

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Technologie lepení pro extrémní klimatické podmínky

Diplomová práce

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

Autor: Bc. Pavel Mejstřík

© 2013 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Mejstřík Pavel

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Technologie lepení pro extrémní klimatické podmínky

Anglický název

Adhesive bonding technology for extreme climate conditions

Cíle práce

Shromáždit literární podklady zaměřené na problematiku technologie lepení v extrémních klimatických podmínkách a analyzování možností a omezení. Výzkum vlivu okolních klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepeného spoje.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Osnova práce

1. Úvod.
2. Cíl práce a metodika.
3. Technologické faktory, možnosti aplikace lepených spojů.
4. Analýza klimatických podmínek v jednotlivých prostředích.
5. Výzkum vlivu extrémních klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepených spojů.
6. Závěr.
7. Seznam literatury.

Rozsah textové části

cca 60 stran

Klíčová slova

extrémní klimatické podmínky, mechanické vlastnosti, technologie lepení

Doporučené zdroje informací

- ADAMS, R. D., COMYN, J., WAKE, W. C.: Structural adhesive joints in engineering. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 376 s.
- 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 trnlení v dílně i v domácnosti. Praha: Grada Publishing, 2000. 104 s.
- POŠTA, J., VESELÝ, P., DVORÁK, M.: Degradace strojních součástí. [monografie]. Praha: ČZU v Praze, 2002. 67 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 10.2.2012

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Technologie lepení pro extrémní klimatické podmínky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 6. 4. 2013



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Miroslavovi Müllerovi Ph.D. za jeho ochotu, odborné vedení a rady při zpracování diplomové práce.

Technologie lepení pro extrémní klimatické podmínky

Adhesive bonding technology for extreme climate conditions

Souhrn

Tato diplomová práce se zabývá tematikou technologie lepení v extrémních klimatických podmínkách. Jsou zde shrnuty postupy v přípravě a konstrukci spojů, jejich výhody a nevýhody, základní rozdělení, porovnání s jinými metodami, využití v praxi a analýza klimatických podmínek na mechanické vlastnosti spojů.

V praktické části je provedena zkouška pevnosti ve smyku při tahovém namáhání zkušebních vzorků. Tyto vzorky byly slepeny různými druhy lepidel, které byly před aplikací vystaveny působení extrémních teplot.

Poté byly jednotlivé výsledky pevností porovnány mezi sebou a vytvořen závěr měření.

Summary

This thesis is focused on the technology of adhesive in extreme conditions. In the theoretical part are described procedures of the preparation and construction of joints, their advantages and disadvantages, basic distribution, comparison with the other methods, their using in practice and analysis of climatic conditions on mechanical properties on the joint.

In the practical part it was realized a shear strength test during strain test of samples. These samples were glued by different types of adhesives, which were subjected to extreme temperatures before application.

After that the results were compared among each other and the conclusion of experiment was written.

Klíčová slova: extrémní klimatické podmínky, mechanické vlastnosti, technologie lepení, technologické faktory, aplikace lepených spojů.

Keywords: extreme climatic conditions, mechanical properties, bonding technology, technological factors, application of bonded joints.

Obsah

1	ÚVOD.....	- 1 -
2	CÍL PRÁCE A METODIKA	- 2 -
2.1	CÍL PRÁCE	- 2 -
2.2	METODIKA	- 2 -
2.2.1	<i>Použité normy</i>	<i>- 2 -</i>
2.2.2	<i>Použitá lepidla</i>	<i>- 6 -</i>
2.2.3	<i>Použité přístroje</i>	<i>- 10 -</i>
2.2.4	<i>Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku pevnosti ve smyku.....</i>	<i>- 13 -</i>
2.2.5	<i>Příprava lepidel a jejich aplikace</i>	<i>- 14 -</i>
2.2.6	<i>Měření pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465.....</i>	<i>- 17 -</i>
2.2.7	<i>Stanovení porušení spoje dle ČSN ISO 10365.....</i>	<i>- 20 -</i>
2.2.8	<i>Analýza naměřených hodnot a interpretace</i>	<i>- 20 -</i>
3	TECHNOLOGICKÉ FAKTORY, MOŽNOSTI APLIKACE LEPENÝCH SPOJŮ	- 21 -
3.1	ZÁKLADNÍ POJMY TECHNOLOGIE LEPENÍ	- 21 -
3.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP LEPENÍ.....	- 22 -
3.2.1	<i>Volba lepidla.....</i>	<i>- 23 -</i>
3.2.2	<i>Úprava spojovaného materiálu</i>	<i>- 23 -</i>
3.2.3	<i>Příprava lepidla.....</i>	<i>- 23 -</i>
3.2.4	<i>Nanášení lepidla.....</i>	<i>- 24 -</i>
3.2.5	<i>Doba otevřeného a uzavřeného sestavení.....</i>	<i>- 26 -</i>
3.2.6	<i>Montáž spoje</i>	<i>- 27 -</i>
3.3	LEPIDLO A JEHO SLOŽENÍ.....	- 27 -
3.4	ROZDĚLENÍ LEPIDEL	- 28 -
3.4.1	<i>Rozdělení dle původu (chemického složení)</i>	<i>- 28 -</i>
3.4.2	<i>Rozdělení dle fyzikálního stavu.....</i>	<i>- 29 -</i>
3.4.3	<i>Rozdělení dle teploty vytvrzující reakce.....</i>	<i>- 29 -</i>
3.4.4	<i>Rozdělení dle principu tuhnutí.....</i>	<i>- 30 -</i>
3.5	KONSTRUKCE LEPENÝCH SPOJŮ	- 31 -
3.5.1	<i>Konstrukce pro lepení rovinných ploch</i>	<i>- 32 -</i>
3.5.2	<i>Konstrukce pro lepení trubek.....</i>	<i>- 35 -</i>
3.5.3	<i>Konstrukce pro lepení koutových spojů</i>	<i>- 35 -</i>
3.6	VÝHODY A NEVÝHODY LEPENÝCH SPOJŮ	- 36 -
3.6.1	<i>Výhody technologie lepení</i>	<i>- 36 -</i>
3.6.2	<i>Nevýhody technologie lepení</i>	<i>- 36 -</i>
3.7	POROVNÁNÍ TECHNOLOGIE LEPENÍ S KLASICKÝMI TECHNOLOGIEMI SPOJOVÁNÍ MATERIÁLU.....	- 37 -
3.8	POUŽITÍ V PRAXI	- 39 -
3.8.1	<i>Použití v automobilovém průmyslu</i>	<i>- 39 -</i>
3.8.2	<i>Použití v leteckém průmyslu a v kosmické technice</i>	<i>- 41 -</i>
3.8.3	<i>Použití v dřevařském a nábytkářském průmyslu</i>	<i>- 43 -</i>
3.8.4	<i>Použití ve stavebním průmyslu</i>	<i>- 43 -</i>

4 ANALÝZA KLIMATICKÝCH PODMÍNEK V JEDNOTLIVÝCH PROSTŘEDÍCH.....	- 44 -
4.1 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI VLIVU ZVÝŠENÉ A SNÍŽENÉ TEPLoty	- 45 -
4.1.1 <i>Teplota prostředí, která působí na lepený spoj během jeho životnosti</i>	- 45 -
4.1.2 <i>Teplota, při které lepidlo vytvrzuje</i>	- 45 -
4.1.3 <i>Teplota prostředí, která působí na tuby s lepidly před procesem lepení</i>	- 46 -
4.2 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI VODĚ A VLHKOSTI.....	- 46 -
4.3 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI SLUNEČNÍMU ZÁŘENÍ	- 47 -
4.4 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI KYSLÍKU	- 47 -
4.5 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI PŮSOBENÉ OZONU	- 48 -
4.6 ODOLNOST LEPENÉHO SPOJE VŮČI BIOLOGICKÝM ČINITELŮM	- 48 -
4.7 ZKOUŠKY ODOLNOSTI STÁRNUTÍ LEPENÝCH SPOJŮ	- 48 -
5 VÝZKUM VLIVU EXTRÉMních KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI LEPENÝCH SPOJŮ	- 50 -
5.1 VÝSLEDKY ZKOUŠEK	- 50 -
5.1.1 <i>Výsledky měření 1. série (23 °C)</i>	- 50 -
5.1.2 <i>Výsledky měření 2. série (6 °C)</i>	- 51 -
5.1.3 <i>Výsledky měření 3. série (-18 °C)</i>	- 52 -
5.1.4 <i>Výsledky měření 4. série (60 °C)</i>	- 54 -
5.1.5 <i>Výsledky měření 5. série (100 °C)</i>	- 56 -
5.1.6 <i>Výsledky měření 6. série (140 °C)</i>	- 57 -
5.1.7 <i>Vliv techniky nánosu lepidla na pevnost a porušení spoje</i>	- 59 -
5.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	- 62 -
6 ZÁVĚR	- 66 -
7 SEZNAM LITERATURY	- 67 -
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK.....	- 69 -
SEZNAM OBRÁZKŮ	- 69 -
SEZNAM TABULEK	- 70 -
PŘÍLOHY.....	I
PŘÍLOHA 1: TABULKY NAMĚŘENÝCH TEPLot LEPIDEL.....	I
PŘÍLOHA 2: TABULKY NAMĚŘENÝCH PEVNOSTÍ VE SMYKU	III
PŘÍLOHA 3: OBRAZOVÁ ANALÝZA TLOUŠTKY LEPENÉHO SPOJE	XI
PŘÍLOHA 4: NAMĚŘENÉ DRSNOSTI POVRCHU ADHERENDU.....	XII

1 Úvod

Technologie lepení byla využívána již v době kamenné, kdy se používalo březové smoly k výrobě věder, lepení harpun nebo hrotů šípů. První archeologické nálezy se známkami lepení jsou zaznamenány v době Babylónu. Tato technika byla prokázána na nálezech sošek s očima zalepenýma do hlavy. V době Římské říše se lepení aplikovalo k výrobě nábytku a k těsnění lodí. Lodě byly těsněny dřevěnými klíny pomocí včelího vosku či dehtu.

Koncem 17. století vznikaly v Holandsku plantáže, které zajišťovaly suroviny pro výrobu klihu. První patent na výrobu lepidla byl udělen roku 1814 v Americe. Jedním z hlavních mezníků vývoje lepidla je polovina 19. století – objev nitrace celulosy. Roku 1872 vznikla první továrna na celuloid. Do konce 19. století byla technologie lepení používána zejména ve výrobě překližek a v obuvnictví.

Dalším důležitým mezníkem byl objev fenolformaldehydové pryskyřice, modifikované polyvinylformalem, která byla známa pod jménem Redux. Umožnila tak roku 1943 sériovou výrobu letounu DH - 103 Hornet ve Velké Británii. Kolem roku 1960 nastává situace, kdy přecházejí prakticky všichni hlavní výrobci letounů k masovému využití techniky lepení v tomto průmyslu.

Dnes je technologie lepení jednou z primárních technologií spojování kovů, plastů a kombinovaných materiálů takřka ve všech průmyslových odvětvích. Jedním z důležitých parametrů této technologie je její efektivnost a ekonomičnost, díky čemuž se stále rozvíjí.

Vlastní diplomová práce se věnuje tématice technologie lepení, jejím technologickým faktorům a využití v extrémních klimatických podmínkách. Hlavním záměrem této práce bylo zjistit, jaký vliv má na pevnost lepeného spoje teplota prostředí, která působí před aplikací na obaly s vybranými druhy lepidel

Výsledkem této práce je jak teoretický rozbor technologických faktorů lepení, jejich použití v praxi a analýza klimatických podmínek prostředí, tak praktické měření prováděné v prostorách laboratoří Technické fakulty ČZU.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je analýza vlivu klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepeného spoje.

Pro dodržení hlavního cíle práce jsou stanoveny následující dílčí cíle:

1. Analýza odborných zdrojů a získání potřebných znalostí a informací pro vypracování vlastní praktické části.
2. Samotný výzkum vlivu okolních klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepeného spoje.
3. Zjištění hodnot pevnosti ve smyku v závislosti na okolní teplotě a vzájemné porovnání těchto hodnot mezi sebou.

Na základě vyhodnocení výzkumu vlivu klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepeného spoje budou provedeny závěry.

2.2 Metodika

Při zpracování teoretické části diplomové práce budou použity především sekundární zdroje dat a to zejména studium odborné literatury a internetových zdrojů.

Hlavním zdrojem pro zpracování praktické části budou data primární, která budou získána vlastním měřením pevnosti ve smyku při tahovém namáhání spoje za působení různých teplot na obaly (tuby) s lepidly.

Měření bude realizováno v laboratořích Technické fakulty ČZU, konkrétně katedry materiálu a strojírenské technologie.

2.2.1 Použité normy

K získání informací o vlastnostech lepeného spoje jako jsou pevnost a mechanické vlastnosti, provádíme zkoušky lepených spojů. Tyto vlastnosti závisí zejména na typu konstrukce, tvaru spoje a materiálu, z kterého se skládají spoje. Zkoušky jsou děleny na destruktivní a nedestruktivní. [2]

Abychom mohli vlastnosti zkoumaných materiálů vzájemně porovnávat, musí být zkušební postupy a podmínky jednotné. K zaručení shodných podmínek a postupů zkoušek slouží normy. [2]

V této diplomové práci byly použity následující normy:

- ČSN EN 1465 - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav,
- ČSN ISO 10365 - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje.

Norma ČSN EN 1465 (Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav)

Tato norma definuje metodu stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Zkouška se provádí na standardních zkušebních tělesech za předepsaných podmínek přípravy a zkoušení. [28]

Pevnost přeplátovaného spoje ve smyku se stanoví smykovým namáháním jednoduchého přeplátovaného spoje mezi tuhými adherendy, které jsou namáhány tahovou silou. Tato síla působí rovnoběžně s plochou lepeného spoje a hlavní osou zkušebního tělesa. Výsledkem zkoušky je síla nebo napětí zjištěné při destrukci spoje. [28]

Požadavky na zkušební zařízení:

- doba odezvy přístroje musí být natolik krátká, aby neovlivnila přesnost měřené síly v momentu porušení spoje,
- zkušební zařízení musí vyvíjet rovnoměrně stoupající tahovou sílu,
- musí být vybaveno vhodnou dvojicí samo vyrovnávacích čelistí pro upevnění vzorku,
- čelisti musí být konstruovány tak, aby byly souosé se vzorkem od okamžiku, kdy začne působit tahová síla,
- zaznamenaná síla se nesmí lišit od doopravdy vynaložené o více než 1 %. [28]

Zkušební tělesa

Pokud není uvedeno jinak, zkušební tělesa musí vyhovovat tvarem, rozměry a uspořádáním obrázku 1. [28]

Doporučená délka přeplátování je $12,5 \pm 0,25$ mm. Aby se dosáhlo optimálního slepení adherendů, musí být povrch budoucího spoje náležitě upraven. Lepidlo se musí nanést a vytvrdit dle pokynů výrobce. Pokud takové doporučení není k dispozici, postupuje se tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího spojení adherendů s minimálními odchylkami. [28]

Pro zajištění požadovaného přeplátování se doporučuje použití speciálního přípravku, který udává šířku lepeného spoje. [28]

Zvláštní péče musí být věnována přípravě jednotlivých těles. Je nutné, aby byla při nánosu zajištěna konstantní tloušťka lepidla. Typická tloušťka spoje by měla být 0,2 mm. Tloušťka se stanoví vložením distančních drátků nebo malých skleněných kuliček na lepenou plochu. Při použití distančních drátků je nutné, aby se drátky položily rovnoběžně se směrem zatížení a to kvůli minimalizaci působení drátků na spoj. [28]

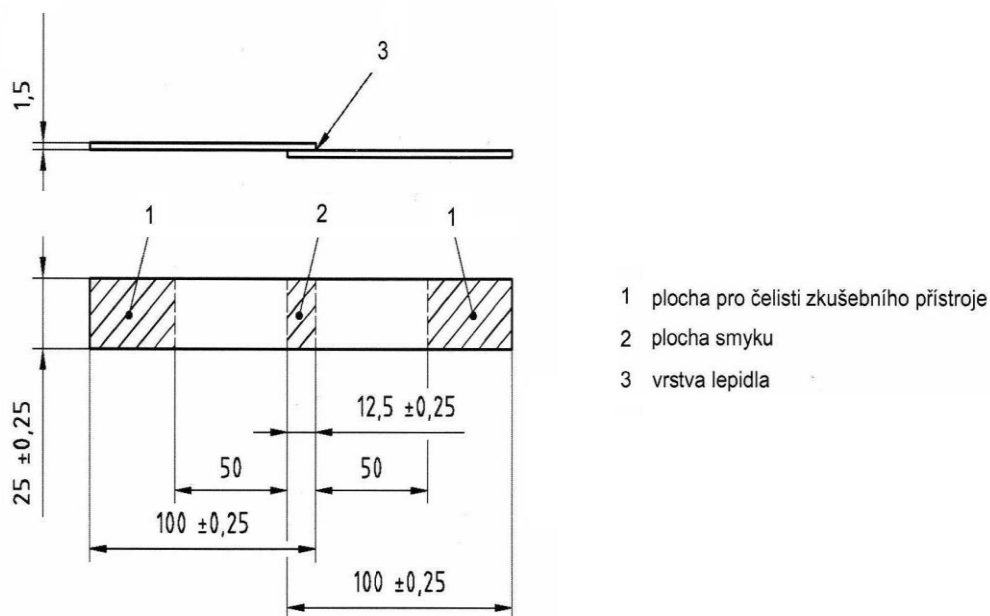
Počet zkušebních vzorků záleží na požadované přesnosti, neměl by ovšem klesnout pod pět. [28]

Postup zkoušky

Zkušební těleso se usadí symetricky do čelistí zkušebního zařízení, kdy vzdálenost každé čelisti od bližšího konce přeplátování je 50 ± 1 mm. Při aplikaci vyrovnávacích podložek v čelistech je zaručeno, že působící tahová síla je v rovině lepeného spoje. [28]

Stroj se uvede do chodu tak, aby se napětí nebo deformace v lepeném spoji zvyšovaly stálou rychlostí. Tato rychlost musí být zvolena tak, aby k destrukci lepeného spoje došlo za 65 ± 20 s. Zaznamenaná se nejvyšší síla v průběhu trhání a uvede se jako síla potřebná k destrukci příslušného lepeného spoje. [28]

Obr. 1 Tvary a rozměry zkušebních vzorků dle ČSN EN 1465



Zdroj: [28]

Vyjádření výsledků

Výsledky zkoušek všech platných zkušebních těles jsou vyjádřeny jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při destrukci v newtonech nebo jako napětí při destrukci v megapascalch. [28]

Norma ČSN ISO 10365 (Označení typu porušení lepených spojů)

Typ poškození lepeného spoje se vyhodnocuje dle normy ČSN ISO 10365. Tato norma stanovuje hlavní typy porušení lepeného spoje (viz Obr. 2). Lze použít pro všechny mechanické zkoušky lepených spojů bez ohledu na vlastnosti adherendů a lepidla. [27]

Označování typu porušení lepeného spoje se používá při hodnocení typu porušení za účelem lepšího posouzení výsledku mechanické zkoušky adheze lepeného spoje. [27]

- Adhezní lom (AF) – lepidlo se oddělí od lepeného povrchu.
- Kohezní lom (CF) – trhlina vede materiálem lepidla. Adheze lepidla k lepenému povrchu je větší než koheze lepidla.
- Adhezně kohezní lom (ACF) – kombinace adhezního a kohezního lomu. Uvádí se procentuální podíl jednotlivých typů porušení. [22]

Obr. 2 Základní typy porušení lepeného spoje



Zdroj: [27]

2.2.2 Použitá lepidla

Předmětem zkoumání byla dvě epoxidová lepidla od japonského výrobce Alteco (Alteco 3 – Ton Epoxy Steel, Alteco 3 – Ton Quick Epoxy), jedno epoxidové lepidlo od výrobce KM plus (Epoxidová pryskyřice 1200/371) a jedno sekundové lepidlo s názvem Novax od společnosti Novato.

Pro zjednodušení budou zkoumaná lepidla dále označována zkratkami:

- NOSE – Novax,
- A30 – Alteco 3 – Ton Epoxy Steel,
- A4 – Alteco 3 – Ton Quick Epoxy,
- EP12 – Epoxidová pryskyřice 1200/371.

NOVAX – sekundové lepidlo

Sekundové lepidlo NOSE je produktem české společnosti Novato s.r.o, která je výhradně zaměřená na výrobky pro opravárenství a údržbu.

Novax je kontaktní, jednosložkové, nízkoviskózní sekundové lepidlo na bázi ethylkyanoakrylátu. [20]

Toto bezbarvé lepidlo (viz Obr. 3) poskytuje extrémně dobré spoje téměř všech materiálů jako jsou kovové látky, kámen porcelán, keramika, kůže, dřevo, přírodní a syntetický kaučuk či různé druhy plastických hmot. [20]

Slepené adherendy se mohou téměř ihned opracovávat. Lepidlo tvrdne pod lehkým tlakem slepovaných dílů. Spoje vytvořené tímto lepidlem jsou zvláště odolné vůči povětrnostním vlivům a širokým škálám chemikálií. Dle typu materiálu je manipulační pevnost spoje zajištěna již během několika sekund. Úplné vytvrzení lepidla nastane přibližně za 6 hodin. [20]

Epoxidová pryskyřice 1200/371

Epoxidová pryskyřice 1200/371 od výrobce KM plus (viz Obr. 4) je určena k lepení a opravě výrobků z kovů, dřeva, hliníku, keramiky, betonu, porcelánu, skla či laminátu.

Před nanesením lepidla musí dojít k dokonalému promísení pryskyřice 1200 a tvrdidla P11 v poměru 100:6,5. [10]

Technické údaje:

- *Odstín:* žlutohnědá.
- *Zpracovatelnost:* 30 min.
- *Míchací poměr (pryskyřice:tvrdidlo):* 100:6,5.
- *Optimální tloušťka nánosu:* 0,1 mm.
- *Funkční pevnost:* 48 hod.
- *Tepelná odolnost:* -20 °C do 120 °C.
- *Pracovní teplota:* 15 °C až 20 °C.
- *Výrobce:* Česká republika – společnost KM plus. [10]

Obr. 3 Sekundové lepidlo NOVAX



Zdroj: [20]

Obr. 4 Epoxidová pryskyřice 1200/371



Zdroj: Autor

Alteco 3 – Ton Quick Epoxy

Alteco 3 – Ton Quick Epoxy (viz Obr. 5 vpravo) je dvousložkové epoxidové lepidlo s obsahem ocelového plnidla pro hobby a řemesla. [24]

Je určeno pro rychlé lepení a tmelení součástek z oceli, litiny, mosazi, dřeva, dřevotřísky, tvrdých plastů, laminátů, betonu, keramiky, skla aj., a to jak mezi sebou, tak i navzájem. Není vhodné pro lepení textilu, teflonu a silikonu. [24]

Mezi hlavní přednosti použití tohoto lepidla patří zejména vytvoření spoje s vysokou smykovou pevností a dobrou odolností vůči vodě a chemickým látkám. [24]

Technické údaje:

- *Vzhled:* šedá pasta.
- *Zpracovatelnost:* 4 min.
- *Míchací poměr (lepidlo:tvrdidlo):* 1:1.
- *Smyková pevnost v tahu:* min. 130 MPa.
- *Manipulační pevnost:* 20 min.
- *Funkční pevnost:* 8 hod.
- *Tepelná odolnost:* -20 °C do +120 °C.
- *Pracovní teplota:* 10 °C až 20 °C.
- *Tvrdost (Shore-D):* 80.
- *Výrobce:* Japonsko – společnost Alteco. [24]

Alteco 3 – Ton Epoxy Steel

Alteco 3 – Ton Epoxy Steel (viz Obr. 5 vlevo) je dvousložkové velmi pevné epoxidové lepidlo s obsahem ocelového plnidla pro opravy, lepení a lepicí svařování za studena. [26]

Je vhodný pro lepení kovů, dřeva, dřevotřísky, laminátů, tvrdých plastů, keramiky, porcelánu, skla, betonu, kamene, gumy, polystyrenu atd. Naopak jeho použití není příliš vhodné pro lepení textilu, papíru, teflonu a silikonu. V praxi se s ním můžeme setkat při opravě aut, strojů, chladičů, náradí a topných těles atd. [26]

Technické údaje:

- *Vzhled:* šedá pasta.
- *Zpracovatelnost:* 30 min.
- *Míchací poměr (lepidlo:tvrdidlo):* 1:1.
- *Smyková pevnost v tahu:* min. 13 MPa.
- *Manipulační pevnost:* 90 min.
- *Funkční pevnost:* 14 hod.
- *Tepelná odolnost:* –20 °C do 120 °C.
- *Pracovní teplota:* 10 °C až 20 °C.
- *Tvrdość (Shore-D):* 80.
- *Výrobce:* Japonsko – společnost Alteco. [26]

Obr. 5 Lepidla Alteco 3 - Ton



Zdroj: [24, 26]

2.2.3 Použité přístroje

K vykonání experimentální části této práce bylo zapotřebí využití několika různých přístrojů, pomocí kterých bylo dosaženo měřených výsledků, které byly dále zpracovány. Mezi tyto přístroje patřily například univerzální trhací stroj ZDM 5t, tryskací kabina ITB 65, Infra-teploměr Testo 845, horkovzdušná sušárna KBC G-100/250 atd.

Univerzální zkušební stroj ZDM 5t

Pro zjištění smykové pevnosti v tahu zkoumaných vzorků bylo využito univerzálního trhacího stroje ZDM 5t (viz Obr. 6). Tento stroj je vybaven výměnnými čelistmi pro jednotlivé zkoušky.

Technické údaje:

- *Použitelné zatížení:* 10 kN, 25 kN, 50 kN.
- *Záznam grafu:* mechanický na papír.
- *Pohyb:* pomocí trapézového šroubu.
- *Výrobce:* Německo.

Obr. 6 Univerzální zkušební stroj ZDM 5t



Zdroj: Autor

Tryskací kabina ITB 65

Tryskací kabina ITB 65 (viz Obr. 7) je vybavena kompresorem, který slouží jako zdroj výroby tlakového vzduchu pro vrhání tryskacího prostředku na otryskávané díly. Po dopadu na otryskávaný předmět se abrazivum odrazí a dopadá na dno kabiny, odkud je opět přisáváno do pistole. Režim pracovního cyklu je kontinuální (trvalý). [25]

Tato kabina je primárně určena a vybavena pro injektorové obslužné tryskání vhodné zejména pro drobnou řemeslnou a uměleckou potřebu s možností doplnění o některé příslušenství, např. cyklón, nebo přístavný odsavač. [25]

Technické údaje:

- *Typ: injektorový.*
- *Běžný pracovní tlak: 2,5 – 7,5 bar.*
- *Účinnost tryskání: vysoká.*
- *Rozměr vnitřní pracovní skříně kabiny: 650 x 500 x 500 mm.*
- *Ovládání: nožním pedálem.*
- *Regulace vstupního tlaku a množství abraziva k ústí pistole: Ano. [25]*

Obr. 7 Tryskací kabina ITB 65



Zdroj: Autor

Infra-teploměr Testo 845

Infra-teploměr Testo 845 (viz Obr. 8) slouží pro bezdotykové měření teploty s možností přepínání optiky pro velkou a malou vzdálenost od měřené plochy. Lze měřit povrchovou teplotu plochy o průměru až 1 mm a to i při velké vzdálenosti od měřeného pole je garantována malá snímaná plocha. [21]

Technické údaje:

- *Měřicí rozsah vlhkosti:* 0 – 100 % rv s přesností 2 %.
- *Měřicí rozsah teploty:* -30 až +950 °C s přesností 0,75 °C.
- *Doba odezvy:* 0,25 s.
- *Optika:* 75:1 / 70:1.
- *Rozměry teploměru:* 155 x 58 x 195 mm. [21]

Obr. 8 Infra- teploměr TESTO 845



Zdroj: [21]

Další použité přístroje

- Horkovzdušná sušárna *KBC G-100/250* s přirozeným prouděním vzduchu.
- Posuvné měřítko (rozsah 0 – 150 mm, odpočet 0,02 mm).
- Třmenový mikrometr.
- Stereoskopický mikroskop.
- Kontrolní digitální váha Ohaus C1 501.

2.2.4 Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku pevnosti ve smyku

Zkoušky byly uskutečňovány na vzorcích, které byly vytvořeny z oceli S235J0 (ČSN 11 373). Výchozím polotovarem pro přípravu ocelových vzorků byla tabule plechu o tloušťce 1,5 mm, ze které byla následně nastříhána zkušební tělíska. Tato tělíska byla nastříhána v požadované velikosti dle normy ČSN EN 1465 (délka $100 \pm 0,25$ mm, šířka $25 \pm 0,25$ mm).

Povrch tělísek byl v místě budoucího spoje upraven abrazivem F 80 (velikost zrn) tak, aby byl zbaven oxidace a bylo dosaženo co nejlepších podmínek pro zhotovení spoje. Tato povrchová úprava adherendu byla doporučena školitelem na základě předchozích zkušeností katedry a vhodnosti použití pro používané druhy lepidel.

Drsnost povrchu adherendu po tryskání byla zjištěna měřením na mikroskopu, kdy tato hodnota činila $Ra 2,11 \pm 0,26$ μm , tj. odchylka 12,1 %. Tryskání bylo prováděno za pomoci tryskací kabiny ITB 65 (viz Obr. 9).

Obr. 9 Tryskání



Zdroj: Autor

Po mechanické úpravě drsnosti povrchu adherendů bylo nutné před aplikací lepidla zkušební tělíska odmastit a očistit pomocí štětce acetonem P6401 tak, aby byly odstraněny všechny částice a vrstvy, které nejsou pevně spojeny s povrchem. Poté byla tělíska otírána bavlněným hadříkem, který byl lehce namočený v přípravku.

Již upravená a očištěná zkušební tělíska byla rozmístěna na připravený papír s narýsovaným ohraničeným pruhem o šířce $12,5 \pm 0,25$ mm, který udává překrytí dvou zkušebních tělísek při lepení – plochu spoje (viz Obr. 10). Tato velikost přelepu je pevně dána normou ČSN EN 1465.

Při lepení adherendů je důležité dodržet vzájemnou rovnost. Tato rovnost je zajištěna připravenými plechy o tloušťce lepeného adherendu, kterými jsou při kompletaci podložena vrchní zkušební tělíska.

Tělíska byla dále označena zkratkami podle druhu použitého lepidla a číslem série, kdy celkový počet sérií byl roven počtu prostředních ovlivňujících obaly lepidel (šest sérií). Každá série pak obsahovala po slepení 40 zkušebních vzorků (4 druhy lepidel po deseti vzorcích).

Obr. 10 Rozmístění zkušebních tělísek před lepením



Zdroj: Autor

2.2.5 Příprava lepidel a jejich aplikace

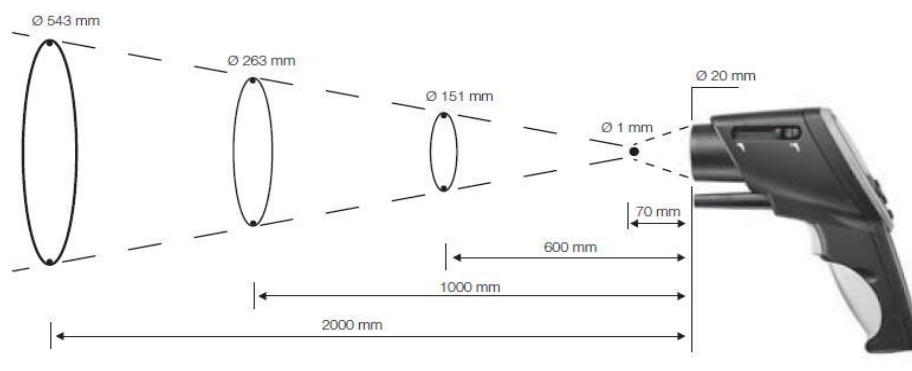
Před samotným procesem lepení byly obaly lepidel vystaveny působení různých teplot v širokém intervalu. Experiment se prováděl pro teploty -18 °C, 6 °C, 23 °C, 60 °C, 100 °C a 140 °C, kdy každé lepidlo bylo v tomto prostředí umístěno 24 hodin. Jako etalon

posloužily hodnoty spojů, které byly vytvořeny za působení teploty 23 °C na obal s lepidlem.

Po vyjmutí lepidla z daného prostředí byly změřeny teploty jednotlivých lepidel pomocí bezdotykového infra-teploměru Testo 845 (viz Obr. 11). Toto měření se provádělo opakovaně vícekrát pro každé lepidlo, aby byly vyloučeny případné chyby měření. K dalšímu měření teplot docházelo těsně před aplikací lepidla na zkušební tělíska.

Naměřené teploty různých druhů lepidel u stejné série (teploty prostředí) se mohou lišit, což může být zapříčiněno odlišnými typy obalů (tub), objemem lepidla či jeho složením.

Obr. 11 Princip měření teploty teploměrem Testo 845



Zdroj: [21]

Lepení všech zkušebních vzorků bylo provedeno za stejných podmínek, kdy vytvrzení lepených spojů probíhalo při laboratorní teplotě (23 °C). Postup lepení a míchací poměry (lepidlo + tvrdidlo) byly dodrženy přesně podle návodu z příbalového letáku. Pro přesné odměření předepsaného poměru mezi lepidlem a tvrdidlem byla použita kontrolní váha Ohaus CI 501 (viz Obr. 12).

Obr. 12 Kontrolní váha Ohaus CI 501



Zdroj: [23]

Lepidla byla nanášena plastovými špachtlemi vždy jen na jedno zkušební tělísko o ploše spoje 25 x 12,5 mm (viz Obr. 13). Při nánosu je nezbytné, aby se lepidlo nanaslo na celou plochu budoucího spoje v dostatečné vrstvě tak, aby se předešlo výskytu vzduchových bublin v lepeném spoji. V tomto případě je vždy lepší, když je lepidla nanaseno více a potom je vytlačeno ven, než aby ho tam bylo málo.

Obr. 13 Plastová špachtle

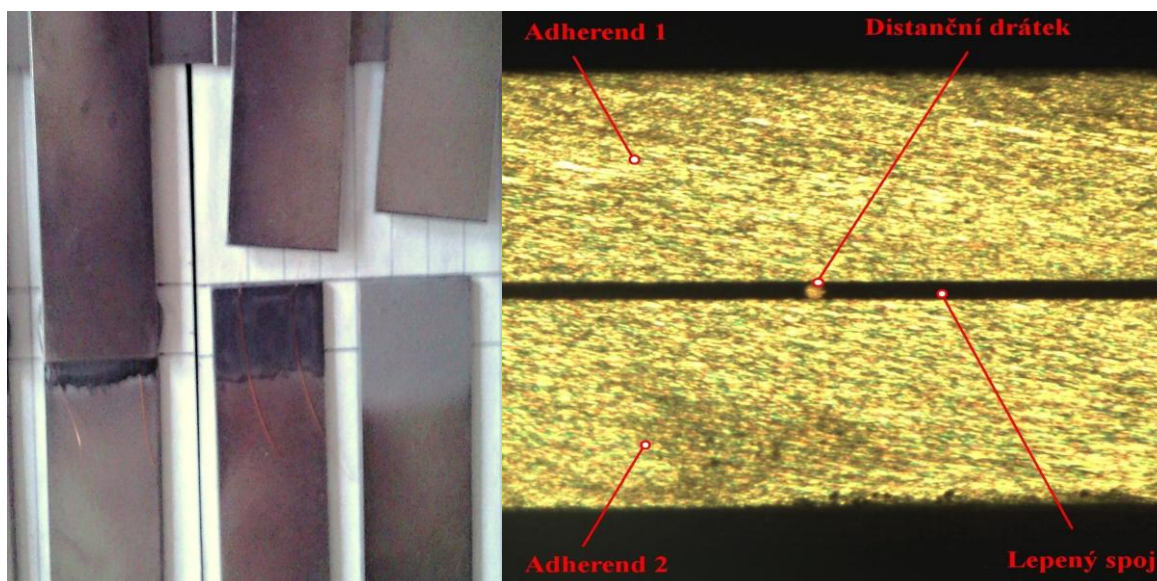


Zdroj: Autor

Tloušťka vrstvy lepidla byla dána distančními drátky o průměru 0,10 mm, které se vždy v páru umístily před spojením tělísek do naneseného lepidla (viz Obr. 14). Průměr distančního drátku byl změřen třmenovým mikrometrem.

Reálná tloušťka lepeného spoje byla ověřena měřením na mikroskopu, kdy jeho průměrná hodnota činila 0,10 s odchylkou 5,03 %.

Obr. 14 Kompletace zkušebních vzorků a jeho mikroskopický řez

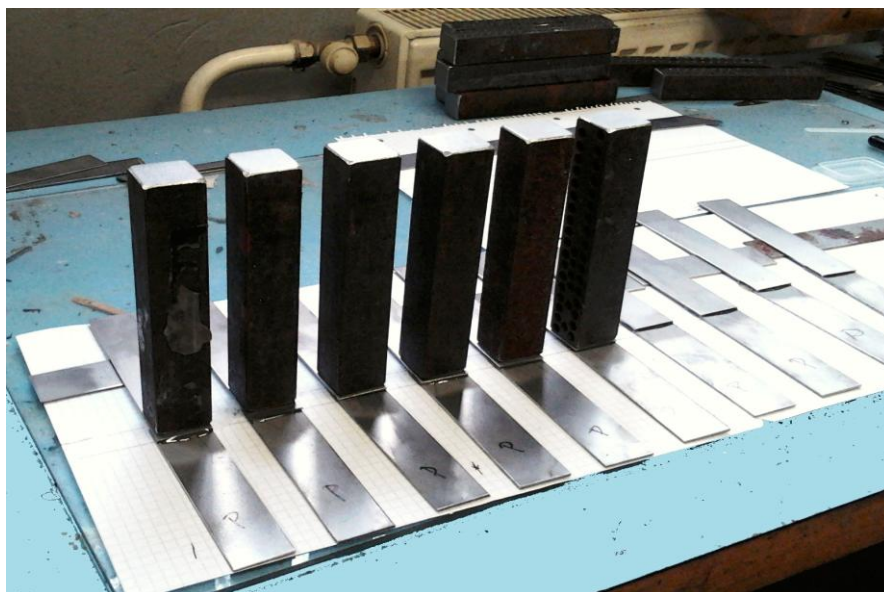


Zdroj: Autor

Po slepení zkušebních tělísek byly vzorky rovnoměrně zatíženy a fixovány ocelovými hranoly (viz Obr. 15) po dobu dvou dnů, kdy již všechna lepidla dosáhla úplného vytvrdnutí. Hmotnost hranolů byla naměřena 603 ± 1 g.

Rovnoměrné zatížení vzorků je důležité jak k optimálnímu rozložení vrstvy lepidla, tak k odstranění možných vzduchových bublin, které negativně působí na celkovou pevnost spoje.

Obr. 15 Fixace a zatížení lepených spojů



Zdroj: Autor

2.2.6 Měření pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465

Zkouška pevnosti byla provedena dle normy ČSN EN 1465 – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav.

Všechny slepené vzorky byly po jednom upnuty symetricky do plochých rovnoběžných čelistí univerzálního zkušebního stroje ZDM 5t (viz Obr. 16), kdy vzdálenost každé čelisti od bližšího konce přeplátování byla 50 ± 1 mm. Poté byly vzorky zatěžovány ve smyku při tahovém namáhání, dokud nedošlo k přetržení lepeného spoje. Aby se zamezilo sklouznutí vzorků v čelistech, bylo do nich vkládáno smirkové plátno z důvodu zvýšení tření.

Rozsah zkušebního stroje je od 0 do 50 000 N dle použitého závaží. V tomto případě plně vyhovovalo závaží s označením A, které vymezuje rozsah stupnice od 0 do 10 000 N. Jeden díl stupnice při tomto rozsahu je 20 N. Posuv příčnicku při zkoušce činil 6 mm/min.

Obr. 16 Čelisti univerzálního zkušebního stroje ZDM 5t



Zdroj: Autor

Výsledkem zkoušky je síla zjištěná při přetržení spoje. Naměřené hodnoty mezní síly F_m byly zapsány do tabulek a seřazeny podle druhu lepidla a teploty prostředí, kde byla lepidla umístěna.

Z naměřených hodnot byla dále vypočtena smyková pevnost v tahu, aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. K výpočtu smykové pevnosti v tahu bylo však zapotřebí stanovit plochu přelepu. Tato plocha se zjistila změřením spoje po destrukci vzorku pomocí posuvného měřítka.

Během vyhodnocování naměřených dat byly použity následující vztahy:

Stanovení smykové pevnosti v tahu:

$$\tau = \frac{F_m}{b \cdot l_u} \quad (1)$$

kde τ - smyková pevnost v tahu [MPa],

F_m - maximální síla [N],

b - šířka přelátování lepeného spoje [mm],

l_u - délka přelátování lepeného spoje [mm].

Aritmetický průměr:

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

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

x_i – soubor vypočtených hodnot smykového napětí [MPa],

n - počet naměřených výsledků.

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

kde s – směrodatná odchylka [MPa],

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

x_i – soubor vypočtených hodnot smykového napětí [MPa],

n - počet naměřených výsledků.

Variační koeficient

$$V = s / \bar{x} \cdot 100 \quad (4)$$

kde V – variační koeficient [%],

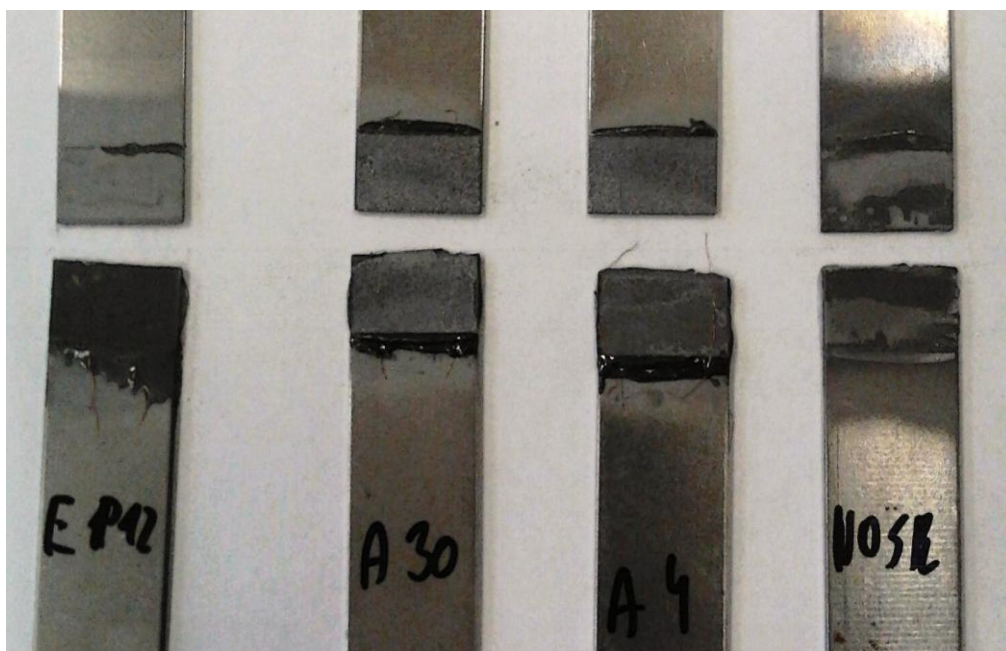
\bar{x} – aritmetický průměr smykového napětí [MPa],

s – směrodatná odchylka [MPa].

2.2.7 Stanovení porušení spoje dle ČSN ISO 10365

Po vykonané zkoušce pevnosti ve smyku následovalo zhodnocení typu porušení zkušebního vzorku podle normy ČSN ISO 10 365. Vyhodnocení probíhalo vizuálně subjektivním posouzením dle charakteru destrukce lepeného spoje (Obr. 17).

Obr. 17 Posouzení porušení spoje



Zdroj: Autor

2.2.8 Analýza naměřených hodnot a interpretace

Naměřené a následně vypočtené hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Exel 2007, ze kterého byl vygenerován graf k vyhodnocení experimentu a určení závěru této diplomové práce. Výsledky jsou prezentovány v grafické formě a doplněny slovním komentářem.

3 Technologické faktory, možnosti aplikace lepených spojů

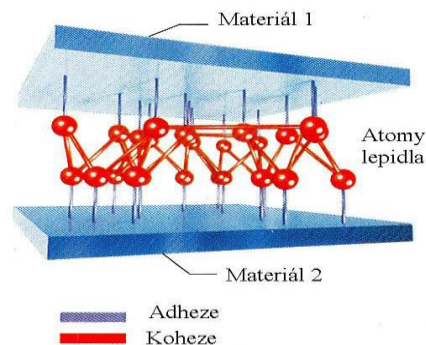
Jednou z progresivních metod spojování materiálu je právě technologie lepení. Spojování materiálu pomocí této metody lze charakterizovat jako technologický proces, při kterém vzniká nerozebíratelné spojení dvou stejných či odlišných materiálů za použití zvoleného lepidla. Tato technologie spojování je vhodná jak pro spojování kovů, tak i plastů, skla, pryže atd. [19]

3.1 Základní pojmy technologie lepení

Celková pevnost a jakost lepeného spoje je závislá zejména na činitelích adheze a koheze (viz Obr. 18). Dalším důležitým parametrem, který je zkoumán pro vytvoření co nejlepšího spoje, je tzv. smáčivost. [22]

- **Adherend** je každý materiál, na který se nanáší lepidlo (adhezivo) a utváří s jiným nebo stejným materiálem spoj působením adheze. [2]
- **Adheze** (přilnavost): „*Vzájemné přitahování dvou povrchů adhezivními silami. Adheze souvisí s molekulovou strukturou lepidla. Je výsledkem působení fyzikálních sil, mezimolekulárních a chemických vazeb.*“ [22]
- **Koheze** (někdy též vnitřní adheze): Pevnost lepeného spoje není závislá jen na dokonalé přilnavosti lepidla na povrch lepeného materiálu, ale i na dobré vnitřní soudržnosti molekul lepidla, která se v praxi nazývá koheze. Kohezi lze definovat jako vnitřní adheze. Velikost koheze udává tzv. kohezní energii, což je velikost energie přebrané k odtržení jedné částičky od ostatních. [1]

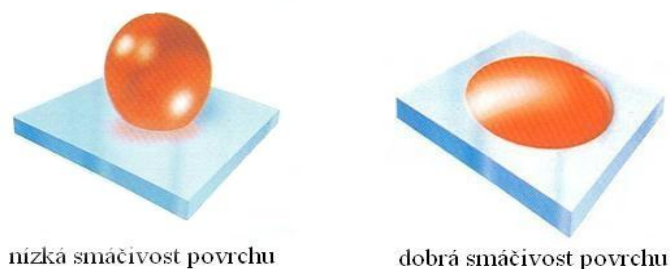
Obr. 18 Adheze a koheze



Zdroj: [11]

- **Smáčivost:** Určení smáčivosti adherendu lepidlem je velice důležitý faktor pro přípravu materiálu před samotným lepením, ten lze snadno zjistit použitím tzv. kapkové zkoušky (viz Obr. 19). Smáčivost nám charakterizuje povrchové napětí lepidla. Pokud je jeho hodnota vyšší než u povrchu lepeného materiálu, pak se lepidlo neudrží na lepeném materiálu. Naopak, pokud je hodnota nižší, tak se lepidlo udrží na povrchu materiálu a jsou vytvořeny dobré podmínky pro vytvoření kvalitního spoje. [22]

Obr. 19 Kapková metoda k určení vhodnosti lepidla



Zdroj: [11]

- **Pevnost** je často jediný údaj, který je uveden v dokumentaci malospotřebitelského balení lepidel. Je to souhrnné vyjádření vlastností adherendů, koheze a adheze, tedy pevnosti lepeného spoje. [5]

3.2 Technologický postup lepení

Technologický postup výroby lepeného spoje je v podstatě vždy stejný a dělí se na tyto fáze:

1. Volba lepidla.
2. Úprava spojovaného materiálu.
3. Příprava lepidla.
4. Nanášení lepidla.
5. Doba otevřeného a uzavřeného sestavení.
6. Montáž spoje. [22]

3.2.1 Volba lepidla

Jednou z hlavních a prvotních úloh konstruktéra u technologie lepení je samotný výběr co nejvhodnějšího lepidla pro spojení daných materiálů, či naopak pro určitý typ lepidla najít vhodný druh aplikace. Kromě toho musí zohlednit všechny další aspekty této technologie jako jsou: oblast použití, technologická hlediska a ekonomická hlediska. [22]

- **Oblast použití** – vnitřní nebo venkovní expozice a z toho plynoucí nároky na tepelnou odolnost, vodovzdornost, odolnost vůči povětrnostním vlivům atd.
- **Technologická hlediska** – použitý tlak, lepení za studena, lepení za tepla, barva lepidla, velikost nánosu, teplota a lisovací doba při samotném lepení atd.
- **Ekonomická hlediska** – cena lepidla, náklady přímo spojené s přípravou a zpracováním lepidla, možnost nastavování levnými plnivými a nastavovadly. [1]

3.2.2 Úprava spojovaného materiálu

Záměrem úpravy povrchu materiálu před lepením je dosažení co největší adheze, která je závislá na úrovni smáčivosti materiálu lepidlem. Vytvořením vysoké smáčivosti vznikají co nejlepší podmínky pro dotyk lepidla s povrchem materiálu a utváří se předpoklady pro vznik adhezivních vazeb. S rostoucí velikostí plochy lepeného spoje, která se podílí na vytváření těchto vazeb, je počet vazeb větší a tím je vyšší pevnost spoje. U úpravy povrchu materiálu je velmi důležité, aby na povrchu nezůstali žádné látky, mastnoty, vrstvy či různé nerovnosti, které by mohli snížit přilnutí lepicí vrstvy a tím ohrozili pevnost spoje. [2]

Základní úpravy povrchu k dosažení optimálních vlastností materiálů můžeme rozdělit na fyzikální a chemické. Mezi fyzikální úpravy patří broušení, tryskání, kartáčování atd. Do chemických metod řadíme moření, fosfátování, odrezování, odmašťování v lázních atd. [2]

3.2.3 Příprava lepidla

Některé druhy lepidel se dodávají již hotová k použití, a tudíž nevyžadují pro aplikaci další úpravy. Mezi taková lepidla můžeme řadit disperzní, tavná lepidla nebo lepicí folie. Většina lepidel však vyžaduje před použitím přípravu tzv. úpravu lepicí směsi a to například přidáváním tvrdidel, plnidel, nastavovadel a jiných přísad. Proces úpravy lepicí směsi musí být přesně dodržován a kontrolován. Jednotlivé složky směsi musí být přesně

odměřené a navážené. Pro koncentraci či rozpouštění lepidel se používají různé typy rozpouštědel a ředidel. Ty jsou zpravidla doporučovány výrobcem lepidel. [1]

3.2.4 Nanášení lepidla

Předpokladem vytvoření kvalitního a soudržného spoje je správné nanášení lepidla na materiál, který má přiměřeně tlustý film lepidla ve spáře. [4]

Optimální adhezivní podmínky u většiny lepidel nastávají, neklesne-li tloušťka ztuhlého filmu lepidla ve spáře pod spodní limit 0,05 mm a nepřekročí-li horní limit tloušťky filmu 0,25 mm. Pokud tloušťka filmu překračuje uvedené rozměry, dochází zpravidla k výraznému snížení pevnosti spoje. [4]

Požadovanou tloušťku vrstvy lepidla lze dosáhnout vhodným tlakem, plnidly s velikostí zrna odpovídající tloušťce vrstvy lepidla, vkládáním distančních drátků, nebo skleněných kuliček mezi spojované plochy. [8]

Pro nános lepidla máme v praxi dvě varianty, a to nános jednostranný či oboustranný. Oboustranný nános lepidla se aplikuje zejména u lepidel disperzních a rozpouštědlových. První nános lepidla se zásadně provádí na povrch, který je méně porézní. Jednostranný nános lepidla se obvykle používá při práci s lepidly reaktivního typu (dvousložkový) a při zpracování tavných lepidel. [4]

Způsoby nanášení můžeme z hlediska jejich kategorizace rozdělit na čtyři základní skupiny:

1. Ruční nanášení

- **Štětce.** U tohoto způsobu lepení je vyžadován štětec s jemnými a tužšími štětinami, tak aby při nanášení lepidla vznikla tenká vrstva, a aby se lepidlo nanásl přesně na lepenou plochu. [2]
- **Tyčinky** jsou určeny zejména na jednorázové použití. Používají se pro nanášení lepidla na malé plochy nebo do dutin. [2]
- **Stěrky** (špachtle) jsou o různých velikostech a bývají vyráběny z plechu, plastu nebo tvrdé gummy. Tuhost stěrky umožňuje nános vysokoviskózních tmelů či past. [2]

- **Tuby** jsou obaly lepidel upravené pro vhodné nanášení lepidla na lepenou plochu. Při použití různých nástavců se dají použít pro nanášení malých lepených ploch, dutin či různých tvarových ploch. [2]

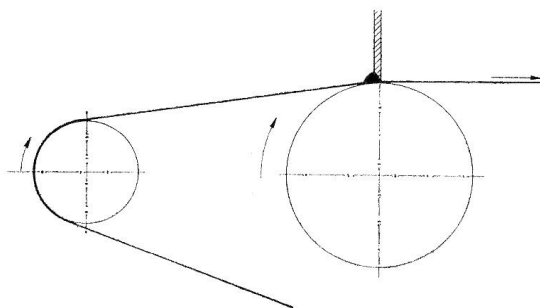
2. Nanášení pomocí přípravků

- **Injekční stříkačky** jsou často určeny k nanášení velmi dobře tekutých a rozpustných lepidel. Použití stříkačky je výhodné zpravidla při nanášení lepidla do nepřístupných spojů a prostorů. Další velkou výhodou injekčních stříkaček je přesně dávkování lepidla. [2]
- **Vytlačovací pistole** pracují na obdobném principu jako injekční stříkačky. Tyto pistole jsou vybaveny pružinovým zařízením či zařízením na stlačený vzduch, aby mohly vytlačovat i husté tmely. Koncovka pistole bývá opatřena nástavci různých tvarů, kterými se lepidlo nanáší na lepenou plochu. [2]
- **Ruční válcové natěrače** jsou konstruovány na podobném principu jako malířské natírací válce. Skládají se ze zásobovací vaničky opatřené rukojetí, soustavou vlhčících válců a posledního nanášecího válce. [2]

3. Nanášení pomocí velmi výkonných zařízení

- **Válcové zařízení se stíracím nožem.** Skládá se z několika po sobě jdoucích válců, které posouvají pásový materiál pod stírací nůž (viz Obr. 20). Štěrbina mezi nožem a materiálem určuje tloušťku nanášené lepící vrstvy. Tento princip nanášení lepidla se v praxi objevuje při lepení fólií, textilních materiálů či papíru. [2]

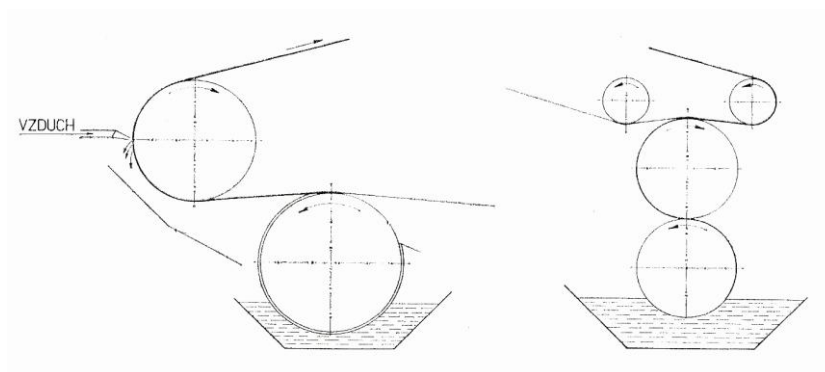
Obr. 20 Princip válcového nanášecího zařízení se stíracím nožem



Zdroj: [2]

- **Válcové zařízení s natíracím válcem** se podobá ručním nanášecím zařízením. Tloušťka lepicí vrstvy je ovlivněna otáčkami válců a tlakem natírajícího válce na lepený materiál. Tento způsob nanášení lepidla je velice výkonný, ale je vhodný jen pro pružné materiály (viz Obr. 21 vpravo). [2]
- **Válcové zařízení se vzdušným nožem.** Princip tohoto zařízení je patrný z obrázku Obr. 14 vlevo. Proudem vzduchu je ovlivňována tloušťka lepidla. [2]

Obr. 21 Princip válcového nanášecího zařízení se vzduchovým stíracím nožem (vlevo) a natíracím válcem (vpravo)



Zdroj: [2]

4. Způsoby nanášení lepidla za tepla

Některé druhy lepidel tvoří lepicí vrstvu až po roztavení. Jsou to tzv. tavná lepidla. Tato lepidla se většinou dodávají v pevné či práškové formě. Mnohé z těchto technik vycházejí z technologie povrchových úprav. Nanášení lepidla můžeme dosáhnout například pomocí natavování či žárovým stříkáním. [2]

3.2.5 Doba otevřeného a uzavřeného sestavení

Dobou otevřeného sestavení spoje je časový interval, který začíná momentem nanesení tekutého lepidla a končí po přiložení druhé lepené plochy, tj. uzavření spoje. Délka tohoto intervalu je podmíněna druhem lepidla, jeho reaktivitou, tloušťkou nanesené vrstvy lepidla, teplotou prostředí atd. Doba otevřeného sestavení spoje nesmí překročit hranici pracovní životnosti lepidla. [5]

V časovém intervalu od okamžiku spojení lepených dílů, do okamžiku zavedení tlaku do lepeného souboru, probíhá tzv. doba uzavření sestavení spoje. V praxi se snažíme, aby tato

doba byla co nejkratší, tak aby lepidlo nezačalo vytvrzovat ještě před vyvozením tlaku na lepený soubor. Tento interval se pohybuje v řádech několika sekund u kyanoakrylátkových („vteřinových“) lepidel do několika desítek minut u standardních dvousložkových epoxidových lepidel. [5]

3.2.6 Montáž spoje

Důležitou operací před vyvozením tlaku na spoj je zajištění vzájemné polohy neboli fixace. Fixace je nutná z důvodu, že mnoho lepidel v první fázi tuhnutí nejprve řídne, takže dílce nezajištěné proti posunu mohou snadno změnit polohu. K nežádoucímu posunu lepených součástí může též dojít až po zavedení tlaku nebo po nárůstu teploty. [4]

Proti posunutí se lepené díly zajišťují k sobě pomocí vhodných přípravků (utažením mezi svorníky, zachycením lepicí páskou, podepřením atd.) a to pod předepsaným tlakem, dokud nedojde k vytvoření adhezního spojení. Fixace je ponechána až do úplného vytvrzení lepidla. Doba tvrzení je u každého druhu lepidla různá, může to být pár minut, ale i několik dní. [22]

Správně zvoleným tlakem lze docílit jak stejnoměrného rozvržení lepidla ve spáře, tak i vyrovnání menších nerovností, které by mohly bránit v souběžnosti spojovaných ploch. Tlak musí působit zásadně kolmo na lepené plochy. Mírné přetékaní lepidla po celém obvodu spáry je signálem, že lepidlo bylo rozvrstveno stejnosměrně a správně po celé ploše spoje. [4]

3.3 Lepidlo a jeho složení

Lepidlo je médium, které je schopné spojovat povrchy tuhých látek (adherentů) jednak přílnavostí, (adhezi) adheziva k adherentu, jednak soudržností (kohezi) samotného adheziva. Nejsou to většinou jednoduché látky, ale složité polymerní směsi více složek, které dodávají lepidlu důležité vlastnosti. Těchto složek je celá řada, ale praxe ukazuje, že je nejvýhodnější považovat lepidlo za systém složený z pěti komponentů: [2, 14]

- **Adhezivní základ** (pojivo) je látka, která má dodat lepidlu a zhotovenému spoji určité požadované vlastnosti, jako je pevnost a odolnost. Aby lepidlo splňovalo svoji funkci v daném spoji, musí mít jeho adhezivní základ rozpustnost, chemickou a tepelnou odolnost, chemickou strukturu, molekulovou hmotnost atd. [2]

- **Nosné médium** (nosič) může být jak rozpouštědlo, tak folie, papír, textilie či vláknitá rohož. Úlohou rozpouštědla u kapalných lepidel je zabezpečit určitou konzistenci, viskozitu a možnost nanášení rovnoměrné vrstvy. Obdobnou úlohu jako u rozpouštědel musí zajistit i tuhé rovinné nosiče. [2]
- **Katalyzátory a tvrdidla** nemusí být obsažena v každém lepidle. Cílem obou složek je zabezpečit vytvrzující reakci. [2]
- **Urychlovače, inhibitory, retardéry** jsou láky, které kontrolují vytvrzující reakci. Jsou obsaženy jak v jednosložkových lepidlech, tak i ve vícesložkových reaktivních lepidlech. Urychlovač zrychluje vytvrzovací reakci vyvolanou katalyzátorem, naopak inhibitor ji zpomaluje nebo úplně zastavuje. Retardér zajišťuje uložení lepidla v připraveném stavu až do chvíle, kdy je nutné, aby reakce proběhla. [2]
- **Modifikátory** (modifikační přísady) jsou přísady, které jsou přidávány do adhezivních směsí. Tyto přísady mění technologické vlastnosti, použití nebo výsledné vlastnosti spoje. Jsou to různé stabilizátory, pigmenty, plniva, nastavovadla, ředidla, změkčovadla, barviva atd. Modifikátory jsou často používány i z ekonomického hlediska, kdy se přidávají za účelem snížit cenu lepidla. [2]

3.4 Rozdělení lepidel

Klasifikace lepidel je složitý problém, který lze zpracovat z nejrůznějších hledisek, někdy až do takových detailů, že se stává nesrozumitelná. Lepidla tak můžeme dělit dle původu, fyzikálního stavu, teploty při zpracování, principu tuhnutí lepeného spoje atd. [3, 6]

3.4.1 Rozdělení dle původu (chemického složení)

Jako nejobecnější základ pro klasifikaci lepidel je bráno dělení dle chemického složení. Podle chemického složení členíme lepidla na přírodní a syntetická. *Přírodní* dále dělíme na anorganická (mouky, škroby, přírodní kaučuk, přírodní pryskyřice aj.) a organická (klihy glutinové, rybí, kaseinové aj.). *Syntetická lepidla* lze rozdělit na lepidla termoreaktivní, termoplastická a polysyntetická. [22]

Termoreaktivní lepidla se vyznačují tím, že se vytvrzují teplem. Zahřátím dochází k chemické reakci, při níž vznikne makromolekulární látka, která má jednotlivé řetězce makromolekul prostorově svázané. Tato lepidla ztvrdnou a jsou nerozpustná. [6]

U termoplastických lepidel na rozdíl od termoreaktivních nedochází působením tepla k chemické reakci, nýbrž jen ke změně fyzikálních vlastností. Zahřátím termoplasty změknou a stávají se tvárnými. [6]

3.4.2 Rozdělení dle fyzikálního stavu

Způsob použití lepidla, konkrétně jeho nanášení, velmi často závisí na formě nebo fyzikálním stavu lepidla. V praxi rozlišujeme lepidla tekutá, prášková, pastová, pěnová, filmy a lepicí pásy (viz Tab. 1). Lepicí pásy a filmy sice nejsou lepidly v pravém smyslu slova, bývají však často používaným spojovacím prostředkem, který spojuje materiály vrstvou lepidla. [6]

Tab. 1 Klasifikace lepidel dle fyzikální formy

Fyzikální stav lepidla	Výhody	Poznámky
<i>Kapaliny</i>	Lehké nanášení, jednoduchá kontrola a úprava viskozity, široký výběr prostředků.	Nejběžnější forma lepidla, jedná se o roztoky či disperzní lepidla.
<i>Prášky</i>	Téměř neomezená skladovatelnost, nanášení přímo či z roztoku.	Vyžadují dokonalé smísení, potřebují vyšší teploty vytvrzování.
<i>Pasty</i>	Poměrně dlouhá skladovatelnost, kratší čas sušení.	Často reaktivní typy.
<i>Tmely</i>	Jednoduché nanášení, spojení prakticky bez tlaku, nízké nároky na pevnost, nestékají.	Prakticky nejde o adhezivní spojování, adhezivní vlastnosti se vyžadují jen kvůli těsnosti.
<i>Filmy, lepicí pásy</i>	Rychlá použitelnost, čistá práce a prostředí, rovnoměrná tloušťka.	Použití je omezené jen na rovné plochy.

Zdroj: [2]

3.4.3 Rozdělení dle teploty vytvrzující reakce

Dle teploty vytvrzující reakce lze lepidla členit na ty, co tuhnou za studena nebo za tepla. Za studena lepidla vytvrdnou díky chemické reakci a to při „pokojové“ teplotě (cca 20 °C), kdy doba tvrzení může trvat od pár vteřin až po několik dní. Lepidla, která tuhnou za tepla, vytvrzují při teplotě 21 až 144 °C. Zpracovatelná lepidla nad 144 °C jsou tzv. horká. [8]

3.4.4 Rozdělení dle principu tuhnutí

Podle principu tuhnutí můžeme lepidla rozdělit do čtyř základních skupin:

1. Lepidla tuhnoucí vsáknutím a odpařením rozpouštědel ve spoji

Nános těchto lepidel tuhne vsáknutím a odpařením rozpouštědel ve spoji. Hlavní podmínkou použití je poréznost a propustnost pro plyny alespoň u jednoho z lepených dílů. Tato lepidla lze rozdělit na další dvě podskupiny: [5]

- **Rozpouštědlová lepidla roztoková** – Filmotvorná látka je rozpouštěna ve vhodném prostředí jako je voda, líh, aceton atd. [5]
- **Rozpouštědlová lepidla disperzní** – Filmotvorná látka je velmi jemná disperze polymerů ve vodě. Souvislý film vzniká slinutím polymerních částic po vsáknutí a odpaření vody. [5]

2. Lepidla reaktivní

Tato lepidla tuhnou působením chemických změn v průběhu vytvrzování. Podle formy, v jaké se prodávají, je můžeme rozdělit na reaktivní lepidla jednosložková a vícesložková. Jednosložková reaktivní lepidla vytvrzují chemickou reakcí vyvolanou vnějšími vlivy jako je teplota, vlhkost či kontakt s kovy. U vícesložkových lepidel jsou jednotlivé složky lepidla oddělené a směšují se těsně před jeho aplikací. [5]

- **Lepidla tuhnoucí vlivem vlhkosti prostředí**

V aplikační formě to jsou kapalné či pastovité monomery. Ty při kontaktu s vlhkostí, která je přítomná na povrchu lepených materiálů, začínají polymerovat a mění se na plastickou hmotu (vteřinová a silikonová lepidla). [5]

- **Lepidla tuhnoucí kontaktem s kovy za nepřístupu vzdušného kyslíku**

V aplikační formě to jsou opět kapalné či pastovité monomery, které po zamezení přístupu vzduchu do spoje začínají polymerovat a mění se na plastickou hmotu s výtečnou adhezí ke kovům (jednosložkové anaerobní lepidla). [5]

- **Lepidla tuhnoucí zvýšenou teplotou**

V praxi se s nimi setkáme ve formě kapalné či pastovité na bázi epoxidových, fenologických, močovinových nebo melaminových pryskyřic. Dodávají se v podobě

jednosložkových nebo dvousložkových lepidel. K vytvrzení lepidla obvykle dochází při teplotách 80 – 200 °C. [5]

- **Lepidla tuhnoucí po přidání tvrdidel**

Dodávají se jako dvou i více složkové lepidla na bázi epoxidových pryskyřic nebo polyuretanů. Jednotlivé složky jsou dodávány v oddělených obalech, které se před samotnou aplikací promíchají v předepsaném poměru. [5]

3. Lepidla tavná

Za normálních teplot to jsou pevné látky termoplastického charakteru, které se dodávají v granulované formě. Při zpracování se roztaví za teploty 120 – 200 °C do kapalné formy. Po zchladnutí filmu lepidla ve spoji je dosaženo manipulační pevnosti a to obvykle během několika desítek sekund (polyesterová, polyamidová lepidla). [5]

4. Lepidla stále lepivá, citlivá na tlak

„V aplikační formě se s nimi setkáváme výhradně v kombinaci s různými nosiči a to ve formě jednostranných nebo oboustranných samolepicích pásek, jednostranných nebo oboustranných samolepicích fólií a samolepicích tapet.“ [5]

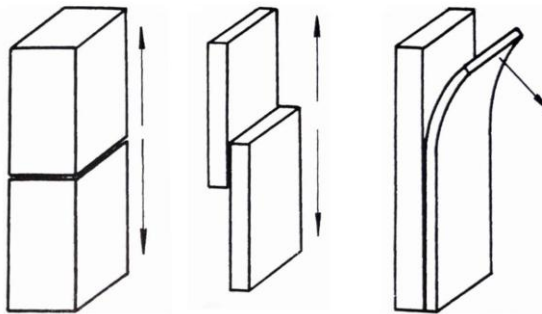
Při stálém zlepšování kvality lepidel i samotných nosičů si technologie lepení pomocí oboustranných lepicích pásek získává stále více příznivců. Mezi její hlavní výhody patří především jednoduchost aplikace, schopnost překlenout nerovnosti povrchu lepených dílů a kompenzace odlišných koeficientů teplotní roztažnosti lepených materiálů. [5]

Manipulační pevnost pásek je dosažena okamžitě po přitlačení dílů k sobě. Konečné pevnosti se dosahuje, v závislosti na typu pásky (fólie) a typu podkladu, běžně do 24 hodin. Doporučená teplota pro práci s lepicími páskami je 15 – 30 °C. [5]

3.5 Konstrukce lepených spojů

Tak jako ostatní technologie vyžaduje i lepení dodržení specifických požadavků. Jedním z hlavních požadavků je konstrukční řešení spoje. Konstrukce lepeného spoje vymezuje vzájemnou polohu lepených částí tak, aby byla vytvořena určitá styková plocha a eventuálně vyloučeny nevhodné způsoby zatížení, jako je především odlupování (viz Obr. 22). [5, 7]

Obr. 22 Namáhání lepeného spoje v tahu, ve smyku a v odlupování



Zdroj: [4]

V praxi jsou ovšem lepené spoje vystaveny kombinaci všech základních druhů namáhání a to při různých teplotních vlivech. Proto je velice důležité přizpůsobit celou konstrukci tak, aby si lepený spoj zachoval dlouhodobou spolehlivost. [5]

K docílení dlouhodobé spolehlivosti a trvanlivosti spoje musí konstrukce splňovat následující body:

- plocha spoje musí být dostatečně velká,
- mechanické namáhání musí být rovnoměrně rozděleno tak, aby se nesoustředilo jen v místě spoje,
- lepené materiály by měly mít stejné nebo obdobné teplotní koeficienty roztažnosti,
- zajistit, aby byl spoj zatěžován převážně v tahu a ve smyku, naopak minimálně namáhán v odlupování. [5]

3.5.1 Konstrukce pro lepení rovinných ploch

V praxi technologie lepení se uplatňuje především spojování rovinných ploch. Pro vytvoření rovinného spoje máme mnoho konstrukčních variant, jsou to například: jednoduše přeplátované spoje, spoj tupý, tupý zkosený, jednostranně přeplátovaný, oboustranně přeplátovaný, spoj pomocí pera atd. [5, 7]

Spoj jednoduše přeplátovaný

Lepené spoje jednoduše přeplátované (viz Obr. 16 a) jsou finančně méně nákladné a v řadě případů splňují pevnostní požadavky a proto jsou v praxi nejčastěji aplikovaným spojením, narušují od speciálních vysoko-pevnostních konstrukcí, které jsou výrobně a technologicky velice náročné. [7]

Spoj tupý

Při použití u tuhých adherendů jako jsou dřeva či kovy, se využívá pouze v případě dostatečně velké plochy lepeného spoje a to při namáhání na tah nebo tlak.

U elastomerů (pryží) je tato konstrukce požívaná jako základní forma pro vytvoření lepeného spoje (viz Obr. 23 b). [5]

Spoj tupý zkosený

Spoj tupý, zkosený je univerzálně použitelná varianta pro tuhé adherendy i elastomery. Tato konstrukce dobře snáší namáhání v tahu, a to i s výraznou ohybovou složkou (viz Obr. 23 c). [5]

Obr. 23 Spoj tupý a spoj tupý zkosený



Zdroj: [15]

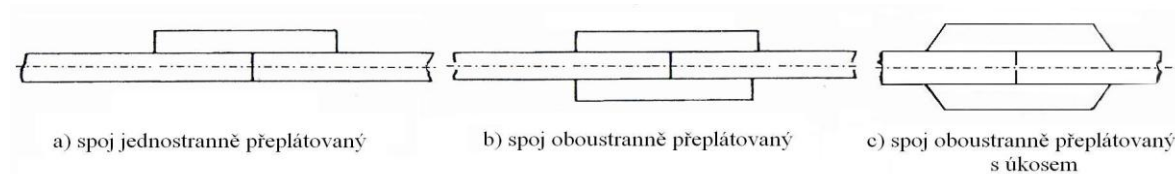
Spoj jednostranně překládaný

Tento spoj je vhodný u tuhých adherendů, které jsou namáhány na tah či tlak, naopak není příliš vhodný pro spojování elastomerů – nepříznivě ovlivňují elasticitu spoje (viz Obr. 24 a). [5]

Spoj oboustranně překládaný

U tuhých adherendů je v praxi vhodnější variantou jednostranně překládané spoje. Pro využití u elastomerů platí stejné negativní vlivy jako je tomu u jednostranně překládaného spoje. Pro vyšší pevnosti se občas aplikuje spoj oboustranně překládaný s úkosem (viz Obr. 24 b, c). [5]

Obr. 24 Spoje jednostranně a oboustranně překládané

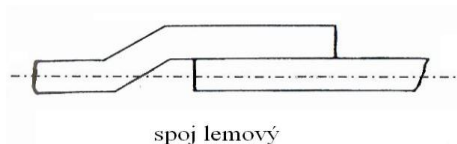


Zdroj: [4,15]

Lemový spoj

Lemový spoj se aplikuje zejména pro spojení tenkých plechů. Výhoda této konstrukce je poměrně velká styková plocha spoje (viz Obr. 25). [4]

Obr. 25 Spoj lemový



Zdroj: [15]

Spoj pero–drážka

Spoj pero-drážka je tradiční a osvědčený způsob spojování tuhých adherendů, který dobře snáší namáhání v tahu i tlaku (viz Obr. 26 a). [5]

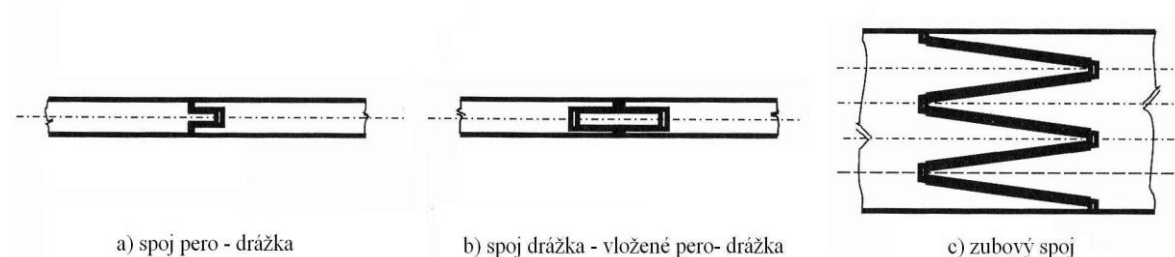
Spoj drážka – vložené pero–drážka

Tento druh spoj je technologická varianta předešlého spoje (spoj pero-drážka). Konstrukce tohoto spoje je velice obdobná a s tím i spojené vlastnosti (viz Obr. 26 b). [5]

Spoj zubový

Spoj zubový se v praxi nejčastěji objevuje při spojování dřeva. U tohoto spoje jde opět o technologickou variantu spoje pero-drážka (viz Obr. 26 c). [5]

Obr. 26 Spoje drážkové a spoj zubový



Zdroj: [5]

3.5.2 Konstrukce pro lepení trubek

Tyto konstrukce jsou vybaveny vnitřní či vnější spojkou nebo hrdlem, které se aplikuje pro spojení trubek.

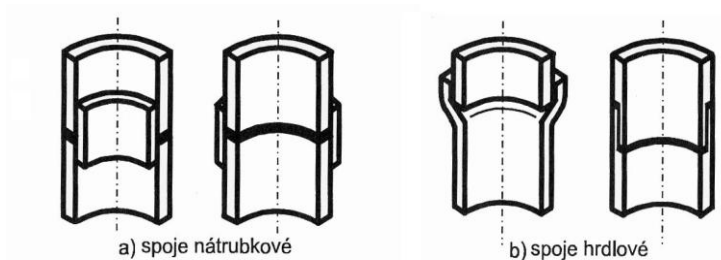
Spoje nátrubkové

Spoje nátrubkové se velmi často používají pro spojování součástí kruhového průřezu (tyčí, trubek). Je to vlastně technologická varianta jednostranně přeplátovaného spoje. Nátrubek se používá dle potřeby, vnější či vnitřní (viz Obr. 27 a). [5]

Spoje hrdlové

Tyto spoje se používají pro spojování trubek jak z kovu tak i plastů (viz Obr. 27 b). [5]

Obr. 27 Spoj nátrubkový a hrdlový

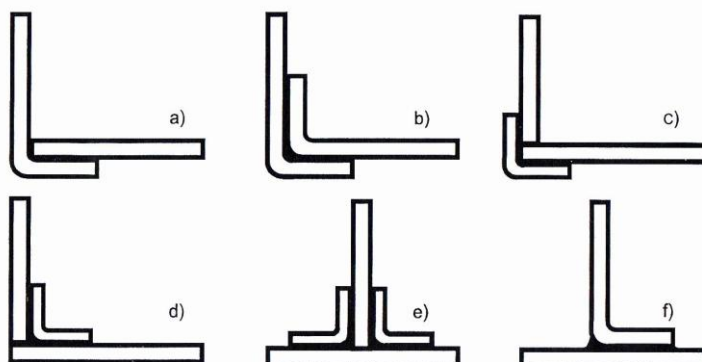


Zdroj: [5]

3.5.3 Konstrukce pro lepení koutových spojů

Konstrukce rohových spojů u lepení jsou často řešeny spojením plechu s profilem. Základní druhy možnosti řešení koutových spojů lze spatřit na obrázku Obr. 28. V podstatě je nutno vždy zajistit dostatečnou lepenou plochu a vhodné rozdělení napětí. [3]

Obr. 28 Základní příklady konstrukčního provedení koutových spojů



Zdroj: [5]

3.6 Výhody a nevýhody lepených spojů

Stejně jako ostatní technologie, vyznačuje se i lepení jak mnoha výhodami, tak i některými zápornými a limitujícími vlastnostmi. Proto při rozhodování o typu lepeného spoje je třeba kromě ekonomického hlediska posoudit všechny technické výhody, ale i nedostatky technologie lepení ve srovnání s tradičními metodami spojování, jako jsou např. svařování, pájení, šroubování nebo nýtování. [4]

3.6.1 Výhody technologie lepení

- Umožňuje spojování stejných (např. kombinace ocel - ocel, dural - dural, pryž - pryž, sklo - sklo aj.), ale i různorodých materiálů (např. kombinace ocel - dural, ocel - pryž, ocel - sklo, dural - pryž, pryž - sklo aj.),
- aplikací lepidel není narušena celistvost, profil ani estetický vzhled lepeného souboru,
- spoje jsou vodotěsné a plynotěsné,
- lepený spoj tlumí vibrace v konstrukci a zvyšuje její tuhost,
- lepený spoj zabraňuje vzniku elektrolytické koroze kovových adherendů,
- lepením se prakticky nezvyšuje hmotnost lepeného souboru, což je jedním z předpokladů miniaturizace,
- spoje mohou být průhledné, v případě požadavku i barevně přizpůsobené,
- lze dosáhnout vysoké pevnosti spojů, zejména při namáhání ve smyku a rázu atd.,
- lepením lze zajistit rovnoměrné rozložení namáhání,
- možnost spojování za nízké teploty, které neovlivní spojovaný materiál,
- lepením se snížil počet součástí, které jsou zapotřebí ke spojení materiálů u jiných technologiích,
- lepením lze poměrně snadno spojovat tenké materiály,
- lepené spoje mají dobrou tepelnou a zvukovou izolaci. [12, 17]

3.6.2 Nevýhody technologie lepení

- Lepení klade vysoké nároky na rovnost a čistotu povrchu lepených materiálů,
- u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi jsou nevyhnutelné speciální úpravy povrchu (např. použití aktivátorů),
- u mnoha lepidel jsou zapotřebí vytvrzovací přípravky nebo připravit směs z několika složek (tzv. vícesložková lepidla),

- lepením vzniká nerozebíratelný spojení materiálů,
- spoje jsou velmi citlivé na namáhání v odlupování,
- lepidla jsou náchylná k degradaci,
- životnost lepeného spoje je časově omezená,
- maximální pevnosti spoje je dosaženo až po určité době,
- spoje mají omezenou odolnost proti vyšším teplotám,
- termoplastická lepidla jsou citlivá vůči dlouhodobému statickému namáhání, které způsobuje tečení polymerních složek lepidla,
- lepení v průmyslovém měřítku je náročnější na vybavení pracoviště (jsou potřeba nanášecí zařízení, lisy, přípravky apod.),
- doba skladovatelnosti lepidel je časově omezená. [12, 17]

3.7 Porovnání technologie lepení s klasickými technologiemi spojování materiálu

Srovnání tzv. klasických metod spojování (svařování, pájení, šroubování nebo nýtování) s technologií lepení je možno vidět v tabulce 2.

Tab. 2 Porovnání technologií spojování

		Lepení	Svařování	Nýtování	Šroubové spoje	Pájení
Konstrukce a návrh spoje	Možnost spojení různých materiálů	velmi dobrá	omezená	dobrá	dobrá	dobrá
	Statická únosnost	dobrá (tvarem smykových ploch)	velmi dobrá (spojovací součásti je materiál)	omezená (nýtová rozteč rozděluje napětí)	omezená (počtem šroubů a jejich jakostí)	dobrá (tvarem smykových ploch)
	Dynamická únosnost	dobrá (malé vrubové účinky)	omezená (tvarové a metalurgické vruby)	špatná (vysoké tvarové a silovým tokem)	omezená (vrubový účinek závitů, přepětí nutné)	dobrá (malé vrubové účinky)

	Tuhost	dobrá	dobrá	uspokojivá	závislá na konstrukci	dobrá
Výroba, montáž	Tepelné ovlivnění materiálů při výrobě	nízké	vysoké	nízké	nízké	vysoké
	Možnost automatizace	omezená	snadná	vysoká (u toxování)	vysoká (snadná montáž)	omezené
	Rozebíratelnost	podmíněně možná (ohřátím na vyšší teplotu možné)	nemožné (porušení nevyhnutelné)	omezené (porušení nýtu)	velmi dobrá (snadná demontáž)	podmíněně možná (při pájení měkkou pájkou)
Odolnost a životnost spoje	Odolnost vůči vyšším teplotám	omezená tepelná odolnost (dle druhu lepidla)	velmi dobrá	dobrá	dobrá	omezená-dle druhu pájky
	Odolnost vůči korozi	zabraňuje vzniku elektrostatické korozi	problematická (spárová koroze zamezitelná jen tvarováním)	problematická (je-li spára nebo při nevhodném použití materiálů)	problematická (spárová koroze)	dobrá (spoj je bez spáry)
	Životnost spoje	časově omezená (stárnutí lepidel)	vysoká	dobrá	dobrá	dobrá
Opravy a údržba	Prohlídky a údržba	nákladné (zkoušky rentgenem a ultrazvukem)	jednoduché (způsoby zkoušení povrchu možné)	jednoduché (uvolněné nýty jsou zřejmé)	jednoduché (uvolněné šrouby jsou zřejmé)	nákladné (zkoušky rentgenem a ultrazvukem)
	Opravy a znovuuvedení do provozu	složitě (nové lepení je nutné)	dobré (oprava svaru možná)	možné (s odvrtáním s novými nýty)	možné (výměnou šroubu)	možné (dodatečné pájení u měkkých pájek)

Zdroj: [8]

3.8 Použití v praxi

Většina významných prací, které se zabírají problematikou lepení, zdůrazňuje, že tato technologie se velmi úspěšně v posledních letech uplatňuje nejen v malých dílnách a domácnostech, ale také v odvětvích jako je stavba letadel, automobilový průmysl, stavebnictví nebo kosmická a vojenská technika. [2]

3.8.1 Použití v automobilovém průmyslu

Technologie lepení v automobilovém průmyslu zastává dvě základní funkce. Funkci doplňkovou a těsnící (tmelení karoserií, antikorozi ochrany), nebo může ve specifických případech nahradit technologii svařování. Ve velké míře se lepení používá v kombinaci s bodovým svařováním (např. lemy dveří). [22]

Těsnění a doplňkové funkce

Tmelení karosérie můžeme rozdělit na vnitřní, které není přímo vystaveno slunci a vlivu povětrnosti, a na tmelení vnějších spojů, které se musí s těmito nepříznivými vlivy vypořádat. [3]

Pro lepení a těsnění skel a světlometů se používají zejména tavná lepidla. Mezi hlavní výhody aplikace těchto lepidel u světlometů je dosažení lepších mechanických spojů, dobré těsnosti a nízkých pořizovacích nákladů. Před samotnou aplikací lepidla se kryty světel přehřívají tak, aby lepidlo adherent co nejlépe smáčelo. [3]

Příklady aplikací lepidel a tmelů za účelem těsnění:

- těsnění lemů a dalších dílů karoserií (blatníků, hrdla palivové nádrže, těsnění spoje krytu zadního kola a postranic apod.),
- těsnění oken a světlometů,
- zvuková izolace dveří. [22]

Konstrukční lepené spoje karoserií

Lepení při stavbě karoserii nachází stále větší zastoupení vzhledem k požadavkům na snižování hmotnosti karoserie a zvyšování efektivity výroby. Ve srovnání se svařováním má technologie lepení značně nižší energetickou a ekonomickou náročnost, což je také

jeden z hlavních faktorů ke zvyšování podílů, lepených spojů ve stavbě automobilových karoserií. [22]

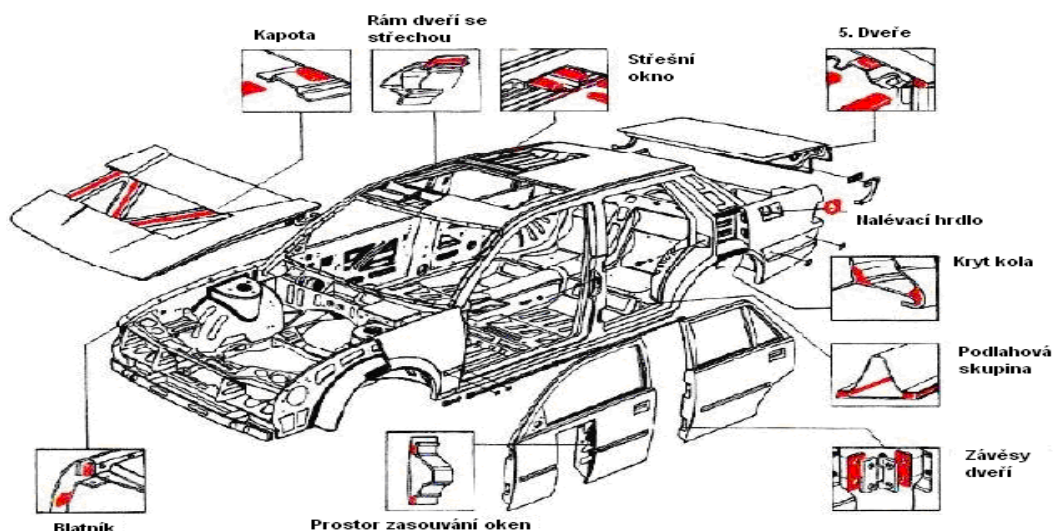
Mezi další tyto faktory patří:

- plošné uchycení plechů zajišťuje karosérii větší tuhost a pevnost,
- spoje jsou těsné, není potřeba je dále utěšňovat,
- těsnost spojů nám zajišťuje odolnost karosérie vůči korozi, která určuje životnost vozu,
- lepený spoj snižuje hlučnost karosérie. [3]

Příklady konstrukčních lepených spojů karosérie.

- spoj hrdla palivové nádrže se zadní postranicí a rámem dveří,
- lepení výztuh povrchových plechů (dveře, kapota),
- lepení střechy a výztuh střechy,
- lemy dveří,
- lemy kapoty (viz Obr. 29). [22]

Obr. 29 Použití lepených spojů u karoserie automobilu



Zdroj: [22]

Vlastnosti a složení používaných lepidel pro lepení karoserií je úzce spjata s požadovanou funkcí spoje. V tabulce 3 jsou znázorněny báze a charakter lepených spojů pro jednotlivé aplikace. [22]

Tab. 3 Báze lepidel a charakter lepeného spoje

Druh lepeného spoje	Příklady	Požadované vlastnosti lepeného spoje	Používaná lepidla
Drážkové přírubové lepení	kapota	tuhost, pevnost, chování při nárazu, ochrana před korozi	epoxidové pryskyřice
Výztuhové lepení	kapota, dveře	neohebnost torze, nesmí se deformovat vzhledový díl	polyuretany, PVC, syntetické kaučuky
Lepení nosné struktury	profily, sloupky, přírubové švy	tuhost, pevnost, chování při nárazu	epoxidové pryskyřice
Těsné lepení	hrdlo nádrže, utěsnění švu	odolnost vůči korozi, těsnost	PVC, syntetické kaučuky
Přímé zasklívání	přední, zadní a pevné boční tabule	tuhost karoserie, těsnost, nepropustnost	polyuretany

Zdroj: [22]

3.8.2 Použití v leteckém průmyslu a v kosmické technice

Letecký průmysl

Rozvoj technologie lepení v letecké technice je způsoben zejména potřebou snížení hmotnosti konstrukce. Tato úspora přímo ovlivňuje provozní náklady a tím ekonomičnost provozu. To vede letecké konstruktéry k volbě tenkostěnných lepených konstrukcí, které však musí mít vzhledem k vysokému využití letounu vynikající únavové vlastnosti. [3]

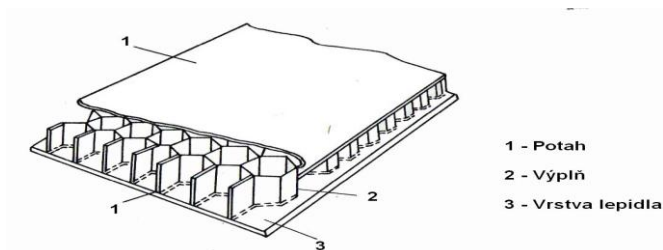
V letectví, ale i u kosmických letounů, se dnes zásadně používají tzv. sendvičové konstrukce. Tato vrstvená konstrukce je tvořena potahovými plechy a výplňovým materiálem. Speciálním případem výplňového materiálu jsou výplně ve tvaru buněk – voštiny (viz Obr. 30). [3]

K výrobě těchto konstrukcí bylo pro spojování kromě lepení zkoušeno i pájení, bodové svařování či nýtování. Tyto výrobní postupy se však v praxi příliš neosvědčily na rozdíl od lepení. [3]

K hlavním výhodám voštinových panelů patří dobrá tepelná izolace, velká životnost konstrukce a poměrně dobrá izolace hluku. Příklady použití lepených spojů v leteckém průmyslu je možno vidět v tabulce 4. [3]

Voštinová konstrukce si našla uplatnění i v dalších průmyslových odvětvích, např. ve stavbě silničních a kolejových dopravních prostředcích, stavebnictví atd. [3]

Obr. 30 Řez voštinovým sendvičovým panelem



Zdroj: [3]

Tab. 4 Příklady použití lepených spojů v letectví

Voštinové sendvičové konstrukce	Lepené spoje
Panely křídla, špička trupu, odtokové hrany, klapky, křídélka, kormidla, podlahy, dvířka, výplně rotorů.	Panely trupu, konstrukce trupu, panely křidel, konstrukce křidel, plochy kormidel, dveře a kryty, zesílení okrajů otvorů, lepená podlaha těsnění styčných ploch atd.

Zdroj: [3]

Kosmická technika

K obvyklým způsobům spojování konstrukcí u kosmických lodí je právě technologie lepení. Za hlavní klady této technologie v kosmické technice lze pokládat tlumení vibrací, tepelná a hluková izolace, možnost spojovat nejrůznější materiály a minimální hmotnost konstrukce. Požadavky na nízké hmotnosti raketoplánu jsou důvodem k použití extrémně tenkých materiálů, které ani nelze klasickými metodami spojovat. [3]

Příklady dílů kosmických lodí, u nichž se používá lepení:

- antény, sluneční panely a tepelné štíty,
- hnací jednotky (raketové motory, turbíny a jejich prodloužení, kryty, izolace),
- primární nosné konstrukce a nádrže,
- rámy, vzpěry, kuželové válcové konstrukce, připojovací prvky,
- chladičí desky pro udržení teploty elektronické části,
- montáž elektrického a elektronického vybavení. [3]

3.8.3 Použití v dřevařském a nábytkářském průmyslu

V dřevařském a nábytkářském průmyslu se lepidla aplikují hlavně při výrobě základních konstrukčních materiálů a polotovarů (dřevotřískové desky, voštinové desky), které jsou používány jak pro výrobu nábytku, tak ve stavebním průmyslu. Dále se využívají při konstrukčním a montážním lepení nebo při dalších výrobních a montážních operacích. [1]

Příklady použití lepidel při výrobě polotovarů a výrobků:

- výroba dřevotřískových desek,
- výroba voštinových desek,
- výroba lepených konstrukcí,
- obalování profilu, lepení dýh, fólií a laminátů,
- výroba vrstveného dřeva. [1]

Příklady montážních operací

- montáž nábytku,
- montáž sedacího nábytku,
- montáž stolového nábytku,
- výroba oken a dveří. [1]

3.8.4 Použití ve stavebním průmyslu

Ve stavebnictví mají lepené spoje dlouholetou tradici. V tomto průmyslu se můžeme setkat s mnoha charakteristicky odlišnými adherenty (dřevo, železo, beton, sklo, plast atd.), s kterými si lepidlo umí poměrně dobře poradit. Další důležitou vlastností, která je pro stavebnictví nutná, je dosahování dobré pevnosti ve smyku, tlaku a tahu, kterou lepené spoje zajišťují. [3]

Jako hlavní příklady aplikace této technologie ve stavebnictví je spojování různých profilů, patek, lepení rámu oken, použití dřevotřískových či voštinových desek, spojování trubek z kovů či plastů, lepení dlaždic – obkládaček, ale například i stavba lávek a mostů pomocí epoxidové malty. [3]

4 Analýza klimatických podmínek v jednotlivých prostředích

Lepené spoje se velmi často aplikují v různých klimatických podmínkách a prostředích. Každé prostředí má své specifické vlastnosti, které zásadně ovlivňují celkovou pevnost a spolehlivost lepeného spoje. Vliv atmosféry je dán současným působením teploty, vody, par, ultrafialového záření, ozonu, kyslíku atd. Intenzita působení jednotlivých faktorů klimatického prostředí se mění podle ročního období, zeměpisné polohy, nadmořské výšky, způsobu skladování či samotného používání výrobku. [14, 16]

Pokud se lepené spoje využívají v průmyslových oblastech, musíme počítat s přítomností agresivních plynů ve vzduchu (SO₂, H₂S atd.). Atmosféra přímořského území je zas charakterizována zvýšenou vlhkostí a přítomností solí ve vodních parách. [16]

Lepené spoje jsou vystavené působení tepla po celé ploše, ale na odkrytých částech spojů může působit i ultrafialové záření, kyslík, pára či voda. Vliv vody se zvyšuje s použitím vysoce pórovitých materiálů (dřevo). Doba působení atmosférické vlhkosti na konce lepených součástí je ve většině případů ohraničená – doba navlhání (deště, sníh) se střídá se suchým obdobím. [16]

Teplota, která působí a prostupuje lepenou konstrukcí při působení slunečního záření, kolísá v poměrně širokých intervalech v závislosti na klimatické oblasti, charakteru povrchu, poměru mezi pohlcováním a odražením sluneční energie či samotném charakteru konstrukce. Zahřívání lepené konstrukce v atmosférických podmínkách probíhá periodickým dějem. V některých oblastech, především pak v oblastech s kontinentálním podnebím, můžeme pozorovat poměrně vysoké poklesy v denních a sezónních teplotách. Obdobně jako je tomu při tepelném nárazu. Čím je pokles teploty větší a čím je kratší interval, za který se dosáhne jeho maxima, tím vzniká větší napětí v lepeném spoji a tím je jeho životnost a spolehlivost nižší. [16]

Působení klimatických podmínek na lepené spoje má cyklický charakter. Můžeme definovat cykly denní (světlo, teplota), sezónní (teplota, vlhkost), cykly spojené se změnami počasí atd. Tímto působením atmosféry vzniká tepelně-vlhkostní napětí cyklického charakteru v lepených spojkách. Čím vyšší jsou tyto hodnoty napětí a čím rychleji se mění, tím rychleji vzniká únava lepeného spoje. [16]

4.1 Odolnost lepeného spoje vůči vlivu zvýšené a snížené teploty

Vliv teploty prostředí na pevnost a životnost lepeného spoje je jedním z nejdůležitějších faktorů, který musí brát konstruktér při návrhu spoje v potaz. Ovlivnění pevnosti lepeného spoje teplotou lze rozdělit do tří základních skupin:

- teplota prostředí, která působí na spoj během jeho životnosti,
- teplota, při které lepidlo vytvrzuje,
- teplota prostředí, která působí na tuby s lepidly před procesem lepení (skladování, přeprava).

4.1.1 Teplota prostředí, která působí na lepený spoj během jeho životnosti

Pevnost a spolehlivost lepených spojů závisí také na jejich odolnosti vůči zvýšené a snížené teploty, tj. schopnost zachovat si vlastnosti jak při dlouhodobém působení zvýšené teploty (tepelná stálost, odolnost vůči tepelnému stárnutí), dlouhodobém působení snížené teploty (odolnost vůči mrazu), tak při náhlé změně teploty (tepelný ráz). [16]

Odlišné podmínky využití lepeného spoje mohou podmiňovat chemický nebo fyzikální mechanismus jeho porušení. Při krátkodobém zahřívání spoje na 700 – 900 °C většina lepidel podléhá tepelnému rozkladu. U dlouhodobého působení „nižších“ teplot (100 – 300 °C) dochází k termooxidační destrukci. [16]

Při změně teploty může v lepidle probíhat fázová transformace, které změní jeho strukturu. Dále je důležité počítat s faktorem tepelného napětí ve spoji, které vzniká rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti lepených adherendů a lepidel. Tato skutečnost může působit na spolehlivost lepených konstrukcí při teplotě pod bodem mrazu nebo při rychlém poklesu teploty. [16]

4.1.2 Teplota, při které lepidlo vytvrzuje

Teplota je významným faktorem ovlivňující proces vytvrzování. Rychlost tuhnutí lepidla ve spoji je ovlivněna teplotou prostředí. Při nižších teplotách dochází u rozpouštědlových lepidel k pomalejšímu vysychání a u reaktivních lepidel se zpomalují, až zastavují reakce vedoucí k vytvrzení. Naopak zvýšením teploty dochází k urychlení vytvrzovacích reakcí a tedy i celkové zkrácení procesu vytvrzování lepidla. Teplotu však

není možné zvyšovat libovolně. Limitujícími faktory při stanovení vyšších teplot jsou tepelná odolnost a rozdíl tepelné délkové roztažnosti lepených materiálů. [13]

Doporučené teploty, pro optimální vytvrzení lepidla, jsou udávány výrobcí. Při překročení těchto teplot může dojít k výraznému snížení pevnosti lepidla vlivem chemických změn. [13]

4.1.3 Teplota prostředí, která působí na tuby s lepidly před procesem lepení

Pokud výrobce neuvádí jinak, skladují se lepidla v suchých místnostech za teploty dosahující maximálně 28 °C, nemají být umístěna poblíž topení a nemá na ně přímo svítit sluneční záření. To platí zvláště pro lepidla dodávaná ve formě roztoku. [3]

U mnoha lepidel je předepsáno skladování za teplot do 5 °C. Tento předpis je nutné dodržovat, aby nedošlo k degradaci lepidla. Například kyanoakrylátová lepidla se mohou při skladování za laboratorních podmínek znehodnotit už za měsíc, i když výrobce udává jejich skladovací dobu 6 měsíců. Za teplot do 5 °C je lépe uchovávat i silikonové tmely, které vytvrzují vzdušnou vlhkostí. [3]

Při přepravě nebo skladování se však v praxi lepidla mohou setkat s působením mnohem vyšších nebo naopak nižších teplot než je doporučeno výrobcem (sluneční záření, sluneční záření přes sklo, přeprava v automobilu, skladování v nevytápěném skladu atd.). Tato problematika je dále podrobněji popisována a zkoumána v experimentální části této diplomové práce.

4.2 Odolnost lepeného spoje vůči vodě a vlhkosti

Lepené spoje různých adherendů podléhají do určité míry působení vody či páry a tím dochází ke snížení pevnosti spoje. Působení vody na lepidla může vést k jejich rozpouštění nebo hydrolýze. Bobtnání lepidla ve vodě nebo jeho vysychání podněcuje vznik napětí a relaxace. Relaxační procesy jsou způsobeny plastifikací lepidla při jejich navlhčení. *„Deformace lepených adherendů se při změně rovnovážné vlhkosti prostředí odráží i na lepicí vrstvě. Proto napětí vznikající ve spoji při vlhnutí nebo vysušování působí jako dlouhodobé zatížení a způsobuje únavu spoje.“* [16]

Daleko nebezpečnější je však působení proměnlivého navlhání, které často probíhá v atmosférických podmínkách. Tímto cyklickým působením dochází k urychlení procesu porušení spoje. [16]

Odolnost lepených spojů vůči vodě závisí zvláště na charakteru lepených dílů. Při působení vody na spoj pórovitého materiálu, který při bobtnání mění svůj objem jen mírně, je pevnost spoje vysoká a stabilní. Naopak u pórovitých materiálů s vysokou hladinou bobtnání (dřevo) se pevnost a stabilita spoje snižuje poměrně razantně. [16]

Zajištění zvýšení odolnosti lepených spojů proti působení vody lze dosáhnout různými způsoby. Tyto způsoby jsou založeny na povrchové ochraně spoje proti působení vlhkosti, ke snížení navlhování, difúze a pórovitosti lepených adherendu i lepidel. Výběr metody závisí na charakteru a vlastnostech lepených materiálů, podmínkách použití spoje a dalších faktorech. [16]

Nejjednodušším způsobem zvýšení odolnosti proti působení vlhkosti a vody je povrchová úprava lepených dílů nátěrem. Mezi další způsoby zvýšení odolnosti patří speciální úpravy lepidel pomocí různých přísad. [16]

4.3 Odolnost lepeného spoje vůči slunečnímu záření

Přesto, že jen asi 5 % veškerého slunečního světla dopadajícího na zemský povrch leží v oblasti ultrafialového záření způsobující degradaci polymeru, je to jeden z neúčinnějších činitelů jejich přirozené degradaci. [14]

Průchodem paprsků atmosférou se intenzita slunečního záření značně snižuje a to jednak rozptýlením paprsků odrazem o molekuly plynů a částice prachu ve vzduchu, tak absorpcí záření víceatomovými plyny (vodní párou H₂O, oxidem uhličitým CO₂ a ozónem O₃) obsaženými ve vzduchu. [9]

4.4 Odolnost lepeného spoje vůči kyslíku

Polymerní materiály jsou v provozních podmínkách vždy vystaveny působení vzdušného kyslíku, který má velký vliv na atmosférické stárnutí. Jeho působení je umocněno přítomností světla a katalyzátorů mechanického namáhání. [9]

I mírná oxidace lepeného spoje může zapříčinit jeho porušení, protože pro lepené spoje je typické, že i nepatrné změny chemického složení způsobují výrazné změny mechanických vlastností. Míra a rychlost oxidace polymerů je závislá na difúzi a rozpustnosti kyslíku v konkrétním lepeném spoji. [9]

4.5 Odolnost lepeného spoje vůči působení ozonu

Ozon je přirozenou složkou zemské atmosféry. Vytváří se v jejích vrstvách rozkladem kyslíku zářením. Difúzí proniká do nižších vrstev, kde se jeho obsah ve vzduchu pohybuje od deseti miliontin procenta. I tak nepatrná koncentrace však způsobuje stárnutí polymerů. Ozon reaguje na povrch polymeru, který pokrývá tvrdou a hlavně křehkou vrstvou. Při používání výrobku potom tato vrstva praská a odkrývá nový povrch polymeru, který opět degraduje stejným principem. [14]

4.6 Odolnost lepeného spoje vůči biologickým činitelům

Napadení materiálu mikroorganismy (biologická koroze), zejména plísněmi, je v praxi velmi rozšířené. Vyskytuje se především v tropickém klimatu, ale často se s ní setkáme i v našich zeměpisných šířkách. O možnostech napadení polymerního materiálu mikroorganismy rozhoduje především jeho chemické složení. Koroze je vyvolána metabolity nebo enzymy produkované mikroorganismy, které způsobují naleptávání povrchu výrobků. [14]

4.7 Zkoušky odolnosti stárnutí lepených spojů

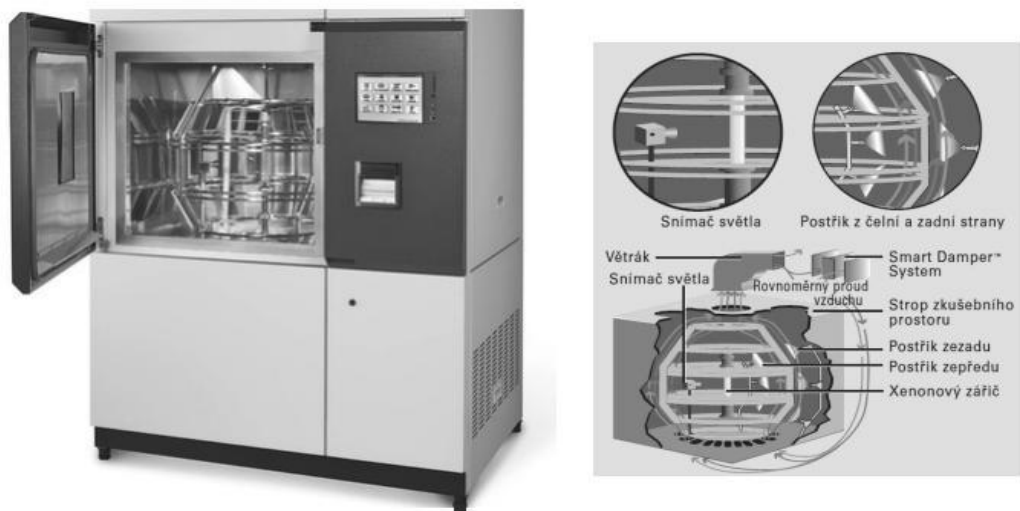
Jsou-li lepené spoje vystaveny účinku povětrnosti, pozorujeme na nich po určité době změny vzhledu i mechanických vlastností. Hodnocení povětrnostní odolnosti polymerů není jednoduché. Zkoušky stárnutí můžeme základně rozdělit na přirozené a tzv. umělé urychlené. [14]

Zkouškou přirozeného stárnutí se hodnotí změny vlastností materiálu po jejich vystavení účinku povětrnosti. Tyto zkoušky jsou velice zdoluhavé a z hlediska geografického mají jen omezenou vypovídající hodnotu. [14]

Urychlené zkoušky umělého stárnutí se provádějí v tzv. veterometrech, které obsahují umělé zdroje povětrnostních vlivů. Tato zkušební zařízení jsou sestavována tak, že se

zkušební tělesa otáčejí v určité vzdálenosti od zdroje světla, což může být například uhlíková oblouková lampa, jejíž spektrum je doplňováno ultrafialovým a infračerveným zářením. Během jedné otáčky zkušební tělesa zároveň prodělávají suchý a mokrý cyklus. Podmínky vyvolané veterometrem se snaží co nejvíce přiblížit přirozenému stárnutí (viz Obr. 31). Změny vlastností testovacích vzorků se analyzují jako u zkoušek přirozeného stárnutí, to znamená změny pevnosti a tažnosti, hodnocení povrchu a optických vlastností. [18]

Obr. 31 Komerčně dostupný veterometr



Zdroj: [18]

5 Výzkum vlivu extrémních klimatických podmínek na mechanické vlastnosti lepených spojů

Tato kapitola je zaměřena na interpretaci naměřených hodnot a vyhodnocení experimentu, z kterého je následně vypracován závěr této práce. Vyhodnocení se týká zkoušky pevnosti ve smyku jednoduše přeplátovaných spojů při působení různých teplot na tuby s lepidly před procesem lepení. Úkolem experimentu tedy bylo stanovit, zda existuje závislost pevnosti lepeného spoje při působení okolních teplot prostředí, s kterými se mohou lepidla v praxi setkat.

5.1 Výsledky zkoušek

Výsledky průměrných naměřených teplot a vypočtených pevností jsou shrnuty v jednotlivých tabulkách a rozděleny dle použitých druhů lepidel.

5.1.1 Výsledky měření 1. série (23 °C)

První série vzorků byla prováděna při působení laboratorní teploty na tuby s lepidly. Obaly s lepidly tak před aplikací byly vystaveny 24 hodin laboratornímu prostředí o teplotě 23 °C.

Naměřené teploty lepidel

Ještě před samotnou aplikací lepidel bylo zapotřebí změřit jejich reálnou teplotu pomocí infra-teploměru. Průměrná naměřená hodnota byla získána aritmetickým výpočtem z šesti naměřených hodnot. Vypočtené průměrné teploty každého druhu lepidla jsou zobrazeny v tabulce 5.

Tab. 5 Naměřené teploty lepidel 1. série

Měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [°C]	Sm. odchylka pevnosti [°C]	Var. koeficient pevnosti [%]
Před aplikací	EP12	20,36	0,07	0,36
	A30	20,80	0,45	2,18
	A4	20,75	0,13	0,66
	NOSE	19,23	0,07	0,38

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Od každého druhu lepidla bylo nalepeno 10 vzorků, které byly určeny ke zkoušce pevnosti ve smyku. Tyto vzorky a jejich hodnoty posloužily jako etalon pro porovnání hodnot s ostatními sériemi, které vznikaly z lepidel ovlivněných nižšími či vyššími teplotami. Výsledky této série jsou shrnuty v tabulce 6.

Z tabulky je patrné, že nejvyšší pevnost zaznamenalo lepidlo s označením A30 a to 15,39 MPa s variačním koeficientem 4,3 %, naopak nejnižší pevnost měla Epoxidová pryskyřice 1200/371 (EP12) a to 11,93 MPa s variačním koeficientem 6,11 %. Charakter poškození spojů se i při dodržení stejných podmínek úpravy povrchu adherendu lišil dle použitého druhu lepidla. U lepidel A4 a A30 bylo zaznamenáno kohezní poškození, naopak u lepidel Novax (NOSE) a EP12 adhezní.

Tab. 6 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 1. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
EP12	11,93	0,57	6,11	10	0
A30	15,39	0,67	4,36	0	10
A4	14,37	0,69	4,81	0	10
NOSE	13,71	1,40	10,25	10	0

Zdroj: Autor

5.1.2 Výsledky měření 2. série (6 °C)

V této sérii byla všechna zkoumaná lepidla umístěna před aplikací na 24 hodin do prostředí o teplotě 6 °C. Tato teplota může demonstrovat prostředí uskladnění lepidla v nevytápěném skladu nebo přepravu lepidla v podzimním či zimním období.

Naměřené teploty lepidel

Nejnižší průměrné teploty po vyjmutí z chladničky byly dosaženy u lepidel EP12 a NOSE, kde průměrná teplota činila 12,7 °C a 12,6 °C. Naopak k nejmenšímu snížení teploty došlo u lepidla A30 a to na hodnotu 16,4 °C.

K dalšímu měření teplot došlo těsně před lepením vzorků po dvou hodinách od vyjmutí z chladničky. Průměrně se teplota lepidel zvýšila o 1 – 6 °C. Podrobně jsou průměrné teploty zobrazeny v tabulce 7 dle doby měření a druhu lepidel.

Tab. 7 Naměřené teploty lepidel 2. série

Doba měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [°C]	Sm. odchylka pevnosti [°C]	Var. koeficient pevnosti [%]
<i>Po vyjmutí z prostředí</i>	<i>EP12</i>	12,75	0,09	0,75
	<i>A30</i>	16,43	0,21	1,33
	<i>A4</i>	15,23	0,09	0,61
	<i>NOSE</i>	12,63	0,09	0,74
<i>Před aplikací</i>	<i>EP12</i>	16,66	0,11	0,66
	<i>A30</i>	20,31	0,07	0,33
	<i>A4</i>	20,35	0,09	0,47
	<i>NOSE</i>	19,18	0,07	0,35

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Nejvyšší průměrné pevnosti zde dosáhly vzorky slepené lepidlem A30 a to 15,26 MPa s variačním koeficientem 2,28 %. Druhou nejvyšší pevnost 13,94 MPa s variačním koeficientem 6,95 % zaznamenalo lepidlo s označením A4. Nejhorší výsledek pevnosti 10,40 MPa s variačním koeficientem 8,29 % byl zjištěn u vzorků, které byly slepeny lepidlem EP12. Ostatní výsledky i s označením charakteru porušení spojů jsou v tabulce 8.

Tab. 8 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 2. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
<i>EP12</i>	10,40	0,86	8,29	10	0
<i>A30</i>	15,26	0,34	2,28	0	10
<i>A4</i>	13,94	0,97	6,95	0	10
<i>NOSE</i>	13,12	1,01	7,76	10	0

Zdroj: Autor

5.1.3 Výsledky měření 3. série (-18 °C)

Nejnižší teplota, které byla vystavena lepidla před nanášením, činila -18 °C, což může simulovat venkovní teplotu v zimním období ve střední a východní Evropě.

Naměřené teploty lepidel

Bezprostředně po vyjmutí zkoumaných lepidel z mrazáku byla změřena jejich teplota. Nejnižší průměrná teplota lepidla v tomto prostředí byla $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ u lepidla s označením EP12. Ostatní průměrné teploty lepidel byli v intervalu $4,38 - 6,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Před aplikací byla teplota většiny lepidel ustálena na cca $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, jen u lepidla EP12 tato teplota byla $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Všechny výsledky průměrných teplot jsou v tabulce 9.

Tab. 9 Naměřené teploty lepidel 3. série

Měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [$^{\circ}\text{C}$]	Sm. odchylka pevnosti [$^{\circ}\text{C}$]	Var. koeficient pevnosti [%]
Po vyjmutí z prostředí	EP12	-3,13	0,15	5,1
	A30	4,40	0,21	5,04
	A4	4,38	0,19	3,6
	NOSE	6,25	0,16	2,17
Před aplikací	EP12	11,48	0,09	0,78
	A30	19,71	0,1	0,54
	A4	19,98	0,12	0,6
	NOSE	18,13	0,12	0,68

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Po vyhodnocení zkoušky pevnosti ve smyku bylo zřejmé, že při působení této nízké teploty prostředí na lepidla se pevnost vzorků od 1. série liší jen mírně. Dá se ale říci, že s klesající teplotou se snižuje i pevnost jednotlivých vzorků.

Z výsledků zkoušky (viz Tab. 10) vyplývá, že nejvyšší průměrná pevnost byla naměřena opětovně u lepidel A30 a A4 a to $15,04\text{ MPa}$ s variačním koeficientem $2,5\%$ a $13,78\text{ MPa}$ s variačním koeficientem $6,3\%$. Nejnižší hodnoty dosáhlo lepidlo firmy KM plus, zde označováno jako EP12. Průměrná hodnota pevnosti byla $9,67\text{ MPa}$ s variačním koeficientem $5,5\%$.

Deformace spoje byla stejně jako u předchozí série u lepidel EP12 a NOSE adhezní a u A30 a A4 kohezní.

Tab. 10 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 3. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
<i>EP12</i>	9,67	0,53	5,55	10	0
<i>A30</i>	15,04	0,37	2,51	0	10
<i>A4</i>	13,78	0,87	6,32	0	10
<i>NOSE</i>	12,68	0,80	6,37	10	0

Zdroj: Autor

5.1.4 Výsledky měření 4. série (60 °C)

V této sérii byla lepidla zahřátá na teplotu 60 °C. K ohřátí lepidel byla využita sušárna značky KBC G-100/250 (viz Obr. 32), ve které byly tuby s lepidly uloženy jeden den.

Této a vyšších teplot se může v praxi dosáhnout v letním období při přímém působení slunečních paprsků či při působení paprsků přes sklo na tuby s lepidly. Teplota může být však značně ovlivněna barvou obalu. Jak je známo, tak černá barva nejlépe pohlcuje tepelné záření (akumuluje), a pak jej vydává, tím může teplota lepidla ještě razantně stoupat. Bílá barva naopak teplo nejlépe odráží.

Obr. 32 Sušárna KBC G-100/250



Zdroj: Autor

Naměřené teploty lepidel

Nejvyšší naměřené teploty hned po vyjmutí tub ze sušárny byly zjištěny u sekundového lepidla NOSE s teplotou 50 °C a u lepidla EP12 s teplotou 49,6 °C.

Z naměřených průměrných teplot těsně před aplikací (viz Tab. 11) je vidět, že u většiny lepidel došlo k ochlazení na cca 20 °C. Pouze u lepidla EP12 byla naměřena vyšší hodnota a to 25,8 °C, která je zapříčiněna nejspíše větším objemem a druhem obalu lepidla.

Tab. 11 Naměřené teploty lepidel 4. série

Měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [°C]	Sm. odchylka pevnosti [°C]	Var. koeficient pevnosti [%]
Po vyjmutí z prostředí	EP12	49,66	0,17	0,36
	A30	36,86	0,48	1,3
	A4	42,15	0,25	0,59
	NOSE	50,01	0,13	0,26
Před aplikací	EP12	25,88	0,089	0,34
	A30	21,45	0,05	0,23
	A4	20,43	0,07	0,36
	NOSE	20,33	0,07	0,36

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Při aplikaci lepidel s označením A30 a A4 docházelo k lepšímu smáčení a snadnosti nánosu lepidla na zkušební vzorky, než tomu bylo u lepidel ovlivněných nižší teplotou. Průměrné hodnoty pevností a jejich odchylek lze vidět v tabulce 12.

Z těchto hodnot vyčnívá průměrná pevnost spojů lepených lepidlem A30, která činí $15,2 \pm 0,27$ MPa, tj odchylka 1,81 %. Spoje s nejnižší pevností byly naměřeny při použití lepidla EP12 s průměrnou hodnotou $11,86 \pm 0,52$ MPa, tj. s odchylkou 4,3 %. Poškození spojů je opět u lepidel A30 a A4 kohezní a u lepidel EP12 a NOSE adhezní.

Tab. 12 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 4. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení vzorků	
				Adhezní	Kohezní
EP12	11,86	0,52	4,38	10	0
A30	15,20	0,27	1,81	0	10
A4	13,89	0,48	3,50	0	10
NOSE	13,70	0,83	6,07	10	0

Zdroj: Autor

5.1.5 Výsledky měření 5. série (100 °C)

Zkoumaná lepidla byla znovu vložena do sušárny, kde byla nastavena teplota prostředí na 100 °C. Po 24 hodinách byla lepidla vyjmuta a nechána v laboratorním prostředí zchladnout po dobu dvou hodin. Poté byla lepidla aplikována k vytvoření zkušebních vzorků pro provedení smykové zkoušky tahem.

Naměřené teploty lepidel

Zkoumaná lepidla hned po vyjmutí z prostředí o teplotě 100°C (sušárny) byla zahřátá na teploty od 64 °C do 82 °C dle druhu lepidla.

Po dvouhodinovém působení laboratorního prostředí teploty klesly u všech druhů lepidel na teploty v rozpětí 28 °C až 41 °C. Nejvyšší teplota byla naměřena u lepidla EP12 41,43 °C. Všechny naměřené teploty jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab. 13 Naměřené teploty lepidel 5. série

Doba měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [°C]	Sm. odchylka pevnosti [°C]	Var. koeficient pevnosti [%]
<i>Po vyjmutí z prostředí</i>	EP12	81,33	0,67	0,83
	A30	74,98	1,89	2,52
	A4	65,06	205	3,16
	NOSE	64,91	1,08	1,67
<i>Před aplikací</i>	EP12	41,43	0,42	1,02
	A30	35,28	0,23	0,66
	A4	31,03	0,26	0,86
	NOSE	28,05	0,32	1,14

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Z výsledků zkoušky je zřejmé, že u většiny spojů došlo k poměrně velkému snížení pevnosti oproti spojům vytvořených z lepidel, která byla v prostředí o teplotách 60 °C či 23 °C. Nejnižší hodnota byla zjištěna u spojů lepidla EP12 a to 10,75 MPa s odchylkou 8,13 %. Nejvyšší snížení pevnosti však zaznamenalo lepidlo s označením A4, u kterého činí průměrná měřená pevnost 11,05 MPa, kdy tabulková hodnota minimální pevnosti ve smyku je výrobcem garantovaná na 13 MPa. Nejpevnější spoje byly vytvořeny

sekundovým lepidlem Novax (NOSE) s hodnotou 14,83 MPa a variačním koeficientem 13,4 %.

Při zjišťování typu deformace bylo zjištěno u všech vzorků lepidel NOSE a EP12 porušení adhezní, a u všech vzorků lepidla A30 a A4 kohezní. Ostatní výsledky jsou shrnuty v tabulce 14.

Tab. 14 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 5. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
<i>EP12</i>	10,75	0,87	8,13	10	0
<i>A30</i>	14,16	0,63	4,51	0	10
<i>A4</i>	11,05	0,58	5,25	0	10
<i>NOSE</i>	14,83	1,99	13,46	10	0

Zdroj: Autor

5.1.6 Výsledky měření 6. série (140 °C)

Poslední série lepidel byla vystavena působení prostředí o teplotě vzduchu 140 °C po dobu 24 hodin. Pro vyjmutí zahřátých lepidel ze sušárny bylo vzhledem k vysoké teplotě použito speciálních kleští.

Naměřené teploty lepidel

Teploty lepidel bezprostředně po vyjmutí byly v rozmezí 120 – 125 °C. Lepidla byla ponechána po dvě hodiny v laboratorním prostředí (23 °C) k jejich vychladnutí, a poté opětovně měřena jejich teplota. Ta se snížila u všech lepidel na teploty dosahující 30 – 48 °C. Nejnižší snížení teploty bylo zaznamenáno u lepidla EP12 na teplotu 48,5 °C (viz Tab. 15).

Tab. 15 Naměřené teploty lepidel 6. série

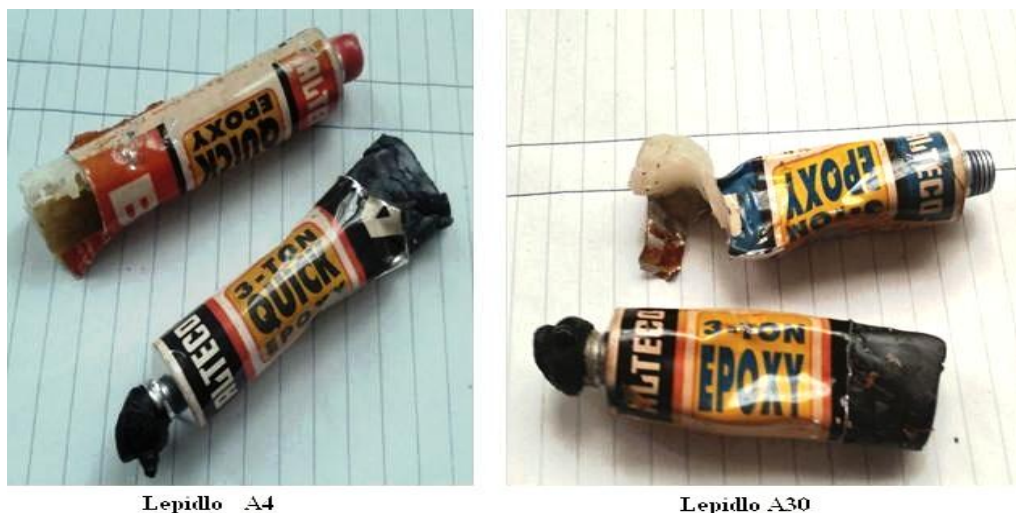
Doba měření teploty	Označení lepidla	Ar. průměr teploty [°C]	Sm. odchylka pevnosti [°C]	Var. koeficient pevnosti [%]
Po vyjmutí z prostředí	EP12	124,71	0,76	0,61
	A30	125,70	0,56	0,44
	A4	120,83	0,23	0,19
	NOSE	124,33	0,48	0,39
Před aplikací	EP12	48,56	0,32	0,67
	A30	35,26	0,12	0,35
	A4	33,23	0,13	0,41
	NOSE	30,50	0,1	0,32

Zdroj: Autor

Výsledky pevnosti vzorků

Vzhledem k vysoké teplotě, která na lepidla působila, se u dvou lepidel, konkrétně A30 a A4, změnila jejich struktura z tekuté pasty na tuhou hmotu (viz Obr. 33). Proto u nich nebyly vytvořeny vzorky potřebné ke smykové zkoušce v tahu.

Obr. 33 Změna struktury lepidel A4 a A30



Lepidlo A4

Lepidlo A30

Zdroj: Autor

U zbylých dvou lepidel (NOSE, EP12) byl aplikován stejný pracovní postup jako u ostatních sérií. Přesto, že došlo k povrchní deformaci obalu a u lepidla NOSE dokonce k částečnému roztavení (viz Obr. 34), byla tato lepidla použita v laboratorních podmínkách k vytvoření lepeného spoje.

Obr. 34 Lepidlo Novax (NOSE) po vyjmutí ze sušárny



Zdroj: Autor

Z naměřených hodnot smykové zkoušky v tahu je patrné, že u obou lepidel došlo k razantnímu snížení pevnosti oproti spojům vytvářených lepidly ovlivněných nižšími teplotami.

Průměrná dosažená pevnost vzorků, které byly lepené epoxidovou pryskyřicí 1200/371 (EP12) byla pouhých $10,38 \pm 0,69$ MPa, tj. s odchylkou 6,73 %. Sekundové lepidlo NOSE dosáhlo pevnosti o hodnotě $12,52 \pm 1,17$ MPa, tj. odchylka 9,34 %. Porušení spojů byl u všech vzorků, lepených lepidly NOSE a EP12 adhezní (viz Tab. 16).

Tab. 16 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 6. série

Označení lepidla	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
EP12	10,38	0,69	6,73	10	0
NOSE	12,52	1,17	9,34	10	0

Zdroj: Autor

5.1.7 Vliv techniky nánosu lepidla na pevnost a porušení spoje

V rámci vlastního měření bylo zjištěno, že u jednoho z epoxidových lepidel (Epoxidová pryskyřice 1200/371) docházelo na rozdíl od ostatních zkoumaných epoxidových lepidel při zkoušce pevnosti ve všech případech k adheznímu porušení lepeného spoje. Adhezní poškození nastává ve většině případech buď špatným opracováním a přípravou materiálu, nebo zvolením špatného lepidla k lepenému materiálu, případně nevhodným postupem nánosu adheziva.

Ing. Vlastimil Boublík [6] ve své publikaci „Lepidla a jejich příprava“ uvádí, že některé druhy epoxidových lepidel, zejména u drsnějších povrchů, se mají nanášet vždy na obě lepené součásti a nikoli jen na jeden lepený díl, jak tomu bylo u předchozího měření.

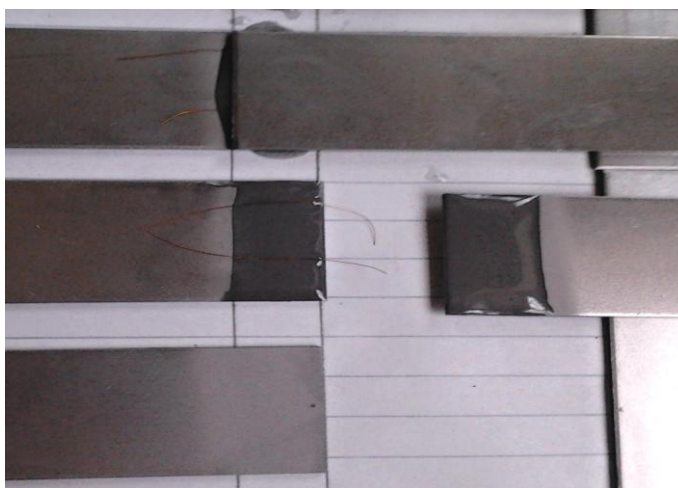
Zkouška vlivu techniky nánosu lepidla na pevnost a charakter porušení spoje

Vliv techniky nánosu lepidla na pevnost spoje byl zkoumán u jedné série obsahující 10 vzorků vytvořených nánosem na obě lepené strany. Následně byla porovnávána se sérií vzorků z předchozího měření, jež vznikla za stejných podmínek.

Postup a příprava zkušebních vzorků byla obdobná jako u předešlého experimentu, jen s rozdílem nanášení lepidla.

Nanášení lepidla bylo uskutečněno použitím plastové špachtle na obě lepená zkušební tělíska (viz Obr. 35). Tloušťka spoje 0,10 mm byla zajištěna použitím distančních drátků, které byly vloženy do nánosu lepidla jednoho ze zkušebních tělísek. Po slepení byly spoje zatíženy železným závažím o hmotnosti 603 g až do úplného vytvrdnutí (48 hod) při laboratorní teplotě 23 °C.

Obr. 35 Nános lepidla na zkušební tělíska



Zdroj: Autor

Poté všechny vzorky prošly smykovou zkouškou pevnosti při tahovém namáhání dle normy ČSN EN 1465.

Naměřené výsledky a charaktery porušení spojů byly poté zpracovány a porovnány s hodnotami získanými z předchozího experimentu.

Výsledky pevnosti a posouzení charakteru porušení spoje

Z tabulky naměřených hodnot Tab. 17 je zřejmé, že průměrná pevnost vzorků vytvořených nánosem lepidla na obě zkušební těliska je takřka srovnatelná s průměrnou hodnotou pevnosti vzorků, které byly vytvořeny nanášením jen jednoho dílu.

Tab. 17 Výsledky zkoušky pevnosti a porušení spojů

Vzorky spojů	Ar. průměr pevnosti [MPa]	Sm. odchylka pevnosti [MPa]	Var. koeficient pevnosti [%]	Porušení	
				Adhezní	Kohezní
<i>Oboustranné nanášení</i>	11,71	0,5	4,3	10	0
<i>Jednostranné nanášení</i>	11,93	0,71	6,01	10	0

Zdroj: Autor

Hodnota pevnosti u vzorků nanášených na obě strany činí 11,71 MPa s variačním koeficientem 4,3 %. Pevnost vzorků, u kterých bylo nanášeno lepidlo jen na jednu stranu, má hodnotu 11,93 MPa s variačním koeficientem 6,01 %. Porušení spojů byl v obou sériích ve všech vzorcích adhezivní. Vybrané zkušební vzorky po destrukci jsou k porovnání vidět na obrázku 36.

Obr. 36 Porovnání porušení spojů



Oboustranný nános lepidla

Jednostranný nános lepidla

Zdroj: Autor

Z porovnání obou sérií je zřejmé, že charakter destrukce a pevnost spojů je bez drobné odchylky srovnatelná.

Závěrem k tomuto měření je nutné říci, že tvrzení Ing. Vlastimila Boublíka z literatury „Lepidla a jejich příprava“, alespoň v tomto případě neplatí.

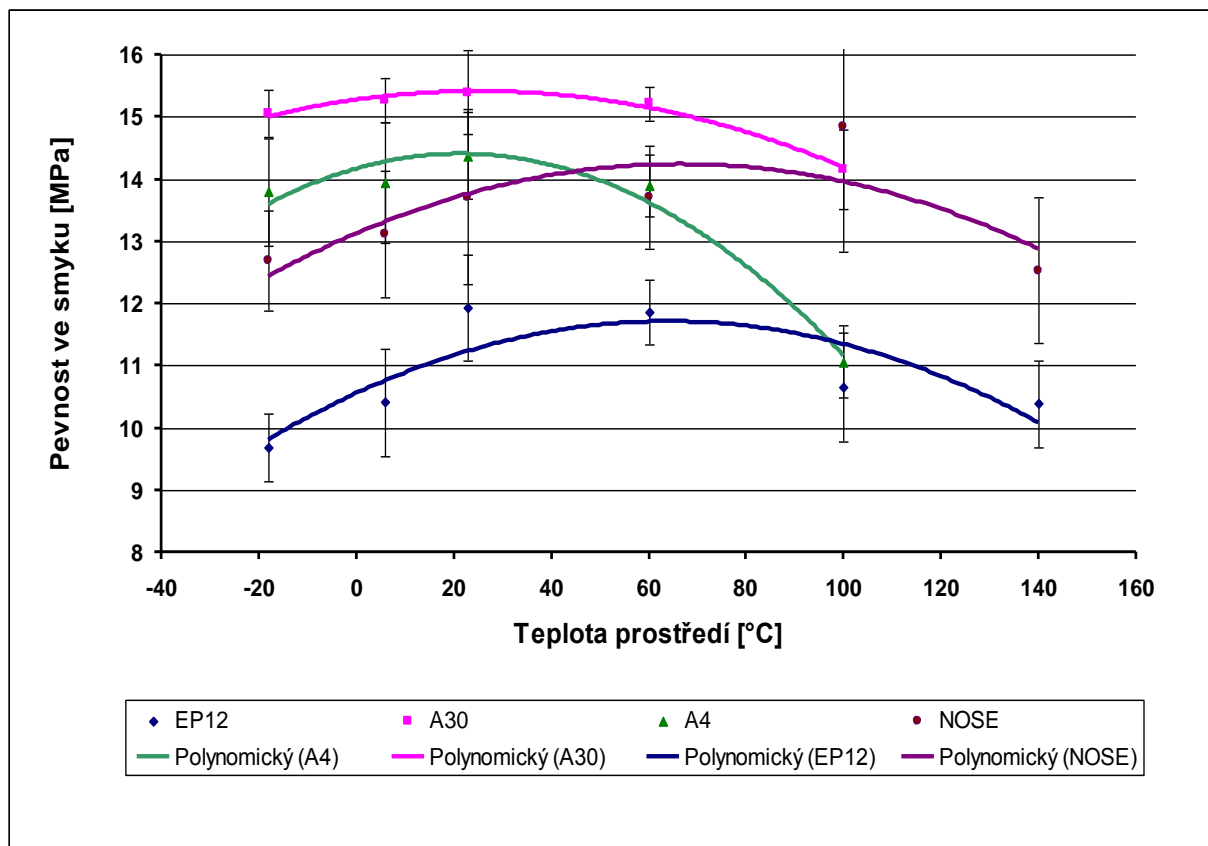
Vznik adhezivního poškození spoje v tomto měření, jak při jednostranném nanášení, tak při oboustranném nanášení lepidla může být způsobeno špatnou volbou lepidla k lepenému materiálu či nedostatečnou úpravou povrchu adherendu.

5.2 Vyhodnocení výsledků

Díky experimentálním zkouškám je možné porovnat chování čtyř zkoumaných lepidel, která byla před aplikací vystavena prostředí nízkých či vysokých teplot.

Závislost pevnosti lepeného spoje ve smyku při tahovém namáhání na teplotě prostředí je patrná z grafu 1, který byl vygenerován z naměřených hodnot pomocí programu Microsoft Excel 2007. Tyto hodnoty byly v grafu pro větší názornost proloženy polynomičnou spojnici 2. stupně, která nejlépe odpovídala korelačnímu poli naměřených hodnot tak, aby vznikl orientační přehled o pevnosti spojů i ostatních teplot prostředí.

Graf 1 Pevnost lepeného spoje







Zdroj: Autor

Rovnice regresí a koeficienty spolehlivosti jsou přehledně zobrazeny v tabulce 18. Koeficient spolehlivosti R^2 nabývá hodnot od 0 do 1. Čím se hodnota R^2 přibližuje k číslu 1, tím má průběh dané závislosti vyšší vypovídací význam.

V grafu jsou dále vyznačené směrodatné odchylky měření, které vyjadřují možné nepřesnosti vzniklé při měření. Hodnoty směrodatných odchylek byly vypočteny v intervalu 0,27 – 1,99 MPa.

Tab. 18 Rovnice regresí a koeficienty spolehlivosti

Označení lepidel	Grafické označení	Rovnice regrese	Spolehlivost R ²
EP12		$y = -0,0003x^2 + 0,0362x + 10,55$	R ² = 0,6964
A30		$y = -0,0002x^2 + 0,011x + 15,272$	R ² = 0,9882
A4		$y = -0,0005x^2 + 0,0224x + 14,165$	R ² = 0,9666
NOSE		$y = -0,0003x^2 + 0,0335x + 13,121$	R ² = 0,6473

Zdroj: Autor

Při vlastním měření byli zjištěny následující skutečnosti:

Z tvaru křivky lepidla EP12 je evidentní, že pevnost lepeného spoje nejprve stoupala až k teplotě 60 °C, kde dosáhla svého pevnostního vrcholu a následně začala klesat. Křivka nabývá tvaru konkávní paraboly se spolehlivostí R² = 0,69. Nejvyšší pevnost byla zaznamenána v teplotním intervalu od 40 °C do 80 °C, kdy se pevnost pohybovala okolo 11,5 MPa. Po překročení 100 °C začala pevnost lepidla mírně klesat až do teploty 140 °C. Dále lepidlo již nebylo zahříváno na vyšší teplotu z důvodů možnosti vznícení, kterou uvádí výrobce mezi 140 – 150 °C. Porušení spojů lepidla při zkoušce pevnosti ve smyku bylo ve všech teplotních případech adhezní.

Podobně jako lepidlo EP12 i vteřinové lepidlo NOSE dosahuje své maximální pevnosti při teplotách 40 – 80 °C, a minima při teplotách -18 °C a 140 °C. Rozdílná je hodnota celkové pevnosti spojů, která je u lepidla NOSE vyšší. Nejvyšší pevnost byla zaznamenána těsně nad 14 MPa a nejnižší mezi 12,5 - 13 MPa. Křivka pevnosti lepidla NOSE má také podobu konkávní paraboly. Při ohřátí lepidla na 140 °C došlo k částečnému roztavení tuby lepidla a z této příčiny již nebylo toto lepidlo dále zahříváno. Po destruktivním testování všech vzorků tohoto lepidla bylo zjištěno adhezní poškození lepeného spoje.

U lepidla A4 je pozorován znatelně strmější pokles pevnosti spoje. Křivka má opět tvar konkávní paraboly, ale maximální a minimální teploty a pevnosti spojů se výrazně liší.

Minimální pevnost spoje je 11 MPa a to při teplotě 100 °C. Maximální pevnost spoje byla zaznamenána kolem 14 MPa, při působení 23 °C, tedy laboratorní teploty. Od tohoto maxima je pozorován se zvyšující teplotou mírný pokles. Prudký pokles pevnosti je registrován od teploty 60 °C do teploty 100 °C. Nejnižší naměřená hodnota pevnosti spoje je 11 MPa při 100 °C. Hodnota 100 °C je pro toto lepidlo mezní. Při zahřátí lepidla na 140 °C byla změněna jeho struktura z tekuté pasty na pevnou hmotu a tím pádem nebylo možné aplikovat proces lepení. Poškození spojů vytvořených tímto lepidlem po zkoušce pevnosti bylo ve všech zkoumaných prostředích kohezní.

Křivka lepidla A30 má také tvar konkávní paraboly, ale v porovnání s ostatními křivkami lepidel je velmi plochá, což je způsobeno stabilní pevností spoje i při změnách teploty. U tohoto lepidla jsou patrné nejvyšší naměřené hodnoty pevnosti spoje. Stejně jako v případě lepidla A4 je zaznamenána mezní hodnota teploty 100 °C, při zahřátí na vyšší teplotu (140 °C) lepidlo taktéž změnilo svou strukturu z tekuté pasty na pevnou hmotu. Nejvyšší hodnoty pevnosti jsou naměřené při teplotách -20 °C až 60 °C s hodnotou pevnosti spoje kolem 15 MPa. Nejnižší průměrná hodnota pevnosti spoje je cca 14 MPa, která byla naměřena při teplotě 100 °C. Obdobně jako u lepidla A30, i u tohoto lepidla docházelo při přetržení spojů, vždy ke koheznímu poškození.

Z vyhodnocení výsledků je zřejmé, že průběh pevnosti lepených spojů se postupně mění v závislosti na teplotě ovlivňující tuby lepidel. Naopak typ porušení vzorků byl stálý za všech teplotních podmínek, tj. u lepidel NOSE a EP12 kohezní poškození a u obou lepidel Alteco adhezní. Toto rozlišné porušení spojů vzniklo při dodržení totožné úpravy povrchu adherendu všech zkušebních tělísek. Rozptyl výsledků se u některých lepidel zvyšoval se vzrůstající teplotou (EP12 100 °C, NOSE 100 °C a 140 °C), což mohlo být způsobeno začínající degradací lepidla.

6 Závěr

Tato diplomová práce se skládala ze dvou základních částí a to z části teoretické (rešerše) a praktické (experiment).

V rámci literární rešerše byly řešeny vlastnosti a technologie lepení, jejich výhody, nevýhody, použití v praxi či porovnání s jinými technologiemi spojování materiálu. Značná pozornost také byla věnována analýze klimatických podmínek v jednotlivých prostředích, které mají velký vliv na celkovou pevnost, spolehlivost a životnost lepených spojů.

Cílem experimentální části bylo stanovit degradaci a vlastnosti lepidel za působení vnějších teplot, s kterými se můžeme setkat v praxi při uskladnění a přepravě lepidel. Mohou to být nízké teploty, které jsou dosaženy v zimním období nebo středně vysoké a vysoké teploty, které vznikají přímým slunečním zářením, či slunečním zářením umocněným přes sklo (např. teplota v automobilu). Velký vliv při slunečním záření na teplotu má samozřejmě i barva podkladu (obalu lepidla).

Předmětem zkoumání byla běžná lepidla, která nejsou speciálně určena pro práci za vysokých teplot. Konkrétně byla podrobena zkoumání dvě epoxidová lepidla značky epoxidová lepidla a jedno „vteřinové“.

Pevnost spojů se u všech lepidel zvyšovala od nejnižších teplot prostředí až po dosažení teplot v rozsahu 20 – 60 °C podle druhu lepidla. Překročila-li teplota interval 60 – 80 °C docházelo ke snížení celkové pevnosti lepidel a po překonání teplot o hodnotě 100 – 140 °C nastával jejich mezní stav.

Přínosem této práce bylo detailnější seznámení s technologií lepení a analýza klimatických podmínek prostředí, které ovlivňují životnost a pevnost celého lepeného systému. Dalším přínosem jsou nepochybně výsledky experimentu, které prokázaly, že průběh pevnosti lepených spojů se postupně mění v závislosti na teplotě ovlivňující tuby lepidel.

7 Seznam literatury

- [1] UHLÍŘ, A. *Nauka o materiálu 2*. 1st ed. Praha: SNTL, 1992. ISBN 80-03-00526-4.
- [2] KOVAČIČ, L. *Lepenie kovov a plastov*. 2nd ed. Bratislava: ALFA SNTL, 1984. 392 p
- [3] PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980. 392 p. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] OSTEN, M. *Práce s lepidly a tmely*. 3rd ed. Praha: Grada, 1996. 129 p. ISBN 80-7169-338-3.
- [5] POKORNÝ, M. *Lepení a tmelení v dílně i domácnosti*. 1st ed. Praha: Grada, 2000. 104 p. ISBN 80-7169-857-1.
- [6] BOUBLÍK, V. *Lepidla a jejich příprava*. 2nd ed. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 192 p.
- [7] MÜLLER, M. *Lepení plechů – Jednoduše přeplátované spoje, seminář: Technologie spojování plechů, Česká společnost pro výzkum zpracování plechu, Praha 10. 11. 2010, CD, ISBN 978-80-01-04672-2*
- [8] KŘÍŽ, R – VÁVRA, P. *Strojírenská příručka – svazek č. 5*. Praha: Scientia, spol. s.r.o. v Praze, 1994. 241 s. ISBN 80-85827-59-X.
- [9] KUDLÁČEK, I.: *Degradační procesy*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1994. 171 s.
- [10] Firemní dokumenty. KM plus – Pryskařice 1200/371
- [11] LOCTITE: *Der Loctite. Worldwide Design Handbook*. München: Loctite European Group, 1998. 452 s.
- [12] MÜLLER, M: *Lepení plechů: Technologie spojování plechů, Česká společnost pro výzkum zpracování plechu, Praha 10. 11. 2010, CD, ISBN 978-80-01-04672-2*
- [13] OSTEN, M.: *Práce s lepidly a tmely*. Praha: SNTL, 1986. 288 s.
- [14] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vydavatelství VŠCHT v Praze, 2007. 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [15] MESSLER, R. W. *Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology*. Burlington: Elsevier, 2004. 790 s. ISBN 0-7506-7757-0

- [16] FREJDIN, A. *Pevnost' a životnost lepených spojov*. 1st ed. Bratislava: ALFA, 1988. 288 p.
- [17] BROŽEK, M. *Technologie lepení*. student.czu [online]. [cit.2012-12-20]. Dostupné: <https://student.czu.cz/popup.php?id_menu=2&id_subject=3328>
- [18] ufmi.ft.utb [online]. [cit.2013-1-20]. Dostupné: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_14.pdf>
- [19] ksp.tul [online]. [cit.2012-12-20]. Dostupné: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm>
- [20] novato [online]. [cit.2013-2-25]. Dostupné: <<http://www.novato.cz/cz/sortiment/lepeni-a-tmeleni/product.html?id=61>>
- [21] testo [online]. [cit.2013-2-25]. Dostupné: <<http://www.testoservis.cz/data/pdf/845.pdf>>
- [22] ksp.tul [online]. [cit.2012-12-20]. Dostupné: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf>
- [23] ohaus-vahy [online]. [cit.2013-2-26]. Dostupné:<<http://www.ohaus-vahy.cz/levna-vaha-cl501>>
- [24] alteco [online]. [cit.2013-3-13]. Dostupné: <http://www.alteco.cz/epoxidova-lepidla_3-ton-quick-epoxy>
- [25] piskovacky [cit.2013-3-15]. Dostupné: <<http://www.piskovacky.cz/piskovacky-profi.php>>
- [26] alteco [online]. [cit.2013-3-27]. Dostupné: <http://www.alteco.cz/epoxidova-lepidla_3-ton-epoxy-steel>
- [27] Norma: ČSN ISO 10365: Lepidla - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje. Praha: Český normalizační institut, 1995. 6 s.
- [28] Norma: ČSN EN 1465: 2009. Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přelátovaných lepených sestav. 2009. 11 s.

Seznam použitých obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1 Tvary a rozměry zkušebních vzorků dle ČSN EN 1465	5
Obr. 2 Základní typy porušení lepeného spoje	6
Obr. 3 Sekundové lepidlo NOVAX	8
Obr. 4 Epoxidová pryskyřice 1200/371	8
Obr. 5 Lepidla Alteco 3 – Ton	9
Obr. 6 Univerzální trhací stroj ZDM 5t	10
Obr. 7 Tryskací kabina ITB 65	11
Obr. 8 Infra- teploměr TESTO 845	12
Obr. 9 Tryskání	13
Obr. 10 Rozmístění zkušebních tělísek před lepením	14
Obr. 11 Princip měření teploty teploměrem Testo 845	15
Obr. 12 Kontrolní váha Ohaus CI 501	15
Obr. 13 Plastová špachtle	16
Obr. 14 Kompletace zkušebních vzorků a jeho mikroskopický řez	16
Obr. 15 Fixace a zatížení lepených spojů	17
Obr. 16 Čelisti univerzálního zkušebního stroje ZDM 5t	18
Obr. 17 Posouzení porušení spoje	20
Obr. 18 Adheze a koheze	21
Obr. 19 Kapková metoda k určení vhodnosti lepidla	22
Obr. 20 Princip válcového nanášecího zařízení se stíracím nožem	25
Obr. 21 Princip válcového nanášecího zařízení se vzduchovým stíracím nožem a natíracím válcem	26
Obr. 22 Namáhání lepeného spoje v tahu, ve smyku a v odlupování	32
Obr. 23 Spoj tupý a spoj tupý zkosený	33
Obr. 24 Spoje jednostranně a oboustranně přeplátované	34
Obr. 25 Spoj lemový	34
Obr. 26 Spoje drážkové a spoj zubový	34
Obr. 27 Spoj nátrubkový a hrdlový	35
Obr. 28 Základní příklady konstrukčního provedení koutových spojů	35

Obr. 29 Použití lepených spojů u karoserie automobilu	40
Obr. 30 Řez voštinovým sendvičovým panelem	42
Obr. 31 Komerčně dostupný veterometr	49
Obr. 32 Sušárna KBC G-100/250	54
Obr. 33 Změna struktury lepidel A4 a A30	58
Obr. 34 Lepidlo Novax (NOSE) po vyjmutí ze sušárny	59
Obr. 35 Nános lepidla na zkušební tělíska	61
Obr. 36 Porovnání porušení spojů	62

Seznam tabulek

Tab. 1 Klasifikace lepidel dle fyzikální formy	29
Tab. 2 Porovnání technologií spojování	37
Tab. 3 Báze lepidel a charakter lepeného spoje	41
Tab. 4 Příklady použití lepených spojů v letectví	42
Tab. 5 Naměřené teploty lepidel 1. série	50
Tab. 6 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 1. série	51
Tab. 7 Naměřené teploty lepidel 2. série	52
Tab. 8 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 2. série	52
Tab. 9 Naměřené teploty lepidel 3. série	53
Tab. 10 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 3. série	54
Tab. 11 Naměřené teploty lepidel 4. série	55
Tab. 12 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 4. série	56
Tab. 13 Naměřené teploty lepidel 5. série	56
Tab. 14 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 5. série	57
Tab. 15 Naměřené teploty lepidel 6. série	58
Tab. 16 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku 6. série	59
Tab. 17 Výsledky zkoušky pevnosti a porušení spojů	61
Tab. 18 Rovnice regresí a koeficienty spolehlivosti	64

Přílohy

Příloha 1: Tabulky naměřených teplot lepidel

Teplota prostředí	Měření teploty	Označení lepidel	1	2	3	4	5	6	Průměrná teplota [°C]
-18 °C	po vyjmutí z lednice	EP12	-3,2	-3	-2,9	-3,4	-3,1	-3,2	-3,13
		A30	4,2	4,3	4,6	3,9	4,3	4,1	4,23
		A4	5,2	5,6	5,7	5,3	5,3	5,2	5,38
		NOSE	7,5	7,3	7,6	7,4	7,8	7,4	7,5
	před aplikací	EP12	11,4	11,6	11,4	11,4	11,6	11,5	11,48
		A30	19,6	19,7	19,6	19,8	19,9	19,7	19,71
		A4	19,9	20,1	19,8	19,9	20,1	20,1	19,98
		NOSE	18,3	17,9	18,2	18,2	18,1	18,1	18,13
6 °C	po vyjmutí z lednice	EP12	12,6	12,8	12,7	12,8	12,9	12,7	12,75
		A30	16,71	16,72	16,5	16,2	16,3	16,2	16,43
		A4	15,2	15,3	15,4	15,1	15,2	15,2	15,23
		NOSE	12,8	12,5	12,6	12,6	12,7	12,6	12,63
	před aplikací	EP12	16,5	16,6	16,6	16,7	16,8	16,8	16,66
		A30	20,2	20,3	20,3	20,4	20,4	20,3	20,31
		A4	20,4	20,3	20,4	20,3	20,5	20,2	20,35
		NOSE	19,2	19,1	19,2	19,3	19,1	19,2	19,18
23 °C	před aplikací	EP12	20,3	20,4	20,3	20,3	20,4	20,5	20,36
		A30	20,1	20,7	21,5	20,8	20,5	21,2	20,8
		A4	20,8	20,6	21	20,8	20,7	20,6	20,75
		NOSE	19,2	19,2	19,3	19,1	19,3	19,3	19,23
60 °C	po vyjmutí ze sušárny	EP12	50	49,8	49,6	49,6	49,5	49,5	49,66
		A30	45	44-9	44,6	44	43,8	43,8	36,68

		A4	42,6	42,3	42,1	42,1	42	41,8	42,15
		NOSE	50,1	50,2	49,8	49,9	50,1	50	50,01
	před aplikací	EP12	25,9	26	25,8	26	25,8	25,8	25,88
		A30	21,5	21,4	21,4	21,5	21,5	21,4	21,45
		A4	20,3	20,5	20,4	20,5	20,5	20,4	20,43
		NOSE	20,3	20,2	20,4	20,3	20,4	20,4	20,33
100°C	po vyjmutí ze sušárny	EP12	81,2	80,6	82,3	80,4	81,9	81,6	81,33
		A30	78,4	74,5	76,5	73,2	74,2	73,1	74,98
		A4	67,9	66,5	65,4	65,7	63,2	61,7	65,06
		NOSE	65,4	64,2	63,2	64,7	66,7	65,3	64,91
	před aplikací	EP12	41,7	42,1	41,6	41,1	40,8	41,3	41,43
		A30	35	35,2	35,6	35,2	35,1	35,6	35,28
		A4	30,8	30,6	31,2	31	31,4	31,2	31,03
		NOSE	28,1	27,9	27,8	27,6	28,5	28,4	28,05
140°C	po vyjmutí ze sušárny	EP12	125,1	125,5	124,3	123,2	125	125,2	124,71
		A30	126,1	126,5	125,9	125,7	124,8	125,2	125,70
		A4	120,6	120,6	121,2	121,1	120,7	120,8	120,83
		NOSE	123,6	124,2	125	123,9	124,5	124,8	124,33
	před aplikací	EP12	48,2	48,9	48,1	48,6	49	48,6	48,56
		A30	35,2	35,1	35,5	35,3	35,3	35,2	35,26
		A4	33,3	33,1	33,5	33,1	33,2	33,2	33,23
		NOSE	30,3	30,6	30,5	30,5	30,6	30,5	30,50

Příloha 2: Tabulky naměřených pevností ve smyku

Teplota prostředí – 18 °C

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,3	2680	AF	8,71
2	12,2	3000	AF	9,83
3	12,4	2920	AF	9,41
4	11,8	3040	AF	10,30
5	12,3	3120	AF	10,14
6	12,2	3220	AF	10,55
7	11,8	2700	AF	9,15
8	12,4	2860	AF	9,22
9	12,1	2940	AF	9,71
10	12,2	2960	AF	9,70
		2944	ar. průměr	9,67 MPa
			sm. odchylka	0,53 MPa
			var. koeficient	5,55

A30	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,8	4460	CF	15,11
2	12,5	4660	CF	14,91
3	12,4	4820	CF	15,54
4	12,1	4680	CF	15,47
5	12,4	4520	CF	14,58
6	12,4	4740	CF	15,29
7	12,3	4380	CF	14,24
8	12,1	4600	CF	15,20
9	12,0	4480	CF	14,93
10	12,6	4780	CF	15,17
		4612	ar. průměr	15,0479524 MPa
			sm. odchylka	0,37827422 MPa
			var. koeficient	2,51379197

A4	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,6	4000	CF	12,69
2	12,8	4420	CF	13,81
3	11,6	3780	CF	13,03
4	12,3	4400	CF	14,30
5	12	4340	CF	14,46
6	12,2	3680	CF	12,06
7	11,8	4420	CF	14,98
8	12	4380	CF	14,60
9	12,2	4280	CF	14,03
10	12,4	4300	CF	13,87
		4200	ar. průměr	13,78 MPa
			sm. odchylka	0,87 MPa
			var. koeficient	6,32

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,8	4220	AF	14,30
2	12	3880	AF	12,93
3	12,1	3920	AF	12,95
4	12,3	3640	AF	11,83
5	12,2	3880	AF	12,72
6	12,4	3880	AF	12,51
7	12,2	3620	AF	11,86
8	11,8	4060	AF	13,76
9	11,8	3600	AF	12,20
10	11,9	3480	AF	11,69
		3818	ar. průměr	12,68
			sm. odchylka	0,80
			var. koeficient	6,37

MPa
MPa

Teplota prostředí 6

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,6	2680	AF	9,24
2	12,4	2880	AF	9,29
3	11,4	3200	AF	11,22
4	11,4	3160	AF	11,08
5	12,2	3600	AF	11,80
6	12,4	3480	AF	11,22
7	12	2820	AF	9,40
8	12,4	3180	AF	10,25
9	12,1	3080	AF	10,18
10	11,3	2920	AF	10,33
		3100	ar. průměr	10,40
			sm. odchylka	0,86
			var. koeficient	8,29

MPa
MPa

A30	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,6	4680	CF	16,13
2	11,5	4400	CF	15,30
3	11,6	4360	CF	15,03
4	11,9	4420	CF	14,85
5	12,8	4880	CF	15,25
6	12	4480	CF	14,93
7	11,6	4460	CF	15,37
8	12,2	4720	CF	15,47
9	11,6	4420	CF	15,24
10	11,2	4200	CF	15,00
		4502	ar. průměr	15,26
			sm. odchylka	0,34
			var. koeficient	2,28

MPa
MPa

A4	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,6	4080	AF	12,95
2	12,2	4440	CF	14,55
3	12,2	4380	CF	14,36
4	11,4	4520	CF	15,85
5	12,3	3860	CF	12,55
6	12,2	4120	CF	13,50
7	11,8	3800	CF	12,88
8	12,4	4240	AF	13,67
9	12,4	4420	CF	14,25
10	12,3	4560	CF	14,82
		4242	ar. průměr	13,94
			sm. odchylka	0,97
			var. koeficient	6,95

MPa
MPa

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,2	3520	AF	12,57
2	12,1	4380	AF	14,47
3	12,4	4400	AF	14,19
4	12,2	4320	AF	14,16
5	12,8	4380	AF	13,68
6	12,6	4200	AF	13,33
7	11,8	3760	AF	12,74
8	12,8	3580	AF	11,18
9	12,2	3600	AF	11,80
10	11,9	3880	AF	13,04
		4002	ar. průměr	13,12
			sm. odchylka	1,01
			var. koeficient	7,76

MPa
MPa

Teplota prostředí 23 °C

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,5	3820	AF	12,2
2	12,4	3920	AF	12,64
3	12,5	3780	AF	12,09
4	12,6	3780	AF	12,00
5	12,4	3960	AF	12,77
6	12,8	4140	AF	12,93
7	12,8	3420	AF	10,68
8	12,5	3520	AF	11,26
9	12,2	3560	AF	11,67
10	12,5	3460	AF	11,07
		3736	ar. průměr	11,93
			sm. odchylka	0,71
			var. koeficient	6,01

MPa
MPa

A30	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,1	4820	CF	15,93
2	12,6	4580	CF	14,53
3	12,4	5140	CF	16,58
4	12,2	4780	CF	15,67
5	12,4	4620	CF	14,90
6	12,8	4580	CF	14,31
7	12,7	4740	CF	14,92
8	12,4	4940	CF	15,93
9	12,3	4820	CF	15,67
10	12,2	4720	CF	15,47
		4774	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	15,39 0,67 4,36

MPa
MPa

A4	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,8	4760	CF	14,87
2	12,7	4780	CF	15,05
3	12,7	4800	CF	15,11
4	12,6	4560	CF	14,47
5	12,4	4520	CF	14,58
6	12,2	4200	CF	13,77
7	12,3	3980	CF	12,94
8	13	4720	CF	14,52
9	12,3	4580	CF	14,89
10	12,5	4220	CF	13,50
		4512	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	14,37 0,69 4,81

MPa
MPa

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,6	4600	AF	15,86
2	11,8	3520	AF	11,93
3	12,4	4580	AF	14,77
4	11,4	3540	AF	12,42
5	11,2	3260	AF	11,64
6	11,4	4340	AF	15,22
7	11,3	4120	AF	14,58
8	12,2	4340	AF	14,22
9	11,6	3620	AF	12,48
10	11,8	4120	AF	13,96
		4004	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	13,71 1,40 10,25

MPa
MPa

Teplota prostředí 60 °C

EP12	Překlátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,6	3980	AF	12,63
2	12,4	3500	AF	11,29
3	11,6	3280	AF	11,31
4	12,1	3360	AF	11,10
5	12,3	3780	AF	12,29
6	12,6	3700	AF	11,74
7	12,1	3460	AF	11,43
8	11,6	3520	AF	12,13
9	12,4	3860	AF	12,45
10	12,4	3780	AF	12,19
		3622	ar. průměr	11,86
			sm. odchylka	0,52
			var. koeficient	4,38

MPa
MPa

A30	Překlátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,1	4500	CF	14,87
2	12,1	4480	CF	14,80
3	12,8	5020	CF	15,68
4	12,8	4820	CF	15,06
5	12,6	4760	CF	15,11
6	12,4	4720	CF	15,22
7	11,8	4620	CF	15,66
8	12,4	4740	CF	15,29
9	12	4580	CF	15,26
10	13	4900	CF	15,07
		4714	ar. průměr	15,20
			sm. odchylka	0,27
			var. koeficient	1,81

MPa
MPa

A4	Překlátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12	3960	CF	13,20
2	12,2	4180	CF	13,70
3	12,4	4240	CF	13,67
4	12,8	4500	CF	14,06
5	12,8	4320	CF	13,50
6	12,4	4400	CF	14,19
7	12,6	4220	CF	13,39
8	13,4	4820	CF	14,38
9	12,6	4380	CF	13,90
10	11,8	4400	CF	14,91
		4342	ar. průměr	13,89
			sm. odchylka	0,48
			var. koeficient	3,50

MPa
MPa

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	11,8	4120	AF	13,96
2	12	4240	AF	14,13
3	11,4	3920	AF	13,75
4	12	4280	AF	14,26
5	12	4520	AF	15,06
6	11,8	3660	AF	12,40
7	12,2	3880	AF	12,72
8	12,2	4000	AF	13,11
9	12,3	3980	AF	12,94
10	11,4	4180	AF	14,66
		4078	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	13,70 0,83 6,07

MPa
MPa

Teplota prostředí 100 °C

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,9	3300	AF	10,23
2	12,2	3320	AF	10,88
3	11,8	2980	AF	10,10
4	12,6	3200	AF	10,15
5	11,4	3080	AF	10,80
6	12,5	3420	AF	10,94
7	12,2	3380	AF	11,08
8	11,8	3720	AF	12,61
9	11,8	3400	AF	11,52
10	12,6	2900	AF	9,20
		3270	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	10,75 0,87 8,13

MPa
MPa

A30	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,6	4760	AF	15,11
2	12,4	4520	AF	14,58
3	12,8	4380	AF	13,68
4	12,4	4620	AF	14,90
5	12,2	4400	AF	14,42
6	12	3920	AF	13,06
7	13	4680	AF	14,40
8	12,6	4480	AF	14,22
9	13,2	4620	AF	14,00
10	12,4	4100	AF	13,22
		4448	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	14,16 0,63 4,51

MPa
MPa

A4	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,4	3560	AF	11,48
2	11,8	3420	AF	11,59
3	12,6	3340	AF	10,60
4	12,2	3220	AF	10,55
5	12	3480	AF	11,60
6	12,2	3660	AF	12,00
7	12,4	3200	AF	10,32
8	11,4	3140	AF	11,01
9	13	3320	AF	10,21
10	11,8	3300	AF	11,18
		3364	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	11,05 0,58 5,25

MPa
MPa

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	13	4720	AF	14,52
2	13,2	5260	AF	15,93
3	12,4	5420	AF	17,48
4	12,4	4180	AF	13,48
5	12,6	5380	AF	17,07
6	11,6	3400	AF	11,72
7	13,8	4680	AF	13,56
8	12,8	4840	AF	15,12
9	13	5620	AF	17,29
10	11,6	3520	AF	12,13
		4702	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	14,83 1,99 13,46

MPa
MPa

Teplota prostředí 140 °C

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]
1	12,2	3340	AF	10,95
2	12,8	3620	AF	11,31
3	12	3220	AF	10,73
4	12,8	3020	AF	9,43
5	13,2	3300	AF	10,00
6	13	3100	AF	9,53
7	12,8	3480	AF	10,87
8	12	3280	AF	10,93
9	12,5	3360	AF	10,75
10	12,8	2980	AF	9,31
		3270	ar. průměr sm. odchylka var. koeficient	10,38 0,69 6,73

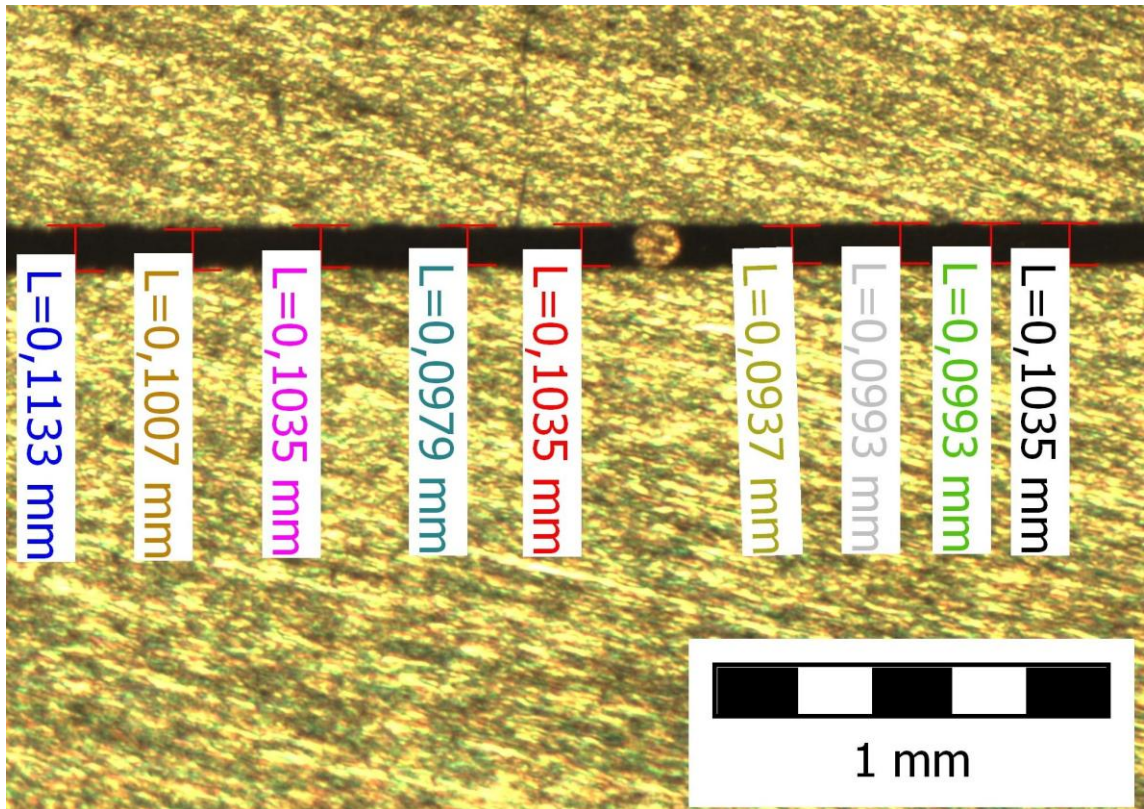
MPa
MPa

NOSE	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]	
1	12,2	4060	AF	13,31	
2	13,6	3980	AF	11,70	
3	13,2	3680	AF	11,15	
4	12,8	3380	AF	10,56	
5	13,4	4400	AF	13,13	
6	12,8	4620	AF	14,43	
7	12,4	3680	AF	11,87	
8	12,5	3820	AF	12,22	
9	12,9	4160	AF	12,89	
10	12	4180	AF	13,93	
		3996	ar. průměr	12,52	MPa
			sm. odchylka	1,17	MPa
			var. koeficient	9,34	

Oboustranný nános lepidla

EP12	Přeplátování [mm]	Síla [F]	Porušení	Pevnost [MPa]	
1	12,2	3500	CF	11,47	
2	12,6	3420	CF	10,85	
3	12,8	3700	CF	11,56	
4	11,4	3420	CF	12,00	
5	11,8	3640	CF	12,33	
6	12,4	3420	CF	11,03	
7	12,2	3820	CF	12,52	
8	12,2	3620	CF	11,86	
9	11,8	3400	CF	11,52	
10	12	3600	CF	12,00	
		3554	ar. průměr	11,71	MPa
			sm. odchylka	0,50	MPa
			var. koeficient	4,30	

Příloha 3: Obrazová analýza tloušťky lepeného spoje



	Tloušťka spoje [mm]
1	0,11
2	0,10
3	0,10
4	0,10
5	0,09
6	0,09
7	0,10
8	0,09
9	0,10
Ar. průměr	0,10
Sm. odchylka	0,005
Var. koeficient	4,95

Příloha 4: Naměřené drsnosti povrchu adherendu

	Ra [μm]	R3z [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]
1	1,62	6,2	13,1	11,7
2	2,48	7,2	22,4	17,2
3	1,91	6,7	22,2	14,5
4	2,12	7,0	20,2	12,8
5	2,17	8,5	17,2	13,5
6	2,0	7,8	27,6	15,5
7	2,41	7,6	24,6	16,3
8	2,21	8,0	15,4	13,5
Ar. průměr	2,11	7,37	20,33	14,37
Sm. odchylka	0,25	0,69	4,54	1,73
Var. koeficient	12,19	9,46	22,34	12,08