



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

URYCHLENÍ MANIPULAČNÍ PEVNOSTI U 2K PUR LEPIDLA

ACCELERATE HANDLING STRENGTH IN 2K PUR ADHESIVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jana Slatinská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Jana Slatinská
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Urychlení manipulační pevnosti u 2K PUR lepidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Automobilový průmysl se stále více věnuje přechodu na elektromobily.

Požadavek snižování celkové hmotnosti vede k využívání kompozitních materiálů. Spolehlivou metodou spojování je lepení dvou povrchů na bázi plastů. Často používaným lepidlem je 2K polyuretan, jehož vytvrzení je časově náročné. Práce řeší možnosti urychlení vytvrzení lepidla na manipulační pevnost.

Cíle bakalářské práce:

1. Literární studie technologie lepení.
2. Návrh experimentální práce zaměřené na chování lepidla při různých podmínkách vytvrzování.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení experimentální práce a doporučení pro praktické využití.

Seznam doporučené literatury:

REIS,Patricia. Loctite, Worldwide Design Handbook. 2 vyd. Mainz: Erasmusdruck GmbH. 1998. 452s. ISBN 0-96 5590-0-5.

OSTEN,Milan. Práce s lepidly a tmely. 3vyd. Praha: Grada Publishing s.r.o.1996. 136s. ISBN 80-7169-338-3.

KOVAČIČ,Lubomír. Lepenie kovov a plastov. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1980. ISBN 63-052-79.

Loctite, 2019. Průmyslová lepidla a tmely, [http:// www.loctite.cz](http://www.loctite.cz)

Sika CZ,2019. produkty a řešení , [http:// www.cze.sika.com](http://www.cze.sika.com)

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

SLATINSKÁ Jana: Urychlení manipulační pevnosti u 2K PUR lepidla

Práce se věnuje urychlení doby k získání manipulační pevnosti u dvoukomponentního polyuretanového adheziva, které bylo nově zakoupeno ve firmě Magna Exteriors Bohemia a bylo potřeba otestovat. K urychlení po rozboru problému byly vybrány metody IR zářiče, teplotní komory, které se porovnávaly s vytvrzením pouze při teplotě okolí. V druhé části práce bylo provedeno měření maximálního napětí, které daný spoj vydrží bez poškození. Z výsledků plyne, že metoda urychlení vytvrzení pomocí IR zářiče je nejrychlejší, ovšem se musí v potaz vzít ekonomická stránka věci, protože je to i nejdražší možnost urychlení. Teplotní komora je téměř 2x pomalejší, ale zase levnější. V závěru práce se zhodnocuje ekonomická efektivita nového řešení lepicí linky a jak velký potenciál ušetření peněz se zde naskýtá.

Klíčová slova

lepení, dvoukomponentní polyuretan, manipulační pevnost, IR zářič, klimatická komora, křivka vytvrzení

ABSTRACT

SLATINSKÁ Jana: Accelerate handling strength in 2K PUR adhesives

This paper is devoted to accelerating the time to obtain the handling strength of two-component polyurethane adhesive, which was newly purchased by the company Magna Exteriors (Bohemia) and had to be tested. In order to speed up the analysis of the problem, methods of IR emitters and temperature chambers were selected to be compared with curing using only the ambient atmosphere. In the second part of this paper, the maximum strength of the bond which withstand the test without damage was measured. The results show that the method of accelerating curing process using an IR emitter is the fastest, but the economic side of things must be taken into account, because it is also the most expensive option of acceleration. The temperature chamber is almost twice as slower, but cheaper. At the end of the thesis, the economic efficiency of the new adhesive line solution is evaluated and how much money can be ideally saved.

Key words

adhesive joining technology, two-component polyurethane, handling strength, IR emitter, climate chamber, curing curve

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLATINSKÁ, Jana. *Urychlení manipulační pevnosti u 2K PUR lepidla* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125053>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Urychlení manipulační pevnosti u 2K PUR lepidla** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. 6. 2020

Datum

Jana Slatinská

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Kubíčkoví a konzultantovi Ing. Lubošovi Lorenzovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a blízkým.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR PROBLÉMU	10
1.1 Varianty řešení.....	10
2 TEORIE LEPENÍ.....	15
2.1 Předúprava povrchu.....	15
2.2 Smáčivost	16
2.3 Adheze	17
2.4 Koheze	17
2.5 Lom lepeného spoje a jeho příčiny	17
2.6 Rozdělení lepidel	18
2.6.1 Rozdělení lepidel dle počtu složek lepidla	18
2.6.2 Rozdělení lepidel dle chemického základu lepidla.....	18
2.6.3 Rozdělení lepidel podle třídy pevnosti	19
2.6.4 Rozdělení lepidel podle chemického principu vytvrzení	19
2.6.5 Rozdělení lepidel podle fyzikálního principu vytvrzení	21
2.7 Vytvrzení 2K lepidel	21
2.8 Zkoušky lepených spojů	22
2.8.1 Nedestruktivní zkoušky lepených spojů	22
2.8.2 Destruktivní zkoušky lepených spojů	23
3 NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	24
3.1 Použité přístroje a další přípravy	25
3.2 Použité vzorky – tělíska	27
3.3 Návrh experimentu	28
3.4 Provedení experimentu	28
3.5 Vyhodnocení výsledků.....	29
3.5.1 Vytvrzování spoje při teplotě okolí	30
3.5.2 Vytvrzování IR zářičem.....	31
3.5.3 Vytvrzení tepelnou komorou	34
3.5.4 Porovnání výsledků.....	36
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	37
5 ZÁVĚR	39

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [1]

V celém automobilovém průmyslu je vyvíjen tlak na snížení hmotnosti výrobků. Tento tlak se zvyšuje zejména s rostoucím trendem využití elektromobilů, kde velkou část hmotnosti tvoří akumulátory a je tedy třeba ušetřit hmotnost jinde. V této souvislosti jsou zejména dodavatelé nuceni vyrábět komponenty z lehčích materiálů.

Jednou z cest je použití platů a kompozitních materiálů, které nahrazují materiály kovové. Pro jejich spojení je možné použít více způsobů, ale v praxi se jako nejsnadnější jeví spojení pomocí lepení. Je to poměrně jednoduchá technologie, jejíž nevýhodou v praxi je však doba vytvrzování. Cílem dodavatelů je její zkrácení a tím zkrácení doby výroby dílů a zvýšení kapacity výrobních linek, aby bylo možné splnit poptávku.

Tato práce vznikla z potřeb zadavatele, kterým je výrobce vnějších plastových dílů pro automobilový průmysl Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. v Liberci a jejím cílem je zjistit potenciál zkrácení doby okamžité fixace pro dosažení manipulační pevnosti při lepení. Zároveň ale musí být dodržena doba zpracovatelnosti, aby bylo možné nanést housenku adheziva na celý díl a poté zahájit samotný proces lepení.

Současně se využívá dvousložkové polyuretanové lepidlo. Mezi výhody tohoto lepidla patří vysoká pevnost ve smyku i v odlupování a teplotní a chemická odolnost. Nevýhodou je vysoká cena a zdravotní škodlivost. Toto lepidlo umožňuje dosažení manipulační pevnosti za 6 minut. Cílem je u nového typu lepidla zjistit možnosti zkrácení této doby.

Pro zkrácení této doby je možné využít konvenční i nekonvenční metody. Mezi konvenční se řadí IR zářič, teplotní komora a mezi nekonvenční například ultrazvuk. Každá metoda má své výhody a nevýhody, některé jsou rychlejší, ale zase dražší. Při zkracování doby k dosažení manipulační pevnosti se tedy musí vzít v úvahu i ekonomická stránka problému,

1 ROZBOR PROBLÉMU

Každé lepidlo má jiný způsob vytvrzování a jsou tedy pro něj vhodné různé metody. Cílem práce je zjistit efektivní, rychlý a spolehlivý způsob vytvrzení dvoukomponentního polyuretanového lepidla, které se využívá ve firmě Magna Exteriors (Bohemia), kde se koná i praktická část této práce, a při jaké teplotě, jakým způsobem a jaký čas je potřebný na vytvrzení.

Firma mění druh využívaného lepidla na lince pro lepení pátých dveří automobilu BMW i3, a proto je potřeba nalézt nejvhodnější způsob urychlení vytvrzení adheziva pro danou firmu a dané dispozice. Aktuální lepidlo využívá metodu IR záření pro vytvrzení, kde je potřeba 4 minut zahřívání a 2 minuty chlazení k dosažení manipulační pevnosti. Cílem je tuto hodnotu co možná nejvíce snížit.

1.1 Varianty řešení

Rychlost vytvrzení lepidla, aby získal manipulační pevnost, je pro výrobní linky stěžejní. Při každé urychlené minutě nebo sekundě se získává čas na uvolnění linky pro další výrobu nebo se ušetří energie potřebná k chodu. Působením záření nebo tepla se podporují reakce v adhezivu, které pak rychleji získá požadovanou pevnost.

Způsobů urychlení vytvrzování lepeného spoje je mnoho. Mezi konvenční způsoby patří vytvrzení vzdušnou vlhkostí nebo teplem. Vzhledem k urychlování linek a celkově výroby se ovšem výzkum snaží přijít s novými způsoby, které dokáží tento proces zkrátit. Mezi ně patří nekonvenční způsoby vytvrzování jako vytvrzování nanočásticemi nebo mikrovlnným zářením.

• Konvenční způsoby urychlení [2, 3]

Vytvrzení vzduchem – tento způsob vytvrzení není urychlen externím zdrojem, avšak dají se ovlivnit podmínky, v kterých se spojované komponenty nalézají. Podmínky jako vlhkost a teplota okolí mohou ovlivnit velmi výrazně rychlost vytvrzování. Principem vytvrzování vzduchem je vaporizace roztoků v daném adhezivu.

• Teplotní komora [4, 5, 6, 7]

Vytvrzování v teplotní komoře je jedním z nejčastějších způsobů vytvrzování lepených spojů. Je to metoda levná, a i principiálně jednoduchá (včetně vybavení). Tepelné vytvrzování zahrnuje řadu výhod – vyšší pevnost, tvrdost a někdy se i chemická a tepelná odolnost zvýší. Při vytvrzování tepelném je důležitá přesná kontrola teplot a vytvrzovací doby dle daného adheziva a typu spoje. Teplo, které komora generuje, v daném spoji iniciuje polymerační reakci, která zaručí vytvrzení adheziva. Každé adhezivum reaguje na teplo jinak, uretany a epoxidy vytvrzují lépe za zvýšené teploty, zatímco např. akryláty na toto reagují negativně. Přestože většina dvoukomponentních adheziv se vytvrdí pouze při teplotě okolí, teplem se tento proces výrazně urychlí.

Reakční rychlost v závislosti na teplotě popisuje Arrheniova rovnice:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1.1)$$

kde: A_f – předexponenciální faktor (pravděpodobnost srážky molekul)

E_a – aktivační energie

k – rychlostní konstanta

R – molární plynová konstanta

T – termodynamická teplota

Nevýhodou je velká spotřeba energie (ztráty pro zahřátí i prostoru kolem spoje, není koncentrace tepla na komponenty) a delší čas pro úplné vytvrzení spoje.

- **UV záření** [2, 3, 8, 9, 10]

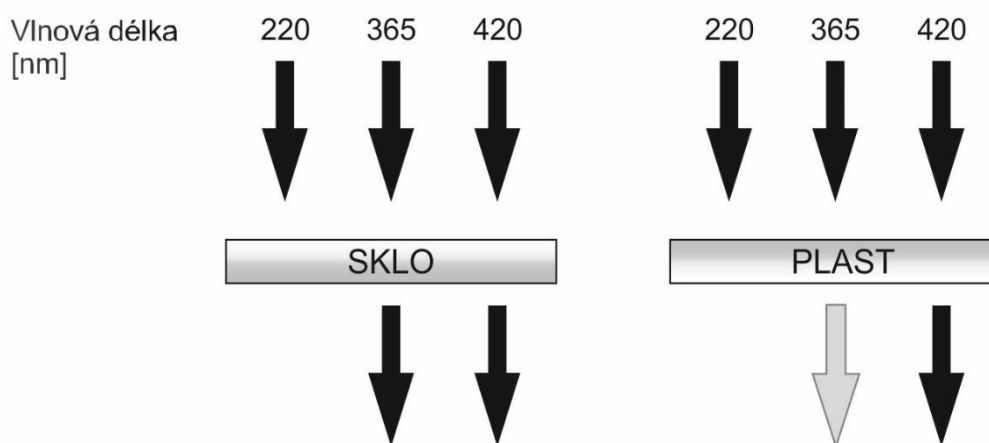
Adhezivum se vytvrzuje díky absorbování ultrafialového záření. Dvoukomponentní polyuretan se používá často v automobilovém průmyslu pro jeho rychlé vytvrzení a dobré mechanické vlastnosti. Ale protože je snaha linky stále urychlovat, a tím i šetřit čas, jsou vyhledávány novější a efektivnější metody vytvrzení. To nabízí právě metody světelného záření jako např. vytvrzování pomocí UV.



Obr. 1 Spektrum záření

UV záření spadá do kategorie světelného záření (spolu s IR zářením a zářením ve viditelném spektru). Pro UV záření se délky vln pohybují mezi 200-400 nm. UV záření je možné rozdělit dále do 3 kategorií – UV-A (315-380 nm), UV-B (280-315 nm) a UV-C (100-280 nm). V praxi se obvykle využívají vlny délky 365 nm, ale může se použít i 400-450 nm. Pak jde o viditelné záření. Na obr. 1 jsou jednotlivé kategorie záření znázorněny.

Aby došlo k vytvrzení spoje, musí se záření k adhezivu dostat přes základní substrát. Právě tato podmínka byla zpočátku vývoje lepidel, které mohly být vytvrzovány pomocí UV záření, byla základním problémem celé této metody. Časem se však vyvinula taková adheziva, u nichž může být použito záření o delších vlnových délkách – často kolem 420 nm, hovoříme pak o vytvrzování zářením ve viditelném spektru a jak je znázorněno na obr. 2 problém propustnosti substrátu byl vyřešen.



Obr. 2 Znázornění průniku záření skrz substrát v závislosti na vlnové délce

Principem metody je působení UV záření, které v adhezivu aktivuje fotoiniciátory, jež způsobí iniciaci polymerických reakcí (vytvrzení). Tyto iniciátory právě absorbují světelnou energii. Po vysazení zdroje reakce dále pokračuje, ale pouze tam, kde záření působilo. Penetrovaná hloubka, kde dojde k vytvrzení závisí na použité vlnové délce, tloušťce spoje a na absorpčních schopnostech substrátu. Kratší vlny se používají pro spojování tenkých folií (mají menší hloubku penetrace), naopak delší vlny jsou vhodnější pro silnější spoje.

Kromě primárního vytvrzování UV zářením během procesu dochází i k vytvrzování sekundárnímu – teplem (proces probíhá při 100–150 °C) nebo okolní vlhkostí. Při kombinaci záření ve viditelném spektru spolu s UV zářením se zvýší vytvrzovací hloubka i mechanické vlastnosti spoje.

Výhodou této metody je, že se výrazně rozšiřuje pole působnosti a aplikací oproti klasickému vytvrzování teplem. Dochází totiž k redukci tepelně ovlivněné oblasti, a tím se i výrazně zmenší napětí a deformace v základním materiálu. Dále jsou metody vytvrzené zářením daleko rychlejší než tradičnější způsoby. Za zmínku také stojí zvýšení efektivity přenosu energie ze zdroje do spoje. U světelných metod je možné využít i lokalizace záření pomocí čoček (místní vytvrzení). Tato lokalizace zaručí i menší ztráty energie a vyšší využití.

Nevýhodou této metody pro polyuretany je to, že PUR při působení UV záření degradují. Proto se častěji se tato metoda používá pro epoxidy. Další nevýhodou je, že se musí použít taková adheziva, která rychle reagují na světelnou energii a také může dojít i k neúplnému vytvrzení a tak „lepivému“ povrchu s nekonzistentními fyzikálními vlastnostmi.

• **Vytvrzení IR zářičem [3, 5, 11]**

Vytvrzování IR zářičem je v dnešní době na vzestupu. Tato metoda patří stejně jako UV záření do oblasti vytvrzování spojů pomocí radiace (zářením). Délky vln u této metody se pohybují nad viditelným spektrem. Tzv. „blízké“ vlny se pohybují v rozmezí 750-1200 nm, krátké vlny 1200-2000 nm a střední vlny IR 2000-3000 nm (viz obr. 1 výše). Vyšší hodnoty (dlouhé vlny) existují, ale v praxi se příliš nevyužívají.

Principem této metody je iniciace chemické reakce – polymerace – díky fotoiniciátorům v adhezivu, které jsou aktivovány externím zářením. Tento princip je také někdy nazýván jako fotopolymerizace. Jedná se vlastně o efektivní zahřátí spoje díky absorpci infračerveného záření. Polymerace zaručí přeměnu tekutého lepidla na pevné (vytvrzení). Metoda je velmi efektivní a hloubka vytvrzení závisí na délce vlny, absorpční schopnosti adheziva a tloušťky spoje (faktorů je více, tyto jsou však nejzásadnější).

Výhoda vytvrzování IR zářičem je snížení energie a tím se i podstatně sníží dopad na životní prostředí v porovnání s teplotní komorou. Stejně jako tepelná komora IR zářič ohřívá celý spoj a neaplikují teplo jako při vytvrzování UV zářičem, které působí pouze na lepidlo. Je tedy potřeba i vyšší energie, tato metoda je i pomalejší, ale oproti UV záření se zabrání lepkavému povrchu, ke kterému může dojít v důsledku neúplného vytvrzení adheziva. Další výhodou této metody je ta, že není potřeba používat transparentní základní materiály jako u UV záření. IR vlny projdou přes většinu substrátů a absorbované teplo spojovanými komponenty vytvoří i méně tepelně namáhaný spoj, čímž se sníží i napětí (zvýšení teploty iniciuje polymerizační reakci).

Nejmodernější metodou je „IR spot curing“ čili lokální vytvrzování IR zářičem, kdy se sníží spotřeba energie díky snížení ztrát. Důležitou stránkou věci, při vytvrzování teplem, ať už pomocí IR zářiče nebo např. tepelné komory, je dodat do spoje vhodné množství tepelné energie. Při nedostatečném množství se spoj správně nevytvrdí, a pokud je dodáno příliš, adhezivum, popř. i substrát degradují.

• **Nekonvenční způsoby vytvrzení**

Protože se průmysl rychle vyvíjí, je kladeno i na technologii lepení nových nároků, a je proto snaha optimalizovat i způsoby vytvrzování lepidel. Mezi takové nároky patří i potřeba recyklace – je snaha vytvořit takové metody, které by umožňovaly snadné spojení, ale i následné rozpojení komponentů bez jejich poškození, aby bylo možné tyto komponenty recyklovat, a tak je i lépe znovu využít. Ušetří se ekonomicky i ekologicky. Dnes se tento problém týká převážně plastů, které nabízejí dobré mechanické vlastnosti a nižší hmotnosti než kovy.

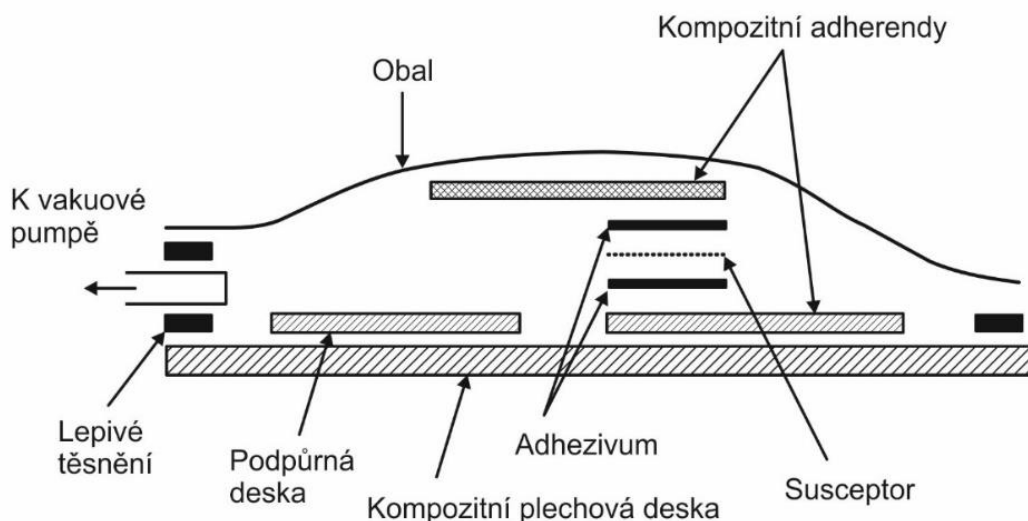
· Elektromagnetické pole – nanočástice a indukce [6, 12, 13]

Principem tohoto způsobu vytvrzování adheziva jsou nanočástice, které jsou součástí adhezivní matrice. Tyto částice reagují v elektromagnetickém poli tak, že se zahřívají a umožňují tak lepidlu dosáhnout teploty, při které se lepidlo roztaví a je umožněno vytvoření spoje. K zahřátí nanočástic dojde díky magnetickým ztrátám, především díky hysterezním ztrátám. Ty se liší v závislosti materiálu a jeho hysterezní křivky, díky tomu je i rozdílné množství tepla, které se vygeneruje během procesu.

Výhodou této metody je jednoduchost samotného procesu (časově nenáročná) a také stejná jednoduchost při rozpojování jednotlivých komponentů. Při rozpojování se používá stejných technologií a podmínek jako při spojování. Frekvence přiváděného proudu a materiálové vlastnosti ovlivňují průnik elektromagnetického pole a ovlivňují tedy i distribuci tepla. Používané nanočástice mohou být různé – vhodné jsou však částice železné, keramické nebo ocelové. Problém této metody nastává při lepení kovových materiálů, kde se indukuje teplo i v základním materiálu, tudíž jsou tak negativně ovlivněny mechanické vlastnosti. U plastů tento problém vymizí, protože nereagují s polem.

Indukční metoda dodání tepla do místa spoje byla motivována urychlením procesu. V porovnání s vytvrzováním pomocí okolí se z řádů hodin touto metodou čas procesu zkrátí na minuty (jak uvádí studie [22]) a zároveň se i zvýší pevnost spoje. Další motivací vývoje této metody bylo zlepšení efektivity přenosu tepelné energie z externího zdroje do dané oblasti. U konvenčních způsobů ohřevu dochází k velké ztrátě energie do okolí.

Princip indukčního ohřevu je stejný jako u nanočástic (viz výše) pouze s malou obměnou – u nanočástic jsou hlavním zdrojem tepla hysterezní ztráty; u indukce jsou hlavním zdrojem ztráty vířivých proudů. Během procesu se využijí měděné susceptory (materiály, které absorbují elektromagnetickou energii z okolí a transformují ji do energie tepelné), které generují teplo v rovině spoje, jak je znázorněno na obr. 3. Vakuum, které je na obrázku znázorněno se využívá k zajištění rovnoměrného tlaku. Výhodou této metody je také to, že se dosahuje vyšších pevností při menších teplotách díky lepší lokalizaci dodaného tepla. Nevýhody jsou stejné, jako u nanočástic (tepelné ovlivnění kovů).



Obr. 3 - znázornění procesu indukčního vytvrzování [13]

· Mikrovlnné záření [2, 14, 15, 16]

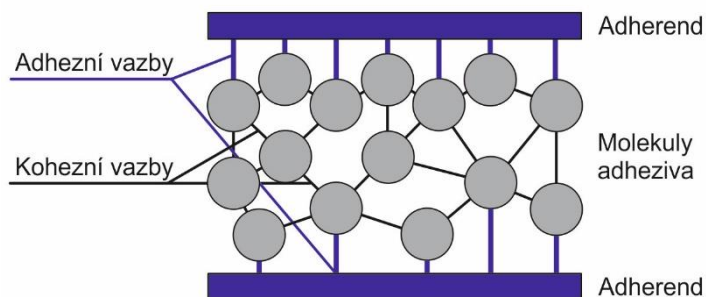
Frekvence mikrovlnného záření se pohybuje od 0,3 do 300 GHz (v praxi nejčastěji od 896 do 2450 MHz), délka vlnky 1 mm až 1 m. Existují druhy materiálů, kterými toto záření prochází, je od nich odraženo nebo toto záření absorbuje. Polyuretany patří do poslední skupiny – jsou tedy absorbenty. Výhoda této metody spočívá v lepším průniku záření do spoje než například tepelná energie. Je možné se tedy vyhnout vytvrzenému vnějšku spoje a nevytvrzeného středu (hlavně u silnějších spojů) nebo naopak teplem ovlivněnému materiálu na povrchu spoje (z toho vyplývá i menší napětí a deformace základního materiálu). Čas vytvrzování se pohybuje od několika sekund do 10 minut (ovlivněno faktory jako tloušťka spoje atp.). Množství použitého mikrovlnného záření je ovlivněno viskozitou adheziva nebo také tloušťkou spoje. Pro **elastomery** – mikrovlnné záření je absorbováno adhezivem, z čehož vzniká tepelná energie, která urychlí vytvrzení spoje. Toto záření se udržuje do ukončení procesu a je možné i zakomponování tepelného externího zdroje pro zefektivnění. Pro **reaktoplasty** – v reaktoplastickém adhezivu se rozmíchají elektricky vodivá vlákna (hliník, ocel). Spoj se umístí pod mikrovlnné záření a ve vláknech se indukují teplo, které započne vytvrzovací reakce. Při tomto způsobu vytvrzení dochází k výrazné úspoře času z řádu minut na sekundy. Výběr vláken závisí na použitém lepidle. To by mělo být schopno absorbovat tepelnou energii dostatečně rychle, aby nedocházelo ke vzniku přehřátí lepidla atp. Například pro rychle vytvrzující se lepidla jsou vhodná grafitická vlákna, která jsou rychleji vedou teplo než hliník nebo ocel. Možností, jak zpomalit přísun tepla je využití pulzního mikrovlnného záření místo kontinuálního. Do adheziva je možné dodat i aditiva ve formě např. prášku, která zlepšují absorpci záření. Dále je též možné u zdroje záření přidat i kompresní sílu během procesu. Tato metoda se používá pro spojení plastů – u kovů nastává problém jako u metody vytvrzování nanočásticemi.

Vzhledem k dispozicím firmy, požadavkům zákazníků, vlastnostem jednotlivých urychlovacích metod a lepidlu se s ohledem na výrobu a možnosti uvolňování jeví jako nejlepší 3 možnosti: vytvrzování při teplotě okolí, IR zářič a tepelná komora. Tyto způsoby budou porovnány v praktické části.

2 TEORIE LEPENÍ [1, 17]

Při lepení (stejně jako u každé jiné technologie) je snaha o co nejkratší čas výroby. Při lepení dílů k sobě dochází po určité době k vytvrzení lepidla a dosažení určité pevnosti. Snahou této bakalářské práce je najít co nejkratší čas, za který je možné dosáhnout manipulační pevnosti 0,4 MPa, po započítání bezpečnosti 0,6 MPa. Po dosažení této hodnoty je možné díl uložit do skladu, kde dochází k dalšímu vytvrzování v rámci několika dnů. Úspora času znamená úspora využití linky ve firmě a tím i úspora peněz pro výrobce a vyšší zisk.

Pevnost lepeného spoje závisí na smáčivosti, adhezi, kohezi adheziva a na pevnosti základního materiálu. Na obr. 4 je znázorněn lepený spoj i s vazbami.



Obr. 4 Lepený spoj [17]

2. 1 Předúprava povrchu [6, 17, 18, 19]

Adherend – lepený materiál, někdy také označován jako základní materiál – je určen konstruktérem. Úkolem technologa je pak vybrat takové lepidlo, aby byly zabezpečeny nároky na pevnost a další předepsané podmínky. Pokud je možné materiál vybrat, volí se dle ekonomických a technologických podmínek a hlavně tak, aby splňoval pevnostní podmínky spoje.

Před samotným lepením je důležitá úprava povrchu adherendu, aby se zajistily co nejlepší podmínky pro spolehlivost a funkčnost spoje. Cílem úpravy povrchu základního materiálu je dosažení co nejlepší smáčivosti povrchu, a tím dosažení i co nejlepších podmínek pro vznik adhezních vazeb a zamezení vzniku slabých vazbových vrstev (nepravého spoje). Tak je možné získat pravý spoj, kde jsou vazbové vrstvy pevné a případný lom probíhá mimo tyto vazby (probíhá v lepidle). Důležité je odstranění nerovností a látek, které by negativně ovlivnily vlastnosti lepeného spoje.

Úprava povrchu adherendu může být založena na fyzikálním principu (mechanická a další fyzikální operace) nebo chemickém principu (odstranění hrubých nečistot, operace na zvýšení adheze). Cílem mechanických operací je vyhlazení povrchu a odstranění nerovností. Toto je možné provést například otryskáváním. U operací založených na chemickém principu je cílem získat hladkého povrchu odstraněním nečistot a mastnot. Používá se odmašťování, moření atp.

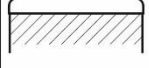

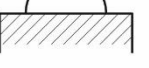
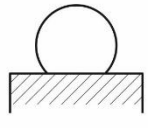
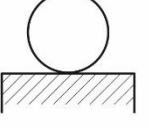
Problém u úpravy povrchu kovu je sorpce složek atmosféry, které ho znečišťují. Pak úkolem povrchové úpravy je odstranění těchto složek a vytvoření filmu, který je vhodný k lepení. Pro lepení je velmi důležité, aby podmínky úpravy povrchu byly možné reprodukovat ve stejné kvalitě. Pokud by to nebylo možné, pevnost spoje by byla pokaždé výrazně rozdílná.

U plastů má předúprava povrchu velký význam, protože je problém s vytvořením adheze, a tudíž i pravého spoje. Plasty mají většinou nepolární povrch, tudíž je na povrchu nedostatek funkčních skupin, které by se mohly účastnit adheze. Dalším problémem je také nízká povrchová energie, která způsobuje to, že je obtížné nalézt lepidlo, které má tuto energii ještě nižší, aby došlo ke smáčení, jež je rozhodujícím faktorem při adhezi. Povrch je možné upravit chemickou cestou pomocí např. kyselin, které zvýší polaritu povrchu adherendu. Tím se zvýší i síly mezi molekulami – adheze. Další možností je ošetření povrchu plazmou nebo ožehem.

Při tomto způsobu úpravy povrchu adherendu dochází k aktivaci center na povrchu substrátu. Tato metoda je ekologická a také rychlá.

2. 2 Smáčivost [1, 4, 6, 10, 18, 20, 21, 22, 23]

Pevnost lepeného spoje závisí na několika faktorech. Adhezi, kohezi, pevnosti a smáčivosti. Dobré rozptřeni lepidla je nutné k zajištění funkčnosti spoje. K rozlití lepidla po povrchu dojde pouze tehdy, pokud je povrchové napětí lepidla nižší než povrchové napětí povrchu. K dobré smáčivosti je tedy potřeba nižší povrchové napětí lepidla a také dobrá viskozita lepidla. Pokud by k rozlití (smočení) lepidla po povrchu nedošlo, není možné, aby vznikly adhezni vazby (vzdálenost atomů je příliš velká). Stupeň smáčení je možné vyjádřit úhlem smáčení – kontaktní úhel. Na dobře upraveném adherendu je tento úhel co nejmenší. Na obr. 5 je tento úhel znázorněn – ideální stav je 0°; do 90° dochází ke smáčení a nad úhel 90° lepidlo povrch nesmáčí. Optimální úhel se pohybuje od 0-30°

$\theta = 0^\circ$	$\theta < 90^\circ$		$\theta > 90^\circ$	
				
Dokonale smáčivý	Velmi dobře smáčivý	Smáčivý	Částečně smáčivý	Nesmáčivý

Obr. 5 Znázornění kontaktního úhlu [22]

Na obr. 6 jsou prakticky znázorněny síly, které jsou odvozeny z povrchových napětí jednotlivých fází a jejich rozhraní (tekuté lepidlo, vzduch a základní materiál). Křivka, kde se všechny 3 fáze stýkají se nazývá linie smáčení, z toho vyplývá, že obvod takové kapky se nazývá obvod smáčení.

$$\cos \theta = \frac{(\sigma_{sv} - \sigma_{sl})}{\sigma_{lv}} \quad (2.1)$$

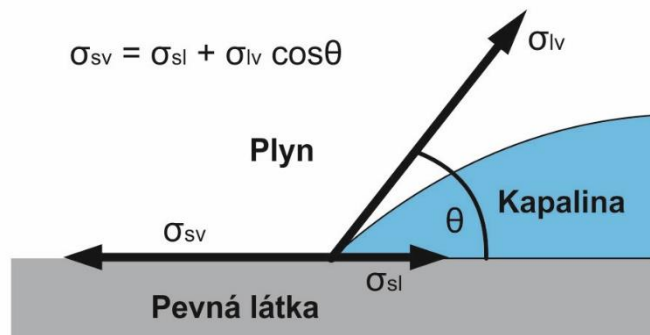
kde:

θ – kontaktní úhel

σ_{sv} – povrchová energie spojovaného dílu

σ_{sl} – napětí na styčné ploše mezi povrchem substrátu a tekutým lepidlem

σ_{lv} – povrchové napětí tekutého lepidla



Obr. 6 Znázornění Youngovy rovnice [10]

Smáčivost se měří několika metodami – goniometrem (přístroj na měření úhlu kontaktu), smáčečí váhou (tenziometr) nebo testovacími inkousty (někdy také nazývány jako tinktury). Principem goniometru je vyfocení kapky a následné vypočítání smáčečího úhlu pomocí tečné metody. Smáčečí váhy se častěji používají při ověření vlastností při pájení.

Nejčastěji se u technologie lepení využívají testovací inkousty díky své jednoduchosti. Každý inkoust má určitou hodnotu povrchového napětí. Inkoust se nanese na povrch a vytvoří se tak čára. Pokud se kapalina slije v kapky, energie povrchu je nižší než inkoustu. Pokud na povrchu materiálu zůstane jednolitá široká stopa, energie povrchu je vyšší než daného inkoustu. Životnost těchto tinktur je však pouze 3 měsíce, což může být nevýhodou.

2. 3 Adheze [1, 17, 24]

Adheze je jedním z nejdůležitějších faktorů při vytváření lepeného spoje a je chápána jako přilnavost adherendu a adheziva. Při vytváření adhezivní vazby dochází při dostatečné smáčivosti (viz 2. 2). Pouze pak je totiž možné dosáhnout dostatečně malé vzdálenosti mezi atomy lepidla a lepeného materiálu, a tím pádem vzniká adhezivní vazba. Síla této vazby by měla dosahovat pevnosti substrátu. Celkově je fenomén adheze velmi složitý a existuje více teorií o jejím vzniku. Pro zajištění spolehlivých a bezpečných spojů neexistují matematické modely, ale vychází se především z empirických zkušeností.

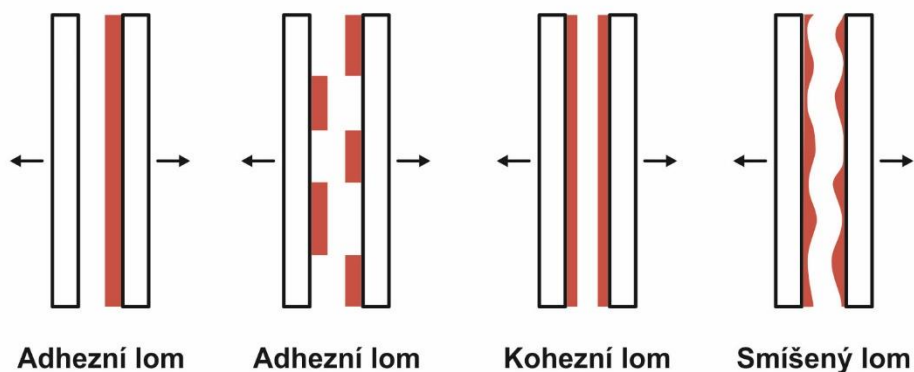
V adhezi se uplatňují dva druhy vazeb – mechanická a chemická. Mechanická vazba je způsobena nerovností základních materiálů, kde dojde k „propletení“ lepidla, a právě těchto nerovností. Uplatňuje se především u pórovitých materiálů, u leštěných je tato část adheze téměř zanedbatelná. Chemická vazba je souhrn všech mezimolekulových interakcí, které jsou nejsilnější, pokud jsou atomy a molekuly u sebe co nejbližší (proto je důležitá dobrá smáčivost povrchu lepidlem). V chemické vazbě se uplatňují kovalentní i Van der Waalsovy síly.

2. 4 Koheze [1, 17]

Koheze je souhrn sil v rámci adheziva neboli míra soudržnosti (pevnosti) lepidla. Koheze by měla být silnější než adheze a než základní materiál. Míra koheze se ve zdrojích vysvětluje také jako práce nutná k destrukci materiálu (adheziva) na jednotku plochy. Síla koheze také závisí na vnitřním uspořádání materiálu – krystalické a organizované uspořádání molekul je pevnější než amorfni a neuspořádané.

2. 5 Lom lepeného spoje a jeho příčiny [4, 17, 18, 25]

Lomy u lepeného spoje definuje norma ČSN ISO 10365. Existují 3 základní druhy lomů – adhezni, kohezní a smíšený. (AF, CF, SCF). Na obr. 7 jsou tyto typy lomů znázorněny.



Obr. 7 Základní druhy lomů lepeného spoje [4]

Adhezní porušení spoje je dle mezinárodní normy EN ISO 10365 definováno jako „porušení adhezivní vazby, kde se oddělení jeví být v adhezní části spoje“ a kohezní porušení jako „porušení spojené sestavy, kde je oddělení v adhezivu nebo adherendu“.

Adhezní lom nastává při vzniku tzv. nepravého spoje – spoj, kterého lom probíhá na rozhraní lepidla a základního materiálu. Toto pomezí je možné označit jako slabou vazbovou vrstvu. Tyto slabé vazbové vrstvy mohou být způsobeny nečistotami, mastnotami a vrstvičky naabsorbovaných plynů na povrchu substrátu. Dále mohou být způsobeny nevhodným lepidlem a jeho nanášením nebo jeho nevhodným vytvrzováním. Častý důvod vzniku slabých vazeb je i okolní atmosféra, která způsobuje bubliny, a tedy náchylnost k lomu. Vznik bublin hrozí při špatné smáčivosti lepidla a povrchu.

2. 6 Rozdělení lepidel

Dnešní trh nabízí mnoho druhů lepidel a další jsou stále vyvíjena. Existuje tedy i mnoho druhů rozdělení. V této práci jsou zmíněna především rozdělení z pohledu využití v technické praxi.

2. 6. 1 Rozdělení lepidel dle počtu složek lepidla [21, 24, 26]

Jednosložková lepidla jsou na použití jednodušší než ta vícesložková. Nevýhodou ovšem je, že pro vytvrzení je nutné dodat externí energii – teplo nebo například UV záření. U jednokomponentního polyuretanu se musí dodávat akcelerátory, jinak dojde k vytvrzení pouze na povrchu adheziva a jádro housenky zůstane nevytvrzené a nedodrží se požadované vlastnosti spoje.

Vícesložková lepidla se nejčastěji vytvrzují chemickou reakcí a nejčastěji jsou to také studená lepidla. Tato lepidla se skládají z několika komponent, které musí být v určitém poměru, aby bylo dosaženo žádaných vlastností lepeného spoje. Po smíchání těchto komponent je lepidlo použitelné po určitou dobu, poté ve směšovači lepidlo ztvdne a je již nepoužitelné. V kusové výrobě se využívá především směšovač statický (obr. 8), v sériové (např. automobilovém průmyslu) pak dynamický. Vícesložková lepidla jsou vytvrzována exotermickou chemickou reakcí mezi komponenty.



Obr. 8 Statický směšovač [26]

2. 6. 2 Rozdělení lepidel dle chemického základu lepidla [4, 18]

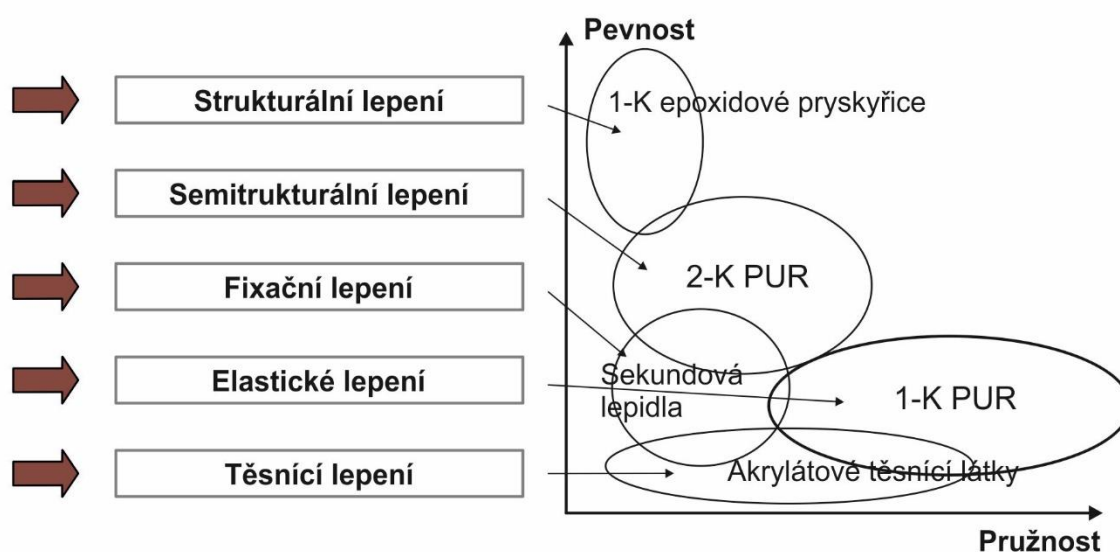
Základní rozdělení lepidel dle chemického základu je na přírodní a syntetická. Ta přírodní se dále dělí na organická (např. škrob, kaučuk) a na anorganická (sádra, cement). Pro strojírenskou praxi se ovšem více používají lepidla syntetická. Ta se dále dělí na lepidla elastomerová, reaktoplastická a termoplastická. Rozdělení syntetických lepidel je znázorněno v tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení syntetických lepidel [18]

Elastomerová	Reaktoplastická	Termoplastická
Nitrilová	Aminoplasty	Akryláty
Polychloroprénová	Epoxidy	Ionomery
Polysulfidová	Fenoplasty	
Silikonová	Polyamidy	Polyamidy
Na bázi přírodního kaučuku	Polyestery	Polystyrén a kopolymery
	Polyuretan	

2. 6. 3 Rozdělení lepidel podle třídy pevnosti [4, 6]

Každé adhezivum je vhodné pro jiný materiál a jiné využití, někdy je vyhledávaná pevnost lepidla, jindy pružnost. Také platí, že pokud se u lepidla zvýší pružnost, automaticky klesá pevnost. To znázorňuje i obr. 9.



Obr. 9 Rozdělení lepidel dle třídy pevnosti [4]

2. 6. 4 Rozdělení lepidel podle chemického principu vytvrzení [1, 4, 6, 11, 18]

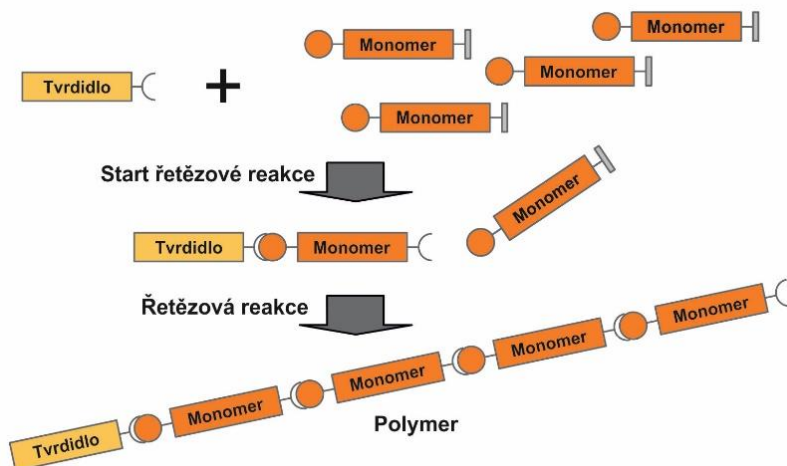
Základní rozdělení mechanismu vytvrzování je na lepidla chemicky tvrdnoucí (reakční lepidla/těsnící látky) a fyzikálně tvrdnoucí (tuhnoucí).

Lepidla chemicky tvrdnoucí se vytvrzují chemickými reakcemi – polyadice, polykondenzace, polymerace. Dochází v nich k polymeraci monomerů.

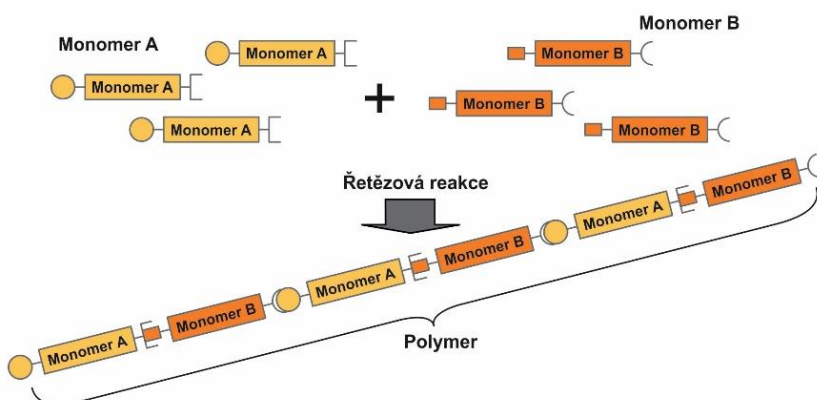
Polymerace je chemická reakce, kde z monomerů vznikají polymery. Jedná se o spojení mnoha molekul v dlouhý řetězec bez reakce funkčních skupin. Podmínkou vzniku je aspoň jedna dvojná vazba v molekule – tvrdidlo – to způsobí start řetězové reakce. Touto metodou se vyrábí například polyethylen, polypropylen nebo polystyren.

Polyadice je chemickou reakcí, kde reagují funkční skupiny monomerů, ale neuvolňuje se zde žádný vedlejší štěpný produkt – skupiny se pouze přesouvají. Polyadicí se vyrábí polyuretany.

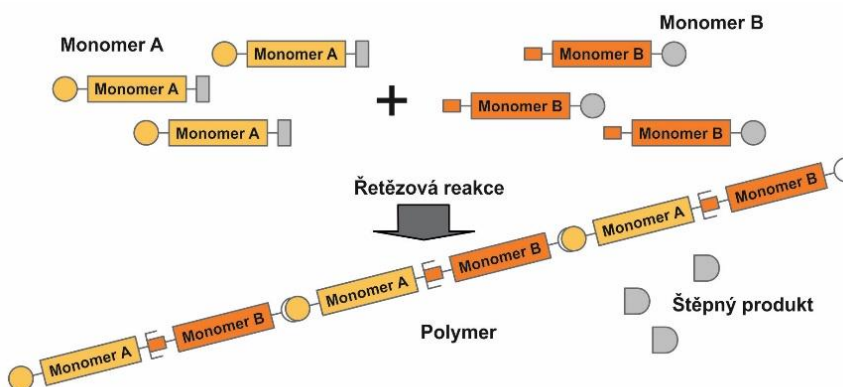
Polykondenzace je chemickou reakcí, do níž vstupují dva monomery, které se spojují a kde vzniká vedlejší štěpný produkt (nejčastěji voda nebo chlorovodík). Polykondenzací se vyrábí polyestery nebo polyamidy. Na obr. 10 je znázorněna polymerace, na obr. 11 polyadice a na obr. 12 polykondenzace.



Obr. 10 Příklad polymerace [4]



Obr. 11 Příklad polyadice [4]



Obr. 12 Příklad polykondenzace [4]

2. 6. 5 Rozdělení lepidel podle fyzikálního principu vytvrzení [4, 24]

Lepidla fyzikálně tuhnoucí se vytvrzují fyzikálními procesy – ztuhnutí (tavná lepidla), odpaření (kontaktní lepidla, disperze), trvale lepivá (citlivá na tlak), gelovatěním (plastisoly). Zde jsou polymery již vytvořeny – jsou částečně tekuté, a tedy smáčí povrch. Po vytvrzení ztuhnou. Dochází u nich tedy k přechodu z nízkoviskozního stavu do pevnějšího bez toho, aniž by se měnilo chemické složení. Nízkoviskozní stav je důležitý pro důkladné smáčení povrchu, vytvrzení je zase důležité pro dosažení požadovaných vlastností.

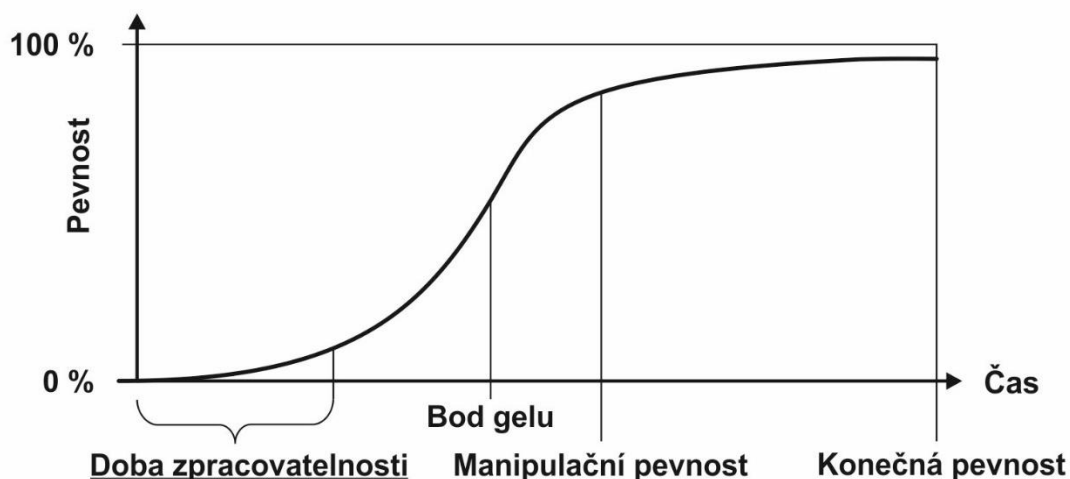
- **Lepidla vytvrzená ztuhnutím (tavná)** se nanášejí na substrát jako polymer v pevném skupenství (granulát, fólie), ten se pak roztaví a po nanesení polymer ztuhne. Výhodou je rychlé tuhnutí nebo cena, nevýhodou zase to, že takové lepidlo není odolné vůči vysokým teplotám.
- **Lepidla vytvrzená odpařením (disperze, kontaktní lepidla)** se dodávají ve formě lepidla v rozpouštědle. Rozpouštědlo se po nanesení na základní materiál rychle odpaří a tím dojde k vytvrzení. Výhodou je snadné nanášení a dobrá smáčivost, nevýhodou opět špatná tepelná odolnost.
- **Lepidla trvale lepivá (citlivá na tlak)** po přitlačení na lepené materiály smáčí povrch a dojde k vytvoření adhezních vazeb. Nevýhodou je opět malá tepelná odolnost a dodání externího dostatečného přitlačného tlaku.
- **Lepidla vytvrzená gelovatěním (plastisoly)** jsou dodávána ve formě pasty, která po nanesení nabobtná a po pohlcení změkčovadel se změní i skupenství na gel. Výhodou je cenová dostupnost a dobře automatizovatelný proces.

2. 7 Vytvrzení 2K lepidel [4, 27]

Lepené spoje získávají svou pevnost postupně – dle vytvrzovací křivky.

- **Vytvrzovací doba** je doba, která je potřebná pro vytvrzení lepidla tak, aby dosáhlo minimálně manipulační pevnosti. Po dosažení této pevnosti je možné s lepeným spojem manipulovat, aniž by byly ovlivněny jeho vlastnosti.
- **Doba zpracovatelnosti** je doba, která začíná prvním vzájemným kontaktem monomerů lepidla a končí, kdy je možné již naměřit viditelný vzrůst pevnosti a viskozity lepidla. Tato doba je uvedena v materiálové listu lepidla a závisí na okolní teplotě. Při zvýšení teploty o 10 °C se doba zpracovatelnosti může zkrátit až na polovinu. Pokud se doba zpracovatelnosti nedodrží a adhezivum se začne používat později, nedojde ke správné adhezi a není možný vznik pravého spoje, protože je lepidlo již částečně vytvrzené.
- **Doba gelace** je definována normou ČSN EN 923 jako: „Doba potřebná k tomu, aby kapalná látka vytvořila gel za stanovených teplotních podmínek.“
- **Manipulační pevnost** lepidla je taková pevnost, při jejímž dosažení se může výrobek vzít z formy bez toho, aniž by došlo k posunutí či jinému poškození spoje v důsledku nedostatečného vytvrzení lepidla. Dle normy ČSN EN 923 je manipulační pevnost definována jako: „hodnota pevnosti umožňující vyjmutí lepené sestavy ze svorek nebo lisu bez jejího poškození.“

Při vytvrzování lepidla tedy dochází k postupnému zvyšování pevnosti spoje. **Konečnou pevnost** získá výrobek po době dané v materiálovém listě. Jedná se o maximální hodnotu pevnosti spoje, kterou lze při určitém lepidlu a základním materiálu získat. Na obr. 13 jsou znázorněny výše zmíněné charakteristiky křivky, která je předmětem experimentální části této práce.



Obr. 13 Křivka vytvrzování adheziva [4]

2. 8 Zkoušky lepených spojů [9,12]

Zkoušky lepených spojů se rozdělují na 2 velké skupiny: destruktivní a nedestruktivní. Každá má své výhody i nevýhody a používají se v závislosti na tom, jaký parametr spoje je pro výzkum a další využití prioritní. Mezi hlavní vady spoje patří nepravý spoj (slabá adheze), slabá koheze a pórovitost. Mezi příčiny nepravého spoje patří nedokonalá předúprava povrchu, slabá koheze je zapříčiněna nedostatečnou přípravou lepidla a pórovitost je způsobena vyšším obsahem vzduchu v adhezivu, popřípadě nedokonalým vytvrzením. Všechny zkoušky jsou normovány dle norem ČSN EN a dalších mezinárodních norem. V české praxi se často využívají normy DIN.

2. 8. 1 Nedestruktivní zkoušky lepených spojů [9,12]

Mezi hlavní způsoby nedestruktivních zkoušek patří vizuální metoda, penetrační a ultrazvukové. U nedestruktivních zkoušek je důležité využití kombinace těchto metody, protože každá z nich s sebou nese své výhody, nevýhody a omezení. Například metoda vizuální a penetrační ukáže pouze vady na povrchu spoje, zatímco metoda ultrazvuková je určena pro vady vnitřní. Volbu metody také ovlivňuje velikost spoje (vrstva lepidla i tloušťka substrátů), geometrie spoje, ale i cena dané metody. Pokud je cílem získat například maximální napětí, které spoj vydrží, nedestruktivní zkouška nenaměří přímo napětí, ale naměří jiný parametr, který je možné s napětím spojit. Hlavním cílem těchto zkoušek je tedy zjistit jakékoliv vady, které by mohly ovlivnit pevnost a výdrž daného spoje. Existuje mnoho druhů těchto zkoušek, pro účely této práce jsou uvedeny ty nejčastější.

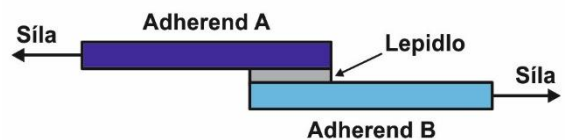
- Metoda zkoušení **ultrazvukem** je jedna z nejpobulárnějších. Frekvence vln, které se při této zkoušce používají jsou 1-20 MHz. Tento impuls je vysílán ze sondy. Mezi sondou a zkoušeným spojem je nutné využít gelu kvůli přenosu signálu. Bez lubrikantu by do spoje impuls neprošel. Existují 2 hlavní typy této metody – odrazová a průchodová. Při odrazové je vysílací a přijímací sonda jedné straně zkoušeného materiálu. Odrazová echa se zachytávají a porovnávají s echem, které se odrazilo od druhého konce (hranice) materiálu. Tak je možné postupně zjistit velikost i polohu. Při průchodové metodě je přijímací sonda na druhé straně základního materiálu a zjišťuje se útlum původního signálu.
- Zkoušení **rentgenem** se využívá hlavně při lepení kovů. Spoj je prozářen a vada se projeví jako ztmavení. K spoji je i přiloženo měřítko. Tuto metodu mohou obsluhovat pouze proškolení pracovníci kvůli negativnímu vlivu rentgenového záření na lidské tělo.

- **Termální metody** patří mezi ty novější. Jedna strana spoje se zahřeje a sleduje se teplota na druhé straně. Místa, kde se vada vyskytuje a kde nedochází k přenosu tepla, se jeví jako místa chladnější. Pro skenování se využívá infračervená kamera nebo například tepelně citlivé povrchy.
- **Vizuální metody** jsou velmi jednoduché a rychlé a levné. Nevýhodou je subjektivita pracovníka, který spoj zkouší a je nutné jeho opětovné přezkušování (především jeho zraku) a dále je také nutné dobré osvětlení zkušebního prostoru (500 lx). Jedná se o metodu pouze pro povrchové zkoušení.

2. 8. 2 Destruktivní zkoušky lepených spojů [4, 5, 7, 9, 11]

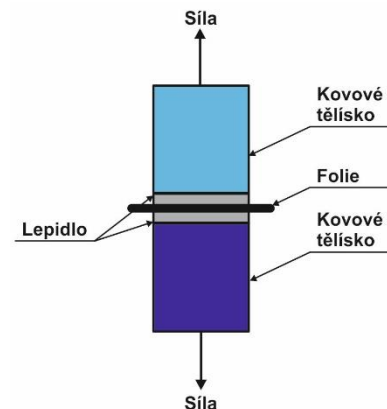
Pevnost spoje závisí na mnoha faktorech – distribuce napětí a zatížení, mechanické vlastnosti základního materiálu, vlastnosti lepidla, předúprava povrchu substrátu atp. Byly ustanoveny 4 hlavní skupiny destruktivních zkoušek – zkouška ve smyku (stříhu), odlupováním, namáhání v tahu a zkouška štěpením (zkouška klínem). Dále jsou možné i únavové zkoušky dlouhodobým kmitavým namáháním, zkoušky tlakem, zkoušky ohybem, zkoušky pod vlivem různých teplot, vlhkostí nebo pod vlivem záření. Zkoušky jsou přizpůsobovány dle toho, kde se daný spoj bude dále používat.

- **Zkouška smykem** je jeden z nejčastějších způsobů testování lepených spojů. Výstup této zkoušky je maximální smykové napětí (pevnost), které daný spoj vydrží (v jednotkách MPa). Spoj nesmí být zatížen normálově. Tato metoda je použita v praktické části této práce, kde bude i detailněji rozebrána. Obr. 14 tuto zkoušku znázorňuje. Primárně je tato zkouška určena pro tuhé materiály. Při zkoušení ohybných substrátů dochází k deformaci základních materiálů spoje a průběh napětí se změní a dochází i k odlupovacím napětím. Tomuto se dá vyvarovat použitím rotační zkoušky, kde dochází k čistému smyku. Modifikace této zkoušky je i zkouška tlakem – změna směru působících sil oproti obr. 14.



Obr. 14 Schéma smykové zkoušky lepeného spoje [17]

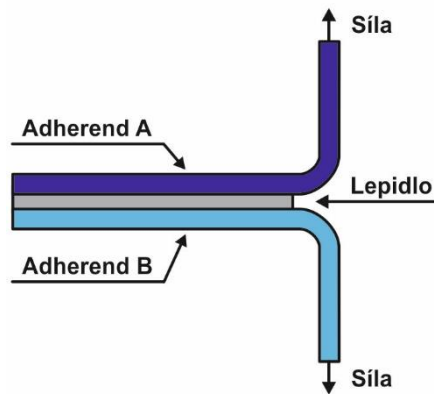
- **Zkouška tahem** (obr. 15) slouží k hodnocení čelních spojů. Měří se síla nutná k zničení spoje. Zatěžovací síla působí kolmo na plochu spoje. Je zde možnost vzniku smykového napětí v důsledku nedokonalé kolmosti síly na plochu, čemuž je nutné se vyvarovat, aby byly výsledky co nejpřesnější.
- **Zkouška odlupováním** je dalším typem destruktivního zkoušení lepeného spoje. Aspoň jeden ze základních materiálů musí být ohybný. Je mnoho typů zkoušek odlupováním. Používají se různé rychlosti odlupování i úhly (nejčastěji 90° a 180°). Test pod úhlem 90° se využívá, pokud substráty nejsou natolik flexibilní, aby byla možná zkouška při 180°. Čím je úhel menší, tím se zvyšuje pevnost spoje. Rychlosti, běžně využívané během této zkoušky, se pohybují 1–50 cm/min. Nejčastěji pak rychlost 15,2 cm/min. Nižší rychlosti jsou určeny pro křehčí adheziva. Pokud je pevnost některého z adherendu nižší než pevnost spoje, může dojít k přetržení substrátu. Proto se slabší substrát musí zpevnit. Na obr. 16 je znázorněna



Obr. 15 Schéma tahové zkoušky lepeného spoje [17]

zkouška 2 pružných materiálů při zkoušce, která se nazývá $2 \times 90^\circ$. Zkouška odlupováním zkoumá sílu adheze a také sílu povrchových povlaků substrátů (výsledky se udávají v N/cm).

- **Zkouška štěpením** (někdy také **zkouška klínem**) napodobuje reálnou situaci lépe než zkouška smykem nebo odlupováním. Posuzuje se rychlost zvětšování vady, která je iniciována klínem – cílem je tedy změřit odpor vůči šíření trhlin při současně působícím zatížení napětím a okolními vlivy.
- **Zkouška ohybem (lámavosti)** namáhá spoj na zlomení. Jedná se o třibodový (nejčastěji) ohyb a získává se maximální zatížení spoje při zlomení.



Obr. 16 Schéma odlupovací zkoušky lepeného spoje [17]

3 NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

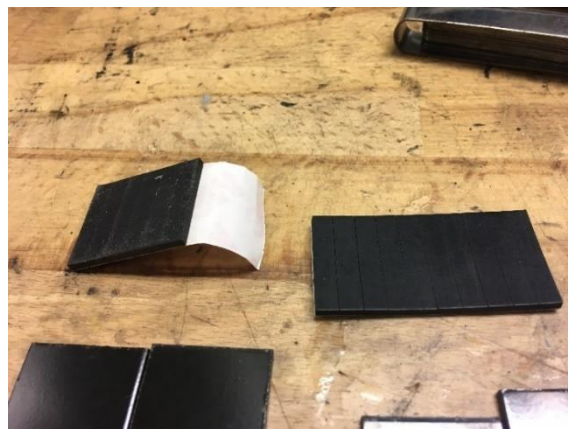
Předmětem praktické části této práce bylo zjištění potenciálu zkrácení doby, za kterou se dosáhne manipulační pevnosti díky urychlenému vytvrzení lepeného spoje. Výsledky této práce budou dále aplikovány ve firmě, kde byl experiment prováděn – Magna Exteriors (Bohemia) s. r. o. se sídlem v Liberci.

3.1 Použité přístroje a další přípravky [4, 28, 29]

Na očištění tělísek byl použit isopropanol (izopropylalkohol). Očištění a předúprava povrchu je velmi důležitá k zaručení správné a dostatečné smáčivosti. Tím se i zajistí pravost spoje (dostatečně pevná adheze). Isopropanol je bezbarvá a vysoce hořlavá látka. Je to rozpouštědlo nepolárních sloučenin a pro své vlastnosti se využívá jako odmašťovací přípravek pro lepení atp. Během zkoušek byl skladován v chladu (15 °C).



Obr. 17 Ruční pistole pro nanesení housenky lepidla



Obr. 18 Spacery o tloušťce 2 mm

Dále byly na tělíska nalepeny spacers (obr. 18) dle normy DIN EN 1465, aby byla zajištěna konzistentní plocha adheziva. Výška spacerů čili i výška vrstvy lepidla, byla 2 mm. Je nutné vzít v potaz, že tloušťka vrstvy naneseného adheziva ovlivňuje výsledky. U zkoušky smykem dochází ke snížení pevnosti při vrstvě nad 1 mm čili použitá tloušťka 2 mm neznázorní nejlepší výsledky. Dochází totiž během zkoušky k částečnému odlupu, které rozšiřuje napětí a snadněji se tak vytvoří vada. Pevnost při vrstvě 1 mm je o 31 % vyšší než vrstva dvoumilimetrová. Nejvhodnější je však tloušťka 0,1-0,5 mm, protože při vyšší vrstvě dochází ke zvýšení napětí v rozích spoje exponenciálně. Protože je ve firmě standardem toto zkoušet na 2 mm spacerech, bylo tak i učiněno v tomto experimentu pro možné porovnání s dalšími adhezivy a metodami urychlování.

Použité lepidlo (obr. 17) ADEKIT A 290 BK od firmy Sika je polyadiční dvoukomponentní polyuretan (2K PUR). Jedná se o duromer (reaktoplast) a jeho technický list je uveden v přílohách této práce. Lepidlo se skládá z dvou složek – pryskyřice (černá barva, na bázi alkoholů) a vytvrzovadla (bílá, na bázi izokyanátů, rakovinotvorná). Na promíchání těchto složek lepidla bylo využito statický mixér. Po promíchání vzniká tedy našedlá barva a doba zpracovatelnosti se pohybuje okolo tří minut (počítáno od prvního kontaktu komponentů). Dle uvedeného technického listu (příloha 1) je možno toto adhezivum vytvrdit při pokojové teplotě na maximální napětí 1 MPa za 10 minut. Je tak provedeno dle normy DIN EN 1465, kde je vrstva adheziva o tloušťce 0,1-0,2 mm. Zvyklostí ve firmě, kde je praktická část této práce prováděna, je ovšem tloušťka 2 mm. Proto se tyto fakty nedají porovnávat. Polyuretany degradují pod působením UV záření, proto tento způsob urychlení vytvrzení není možný. Toto

adhezivum nabízí své využití v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Samotný list lepidla uvádí, že musí být skladováno mezi $15\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez vystavení vlhkosti. Lepidlo bylo nanášeno ruční pistolí (obr. 18)

Stroj, na kterém byla provedena zkouška ve smyku, byl trhací stroj TIRA typu TT2820 E22 (obr. 20). Výkon stroje je $0,7\text{ kW}$.



Obr. 20 Testované adhezivum



Obr. 19 Trhací stroj TIRA TT80 E22

Pro urychlování na IR zářiči byl využit krátkovlnný IR zářič ve dvojité trubici z křemenného skla o průměru $23 \times 11\text{ mm}$ se zlatým reflektorem (konstrukce B) od firmy KAITRADE (viz obr. 21). Jmenovitý výkon zařízení je 270 W a jmenovité napětí 57 V .



Obr. 21 IR zářič s ovládacím zařízením

Urychlování procesu vytvrzování v tepelné (klimatické) komoře (obr. 22 a obr. 23) probíhalo v zařízení od výrobce Binder. Jednalo se o komoru APT.Line série MKF (E3) s programovatelným regulátorem MB1. Maximální výkon komory je 5,1 kW a je napájena 400 V.



Obr. 22 Klimatická komora



Obr. 23 Detail nastavení klimatické komory

3. 2 Použité vzorky – tělíška [30, 31, 32]

Materiál, ze kterého jsou testovací tělíška vyrobená, je EN AC-ALSi10Mg E. Jedná se tedy o plech z hliníku. Chemické složení je znázorněno v tab 2.

Tab. 2 Chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu

Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Zn	Pb, Sn, Ni, Cu	Al	Rm	Rp0,2	As
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
9-11	≤0,55	≤0,45	0,2- 0,45	≤0,15	≤0,1	≤0,05	zbytek	170	120	1,5

Tělíska (obr. 24), na kterých proběhl experiment byly kataforézně povlakovány. Tato metoda je vhodná pro ocelové části, protože je ocel vodivá a snese teplotu 160 až 1400 °C, při které tento proces probíhá. Tělísko (katoda) je ponořeno do lázně, kam se ponoří anoda. Po přivedení stejnosměrného napětí mezi obě elektrody se vytvoří elektrické pole, které zajistí pohyb kationtů barvy ke katodě. Po neutralizaci náboje iontu barvy na povrchu katody dochází k vytváření vrstvy, která při růstu snižuje elektrostatickou přitažlivost. Tato metoda dokáže povlakovat i těžko přístupná místa. Po vzniku vrstvy se povlak vypálí, dochází k polymeraci a je vytvrzen. Jedná se o rychlou, ekologickou a ekonomicky efektivní metodu lakování, která zajistí rovnoměrný povrch a prodlouží životnost výrobku (zisk antikoročních vlastností při nízké tloušťce povlaku).



Obr. 24 Využívané vzorky s nalepenými spacery

3. 3 Návrh experimentu

Experiment se prováděl z výzkumného hlediska pro novou linku ve firmě Magna Exteriors (Bohemia) se sídlem v Liberci. Experiment byl proveden po konzultaci se zástupcem firmy. Prvním krokem bylo otestování vlastností lepidla při vytvrzování pouze při teplotě okolí. Všechny vzorky byly označeny a testovány na trhacím zařízení, které bylo propojeno s programem TIRAtest. Ten vyhodnocoval tahové křivky a udával nejvyšší napětí, které daný spoj vydržel bez výrazného snížení pevnosti. Dalším krokem bylo otestování chování spoje po vytvrzení IR zářičem. Proces testování se opakuje. Posledním krokem bylo zkoušení spojů po vytvrzení v tepelné komoře. Naměřené hodnoty byly následně zapsány a vyhodnoceny.

3. 4 Provedení experimentu [18]

Prvním krokem experimentu bylo odmaštění tělísek isopropanolem, což zaručí dobrou smáčivost (a tedy adhezi) a předejde se nepravému spoji. Po očištění došlo k nalepení spacerů, které zaručí stálost housenky adheziva – jak tloušťku, tak i plochu nanesení. Housenka byla nanášena ruční pistolí s mechanickým posuvem, v které byla vsazena kartuš s dvoukomponentním adhezivem. Adhezivum se smíchalo ve statickém mísiči. Od prvního styku je měřena doba zpracovatelnosti (přibližně 3 minuty). Po této době se musí statický mísič vyměnit, protože lepidlo v něm již zatvrdlo. Také je důležité před nanesením nové housenky částečně adhezivum „odstříknout“ mimo danou plochu, protože se vytváří již částečně ztvrdnuté lepidlo na konci kartuše. Po ručním nanesení byly vzorky řádně označeny, pro pozdější vyhodnocování.

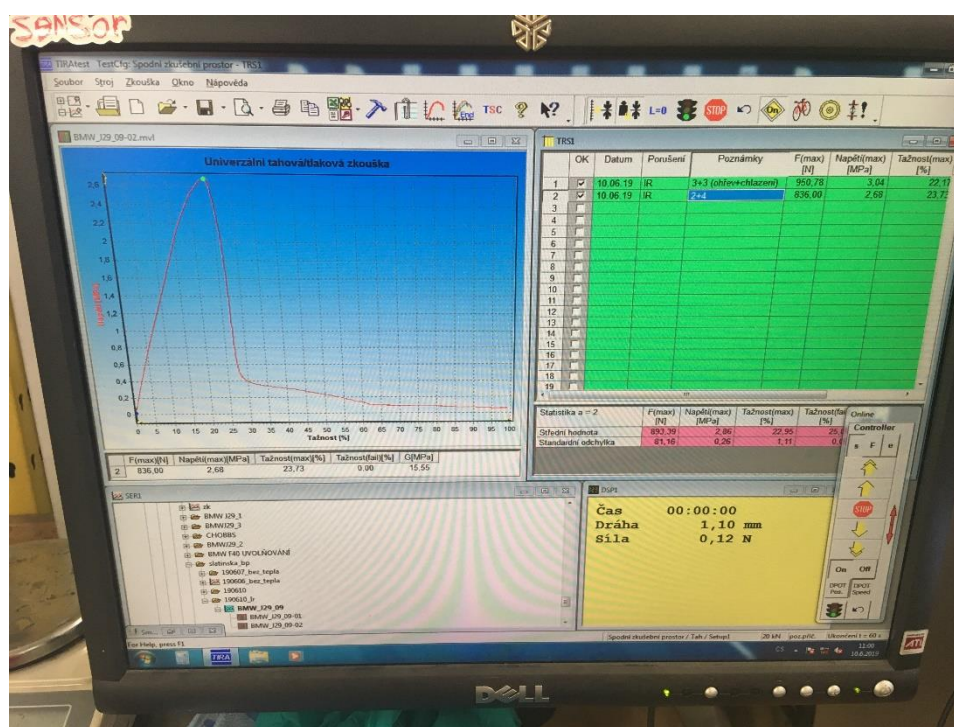
- Vytvrzování při teplotě okolí – vzorky po označení byly ponechány na rovné podložce a po daných časových intervalech byly vloženy mezi čelisti trhacího zařízení, ty byly utaheny imbusovým klíčem, a v programu na připojeném počítači se spustil zkoušecí proces. Zkoušení probíhalo po minutových intervalech. Proces byl časově omezen na 1 minutu nebo po klesnutí pevnosti o polovinu oproti nejvyšší průběžné naměřené hodnotě. Naměřená hodnota nejvyššího napětí, které daný lepený spoj vydržel bez poškození, byla zapsána a do trhacího zařízení se vložil další vzorek.

- Vytvrzování pomocí IR záření – po očištění byla tělíska řádně označena (časovým intervalem a teplotou) a po nanesení housenky slepeny a vloženy pod IR zářič. Ten na lepený spoj působil daný interval, pak se spoj nechal ochladit (opět na určitou dobu) na vzduchu. Poté byl vložen do čelistí trhacího zařízení, kde probíhalo stejné měření jako při vytvrzování při teplotě okolí. Výsledek se zapsal pro pozdější vyhodnocování.
- Vytvrzování v tepelné komoře – začátek postupu je zde stejný, jako u IR zářiče. Ovšem zde se lepený spoj nevkládá pod IR zářič, ale do tepelné komory. Na vzorcích byly opět zaznačeny parametry procesu, kterým vzorek prošel (teplota a čas). Z komory se vzorek po dané době vyndal, nechal ochladit na vzduchu a byl vložen do čelistí trhacího zařízení. Výsledek byl opět zapsán.

Samotná trhací zkouška (smyková) je jednou ze základních zkoušek lepených spojů. Při ní vzniká tangenciální napětí, které působí v rovině spoje. Zátěžná síla působí taktéž v rovině spoje. Jisté rozdíly také tvoří základní materiál, při zkoušení na plastových tělíscích dochází i k částečnému odlupu v důsledku ohybu plastu a napětí je větší. Kov tak flexibilní není čili k ohybu nedochází. Výsledkem zkoušky je maximální napětí v MPa, které daný spoj vydrží.

3.5 Vyhodnocení výsledků

Výsledky byly zajištěny díky programu TIRAtest (obr. 25), který přísluší trhacímu přístroji. Ten zajistil tahové křivky a vyhodnotil i maximální napětí, které daný lepený spoj vydržel bez výrazného porušení (snížení v tahové křivce).



Obr. 25 Vyhodnocovací program TIRAtest příslušící k trhacímu stroji

Získané výsledky z experimentu byly zaznamenány do tabulek (tab. 3–6). Cílem bylo najít teoretický bod zvrátu (bod po nejkratším možném čase), kdy se získá napětí 0,4 MPa, což je teoretická minimální manipulační pevnost. Při této pevnosti je možné daný díl z linky vzít a uložit do skladovacího prostoru, kde spoj získává postupně konečnou pevnost (i v řádu týdnů). Po započítání bezpečnostních rezerv se tato hodnota zvýšila na 0,6 MPa. Pro praktické využití bylo tedy cílem najít bod, kde se získá bezpečně hodnota 0,6 MPa.

Je nutné vzít v potaz, že experiment byl prováděn ručně, čili se v jednotlivých měřeních vyskytují odchylky v dokonalosti nanášení adheziva, očištění tělísek před nanesením housenky a malé odchylky v nalepení spacerů. Do grafů byly vzaty průměrné hodnoty, zvýrazněné v tabulce.

3. 5. 1 Vytvrzování spoje při teplotě okolí

Po počátečních pokusech měřit pevnost již po čtvrté a páté minutě se zjistilo, že tyto hodnoty musí výrazně zvýšit, protože se naměřilo napětí nulové nebo téměř nulové. První měřitelné hodnoty se začaly vyskytovat po osmé minutě. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.

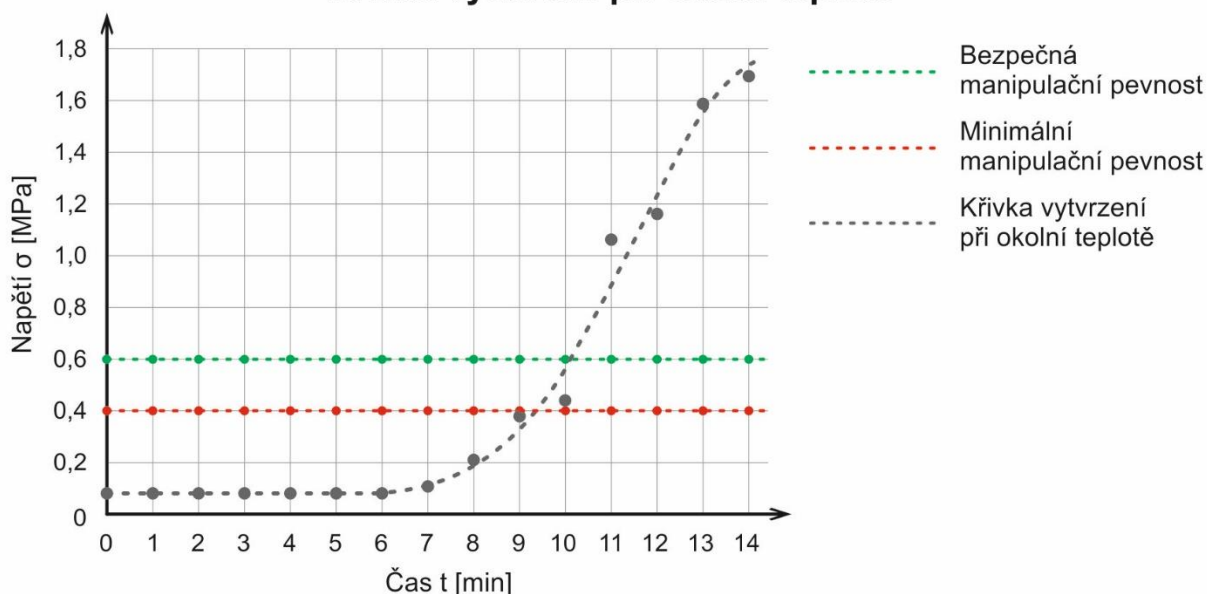
Vzhledem k rozdílným dnům se teplota v místě měření částečně měnila, ovšem rozdíl teplot je zanedbatelný (pouze 1 °C).

Tab. 3 Hodnoty naměřené při vytvrzování lepeného spoje při teplotě okolí

	T=23 °C	T=23 °C	T=22 °C	T=23 °C	T=23 °C
čas	napětí σ [MPa]				
t [min]	1	2	3	4	5
1	0,07	-	-	-	-
2	0,07	-	-	-	-
3	0,07	-	-	-	-
4	0,08	-	-	-	-
5	0,08	-	-	-	-
6	0,08	-	-	-	-
7	0,1	-	-	-	-
8	0,2	0,1	0,33	0,22	0,27
9	0,32	0,38	0,61	0,43	0,33
10	0,38	0,41	0,9	0,59	0,53
11	0,85	1,06	0,82	0,85	0,93
12	1,14	1,27	1,4	1,22	1,19
13	1,58	1,74	2,04	1,6	1,59
14	1,61	1,68	1,69	1,61	1,72

Jak je viditelné z grafu na obr. 26, teoretický bod zvratu (zisk 0,4 MPa, minimální manipulační pevnost) se vyskytuje mezi devátou a desátou minutou. Tato hodnota je ovšem pouze teoretická. Bezpečný bod zvratu (0,6 MPa, bezpečná manipulační pevnost) je po desáté minutě. Dle naměřených hodnot při jedenácté minutě bylo bezpečně získáno napětí dokonce 0,8 MPa. Z toho se dá usoudit, že ideální bod zvratu pro praktické využití je při 10 minutách a 30 sekundách. Přesně na sekundy ovšem opakované měření nebylo možné zajistit vzhledem k tomu, že bylo prováděno ručně. Dále výsledky při jednotlivých pokusech také ovlivnila dokonalost očištění tělísek a nanesení spacerů.

Křivka vytvrzení při okolní teplotě



Obr. 26 Schéma odlupovací zkoušky lepeného spoje

Získ bezpečné manipulační pevnosti mezi 10-11 minutou také potvrzují vizuální kontroly přetržených vzorků (obr. 27). V osmé minutě je vrstva adheziva stále nevytvrzená, po přerušení jsou vidět táhlá vlákna a celkový měkká charakteristika porušení. To se sice při přetržení v desáté minutě zlepšuje, ale stále jsou vidět lesklá „měkká“ místa. Naopak při jedenácté minutě je vidět správné kohezní matné porušení, které značí o vytvrzení adheziva na požadovanou hodnotu. Další přetržení a jejich charakteristické porušení v závislosti na době vytvrzování jsou znázorněny v přílohách 2 a 3.



Obr. 27 Přetržené lepené spoje a znázornění postupu vytvrzení lepidla při teplotě okolí

3. 5. 2 Vytvrzování IR zářičem

Nejdříve probíhalo zkoušení kvůli nalezení hranice manipulační pevnosti. Bylo vyzkoušeno několik časů ohřevu a chlazení, přičemž se hranice (bod zvratu) pohybovala kolem 1 minuty ohřevu a 1 minuty ochlazení. Ovšem po opakovaném porovnání pevností (tab. 4) lepených spojů pro 1 minutu ohřev a 1 minutu chlazení a pevností spoje po 1,5 minutu ohřevu na 60 °C a 1 minutu chlazení vyšlo najevo, že pro bezpečné udržení pevnosti 0,6 MPa stabilně i v praxi bude vhodnější možnost 1,5+1 minuty. U této metody vytvrzování je možné vystavit lepený spoj záření přesně na sekundy, díky snadnému ovládnutí zářiče. Doba chlazení má již své mírné odchylky v sekundách kvůli manuálnímu zasazení vzorku do čelistí trhačského zařízení. Teplota 60 °C je zároveň nejvyšší možnou teplotou, které lze za tak krátký čas, jako je 1,5 minuty, dosáhnout.

Tab. 4 Naměřené hodnoty při vytvrzování IR zářičem

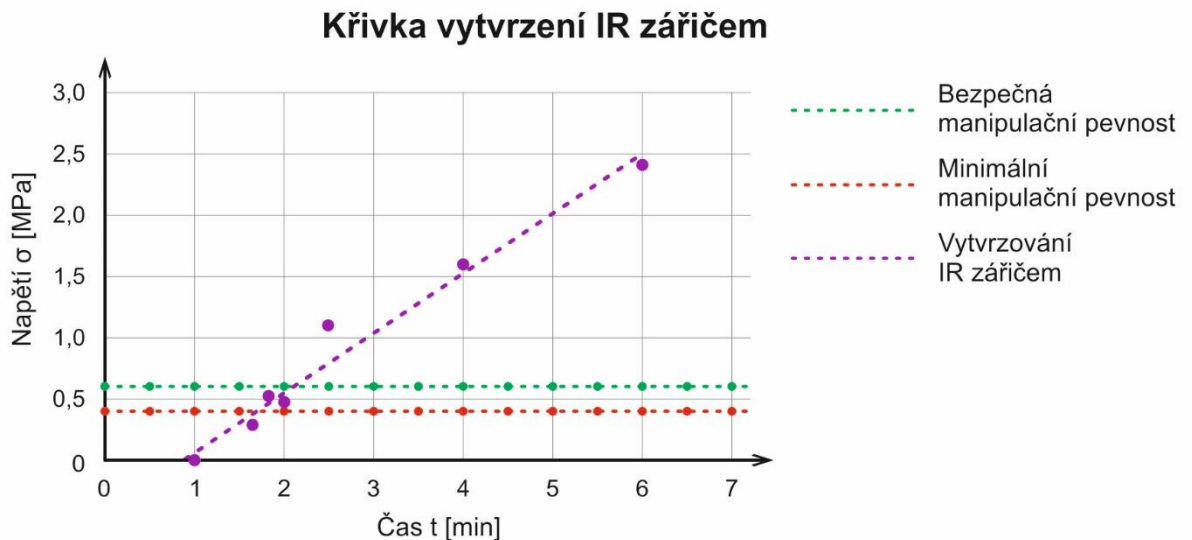
čas t (ohřev + chlazení)	teplota T	napětí σ [MPa]
3+3	70 °C	3,04
3+3	60 °C	2,42
2+4	70 °C	2,68
2+4	80 °C	2,65
4+2	70 °C	2,75
4+2	60 °C	1,3
4+2	80 °C	1,94
2+2	80 °C	1,9
2+2	70 °C	1,28
2+2	60 °C	1,61
2+2	50 °C	1,67
1+1	70 °C	1,02
1+1	60 °C	0,68
1+1	50 °C	0,43
4+1	70 °C	1,89
40 s+1	60 °C	0,28
2+1	50 °C	1,26
2+1	80 °C	1,52
50 s+1	60 °C	0,36
1,5+1	50 °C	1,13
1+50 s	60 °C	0,52
40 s+1	60 °C	0,28

Pro přesnější určení bodu zvratu, a tedy získání bezpečné manipulační pevnosti byla měření, která se nejvíce blížila hodnotě 0,6 MPa zopakována.

Tab. 5 Detailní naměřené hodnoty při vytvrzování IR zářičem

čas t	teplota T	napětí σ [MPa]				
		0,29	0,62	0,47	0,65	0,68
1+1	60 °C					
1,5+1	60 °C	1,19	1,06	1,1	1,25	1,01

Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu na obr. 28 v porovnání s bezpečnou manipulační pevností.



Obr. 28 Grafické znázornění výsledků pro urychlení vytvrzování pomocí IR zářiče

Při opakovaném a detailnějším měření, se zjistilo, že časový cyklus 1+1 při 60 °C (obr. 29) není bezpečná, což potvrzují i vizuální kontroly jednotlivých vzorků. Při tomto cyklu jsou porušení adheziva v určitých částech stále lesklá, což znamená, že nedošlo k dostatečnému vytvrzení. Porušení jsou také hrbolatá a nekonzistentní. Naopak při ponechání vzorku na zdroji tepla o 30 sekund déle (tedy cyklus 1,5+1 - obr. 30) zaručí bezpečné vytvrzení, tím pádem i bezpečnou hodnotu napětí, které daný spoj vydrží. Detailní zobrazení tohoto vzorku značí, že došlo k cílenému konzistentnímu koheznímu porušení. Z výsledků tedy plyne, že se vyplatí vzorek nechat o 30 sekund déle na ohřevu. Detailní zobrazení porušení lomů je v přílohách 4 a 5.



Obr. 29 Detailní vizuální kontrola při vytvrzování IR zářičem



Obr. 30 Detail ideálního porušeného spoje

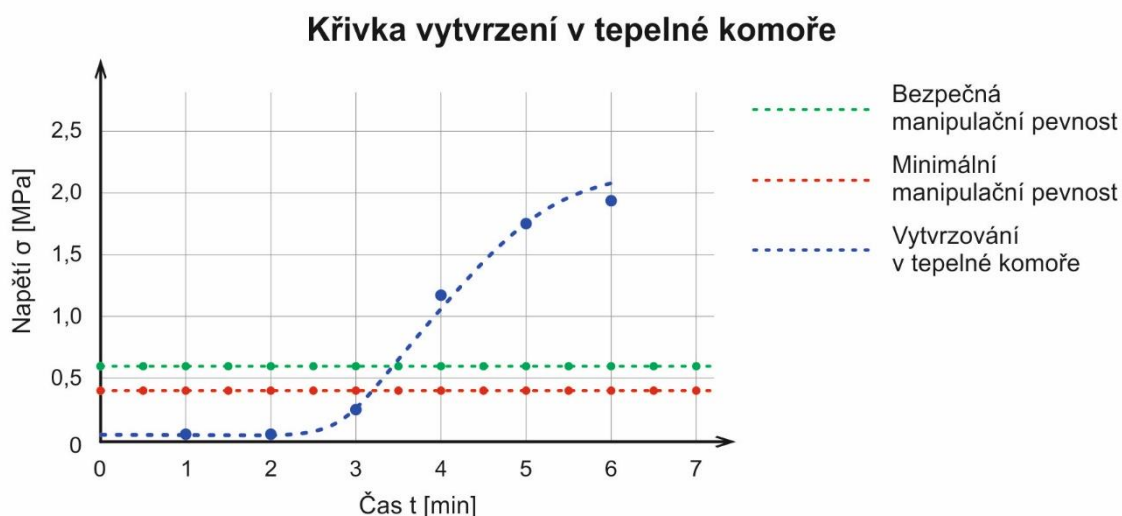
3. 5. 3 Vytvrzení tepelnou komorou

Zpočátku experimentu se začínalo na vyšších hodnotách jak teplot, tak časů. Protože tyto hodnoty byly příliš vysoké (více jak 1 MPa), parametry se postupně snižovaly. Z výsledků (tab. 6) plyne, že optimum je během 2 minut ohřevu na 70 °C a 2 minut ochlazení (podobných výsledků se dosahovalo i v případě 3+1, ale vzhledem k ekonomickému hledisku je vhodnější volba 2+2).

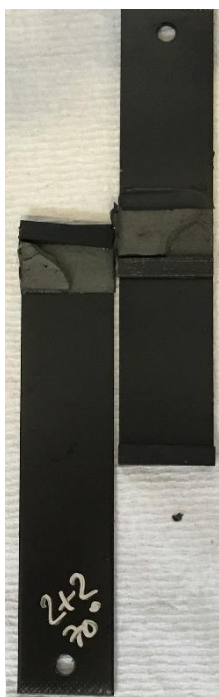
Tab. 6 Naměřené hodnoty při vytvrzování spoje v tepelné komoře

čas t (ohřev + chlazení)	teplota T	napětí σ [MPa]				
3+3	80 °C	2,49				
3+3	70 °C	1,93	2,74	-	-	-
3+3	60 °C	1,04	-	-	-	-
4+2	70 °C	2,29	-	-	-	-
2+4	70 °C	1,91	-	-	-	-
3+2	80 °C	2,1	-	-	-	-
3+2	70 °C	1,75	1,76	-	-	-
2+2	80 °C	1,17				
2+2	70 °C	1,16	1,44	1,45	1,27	1,39
2+2	60 °C	0,34	0,34	-	-	-
3+1	70 °C	1,34	1,45	1,31	0,9	1,32
2+1	60 °C	0,1	-	-	-	-
2+1	70 °C	0,35	-	-	-	-
1+2	70 °C	0,06	-	-	-	-
1,5+1,5	70 °C	0,2	0,24	0,29	0,22	0,3
1+1	70 °C	0,04	-	-	-	-

Získané hodnoty z měření byly vyneseny do grafu na obr. 31, kde došlo k porovnání s bezpečnou manipulační pevností.



Obr. 31 Grafické znázornění výsledků pro urychlování vytvrzení v tepelné komoře



Obr. 32 Přetržený vzorek při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 2 minutách ochlazování v klimatické komoře



Obr. 33 Přetržený vzorek při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutu ochlazování v klimatické komoře



Obr. 34 Přetržený vzorek při 3 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutě ochlazování v klimatické komoře

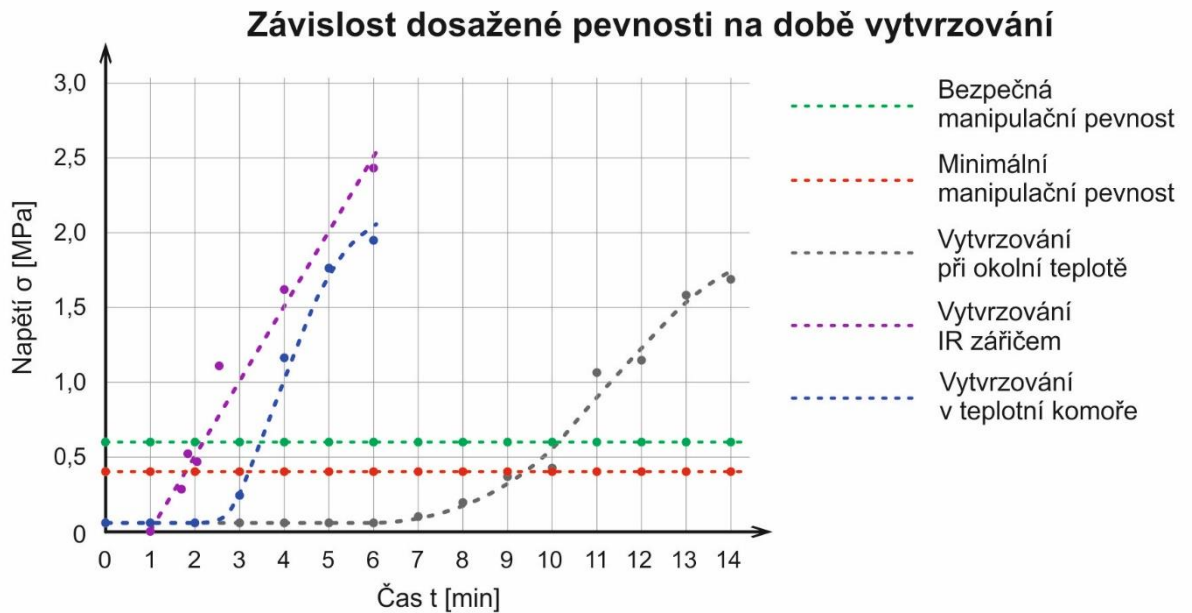
Vizuální kontroly potvrzují naměřené číselné hodnoty. Ideální cyklus 2+2 při 70 °C (obr. 32) vytvoří plně vytvrzený kohezně porušený spoj. To samé splňuje i cyklus 3+1 při stejné teplotě (obr. 34), ale jak již bylo výše zmíněno – z ekonomických důvodů a energetických úspor je cyklus 2+2 výhodnější. Při dodržení teploty 70 °C, ale zkrácení doby chlazení o 1 minutu (obr. 33) se spoj jeví matný, ale ne úplně a číselné hodnoty i tento fakt o nedostatečné pevnosti dosvědčují. Při snížení teploty již o 10 °C na 60 °C (obr. 35) se opět ukazuje nevytvrzený spoj s lesklými částmi a roztrhaným a nerovnoměrným porušením spoje.



Obr. 35 Přetržené vzorky při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutu ochlazování (vlevo 2 minuty ochlazování) v klimatické komoře

3. 5. 4 Porovnání výsledků

Z výsledků plyne, že tepelná komora neurychlí chemickou reakci během vytvrzování tak rychle jako IR zářič, ale oproti vytvrzování při teplotě okolí proces urychlí. Tepelná komora je navíc levnější než IR zářič. Je nutné vzít v potaz, že u IR zářiče se ideální teplotou vytvrzování stalo 60 °C, zatímco u tepelné komory 70 °C. Přestože je tedy metoda IR zářiče dražší, dojde k úspoře časové i energetické, protože není potřeba vyšší teploty. Při teplotách u 80 °C docházelo částečně i k degradaci adheziva, což potvrzuje materiálový list lepidla (příloha 1), kde výrobce uvádí, že vyšší teploty (do 80 °C) vytvrzovací proces zkracují. Výsledky byly vyneseny do grafu na obr. 36. Takto vynesené hodnoty ukazují vytvrzovací křivku při všech využitých způsobem vytvrzování.



Obr. 36 Grafické znázornění porovnání výsledků

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ [34]

Pro porovnání stávajícího a možného nového stavu i z finančního hlediska se vychází z daných hodnot:

- sazba pro lepicí linku – 1554 Kč/hod (c_L)
- mzda na každého operátora linky – 213,14 Kč/hod ($c_{děl}$)
- operátorů na lince je 10 ($n_{děl}$)
- výchozí cyklus: 4 minuty ohřevu IR zářičem a 2 minuty ochlazování, celkem 6 minut (t_{0C})

Celkový počet kusů výrobků (n_{0C}) za 1 hodinu ve stávající verzi:

$$n_{0C} = \frac{hod}{t_{0C}} = \frac{60}{6} = 10 \text{ ks} \quad (4.1)$$

Po úpravě a při zvolení ideálního cyklu ohřevu IR zářičem, který plyne z experimentální části – celkové trvání cyklu je 2,5 minuty (t_{NC}) - pak celkový počet kusů výrobků za 1 hodinu v novém stavu (n_{NC}):

$$n_{NC} = \frac{hod}{t_{NC}} = \frac{60}{2,5} = 24 \text{ ks} \quad (4.2)$$

kde: t_{NC} – doba nového cyklu [min]

Hodnoty spočtené v rovnicích 4. 1 a 4. 2 se přepočítávají k roku, protože i kapacita výroby se počítá na rok. Tedy hodnoty z prvních dvou rovnic se vynásobí počty pracovních dnů v roce a počtem hodin, kdy je linka v provozu (jedná se o třisměnný provoz).

$$240 \text{ dní} \cdot (8 \cdot 3) \text{ hodin} \cdot 10 \text{ ks} = 57\,600 \text{ ks} \quad (4.3)$$

Použití nového adheziva a výrazného zkrácení cyklu umožní zvýšení kapacity linky na víc než dvojnásobek:

$$240 \text{ dní} \cdot (8 \cdot 3) \text{ hodin} \cdot 24 \text{ ks} = 138\,240 \text{ ks} \quad (4.4)$$

Pro případ, že je nutný pouze určitý počet kusů výrobků, dojde ke snížení času provozu linky a z toho i plynoucí úspory. Obvyklá zakázka na výrobu pátých dveří je $n_D=35\,000$ ks/rok.

Cena provozu linky na 1 hodinu c_{LH} :

$$c_{LH} = c_L + c_{děl} \cdot n_{děl} = 1554 + 213,14 \cdot 10 = 3685,4 \text{ Kč/hod} \quad (4.5)$$

Celková doba pro výrobu dávky t_{0D} – stávající stav:

$$t_{0D} = \frac{n_D}{n_{0C}} = \frac{35000}{10} = 3500 \text{ hod} \quad (4.6)$$

Celková doba pro výrobu dávky – nový stav:

$$t_{ND} = \frac{n_D}{n_{NC}} = \frac{35000}{24} = 1458,3 \text{ hod} \quad (4. 7)$$

Celkové náklady na výrobu dávky při stávajícím stavu c_{0CD} :

$$c_{0CD} = t_{0D} \cdot c_{LH} = 3500 \cdot 3685,4 = 12\,898\,900 \text{ Kč} \quad (4. 8)$$

Celkové náklady na výrobu dávky při novém stavu c_{NCD} :

$$c_{NCD} = t_{ND} \cdot c_{LH} = 1458,3 \cdot 3685,4 = 5\,374\,419 \text{ Kč} \quad (4. 9)$$

Celkové úspory na dávku u :

$$u = c_{0CD} - c_{NCD} = 18\,427\,000 - 7\,677\,794 = \mathbf{7\,524\,481 \text{ Kč}} \quad (4. 10)$$

Tyto úspory vzniknou při situaci, kdy na lince běží výroba pouze jednoho projektu. Celkové ekonomické zhodnocení je však složitější a přesahuje rámec této bakalářské práce.

5 ZÁVĚR

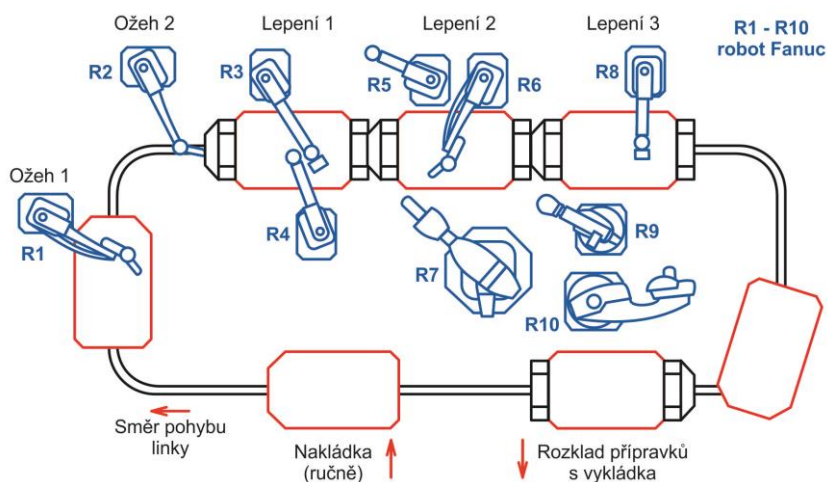
Práce vznikla na zakázku z praxe, konkrétně z firmy Magna Exteriors Bohemia. Bylo nutné otestovat nově zakoupené adhezivum SikaForce – 7990. Cílem práce bylo zajistit urychlení doby k získání manipulační pevnosti, při níž je možné výrobek z linky vzít a uložit do skladu, kde dojde k plnému vytvrzení lepeného spoje. Manipulační pevnost byla stanovena na 0,6 MPa.

Dalším cílem bylo zjistit vhodnou metodu, která bude vytvrzovací proces spoje urychlovat. Po rozboru výhod a nevýhod různých metod a možností firmy byly jako vhodné způsoby urychlování zvoleny IR zářič a klimatická komora. V praktické části práce byly pak tyto metody porovnány s vytvrzováním pouze při teplotě okolí. Lepené spoje se porovnávaly při smykové zkoušce prováděné na trhacím stroji, k němuž příslušel i program, který jednotlivé spoje vyhodnocoval a uváděl nejvyšší naměřené napětí, které vydržely bez výrazného poškození, které by znamenalo omezení funkčnosti spojení.

Výsledky praktické části ukázaly, že nejrychlejším způsobem pro získání manipulační pevnosti je vytvrzování IR zářičem. Ten zajišťuje lokální přenos energie a je i nejefektivnější. Při porovnání s výchozím stavem 4 minuty ohřevu a 2 minuty ochlazování je nový zjištěný cyklus 1,5 minuty ohřevu a 1 minuta ochlazování velkou časovou a energetickou úsporou, která se i přemění v úspory finanční. Je důležité zmínit, že IR zářič je ovšem také dražší než například klimatická komora. Při ní je ale třeba daný spoj nechat v cyklu (2 minuty ohřívání a 2 minuty ochlazování), který je téměř dvakrát delší.

Ekonomické propočty ukázaly, že při použití nového adheziva dochází k výrazným časovým úsporám. Tyto úspory také souvisí s úsporami energetickými (linka běží kratší čas, není potřeba elektrického napájení) a hlavně finančními. Při uvažování fixní dávky 35 000 ks výrobků za rok, finanční úspora se pohybuje přes 7,5 milionů Kč. Tyto propočty jsou však hrubé a vztahují se k využití linky pro jeden projekt.

Pro současný stav výroby projektu pátých dveří BMW je kapacita linky (cca 57 000 ks) dostatečná. Firma Magna však připravuje době další projekty na výrobu s předpokládanou kapacitou 80 000 ks. Celkem se v nejbližších letech počítá s kapacitou 115 000 ks pátých dveří, linka by tedy kapacitně nestačila a byly by třeba investice na další linku, další pracovníky, prostor atd. Jak je uvedeno v kap. 4., použitím nového adheziva dojde k navýšení kapacity linky na více než dvojnásobek, ušetří se tedy investiční náklady spojené s nákupem nové linky.



Obr. 37 Schéma lepicí linky

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [35]

1. MRŇA, L. Lepení materiálů. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf
2. FOLZ, D. C. *Variable Frequency Microwave Curing of Polyurethane* [online]. Blacksburg, Virginia, 2011 [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/34567>. Master Thesis (diplomová práce). Virginia Polytechnic Institute nad State University. Vedoucí práce David E. Clark, Gary S. Pickrell, Robert W. Hendricks.
3. YACOBI, B. G., S. MARTIN, K. DAVIS, A. HUDSON a M. HUBERT. Adhesive bonding in microelectronics and photonics. *Journal of Applied Physics* [online]. 2002, 13. 5. 2002, **91**(6227), 37 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1467950>
4. J. a K. DILGER. *Evropský lepičský praktik. Übach – Palenberg, Carlstrasse 50: TC-Kleben GmbH, 2015)*
5. Cure Epoxies with Heat. *3M: Science. Applied to Life.* [online]. Spojené státy americké [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1081388O/heat-curing-article.pdf?fn=Heat%20Curing%20Article.pdf>
6. Rozhovor s P. NECHANICKÝM, technologem ve firmě Magna Exteriors (Bohemia), Liberec 14. 2. 2020.
7. KUBÁČEK, P. *Základy fyzikální chemie: Mechanismus reakce* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2011 [cit. 2020-2-15]. ISSN 1802 - 128X. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/dynamika/mechanismus.htm
8. The Perfect Cure: IR Spot Curing Speeds Production and Saves Energy. *Verdict: Medical Devices* [online]. Verdict Media [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://www.medicaldevice-network.com/projects/irphotonics/>
9. GOSS, B. Bonding glass and other substrates with UV curing adhesives. *International Journal of Adhesion&Adhesives* [online]. Elsevier Science, 2002, **22**(5), 4 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749602000222>
10. LEONOVA, L. A., E. L. BOYTSOVA a A. A. PUSTOVALOVA. The study of titanium oxynitride coatings solubility deposited by reactive magnetron sputtering. In: *Research Gate* [online]. 2008, červen 2016 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305792521_The_study_of_titanium_oxynitride_coatings_solubility_deposited_by_reactive_magnetron_sputtering
11. ADAMS, R. D. a B. W. DRINKWATER. Nondestructive testing of adhesively-bonded joints. *NDT&E International* [online]. Velká Británie: Elsevier Science, 1997, duben 1997, **30**(2), 6 [cit. 2020-02-07]. ISSN 0963-8695. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869596000503>
12. VERNA, E., E. KORICHO, G. SPEZZATI, et al. *Validation of a new nano-modified adhesive joining technology triggered by electromagnetic field, by testing of a real component: 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014* [online]. 2014, 7 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/286796917_Validation_of_a_new_nano-modified_adhesive_joining_technology_triggered_by_electromagnetic_field_by_testing_of_a_real_component

13. TAY, T. E., B. K. FINK, S. H. MCKNIGHT, S. YARLAGADDA a J. W. GILLESPIE, JR. Accelerated Curing of Adhesives in Bonded Joints by Induction Heating. *Journal of Composite Materials* [online]. 1999, 1. 9. 1999, **33**(17), 22 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199839903301704>

14. SCHONFELD, S. E., G. G. A. BOHM a M. W. HAYES. *Method for Curing Polyurethanes*. 1975. United States of America. 608,936. Uděleno 11.4.1978. Zapsáno 29.8.1975.

15. WANG, C. a D. S. NELSON. *Microwave Method of Curing a Thermoset Polymer*. 1985. United States of America. 4,626,642. Uděleno 2.12.1986. Zapsáno 8.10.1985.

16. LAUF, R. J., A. D. MCMILLAN, F. L. PAULAUSKAS, Z. FATHI a J. WEI. *Adhesive Bonding Using Variable Frequency Microwave Energy*. 1997. United States of America. 5,804,801. Uděleno 8.9.1998. Zapsáno 12.3.1997.

17. RUDAWSKA, A. *Surface Treatment in Bonding Technology*. Elsevier Science Publishing Co, 2019. ISBN 978-0-12-817010-6.

18. KOVAČIČ, Ľ. *Lepenie kovov a plastov*. 2. opravené vydání. Bratislava: Nakladatelství technické literatury Praha, 1984.

19. AWAJA, F., M. GILBERT, G. KELLY a P. J. PIGRAM. Adhesion of Polymers. *Progress in Polymer Science* [online]. Elsevier, 2009, 28. září 2009, (9), 23 [cit. 2020-01-21]. ISSN 0079-6700. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670009000501?via%3Dihub>

20. Poradenské centrum společnosti LEAR, a. s. *Základy teorie lepení* [online]. In: . [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf

21. PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1980.

22. WETTING: The Physics Behind Wetting. *Adhesives.org/Sealants.org* [online]. 2008 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion/wetting>

23. CHALOUPEK, J. *Smáčení vlákných útvarů*. Liberec, 2007. Dizertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce David Lukáš.

24. BROCKMANN, W., P. L. GEISS, J. KLINGEN, K. B. SCHRÖDER a B. MIKHAIL. *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*. Ilustrované, přepracované vydání. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009, 432 s. ISBN 978-3-527-62393-8.

25. ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Norma byla upravena roku 1996.

26. TEROSON statický směšovač PRE 200,400 EPOXY ML. In: *FORMOTOR* [online]. Zvolen, Slovensko [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.formotor.cz/lepidla-a-tmely/805-teroson-staticky-zmiesavac-pre-200400-epoxy-ml.html>

27. LORENZ, L. *Záříč – specifikace*. [elektronická pošta]. Příjemce zprávy: slatinska.jana@seznam.cz. 19. února 2020 [cit. 2020-02-22]. Osobní komunikace
28. LORENZ, L. *Záříč – specifikace*. [elektronická pošta]. Příjemce zprávy: slatinska.jana@seznam.cz. 19. února 2020 [cit. 2020-02-22]. Osobní komunikace
29. BANEÁ, M. D., L. F. M. DA SILVA a R. D. S. G. CAMPILHO. The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive. *The Journal of Adhesion* [online]. 2014, **91**(5), 331-346 [cit. 2020-02-22]. DOI: 10.1080/00218464.2014.903802. ISSN 0021-8464. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218464.2014.903802>
30. Katoforézní lakování. *LAKOL s. r. o* [online]. Kolín [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <http://www.lakol.cz/project/katoforeza/>
31. Slitiny hliníku pro odlitky – chemické složení a mechanické vlastnosti. In: *Vítkovice: Machinery Group* [online]. Vítkovice [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <http://www.vitkovice.cz/documents/10181/286999/Odl%C3%A9van%C3%A9+materialy+-+slitiny+hlin%C3%ADku+pro+odlitky/fbc34196-fa70-47c9-9165-9afab70d4c80?version=1.3>
32. LORENZ, L. *i3 – KTL – materiál – sur. kov (bez e-coating)* [elektronická pošta]. Příjemce zprávy: slatinska.jana@seznam.cz. 19. února 2020 [cit. 2020-02-22]. Osobní komunikace
33. LORENZ, L. *technický list lepidla* [elektronická pošta]. Příjemce zprávy: slatinska.jana@seznam.cz. 2. listopadu 2019 [cit. 2020-02-22]. Osobní komunikace
34. Rozhovor s L. LORENZEM, vedoucím technologem ve firmě Magna Exteriors (Bohemia), Liberec 28. 2. 2020
35. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
1K	jednokomponentní	[-]
2K	dvoukomponentní	[-]
A	Celková plocha	[mm ²]
AF	adhezní porušení lepeného spoje	[-]
A _f	předexponenciální faktor (pravděpodobnost srážky molekul)	[]
c _{0CD}	celkové náklady na výrobu dávky při stávajícím stavu	[Kč]
c _{děl}	mzda na každého operátora linky	[Kč/hod]
CF	kohezní porušení lepeného spoje	[-]
c _L	sazba pro lepicí linku	[Kč/hod]
c _{LH}	cena provozu linky na 1 hodinu	[Kč/hod]
c _{NCD}	celkové náklady na výrobu dávky při novém stavu	[Kč]
E _a	aktivační energie	[]
IR	infračervený	[-]
k	rychlostní konstanta	[]
n _{0C}	celkový počet kusů výrobků za 1 hodinu – výchozí verze	[ks]
n _D	výrobní dávka	[ks/rok]
n _{děl}	počet operátorů na lince	[osob]
n _{NC}	celkový počet kusů výrobků za 1 hodinu – nová verze	[ks]
PUR	polyuretan	[-]
R	molární plynová konstanta	[]
RT	room temperature (pokojová teplota)	[-]
SCF	smíšené porušení lepeného spoje	[-]
T	termodynamická teplota	[]
t	čas vytvrzovacího cyklu	[min]
t _{0C}	doba výchozího cyklu	[min]
t _{0D}	celková doba pro výrobu dávky – výchozí stav	[min]
t _{NC}	doba nového cyklu	[min]
t _{ND}	celková doba pro výrobu dávky – nový stav	[min]
u	celkové úspory na výrobní dávku	[Kč]
UV	ultrafialový	[-]
ZM	základní materiál	[-]
θ	kontaktní úhel	[°]
σ	maximální napětí, které daný lepený spoj vydržel	[MPa]
σ _{sv}	povrchové napětí tekutého lepidla	[]
σ _{sl}	napětí na styčné ploše mezi povrchem substrátu a tekutým lepidlem	[]
σ _{lv}	povrchové napětí tekutého lepidla	[]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Spektrum záření.....	11
Obr. 2 Znázornění průniku záření skrz substrát v závislosti na vlnové délce	11
Obr. 3 - znázornění procesu indukčního vytvrzování [13]	13
Obr. 4 Lepený spoj [17].....	15
Obr. 5 Znázornění kontaktního úhlu [22]	16
Obr. 6 Znázornění Youngovy rovnice [10]	16
Obr. 7 Základní druhy lomů lepeného spoje [4].....	17
Obr. 8 Statický směšovač [26].....	18
Obr. 9 Rozdělení lepidel dle třídy pevnosti [4]	19
Obr. 10 Příklad polymerace [4]	20
Obr. 11 Příklad polyadice [4]	20
Obr. 12 Příklad polykondenzace [4]	20
Obr. 13 Křivka vytvrzování adheziva [4]	22
Obr. 14 Schéma smykové zkoušky lepeného spoje [17]	23
Obr. 15 Schéma tahové zkoušky lepeného spoje [17]	23
Obr. 16 Schéma odlupovací zkoušky lepeného spoje [17].....	24
Obr. 17 Ruční pistole pro nanesení housenky lepidla	25
Obr. 18 Spacery o tloušťce 2 mm	25
Obr. 19 Testované adhezivum	26
Obr. 20 Trhací stroj TIRA TT80 E22	26
Obr. 21 IR zářič s ovládacím zařízením	26
Obr. 22 Detail nastavení klimatické komory	27
Obr. 23 Klimatická komora	27
Obr. 24 Využívané vzorky s nalepenými spacery	28
Obr. 25 Vyhodnocovací program TIRAtest příslušící k trhacímu stroji	29
Obr. 26 Schéma odlupovací zkoušky lepeného spoje.....	31
Obr. 27 Přetržené lepené spoje a znázornění postupu vytvrzení lepidla při teplotě okolí.....	31
Obr. 28 Grafické znázornění výsledků pro urychlení vytvrzování pomocí IR zářiče	33
Obr. 29 Detail ideálního porušeného spoje.....	33
Obr. 30 Detailní vizuální kontrola při vytvrzování IR zářičem.....	33
Obr. 31 Grafické znázornění výsledků pro urychlování vytvrzení v tepelné komoře.....	34
Obr. 32 Přetržený vzorek při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 2 minutách ochlazování v klimatické komoře	35
Obr. 33 Přetržený vzorek při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutě ochlazování v klimatické komoře	35
Obr. 34 Přetržený vzorek při 3 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutě ochlazování v klimatické komoře	35
Obr. 35 Přetržené vzorky při 2 minutách ohřevu na 70 °C a 1 minutě ochlazování (vlevo 2 minutě ochlazování) v klimatické komoře	35
Obr. 36 Grafické znázornění porovnání výsledků	36
Obr. 37 Schéma lepicí linky	369

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení syntetických lepidel [18]	19
Tab. 2 Chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu.....	27
Tab. 3 Hodnoty naměřené při vytvrzování lepeného spoje při teplotě okolí.....	30
Tab. 4 Naměřené hodnoty při vytvrzování IR zářičem	32
Tab. 5 Detailní naměřené hodnoty při vytvrzování IR zářičem	33
Tab. 6 Naměřené hodnoty při vytvrzování spoje v teplené komoře	34

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Technický list lepidla Sika 7990 [33]
Příloha 2	Přetržené vzorky lepených spojů vytvrzených při teplotě okolí – sudé
Příloha 3	Přetržené vzorky lepených spojů vytvrzených při teplotě okolí – liché
Příloha 4	Přetržené vzorky lepených spojů vytvrzených IR zářičem – kratší cyklus
Příloha 5	Přetržené vzorky lepených spojů vytvrzených IR zářičem – delší cyklus

Provisional Product Data Sheet
Version 1 07 / 2016

SikaForce®-7990

The Fast Assembly Adhesive

Technical product data

	Component A (Resin) 7990 A	Component B (Hardener) 7990 B
Reaction Mechanism	Polyaddition	
Chemical base	Polyols, filled	Isocyanate derivatives, unfilled
Solid content	100 %	100 %
Color	Black	Whitish
Mixing color	Black	
Density (25°C) (CQP 553-1)	1,5 g / cm ³ approx.	1,2 g / cm ³ approx.
Viscosity (25°C) (CQP 538-1)	85.000 mPas approx.	15.000 mPas approx.
Mixing ratio	parts per weight part per volume	100 100
Pot life 25°C ¹⁾ (CQP 536 -2)	3 min approx.	
Application temperature range	18 - 25°C	
Shore-D hardness ²⁾ (DIN ISO 7619-1 / CQP 023-1)	48 approx.	
Lap shear strength ²⁾³⁾ (DIN EN 1465 / CQP 546-1)	16 MPa approx. (substrate dependent)	
Elongation at break ²⁾⁴⁾ (ISO 527 / CQP 545-1)	70 % approx.	
Tensile strength ²⁾⁴⁾ (ISO 527 / CQP 545-1)	13 MPa approx.	
E-Modulus ²⁾⁴⁾ (ISO 527 / CQP 545-1)	110 MPa approx.	
Floating roller peel resistance (ISO 4578) ²⁾	12 N/mm approx.	
Service temperature (continuous)	-40°C up to +130°C	
Shelf life (15-25°C in sealed packaging)	9 months after production	

¹⁾ Cup method: 20 g component A + 3,4 g component B, conditioned in water bath at 25°C

²⁾ Testing temperature: 23°C and 50% relative humidity; curing conditions: 16 hrs. 70°C + 48 hrs. RT

³⁾ Substrate: sandblasted Aluminium; thickness: 2 mm

⁴⁾ Film thickness of test sample: 2 mm

Description

SikaForce®-7990 is a flexible two component adhesive. It consists of a filled polyol based resin and an isocyanate based hardener. The components are processed by means of suitable metering and mixing machines.

Product benefits

- Fast handling time
- Room temperature curing
- High strength
- Non sagging product for vertical applications
- Solvent free
- Ageing resistant

Areas of application

SikaForce®-7990 is especially designed for semi-flexible, industrial bonding of different materials like metals, ceramics, woods and plastics like ABS, PC and different blends. Polyolefin's could be also bonded if a pre-treatment like Plasma, Corona, or flame is used.



** This product is currently in the field test phase and has not been finally released. Technical data stated herein is based on preliminary testing and experience and is subject to change. Product is only suitable for experienced users and only after suitable pre-testing. Subject to mandatory legal provisions, Sika's liability is limited to the replacement of the defective products.*

Cure mechanism

The curing of SikaForce®-7990 takes place by chemical reaction of the two components.

Higher temperatures (max 80 °C) fasten the curing process, lower temperatures extend the curing process. 1 MPa Lap shear strength is reached after 10 min at 23°C. The system built up the full adhesion after 7 days.

Chemical resistance

SikaForce®-7990 is resistant to hydrolysis. As the chemical resistance depends on type and condition of the substrate, chemical concentration, exposure duration and temperature, a project adapted adhesive performance test is strongly recommended. The same is valid for the temperature resistance. Without exposure to chemicals the adhesive is permanent resistant to temperatures up to 130 °C. For short time exposure it resists even to higher temperatures.

In case of expected chemical or thermal exposure, we recommend a project related testing.

Method of application

Bond-line application requires a metering machine preferably with gear pumps and dynamic mixing system. The use of static mixer and/or piston pumps requires process orientated trials.

For advice on selecting and setting up a suitable pump system, as well on the techniques of pump operated application, please contact our System Engineering.

The application temperature must be higher than 15 °C. The optimal application temperature is between 20 °C and 25 °C.

Surface preparation.

Bonding area must be clean, dry and free from grease, oil and dust. Due to a variety of substrates and mechanical load requirements, technical consultations with our Technical Service are in any case advisable.

Cleaning up.

SikaForce®-7990 in uncured state may be removed from tools and equipment with Sika® Remover-208, isopropanol, acetone, etc. Once cured, the material can only be removed mechanically.

Hands and exposed skin should be washed immediately using Sika® Handclean Towels or a suitable industrial hand cleaner and water. Do not use solvents!

Storage conditions

Resin and Hardener are sensitive to moisture. Therefore they have to be stored in tightly closed containers. After product take-out the containers have to be closed immediately.

The resin must be stored between 15 - 25 °C. The hardener must be stored between 15 - 25 °C.

During delivery both components can be exposed to temperatures down to 0 °C for a maximum of 3 days. It could be possible that yellowing on the surface of the hardener appears. That is not a quality defect.

Do not use crystallized or inhomogeneous components.

Further information

The following publications are available on request:

- Material Safety Data Sheet

Packaging information

Component A (Resin)	Drum	300 kg
Component B (Hardener)	Drum	200 kg

Value Bases

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Health and Safety Information

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users should refer to the actual Material Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Legal Notes

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Sika Automotive GmbH
 Reichsbahnstr. 99
 D-22525 Hamburg
 Germany
 Tel.: +49 40 540 02-0
 Fax: +49 40 540 02-241





