 %. Minimální průměrná hodnota, tedy 5,83, byla naměřena u vzorků s 50 % tvrdidla.

U koncentrace s 50 a 60 % tvrdidla byla během práce zjištěna elastická deformace, u níž byla několikrát změřena doba potřebná k navrácení povrchu do původního tvaru, a z ní vypočítána průměrná délka trvání. V případě vzorků s 50 % tvrdidla tato doba odpovídala v průměru 16 minutám a 50 sekundám, u vzorků s 60 % tvrdidla tato doba činila 15 minut a 29 sekund.

Vyhodnocení tahových vlastností lze shrnout následujícím způsobem. Minimální průměrná hodnota tahového napětí 7,29 MPa byla naměřena na vzorcích s 50 % tvrdidla, maximální průměrná hodnota, tedy 50,20 MPa pak u vzorků se 150 % tvrdidla. U vzorků se základním poměrem bylo dosaženo průměrného tahového napětí 27,3 MPa, a současně je možné říci, že závislost velikosti tahového napětí na podílu tvrdidla je ve zkoumané oblasti lineární. Závislost jmenovitého poměrného prodloužení na množství tvrdidla lze pak popsat

pomocí mocninné funkce. Maximální jmenovité poměrné prodloužení odpovídá průměrné hodnotě 61,54 % u koncentrace 50 % tvrdidla. V základním poměru je průměrná hodnota jmenovitého prodloužení 1,71 %.

Po celou dobu výzkumu bylo předpokládáno, že se snižováním množství tvrdidla poroste až do zjišťované extrémní hodnoty poměru pevnost přeplátovaných spojů ve smyku, zároveň bude klesat tvrdost lepidla i pevnost v tahu univerzálních zkušebních těles. Tento předpoklad se prakticky potvrdil, nutné je však podotknout, že ne vždy se jevil poměr tvrdidla a lepidla předepsaný výrobcem jako ideální. Současným předpokladem bylo, že s větším množstvím tvrdidla bude klesat pevnost přeplátovaných spojů a zvyšovat se tvrdost lepidla i pevnost v tahu univerzálních zkušebních těles. Tohoto předpokladu však bylo dosaženo jen v posledním případě, nýbrž pevnost přeplátovaných spojů při větším než předepsaném množství tvrdidla z počátku rostla, a tvrdost lepidla lze zde označit za neměnnou. Při zkoušce tahových vlastností byl zaznamenán výrazný nárůst pevnosti, což je v souladu původním předpokladem.

V průběhu experimentální části byl potvrzen vliv tvrdidla na vlastnosti dvousložkových systémů lepidel, přičemž bylo zjištěno, že změna množství tvrdidla některé vlastnosti ovlivňuje více a některé méně. Laborování s množstvím tvrdidla by pak mohlo mít příznivý vliv při výrobě kompozitních materiálů, jelikož s použitím menšího množství tvrdidla výrazně stoupá pevnost ve smyku, klesá tvrdost, a tím stoupá houževnatost využitelná především u spojů namáhaných dynamicky. Významným parametrem je rovněž stoupající hodnota tahového napětí při větším podílu tvrdidla, která ve zkoumané oblasti podílů vzrostla téměř na dvojnásobek oproti hodnotě naměřené při podílu předepsaném.

7 SEZNAM LITERATURY

- [1] www.feromat.cz [online]. [cit. 2013-3-2]. Dostupné: <http://www.feromat.cz/jakosti_oceli>
- [2] www.bolzano.cz [online]. [cit. 2013-1-15]. Dostupné: <http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_EN_10025-2-prehled-chem-sloz.pdf>
- [3] Norma: ČSN EN 1465: 2009. Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Praha: Český normalizační institut 2009. 11 s.
- [4] sklarsky-prumysl.gds.cz [online]. [cit. 2013-1-10]. Dostupné: <<http://sklarsky-prumysl.gds.cz/piskovani-skla/piskovaci-boxy/piskovani-tabuloveho-skla>>
- [5] www.piskovacky.cz [online]. [cit. 2013-1-24]. Dostupné: <<http://www.piskovacky.cz/piskovacky-profi.php>>
- [6] www.barvy.cz [online]. [cit. 2013-2-3]. Dostupné: <<http://www.barvy.cz/zbozi/1z6-aceton/2q>>
- [7] Norma: ČSN EN ISO 3167: Plasty – Víceúčelová zkušební tělesa. Praha: Český normalizační institut, 1997. 12 s.
- [8] Norma: ČSN ISO 10365: Lepidla - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje. Praha: Český normalizační institut, 1995. 6 s.
- [9] Norma: ČSN EN ISO 868: Plasty a ebonit – stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). Praha: Český normalizační institut, 1997. 12 s.
- [10] Norma: ČSN EN ISO 2039-1: Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtlačováním kuličky. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [11] Norma: ČSN EN ISO 527-1: Plasty: stanovení tahových vlastností. Praha: Český normalizační institut, 1997. 15 s.
- [12] www.mmspektrum.com [online]. [cit. 2013-1-23]. Dostupné: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-tloustky-vrstvy-lepidla-na-pevnost-lepeneho-spoje.html>>
- [13] KRŮŽ, R. – VÁVRA, P.: Strojírenská příručka. 5. svazek. Praha: Scientia, spol. s.r.o., 1994. 241s. ISBN 80-85827-59-X.
- [14] OSTEN, M.: Práce s lepidly a tmely, 3. vydání. Praha: Grada Publishing, spol. s.r.o., 1996. ISBN 80-7169-338-3

- [15] OSTEN, M.: Práce s lepidly a tmely, 2. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1982.
- [16] BROŽEK, M.: Strojírenská technologie I (návody ke cvičení). Praha: ČZU, 1998. 80s. ISBN 978-80-213-1780
- [17] LOCTITE: Der Loctite. Worldwide Design Handbook. München: Loctite European Group, 1998. CD.
- [18] www.ksp.tul.cz [online]. [cit. 2013-3-3]. Dostupné: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf>
- [19] PETERKA, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1980.
- [20] BOUBLÍK, V.: Lepidla a jejich příprava. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1966.
- [21] student.czu.cz [online]. [cit. 2013-2-2]. Dostupné: <https://student.czu.cz/popup.php?id_menu=2&id_subject=3328>
- [22] POKORNÝ, J.: Lepení a tmelení v dílně a domácnosti. Praha: Grada Publishing, spol. s.r.o., 2000. ISBN 80-7169-857-1
- [23] FREJDIN, A.: Pevnosť a životnosť lepených spojov. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, n.p., 1988.
- [24] www.uhu.cz [online]. [cit. 2013-2-25]. Dostupné: <<http://www.uhu.cz/lepeni-kovu>>
- [25] www.makrotech.cz [online]. [cit. 2013-1-18]. Dostupné: <<http://www.makrotech.cz/wp-content/uploads/2012/06/Loctite/pdf/2.Lepeni.pdf>>
- [26] www.sika-diamondfloor.cz [online]. [cit. 2013-1-20]. Dostupné: <<http://www.sika-diamondfloor.cz/data/obsah/technologie/5/Sikabond.pdf>>
- [27] EBNESAJJAD, S.: Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing. Oxford: William Andrew, 2011. ISBN 978-1-4377-4461-3
- [28] sunilbhangale.tripod.com [online]. [cit. 2013-4-3]. Dostupné: <<http://sunilbhangale.tripod.com/epoxy.html>>
- [29] www.epotek.com [online]. [cit. 2013-4-3]. Dostupné: <<http://www.epotek.com/SSCDocs/Brochures%20and%20Selector%20Guides/Brochures/Adhesive%20Application%20Guide.pdf>>
- [30] solutions.3mcesko.cz [online]. [cit. 2013-3-8]. Dostupné: <http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ/EU-Auto/Home/ExploreOur/ProductFamilies/StructuralAdhesives/>

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1: NAMĚŘENÉ HODNOTY – PEVNOST SPOJE

SADA I - PEVNOST SPOJE				
Podíl předepsaného množství tvrdidla	100%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	6,5			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,8	3200	Adhezní	10,00
2	12,2	2780	Adhezní	9,11
3	12,7	2800	Adhezní	8,82
4	12,5	2880	Adhezní	9,22
5	12,3	2750	Adhezní	8,94
6	13,1	3000	Adhezní	9,16
7	12,8	2520	Adhezní	7,88
8	12,7	2250	Adhezní	7,09
9	12,6	2240	Adhezní	7,11
10	12,5	2900	Adhezní	9,28
11	13,1	2940	Adhezní	8,98
12	12,4	3040	Adhezní	9,81
13	12,6	2600	Adhezní	8,25
14	13,2	2270	Adhezní	6,88
15	12,15	2590	Adhezní	8,53
16	12,4	3040	Adhezní	9,81
17	12,1	2970	Adhezní	9,82
18	13,8	2370	Adhezní	6,87
19	13	2580	Adhezní	7,94
20	13,5	2700	Adhezní	8,00
SADA II - PEVNOST SPOJE				
Podíl předepsaného množství tvrdidla	95%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	6,175			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	9,8	2040	Adhezní	8,33
2	12,8	2670	Adhezní	8,34
3	11,8	2680	Adhezní	9,08
4	12,6	3220	Adhezní	10,22
5	11,9	2500	Adhezní	8,40
6	11,7	2680	Adhezní	9,16
7	12,5	2890	Adhezní	9,25
8	11,9	2890	Adhezní	9,71
9	10,5	2000	Adhezní	7,62
10	11,8	2460	Adhezní	8,34
11	11,9	2510	Adhezní	8,44
12	12,5	2120	Adhezní	6,78
13	9,8	2120	Adhezní	8,65
14	12,4	2760	Adhezní	8,90

15	9,5	1840	Adhezní	7,75
16	9,2	1740	Adhezní	7,57
17	12,1	2930	Adhezní	9,69
18	11,3	2740	Adhezní	9,70
19	11,6	2780	Adhezní	9,59
20	12,55	2210	Adhezní	7,04
SADA III - PEVNOST SPOJE				
Podíl předepsaného množství tvrdidla	105%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	6,825			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	9,8	1950	Adhezní	7,96
2	11,5	2850	Adhezní	9,91
3	10,4	2340	Adhezní	9,00
4	10,6	2220	Adhezní	8,38
5	8,5	1710	Adhezní	8,05
6	12,3	3340	Adhezní	10,86
7	12,2	3340	Adhezní	10,95
8	10,5	2300	Adhezní	8,76
9	11,5	2200	Adhezní	7,65
10	10,8	2460	Adhezní	9,11
11	11,1	2500	Adhezní	9,01
12	11,8	2960	Adhezní	10,03
13	9,75	1900	Adhezní	7,79
14	11,4	2660	Adhezní	9,33
15	11,5	2750	Adhezní	9,57
16	12,3	2220	Adhezní	7,22
17	8,8	1300	Adhezní	5,91
18	11,8	2820	Adhezní	9,56
19	12	3140	Adhezní	10,47
20	11,8	2400	Adhezní	8,14
SADA IV - PEVNOST SPOJE				
Podíl předepsaného množství tvrdidla	90%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	5,85			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,1	2060	Adhezní	6,81
2	12,3	3440	Adhezní	11,19
3	12,1	2580	Adhezní	8,53
4	12,3	2770	Adhezní	9,01
5	11,4	2350	Adhezní	8,25
6	11,7	2650	Adhezní	9,06
7	11,8	2880	Adhezní	9,76
8	9,2	2060	Adhezní	8,96
9	12,15	3150	Adhezní	10,37
10	12,1	2960	Adhezní	9,79
11	12	2880	Adhezní	9,60
12	12	2660	Adhezní	8,87
13	11,8	2520	Adhezní	8,54

14	11,9	2520	Adhezní	8,47
15	12,1	3060	Adhezní	10,12
16	11,9	2800	Adhezní	9,41
17	10,4	2190	Adhezní	8,42
18	12,2	2870	Adhezní	9,41
19	12,3	2770	Adhezní	9,01
20	11,7	2320	Adhezní	7,93

SADA V - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	110%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	7,15

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	11,9	2560	Adhezní	8,61
2	12,6	3140	Adhezní	9,97
3	7,7	1900	Adhezní	9,87
4	12,3	2980	Adhezní	9,69
5	12,4	2950	Adhezní	9,52
6	12,2	2940	Adhezní	9,64
7	10,5	1900	Adhezní	7,24
8	10,8	2000	Adhezní	7,41
9	11,2	2200	Adhezní	7,86
10	11,9	2480	Adhezní	8,34
11	12	1760	Adhezní	5,87
12	11,2	1740	Adhezní	6,21
13	11,8	2750	Adhezní	9,32
14	12,1	2700	Adhezní	8,93
15	12,2	3080	Adhezní	10,10
16	11,7	3250	Adhezní	11,11
17	12	2100	Adhezní	7,00
18	12,4	2680	Adhezní	8,65
19	11,4	2300	Adhezní	8,07
20	12	2270	Adhezní	7,57

SADA VI - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	85%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	5,525

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	11,4	2660	Adhezní	9,33
2	11	1850	Adhezní	6,73
3	13,3	2980	Adhezní	8,96
4	11,9	2980	Adhezní	10,02
5	12,8	3480	Adhezní	10,88
6	12,6	3120	Adhezní	9,90
7	10,9	1960	Adhezní	7,19
8	11,8	2500	Adhezní	8,47
9	13,1	3480	Adhezní	10,63
10	12,2	2680	Adhezní	8,79
11	13,6	1650	Adhezní	4,85
12	10,8	2260	Adhezní	8,37

13	12	3390	Adhezní	11,30
14	12,2	2290	Adhezní	7,51
15	12,1	2840	Adhezní	9,39
16	12,15	3080	Adhezní	10,14
17	12,3	2840	Adhezní	9,24
18	12,3	2940	Adhezní	9,56
19	12,3	2800	Adhezní	9,11
20	12,7	2750	Adhezní	8,66

SADA VII - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	115%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	7,475

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,3	2780	Adhezní	9,04
2	11,9	2630	Adhezní	8,84
3	12	3190	Adhezní	10,63
4	12,1	2260	Adhezní	7,47
5	12,4	3340	Adhezní	10,77
6	11,2	2750	Adhezní	9,82
7	12,4	2620	Adhezní	8,45
8	12,5	2920	Adhezní	9,34
9	12,2	2500	Adhezní	8,20
10	12,6	3160	Adhezní	10,03
11	10,4	1800	Adhezní	6,92
12	12	2800	Adhezní	9,33
13	11,8	2740	Adhezní	9,29
14	12	3020	Adhezní	10,07
15	12,9	3350	Adhezní	10,39
16	12,1	3110	Adhezní	10,28
17	11,6	2000	Adhezní	6,90
18	12	2870	Adhezní	9,57
19	12,3	2520	Adhezní	8,20
20	12	2500	Adhezní	8,33

SADA VIII - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	75%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	4,875

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	13,2	4140	Adhezní	12,55
2	13,35	4120	Adhezní	12,34
3	13	3460	Adhezní	10,65
4	13,5	4370	Adhezní	12,95
5	13,3	4550	Adhezní	13,68
6	13,6	3910	Adhezní	11,50
7	13,2	3740	Adhezní	11,33
8	13,4	4220	Adhezní	12,60
9	13,25	4550	Adhezní	13,74
10	13,1	4570	Adhezní	13,95
11	13,1	4000	Adhezní	12,21

12	13,9	4200	Adhezní	12,09
13	13,45	4100	Adhezní	12,19
14	13	4180	Adhezní	12,86
15	12,9	4080	Adhezní	12,65
16	12,15	4290	Adhezní	14,12
17	12,7	4130	Adhezní	13,01
18	12,8	4600	Adhezní	14,38
19	13,05	4580	Adhezní	14,04
20	13	4540	Adhezní	13,97

SADA IX - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství
tvrdidla
Množství pryskyřice [g]
Množství tvrdidla [g]

125%

100

8,125

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	13,4	3600	Adhezní	10,75
2	13,4	3800	Adhezní	11,34
3	12,8	4030	Adhezní	12,59
4	13,1	3710	Adhezní	11,33
5	12,9	3390	Adhezní	10,51
6	13,3	4000	Adhezní	12,03
7	13,3	3640	Adhezní	10,95
8	13,3	3210	Adhezní	9,65
9	12,9	3250	Adhezní	10,08
10	12,4	3250	Adhezní	10,48
11	13,05	3290	Adhezní	10,08
12	12,9	3180	Adhezní	9,86
13	12,3	3180	Adhezní	10,34
14	13,1	3630	Adhezní	11,08
15	13,75	3270	Adhezní	9,51
16	12,75	3460	Adhezní	10,85
17	12,25	3400	Adhezní	11,10
18	12,55	3680	Adhezní	11,73
19	12,7	3250	Adhezní	10,24
20	13	3340	Adhezní	10,28

SADA X - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství
tvrdidla
Množství pryskyřice [g]
Množství tvrdidla [g]

70%

100

4,55

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	13,8	4410	Adhezní	12,78
2	13,4	4960	Adhezní	14,81
3	13,9	4560	Adhezní	13,12
4	14,3	5550	Adhezní	15,52
5	12,9	5640	Adhezní	17,49
6	13,2	4750	Adhezní	14,39
7	13,55	4590	Adhezní	13,55
8	13,55	4920	Adhezní	14,52
9	13,3	4960	Adhezní	14,92
10	13	4370	Adhezní	13,45

11	13,4	4740	Adhezní	14,15
12	13,45	5050	Adhezní	15,02
13	13,9	5360	Adhezní	15,42
14	13,3	5090	Adhezní	15,31
15	13,8	4480	Adhezní	12,99
16	13	4540	Adhezní	13,97
17	13	4820	Adhezní	14,83
18	13,05	4760	Adhezní	14,59
19	12,4	4700	Adhezní	15,16
20	13,8	5560	Adhezní	16,12

SADA XI - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	130%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	8,45

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12	3770	Adhezní	12,57
2	12,75	3940	Adhezní	12,36
3	12,6	4130	Adhezní	13,11
4	12,4	3100	Adhezní	10,00
5	13,1	3710	Adhezní	11,33
6	13,55	4610	Adhezní	13,61
7	13,4	3520	Adhezní	10,51
8	12,2	3180	Adhezní	10,43
9	11,8	2850	Adhezní	9,66
10	12,4	3170	Adhezní	10,23
11	12,3	4050	Adhezní	13,17
12	12,55	3230	Adhezní	10,29
13	13,75	3660	Adhezní	10,65
14	12,5	2920	Adhezní	9,34
15	12,15	2930	Adhezní	9,65
16	13,1	4250	Adhezní	12,98
17	12,65	3830	Adhezní	12,11
18	13	4020	Adhezní	12,37
19	12,7	2850	Adhezní	8,98
20	13,5	3820	Adhezní	11,32

SADA XII - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	60%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	3,9

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,3	3640	Adhezní	11,84
2	12,2	3690	Adhezní	12,10
3	12,4	3500	Adhezní	11,29
4	12,9	4370	Adhezní	13,55
5	12,95	4260	Adhezní	13,16
6	12,4	3760	Adhezní	12,13
7	12,1	3750	Adhezní	12,40
8	12,4	3620	Adhezní	11,68
9	12,3	3710	Adhezní	12,07

10	13,05	4030	Adhezní	12,35
11	12,6	3450	Adhezní	10,95
12	12,65	3120	Adhezní	9,87
13	12	3640	Adhezní	12,13
14	12,65	3040	Adhezní	9,61
15	12,6	3440	Adhezní	10,92
16	12,7	3700	Adhezní	11,65
17	12,85	4090	Adhezní	12,73
18	12,05	3370	Adhezní	11,19
19	12,55	3430	Adhezní	10,93
20	12,85	4220	Adhezní	13,14

SADA XIII - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	140%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	9,1			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,2	3700	Adhezní	12,13
2	13,1	4560	Adhezní	13,92
3	13,2	4560	Adhezní	13,82
4	12,5	4920	Adhezní	15,74
5	12,85	4800	Adhezní	14,94
6	12,65	4880	Adhezní	15,43
7	12,7	3900	Adhezní	12,28
8	12,7	4340	Adhezní	13,67
9	12,2	4130	Adhezní	13,54
10	12,9	4480	Adhezní	13,89
11	12,7	4000	Adhezní	12,60
12	12,4	3300	Adhezní	10,65
13	12,2	4620	Adhezní	15,15
14	12,8	4360	Adhezní	13,63
15	12,6	4620	Adhezní	14,67
16	13	4240	Adhezní	13,05
17	12,9	4160	Adhezní	12,90
18	12,7	4620	Adhezní	14,55
19	12,6	4160	Adhezní	13,21
20	12,8	3580	Adhezní	11,19

SADA XIV - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	50%			
Množství pryskyřice [g]	100			
Množství tvrdidla [g]	3,25			
VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,5	3120	Adhezní	9,98
2	12,8	3890	a/k	12,16
3	12	4120	a/k	13,73
4	12,45	3120	Adhezní	10,02
5	12,4	3940	Adhezní	12,71
6	12,85	4030	a/k	12,54
7	13	4200	Adhezní	12,92
8	12,6	3600	a/k	11,43

9	12,3	4000	a/k	13,01
10	12,6	3700	a/k	11,75
11	12,8	3180	a/k	9,94
12	12,35	3620	a/k	11,72
13	12,5	4090	a/k	13,09
14	12,1	1480	a/k	4,89
15	12,2	2700	a/k	8,85
16	13,3	4460	a/k	13,41
17	13,2	4190	a/k	12,70
18	12,7	2930	a/k	9,23
19	13	4260	a/k	13,11
20	12,2	3170	a/k	10,39

SADA XV - PEVNOST SPOJE

Podíl předepsaného množství tvrdidla	150%
Množství pryskyřice [g]	100
Množství tvrdidla [g]	9,75

VZOREK	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení	Pevnost spoje [MPa]
1	12,75	2920	Adhezní	9,16
2	12,5	2830	Adhezní	9,06
3	13	3130	Adhezní	9,63
4	13,45	3430	Adhezní	10,20
5	12,95	3250	Adhezní	10,04
6	13,3	3240	Adhezní	9,74
7	12,2	3600	Adhezní	11,80
8	12,35	3300	Adhezní	10,69
9	12,7	2840	Adhezní	8,94
10	12,25	3040	Adhezní	9,93
11	12,6	3110	Adhezní	9,87
12	12,75	3070	Adhezní	9,63
13	13,2	2500	Adhezní	7,58
14	12,45	2720	Adhezní	8,74
15	12,9	2690	Adhezní	8,34
16	12,5	2460	Adhezní	7,87
17	12,9	3090	Adhezní	9,58
18	12,65	2960	Adhezní	9,36
19	13,7	3080	Adhezní	8,99
20	13,2	2770	Adhezní	8,39

PŘÍLOHA 2: NAMĚŘENÉ HODNOTY – DOBA ZPRACOVATELNOSTI LEPIDLA

SADA 1 – ZPRACOVATELNOST 100%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	27,5	11,95	2900	Adhezní
	28,3	12,75	3080	Adhezní
	28	12,2	3070	Adhezní
10 minut	31,8	12,75	2950	Adhezní
	31,3	12,55	2710	Adhezní
	30,7	12,3	2540	Adhezní
20 minut	34,2	12,45	2380	Adhezní
	34,2	12,15	2840	Adhezní
	35	11,95	2640	Adhezní
30 minut	37,9	12,65	2740	Adhezní
	38,5	11,9	2660	Adhezní
	38,7	12,1	2780	Adhezní
40 minut	43,2	12,4	2520	Adhezní
	42,2	12,4	2760	Adhezní
	42,9	11,8	2270	Adhezní
50 minut	43,3	11,9	1730	Adhezní
	41,9	13,8	2340	Adhezní
	42,4	13,05	2550	Adhezní
SADA 2 – ZPRACOVATELNOST 90%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	28,3	12,3	3060	Adhezní
	27,3	12,2	3070	Adhezní
	27,5	12,2	2980	Adhezní
10 minut	29,6	12,6	3200	Adhezní
	31,3	11,9	2870	Adhezní
	30	12,3	3130	Adhezní
20 minut	31,9	11,95	3020	Adhezní
	31	12,1	3030	Adhezní
	33,1	12,8	2970	Adhezní
30 minut	36,5	13,5	3240	Adhezní
	35,6	13	3110	Adhezní
	36,2	12,5	3030	Adhezní
40 minut	39,5	12,1	2950	Adhezní
	39	11,7	2580	Adhezní
	39,1	12,7	2960	Adhezní
50 minut	41,1	11,8	2480	Adhezní
	41	11,9	2570	Adhezní
	41,7	12,6	2960	Adhezní
60 minut	40,9	12,4	2520	Adhezní
	41,2	12,4	2760	Adhezní
	40,3	11,8	2270	Adhezní
70 minut	40,3	11,9	1730	Adhezní
	41,2	13,8	2340	Adhezní
	40	13,05	2350	Adhezní

SADA 3 – ZPRACOVATELNOST 110%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	28,4	12,8	2500	Adhezní
	28,3	13,2	3110	Adhezní
	28,8	13,25	3070	Adhezní
10 minut	31,1	12,6	2980	Adhezní
	30,8	12,95	3020	Adhezní
	32	11,8	3080	Adhezní
20 minut	35,2	12,2	2840	Adhezní
	34,9	12,4	2720	Adhezní
	34,3	11,1	3150	Adhezní
30 minut	40,2	12,4	2690	Adhezní
	40,5	11,8	2730	Adhezní
	40,2	12,4	2980	Adhezní
40 minut	53,3	12,9	2420	Adhezní
	54,8	13,4	2670	Adhezní
	53,9	12,7	2670	Adhezní
50 minut	56,5	14,2	1330	Adhezní
	58,3	12,6	1450	Adhezní
	57,1	13,7	1580	Adhezní

SADA 4 – ZPRACOVATELNOST 80%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	26,8	12,5	3820	Adhezní
	25,7	12	3160	Adhezní
	25,5	12,6	3620	Adhezní
10 minut	28,2	12,5	3030	Adhezní
	28,1	12,6	4340	Adhezní
	28,6	12,95	3650	Adhezní
20 minut	30	12,3	4350	Adhezní
	30,1	12,8	3770	Adhezní
	30,5	12,7	4040	Adhezní
30 minut	32,3	12,25	3600	Adhezní
	32,3	13,15	3760	Adhezní
	32	13,15	3740	Adhezní
40 minut	36,1	12,4	3590	Adhezní
	36,3	13	4000	Adhezní
	35,9	12,9	3740	Adhezní
50 minut	37,3	12,2	3700	Adhezní
	37,2	12,2	3490	Adhezní
	37,7	12,45	3250	Adhezní
60 minut	39,3	11,95	3210	Adhezní
	40,1	12,6	3360	Adhezní
	39,1	12,4	3460	Adhezní
70 minut	38,1	12,7	2670	Adhezní
	39	13	3440	Adhezní
	37,8	12,2	2830	Adhezní

80 minut	37,3	12,2	2830	Adhezní
	36,2	12,25	2840	Adhezní
	36,6	12,3	2450	Adhezní
90 minut	34,8	12,6	2480	Adhezní
	35,1	11,1	1960	Adhezní
	36	11,6	2740	Adhezní

SADA 5 – ZPRACOVATELNOST 120%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	27,3	11,7	3340	Adhezní
	26,4	12,2	3340	Adhezní
	26,1	12,1	3300	Adhezní
10 minut	29,4	13,1	2300	Adhezní
	29,3	12,8	2960	Adhezní
	29,8	12,7	2940	Adhezní
20 minut	33,3	12,9	2920	Adhezní
	34,1	12,8	3570	Adhezní
	33,1	12,7	3350	Adhezní
30 minut	39,5	12,2	2720	Adhezní
	40,3	12,8	3280	Adhezní
	40	12,8	2940	Adhezní
40 minut	52,1	10,85	3220	Adhezní
	52	13,4	2920	Adhezní
	52,7	13,05	2660	Adhezní
50 minut	93,1	12,9	1900	Adhezní
	92	13,3	1820	Adhezní
	92,7	13,4	1750	Adhezní

SADA 6 – ZPRACOVATELNOST 70%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	25,8	12,4	4520	Adhezní
	26,3	12,7	5340	Adhezní
	26,5	12,45	4200	Adhezní
10 minut	25,7	12,85	4670	Adhezní
	26,5	12,7	5010	Adhezní
	26,5	12,9	4850	Adhezní
20 minut	26,4	12,2	4160	Adhezní
	26,3	12	4340	Adhezní
	25,3	13	5170	Adhezní
30 minut	26,3	12,4	4790	Adhezní
	25,9	12,45	4140	Adhezní
	26,1	12,85	4500	Adhezní
40 minut	25,8	12,55	4370	Adhezní
	26,1	12,7	4250	Adhezní
	26,1	12,55	4600	Adhezní
50 minut	26,1	12,4	4630	Adhezní
	25,7	12,4	4590	Adhezní
	25,6	12,8	4300	Adhezní

60 minut	26,1	13	4420	Adhezní
	25,7	12,6	4100	Adhezní
	26,1	13,05	4330	Adhezní
70 minut	25,6	13	4320	Adhezní
	26	12,4	4200	Adhezní
	25,5	13	4240	Adhezní
80 minut	25,8	12,85	4000	Adhezní
	25,7	12,35	3750	Adhezní
	25,6	12,35	3630	Adhezní
90 minut	26,2	13,15	3880	Adhezní
	26,1	13,05	3590	Adhezní
	26	12,3	2750	Adhezní
100 minut	25,9	12	2760	Adhezní
	26,8	11,8	2430	Adhezní
	26,2	11,9	2500	Adhezní

SADA 7 – ZPRACOVATELNOST 130%				
Čas lepení	Průměrná teplota lepidla [°C]	Délka přeplátování [mm]	Zatěžovací síla [N]	Typ porušení
0 minut	26,9	12,9	3780	Adhezní
	26,1	12,95	3550	Adhezní
	28,3	12,05	3540	Adhezní
10 minut	28,9	11,85	2820	Adhezní
	28,3	12,75	3450	Adhezní
	27,7	12,85	3700	Adhezní
20 minut	28	11,7	3270	Adhezní
	29,8	12	3130	Adhezní
	28,8	12	3230	Adhezní
30 minut	28,8	12,65	3480	Adhezní
	30,7	12,35	3400	Adhezní
	29,3	12,65	3370	Adhezní
40 minut	31,1	12,75	3110	Adhezní
	32	12,55	3140	Adhezní
	30,8	12,6	3400	Adhezní
50 minut	31	12	3130	Adhezní
	30,1	12,8	3040	Adhezní
	30,7	12,7	3360	Adhezní
60 minut	31,6	12,6	3000	Adhezní
	30,3	12,45	2900	Adhezní
	31,7	12,8	3160	Adhezní
70 minut	31,5	11,65	2840	Adhezní
	30,5	12,35	3000	Adhezní
	31,3	12,4	2920	Adhezní
80 minut	29,9	12,9	2700	Adhezní
	30,9	12,1	2460	Adhezní
	30,7	12,5	2690	Adhezní
90 minut	29,6	12,2	2180	Adhezní
	30,5	12,7	1960	Adhezní
	30,2	12,2	2340	Adhezní

PŘÍLOHA 3: NAMĚŘENÉ HODNOTY – ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA

SADA I - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,5	2,5	2,5	37,63
2	2,7	2,6	2,65	33,42
3	2,7	2,7	2,7	32,17
4	2,8	2,9	2,85	28,81
5	2,6	2,8	2,7	32,17
6	2,7	2,8	2,75	30,99
SADA II - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,7	2,5	2,6	34,74
2	2,5	2,6	2,55	36,14
3	2,7	2,4	2,55	36,14
4	2,9	2,9	2,9	27,80
5	2,9	2,8	2,85	28,81
6	2,7	2,8	2,75	30,99
SADA III - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,7	2,8	2,75	30,99
2	2,7	2,6	2,65	33,42
3	2,8	2,8	2,8	29,87
4	2,9	2,8	2,85	28,81
5	2,9	2,8	2,85	28,81
6	2,9	2,9	2,9	27,80
SADA IV - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1		2,8	2,75	30,99
2	2,7	2,6	2,65	33,42
3	2,8	2,8	2,8	29,87
4	2,9	2,8	2,85	28,81
5	2,9	2,8	2,85	28,81
6	2,9	2,9	2,9	27,80
SADA V - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,8	2,8	2,8	29,87
2	2,8	2,8	2,8	29,87
3	2,7	2,8	2,75	30,99
4	2,8	2,8	2,8	29,87
5	2,7	2,8	2,75	30,99
6	2,7	2,7	2,7	32,17

SADA VI - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,5	2,7	2,6	34,74
2	2,7	2,8	2,75	30,99
3	2,8	2,8	2,8	29,87
4	2,7	2,6	2,65	33,42
5	2,7	2,5	2,6	34,74
6	2,7	2,5	2,6	34,74
SADA VII - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,7	2,9	2,8	29,87
2	2,7	2,8	2,75	30,99
3	2,7	2,8	2,75	30,99
4	2,5	2,5	2,5	37,63
5	2,7	2,8	2,75	30,99
6	2,6	2,7	2,65	33,42
SADA VIII - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	3	2,8	2,9	27,80
2	2,9	3	2,95	26,85
3	3,1	3	3,05	25,07
4	3,1	3	3,05	25,07
5	3	3,1	3,05	25,07
6	3,1	3,2	3,15	23,47
SADA IX - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,8	2,7	2,75	30,99
2	2,7	2,8	2,75	30,99
3	2,75	2,8	2,775	30,42
4	2,7	2,85	2,775	30,42
5	2,75	2,8	2,775	30,42
6	2,8	2,8	2,8	29,87
SADA X - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	3,1	3,2	3,15	23,47
2	3,2	3,3	3,25	22,01
3	3,1	3,3	3,2	22,72
4	3,4	3,3	3,35	20,68
5	3,3	3,25	3,275	21,66
6	3,4	3,45	3,425	19,75

SADA XI - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,7	2,7	2,7	32,17
2	2,65	2,8	2,725	31,57
3	2,65	2,8	2,725	31,57
4	2,7	2,9	2,8	29,87
5	2,7	2,85	2,775	30,42
6	2,7	2,7	2,7	32,17
SADA XII - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	6,1	6,15	6,13	5,70
2	5,8	5,95	5,88	6,26
3	5,9	6	5,95	6,09
4	5,8	5,9	5,85	6,32
5	5,4	5,75	5,58	7,04
6	5,7	5,7	5,70	6,70
SADA XIII - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,55	2,6	2,58	35,43
2	2,5	2,75	2,63	34,07
3	2,5	2,55	2,53	36,87
4	2,5	2,55	2,53	36,87
5	2,6	2,7	2,65	33,42
6	2,5	2,65	2,58	35,43
SADA XIV - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	5,7	5,9	5,80	6,44
2	6,5	6,3	6,40	5,16
3	6,3	6	6,15	5,65
4	5,85	6	5,93	6,14
5	5,9	5,95	5,93	6,14
6	6,3	6,2	6,25	5,45
SADA XV - TVRDOST PODLE BRINELLA				
Číslo vtisku	průměr vtisku d_1 [mm]	průměr vtisku d_2 [mm]	Střední průměr vtisku [mm]	Tvrdość [-]
1	2,65	2,7	2,68	32,79
2	2,7	2,8	2,75	30,99
3	2,75	2,8	2,78	30,42
4	2,7	2,75	2,73	31,57
5	2,6	2,6	2,60	34,74
6	2,7	2,65	2,68	32,79

PŘÍLOHA 4: NAMĚŘENÉ HODNOTY – ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE SHORE

SADA I - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	84,1
2	88,6
3	88,2
4	84,2
5	82,5
6	87,6
7	88,4
8	83,5
9	84,7
10	85,1
11	89,1
12	87,5
13	88,9
14	88,3
15	88,1
16	84,8
17	84,8
18	83,1
19	84,9
20	81,1

SADA III - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	87,8
2	86,6
3	88,4
4	88,3
5	87
6	88,8
7	87,1
8	88
9	83,1
10	86,7
11	84
12	88,2
13	88,6
14	87,8
15	88,2
16	88,3
17	88,2
18	88,1
19	83,5
20	84,7

SADA II - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	90,4
2	85,1
3	84,6
4	76,7
5	90,3
6	91,8
7	88,6
8	82
9	88,9
10	87,4
11	80,3
12	84,5
13	86,9
14	79,4
15	87,4
16	85,6
17	87,2
18	88
19	88,9
20	87,3

SADA IV - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	88,8
2	89,2
3	84
4	87,7
5	88,2
6	88,7
7	88,9
8	88
9	87,8
10	89
11	88,4
12	87,8
13	87,3
14	88,6
15	87,7
16	89,2
17	88,9
18	88,3
19	86,4
20	88,9

SADA V - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	84,3
2	86,7
3	86,8
4	89,6
5	90,1
6	87,2
7	87,1
8	89,1
9	88,9
10	88,8
11	89,5
12	86,1
13	88,5
14	90,5
15	89,1
16	87,5
17	87,1
18	84,5
19	88,9
20	87,2

SADA VII - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	90
2	89,6
3	89,7
4	88,9
5	88,8
6	90,1
7	86,4
8	88,3
9	89
10	88,5
11	88,1
12	88,7
13	87,9
14	88,8
15	87,7
16	89,4
17	89,4
18	88,9
19	88,3
20	87,5

SADA VI - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	85,3
2	87,9
3	87,9
4	84,6
5	86,8
6	89,4
7	90,1
8	87,9
9	85,5
10	89,2
11	90,9
12	87,7
13	89,3
14	90,4
15	90,6
16	89,9
17	86,7
18	88,9
19	89,9
20	87

SADA VIII - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	87,8
2	87,8
3	86,9
4	86
5	86,8
6	82,8
7	85,7
8	86,5
9	88
10	86,8
11	86,4
12	87,8
13	87
14	84,3
15	88
16	87,9
17	87,3
18	88
19	87,6
20	88,1

SADA IX - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	87,3
2	88,4
3	89,7
4	87,9
5	83,2
6	85,5
7	82,8
8	87,9
9	87,3
10	85,3
11	88,4
12	86,6
13	86,1
14	87,8
15	88
16	88,6
17	86,2
18	85,2
19	88,3
20	83,1

SADA XI - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	90,1
2	89,4
3	89,7
4	90,2
5	88
6	89,1
7	88,7
8	90
9	87,3
10	88,1
11	88,6
12	90,7
13	89,4
14	88,5
15	88,3
16	86,3
17	87,4
18	87,2
19	88,2
20	88,4

SADA X - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	80,8
2	82,3
3	86,1
4	83,9
5	85,4
6	84,9
7	86,3
8	86,3
9	85,3
10	81,4
11	82,8
12	85,3
13	84,5
14	85,2
15	87,7
16	87,3
17	85,2
18	87,5
19	85,9
20	85,8

SADA XII - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	74,4
2	74,8
3	75,1
4	74,8
5	75,7
6	72
7	72,9
8	72,3
9	72
10	73,1
11	71,5
12	75,5
13	74
14	72,7
15	75,6
16	72,5
17	72,6
18	72,5
19	73,9
20	70,3

SADA XIII - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	90
2	86,9
3	88,6
4	87,5
5	87,9
6	90,3
7	88,9
8	87,4
9	86,9
10	88,5
11	87,8
12	89,1
13	89,4
14	88
15	87,6
16	85,8
17	87,6
18	87,5
19	87,7
20	86,8

SADA XIV - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	75,9
2	75,7
3	75,8
4	75,8
5	76
6	75,8
7	73,7
8	72,9
9	76
10	76,2
11	75
12	78
13	77,2
14	74,2
15	80,4
16	78,7
17	77,3
18	78,5
19	79,1
20	73,6

SADA XV - TVRDOST PODLE SHORE	
Číslo měření	Tvrdość [Shore D]
1	86,5
2	89,9
3	89,3
4	84,8
5	89,2
6	88,2
7	89,2
8	87,7
9	88,7
10	86,4
11	87,5
12	87,8
13	85,7
14	87,8
15	85,7
16	86,1
17	85,2
18	87,4
19	87,1
20	88

PŘÍLOHA 5: NAMĚŘENÉ HODNOTY - STATICKÁ ZKOUŠKA V TAHU

Číslo vzorku	Podíl předepsaného množství tvrdidla [%]	Množství tvrdidla [g]	Síla potřebná k přetržení [N]	Tloušťka zkušebního tělesa [mm]	Šířka zkušebního tělesa [mm]	Tahové napětí [MPa]	Jmenovité prodloužení [%]
1	50	3,25	168,15	2,64	9,41	6,7686	59,38
			199,60	2,69	9,51	7,8023	63,69
2	60	3,9	180,50	2,61	9,32	7,4202	42,67
			233,95	2,82	9,55	8,6870	48,42
3	70	4,55	575,35	2,82	9,55	21,363	6,65
			508,35	2,71	9,56	19,621	7
4	80	5,2	955,45	2,53	9,37	40,303	5,72
			997,85	2,66	9,48	39,570	5,8
5	90	5,85	582,55	2,69	9,5	22,795	1,51
			548,75	2,62	9,49	22,070	1,44
6	100	6,5	599,15	2,36	9,46	26,836	1,68
			643,70	2,48	9,35	27,760	1,74
7	110	7,15	622,70	2,42	9,56	26,915	1,64
			673,75	2,53	9,40	28,330	1,85
8	120	7,8	832,00	2,08	9,32	42,918	4,21
			955,45	2,52	9,35	40,550	4,84
9	130	8,45	1050,45	2,66	9,37	42,145	4,87
			1031,85	2,65	9,38	41,511	4,08
10	140	9,1	980,35	2,33	9,30	45,242	4,76
			896,75	2,17	9,31	44,387	5,02
11	150	9,75	1001,40	2,38	9,37	44,904	5,22
			1044,05	2,01	9,36	55,494	5,01

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY - DRSNOST POVRCHU A TLOUŠŤKA VRSTVY LEPIDLA

Číslo měření	Drsnost [μm]
1	1,62
2	2,48
3	1,91
4	2,12
5	2,17
6	2
7	2,41
8	2,21

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [mm]
1	0,1035
2	0,0993
3	0,0993
4	0,0937
5	0,1035
6	0,0979
7	0,1035
8	0,1007
9	0,1133