



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SPOJOVÁNÍ 3D FDM TIŠTĚNÝCH DÍLŮ Z ABS

BONDING OF 3D FDM PRINTED PARTS FROM ABS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Halabrín

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Marek Halabrín
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

Spojování 3D FDM tištěných dílů z ABS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor v úvodní části provede rešerši metod spojování 3D tištěných dílů vyrobených z ABS. Součástí budou i materiály na bázi ABS s případným přidaným plnivem. Dále navrhne experiment pro testování mechanických vlastností spojů těchto materiálů. Provede testy a vyhodnocení experimentu. Navrhne nejvhodnější metody spojování pro jednotlivé varianty řešení spojů. Součástí bude i technicko ekonomické vyhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- rešerše metod spojování 3d fdm tištěných dílů
- návrh metod pro experiment
- návrh experimentu pro ověření mechanických vlastností
- vyhodnocení experimentu
- technicko–ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FORŤ, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce předkládá porovnání vhodnosti spojování součástí různými lepidly. Lepený materiál je ABS plast od firmy Gembird. Vzorky byly slepeny pomocí čtyř lepidel: BISON Power Adhesive, BISON Epoxy Universal, PATTEX Repair Epoxy 5 min. a poslední je směs acetonu s rozpuštěným ABS plastem. Vzorky byly otestovány na tahovou a rázovou zkoušku. Na tahovou zkoušku jsou vyrobeny ve třech konstrukčních variantách. Jsou to tupý čelní spoj, zkosený spoj a stupňovitě přeložený spoj. Na rázovou zkoušku byly vyrobeny ve variantě tyčinky s V vrubem. Každá varianta spoje obsahovala pět vzorků a referenční byly použity tři neslepené. Testování proběhlo na trhacím stroji ZD 10/90 a na Charpyho kladivu od firmy WPM. Práce obsahuje technicko-ekonomické zhodnocení s výsledky zkoušek a s porovnáním jednotlivých lepidel a konstrukcí.

Klíčová slova: 3D FDM tisk, ABS, lepený spoj, tahová zkouška, rázová zkouška

ABSTRACT

The thesis focuses on comparisons of usability of distinct types of glues to attach specimens. The specimens were glued using 4 types of glue: BISON Power Adhesive, BISON Epoxy Universal, PATTEX Repair Epoxy 5 min and a mixture of acetone with diluted ABS plastic as the last. The specimens underwent tensile and impact tests. For the tensile test, the specimens were made in 3 variants: blunt frontal joint, bevelled joint and gradually folded joint. For the impact test, the specimens were made in the form of a rod with a V-shaped notch. All variants of the joints consisted of 5 specimens with 3 unglued specimens for reference. The testing was conducted on the ZD 10/90 tensile strength machine and a Charpy impact test machine from the WPM company. The thesis contains technical-economic evaluation of the results of the tests with comparisons of the individual glues and forms.

Keywords: 3D FDM printing, ABS, adhesive joints, tensile testing, impact testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALABRÍN, Marek. *Spojování 3D FDM tištěných dílů z ABS* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132203>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Spojování 3D FDM tištěných dílů z ABS vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Marek Halabrn

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále chci poděkovat rodičům za jejich trpělivost při mém studiu a panu Ing. Petru Záleskému za poskytnutí strojů na zkoušky.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
2 Lepící proces	12
2.1 3D tisk a ABS materiál	12
2.2 Lepení	13
2.2.1 Pevnost lepených spojů	14
2.2.2 Adheze a koheze	15
2.2.3 Smáčivost.....	16
2.2.4 Rozdělení lepidel	17
2.2.5 Složení lepidel	19
2.2.6 Technologický postup lepení	20
2.2.7 Běžné druhy namáhání lepených spojů	21
2.2.8 Poruchy lepených spojů.....	22
2.2.9 Konstrukce lepených spojů.....	23
2.2.10 Vhodné namáhání lepených spojů	24
2.3 Zkoušení materiálů	25
2.3.1 Zkouška rázem.....	25
2.3.2 Zkouška tahem.....	28
3 Návrh výroby	30
3.1 Návrh vzorků pro tisk	30
3.2 Použitá lepidla	33
3.2.1 BISON Bisonite Power Adhesive.....	33
3.2.2 BISON Epoxy Universal	34
3.2.3 PATTEX Repair Epoxy 5 min.....	34
3.2.4 Aceton+ABS.....	34
3.3 Označení vzorků	34

3.3.1	Označení vzorků pro lepidlo A.....	35
3.4	Přípravek	36
3.5	Volba zkušebních strojů	37
3.5.1	Volba stroje pro tahovou zkoušku	37
3.5.2	Volba stroje pro rázovou zkoušku	38
3.6	Provedení zkoušek a vyhodnocení vzorků	38
3.6.1	Vyhodnocení referenčních vzorků.....	38
3.6.2	Vyhodnocení vzorků pro tahovou zkoušku	40
3.6.3	Vyhodnocení vzorků pro rázovou zkoušku	54
4	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	59
4.1	Vyhodnocení tisku a lepení vzorků	59
4.1.1	Dle konstrukce	59
4.1.2	Dle lepidel.....	59
4.1.3	Dle lepicího procesu	60
4.1.4	Dle kvality spoje	60
4.2	Ekonomické zhodnocení.....	61
5	Závěry	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [44]	64
	Příloha 1 Technický list lepidla BISON Power Adhesive [36]	70
	Příloha 2 Technický list lepidla BISON Epoxy Universal [36]	71
	Příloha 3 Technický list lepidla PATTEX Repair Epoxy 5 min. [37].....	72
	Seznam použitých zdrojů	
	Seznam použitých symbolů a zkratk	
	Seznam příloh	

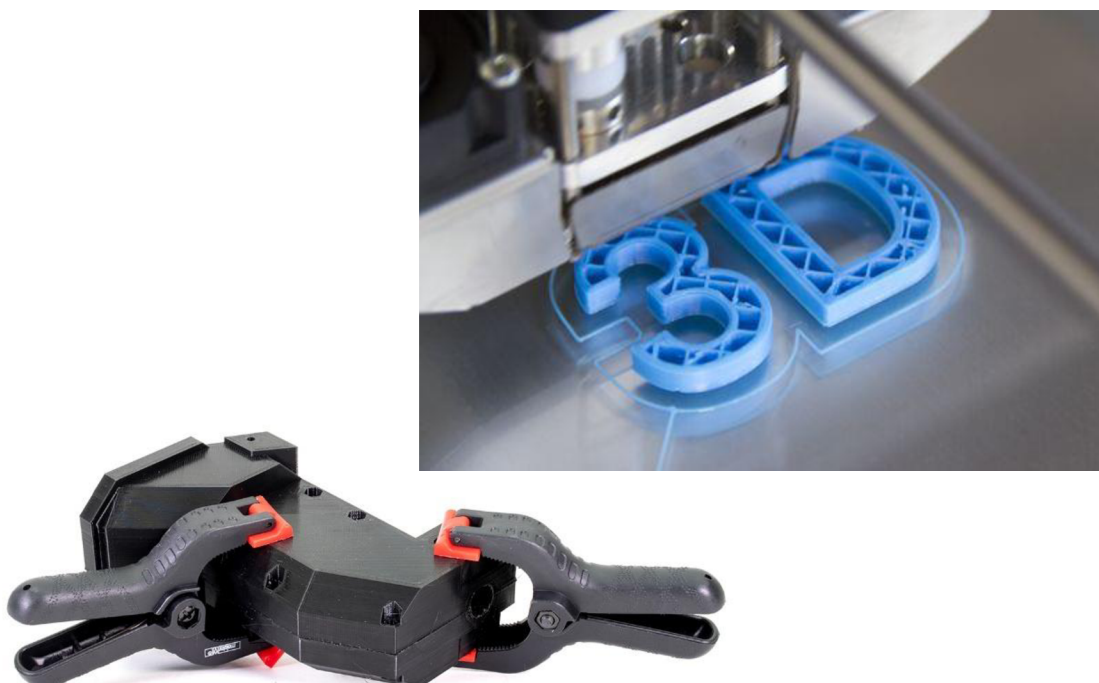
ÚVOD

V dnešní době se 3D tisk stal nedílnou součástí běžného života. Tato technologie zažívá obrovský rozmach, dá se využít v široké škále odvětví, a to ať v průmyslu strojírenském, elektrotechnickém nebo stavebním. Dále v potravinářském, kdy se tisknou například z jedlých materiálů potraviny, tak i ve zdravotnictví. Nespornou výhodou této technologie je, že lze tisknout nejen plasty, ale i například materiály s obsahem titanu. V dnešní době se objevuje technologie na tisk kovových materiálů. Je jen otázka času, kdy se dostane na úroveň tváření či obrábění. Ovšem nejrozšířenější je aktuálně tisk z plastových materiálů.

Touto technologií lze vytisknout složité tvary. Omezující jsou pouze technologické vlastnosti a možnosti tiskárny. Na složitější tvary lze využít vícetryskové tiskárny a v tomto případě lze jeden materiál chemicky rozpustit. Tím se získává nesporná výhoda, že lze tisknout i duté tvary. V případě extrémní složitosti tvaru se otevírá nutnost materiálu nějakým způsobem spojit. 3D tisk nabízí výhodu, že lze konstrukci vytvořit tak, že se již při vývoji navrhne budoucí tvar pro spoj.

Správně zvolenou technologií spoje lze dosáhnout i takového povrchu, že spoj téměř není poznat. Existuje mnoho způsobů spojů. Jsou rozebíratelné, jako například sešroubované, západkové či trubkové. Druhou možností jsou nerozebíratelné spoje, jako lepení nebo pájení. Spojovat díly lze i mechanickým způsobem, a to nýtováním nebo nalisováním.

Nesmírnou výhodou lepení je, že existuje velké množství druhů lepidel, že lze vybrat pro téměř každý materiál a každý typ namáhání to ideální. Jsou tu lepidla pro domácí využití i pro průmyslové. Jsou tu jednosložková, dvousložková a tak dále. Tímto lze dosáhnout, ať vzhledově či mechanicky, kvalitního spoje. Spoj provedený lepením může být až nerozeznatelný od vzhledu nelepene součástí. [1], [2], [3], [4], [5], [6]



Obr. 1 Ukázka výrobků z plastů a jejich spojování. [7], [8]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem diplomové práce je zvolit vhodnou technologii spojování materiálů a následně otestovat pevnost spojů. Pro tyto spoje je zapotřebí následně provést zkoušky. Určený materiál pro testování je ABS, popřípadě jeho varianty. Určená technologie pro výrobu vzorků je pomocí 3D tisku.

Veškeré vzorky budou vytištěny na FDM 3D tiskárně *ENDER 3 PRO* od asijského výrobce *CREALITY*. Výhodou této tiskárny je stabilní tuhý rám, který zabrání odchylkám rozměrů a nízká ucpávatelnost trysky.

Tisk ABS materiálu je problematický tím, že je náchylný na prudké změny, ale i na drobné výchyly teplot. To může v kombinaci s nekvalitně seřízenou výškou trysky a špatnou přilnavostí podložky způsobit odlupování od podložky, případně špatnou přilnavost jednotlivých vrstev. Z tohoto důvodu bude tisk probíhat v ochranné atmosféře. Technologická úprava vzorků proběhne ve formě zkosení hran, aby nedocházelo k pnutí a vypouknutí hran a následné problematice kvalitního spoje.

Spojení plastů lze provést několika způsoby. Spoje existují rozebíratelné a nerozebíratelné. Mezi rozebíratelné spoje lze zařadit spojení šroubem, čepem či závlačkou. Jako nerozebíratelné lze klasifikovat nýtování, svařování nebo lepení. Vzhledem k nutnosti technologických úprav, jako například příprava otvoru pro šroubový spoj, je voleno lepení. Výhodou těchto spojů je, že spojovací prvky nevyčnívají z místa spoje. Výhoda lepení je, že tepelně neovlivňují okolí spoje a také velká dostupnost různých druhů lepidel.

Pro zjištění kvality lepené plochy a celkově kvalitu lepení je zapotřebí provést zkoušku spoje. Zkoušky mohou probíhat v několika variantách jako například na tahovou, ohybovou či smykovou pevnost.

Materiál pro tisk vzorků byl zvolen ABS od firmy *Gembird*. Volba tohoto materiálu proběhla na základě pozitivních zkušeností s tímto materiálem. Vlastnosti viz tab. 1. Kvalita tisku tohoto materiálu je nadprůměrná. Konstrukční úpravy vzorků pro lepení proběhnou v několika variantách pro možnost porovnání konstrukčních úprav, které lze provést již při modelování. Zvolená lepidla jsou *BISON Power adhesive*, *BISON Epoxy Universal*, *PATTEX Repair Epoxy* a směs acetonu s rozpuštěným ABS. Následné zkoušení spojů proběhne na trhacím stroji ZD 10/90 pro tahovou zkoušku a na Charpyho kladivu od firmy WPM pro rázovou zkoušku. [3], [4], [6], [9], [10], [11], [12], [13]

Tab. 1 Vlastnosti materiálu ABS od firmy Gembird [10], [14]:

Materiál	Gembird ABS – 3DP-ABS1.75-01-BK			
Chemické vlastnosti	Bod tání [°C]	Hustota (při 215 °C) [%]	Index toku taveniny (10 min, 2,16 kg)	
	225 ÷ 240	17,5 ÷ 19,5	5	
Mechanické vlastnosti	Mez kluzu (na 5 mm) [MPa]	Rázová odolnost [kJ·m ⁻²]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]
	45	16	37 ÷ 110	65
Technické vlastnosti	Hmotnost cívky [kg]	Průměr filamentu [mm]	Délka filamentu [m]	Ideální teplota tisku [°C]
	1	1,75	400	230

2 LEPÍCÍ PROCES

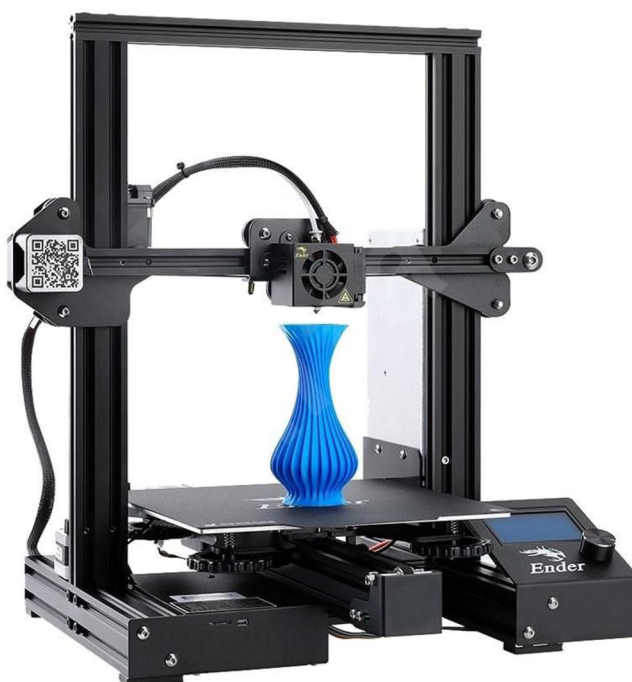
Lepení je proces, který je možno definovat jako trvalé a pevné spojení mezi dvěma materiály pomocí lepidla. Jedná se o látku či směs, která toto spojení umožňuje. Vznikne spoj s vysokou pevností, i s těsnicí funkcí, která zajišťuje voděodolnost. Spoje jsou odolné proti korozi, což je i výhodou polymerních materiálů. Lze spojovat i tenké materiály. Kvalita procesu závisí na správné volbě lepidla v závislosti na materiálu, povrchové úpravě a konstrukci. Je důležité dodržovat technologický postup, obzvlášť pokud má součást složitější konstrukci. [12], [15]

2.1 3D tisk a ABS materiál

Jedná se přibližně o 30 let starou technologii. Největšího rozmachu dosáhla teprve za posledních 10 let. Tento rozmach umožnila větší dostupnost obyčejných 3D tiskáren pro běžné domácí využití, vypršení prvních patentů umožnilo větší dostupnost pro více výrobců. Jedná se o technologii, která je schopna podle dat získaných v modelování ve 3D kreslicím programu vytvořit trojrozměrný výrobek dle předlohy. Výsledkem je dosaženo tak, že se jednotlivé vrstvy materiálu přidávají postupně jedna na druhou. Jedná se o aditivní metodu tisku. Toto je rozdíl například od obrábění, kde se materiál odebírá.

Technologie FDM (Fused Deposition Modeling) neboli označení FFF (Fused Filament Fabrication), je metoda, kde se natavuje materiál umístěný v podobě filamentu na cívce (obr. 2). Z cívky se materiál postupně odvíjí podavačem do tiskové hlavy, ze které se následně tisknou jednotlivé vrstvy kumulující se na sebe. Z předlohy digitálních dat je vytištěn požadovaný 3D model. Pro svou jednoduchost se jedná o nejběžnější a nejlevnější metodu tisku.

Nevýhodou procesu je dlouhý tiskový čas. Špatné seřízení a nastavení tiskárny může způsobit rozdílnou kvalitu u stejných výrobků. Velice záleží na použitém materiálu, který se od různých výrobců může lišit kvalitou či barvou. Většinou je nutné využít podpěry, které se po vytisknutí oddělí odloupením. [9], [14], [16]



Obr. 2 3D tiskárna ENDER 3 PRO [11].

ABS je druh v průmyslu hojně využívaného amorfního plastu. Zkratka označení termoplastu znamená Akrylonitrilbutadienstyren. Jedná se o materiál s vysokou odolností proti mechanickému působení. Hlavními mechanickými vlastnostmi jsou tuhost, houževnatost, odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám. Vzhledem k tomu, že je zdravotně nezávadný a odolný proti velké škále chemického působení, jako jsou olej, tuky či kyseliny, tak je vhodný pro výrobu láhví či potravinářských boxů. ABS je často používán pro výrobu kojeneckých láhví, kde vyniká vysokou tepelnou odolností a zdravotní nezávadností, neobsahuje bisfenol. Využívá se i u airsoftových zbraní. Dalším využitím je například při výrobě nábytku, cestovních kufrů, na hrany dřevotřískových desek, ale hlavně při použití na 3D tiskárnách. Pro tisk je materiál dodáván ve formě filamentu (obr. 3).



Obr. 3 Filament pro 3D tisk [A1].

Smrštění materiálu je v rozsahu $0,3 \div 0,7$ %. Samotné lepení materiálu je možné rozpuštědlovými lepidly na bázi toluenu a methylenchloridu či polyakrylátovými lepidly. Maximální možná teplota zpracování je 280 °C, poté nastává rozklad materiálu. Hustota materiálu je $1045 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Odolnost výrobku z ABS plastu proti vyšším teplotám je do 105 °C.

Existují i další druhy ABS pro 3D tisk kromě klasického jako například ABS-T či ABS+. Jedná se o různé modifikace klasického ABS plastu.

ABS-T je transparentní druh ABS plastu. Je měkčí než klasický ABS, má o něco menší tepelné pnutí a dobrou kvalitu slepování jednotlivých vrstev. Je zdravotně nezávadný. Základním rozdílem mezi ABS a ABS-T je v konstrukci cívky. U ABS-T má větší průměr vinutí a struna nepodléhá takovému pokroucení. Teplota tisku je mezi $200 \div 230$ °C a lze jím tisknout velké objekty. A jako klasický ABS je také rozpustný v acetonu.

ABS+ je druh ABS, který je přibližně o 40 % pevnější než klasický ABS. Velkou výhodou je menší náročnost na konstantní teplotu při tisku. Tím pádem není potřeba přídavných ventilátorů nebo kryt tiskárny komorou. V závislosti na teplotě dochází k minimální deformaci. Je zdravotně nezávadný, odolný vůči rázu, rozdílným, a to ať vysokým či nízkým, teplotám a mechanickému namáhání. [5], [6], [14], [18]

2.2 Lepení

Jedná se o způsob spojování materiálů, tedy adherendů, při kterém dochází k trvalému spojení dvou různých nebo stejných materiálů. Používají se lepidla, tedy adhesiva. Tímto způsobem lze dosáhnout trvalého a pevného spoje spojovaných dílů. Schopnost spoje odolat namáhání závisí na kohezi lepidla a adhezi povrchů lepených dílů.

V případě koheze se jedná o stav, při kterém jsou částice látky drženy mezimolekulárními a valenčními silami. Dají se rozdělit na mechanické, chemické a fyzikální.

Strukturu lepeného spoje lze vidět na obr. 4. Modrá představuje adherendy, červená kohezní zónu lepidla, světle šedá je přechodová adhezní zóna a tmavě šedá adhezní zóna. Každá tato oblast má svou důležitou funkci pro zachování stability spoje a jsou důležité, aby si spoj

zachoval svoji kvalitu a funkci. Jedná se v ideálním případě o komplex tří hlavních vrstev v kombinaci dvou mikrovrstev. [12], [15], [18], [19], [20]



Obr. 4 Popis jednotlivých oblastí v lepeném spoji [15].

Jedná se o nerozebíratelný spoj. Oproti jiným technologiím má řadu výhod [18], [21]:

- rovnoměrné rozložení pnutí ve spoji,
- neovlivňuje tepelně strukturu okolí lepeného spoje,
při lepení nedochází k žádné mechanické deformaci dílů,
lze kombinovat i s jinými metodami spojování materiálů,
lze lepit různé tvary a různé tloušťky, a to i velmi tenké,
při použití vhodného lepidla lze kombinovat různé materiály,
- spoj má dobré vlastnosti, jako například dynamickou pevnost a tlumení.

Tímto spojením vznikají i vedlejší výhody, a to vznik bariéry, kterou se získá například [18]:

- odolnost proti prachu,
- odolnost proti pronikání vody,
- odolnost proti chemikáliím,
- odolnost proti profukování větru,
- odolnost proti šíření tepla.

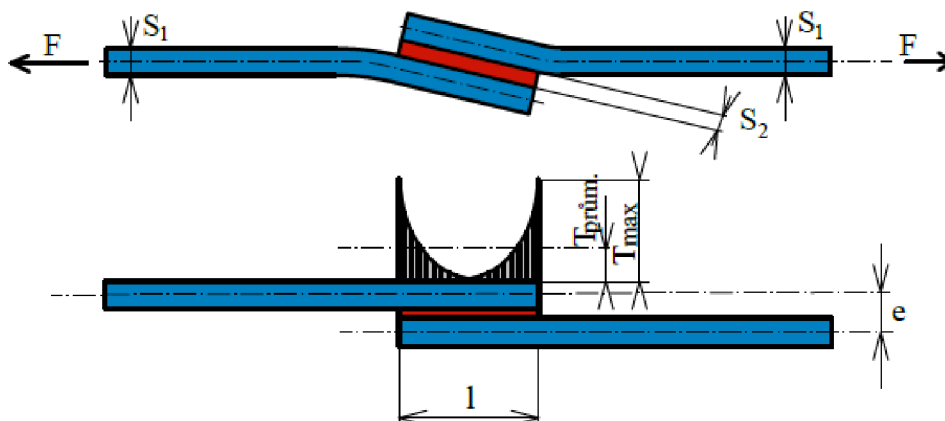
Mezi nevýhody lze zařadit [18]:

- stárnutí spoje, které se špatně odhaduje,
- počáteční pevnost je často malá,
- pokud je spoj staticky zatížený, může docházet k plastickému tečení,
- spoj se stává nerozebíratelný, a ne všechna lepidla lze jinou chemickou složkou rozebrat,
- u nedestruktivního zkoušení je vyšší cena,
- je nutné provést úpravu spojovaných dílů, jako například očištění.

Nevýhody lze volbou vhodného lepidla a technologickými úpravami částečně eliminovat.

2.2.1 Pevnost lepených spojů

Pevnost a deformace lepených spojů je přímo závislá na mechanických vlastnostech samotné slepené části a napětově-deformačním stavu spoje. Tento stav je obvykle nerovnoměrný a lim nastává v čase, kdy napětí dosahuje maximální hodnoty. Proto se k určení lomového namáhání dělí střední pevnost lepenou plochou, viz obr. 5. U lepených spojů je důležité se vyvarovat ohybovému namáhání. [15], [20]



Obr. 5 Deformace jednostranně přeplátovaného spoje [15].

Vztah pro výpočet [15]:

$$\tau_b = \frac{F_{\max}}{A} \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

kde: τ_b [MPa] - pevnost v tahu
 F_{\max} [N] - maximální působící síla
 A [mm²] - plocha přeplátovaného spoje

$$A = b \cdot l \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.2)$$

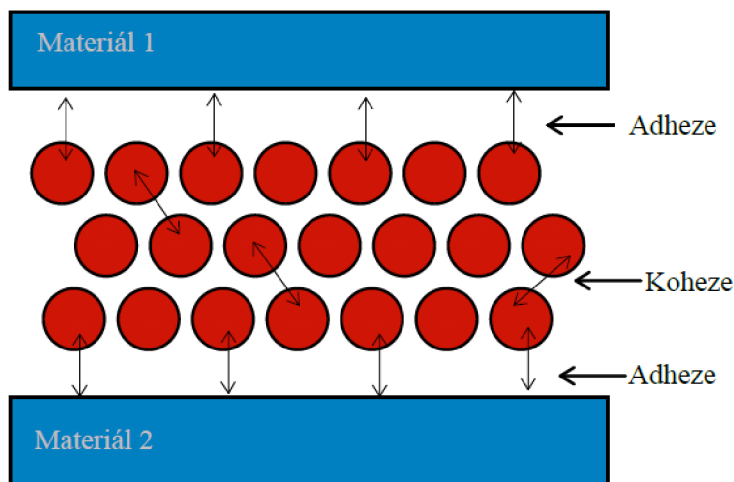
kde: b [mm] - šířka přeplátovaného spoje
 l [mm] - délka přeplátovaného spoje

2.2.2 Adheze a koheze

Pojmy adheze a koheze jsou velmi důležitou součástí technologie lepení. Určují výslednou kvalitu slepeného spoje, a to jak z pohledu vnitřních vlastností lepidla, tak přilnavosti k lepenému povrchu. Jedná se o chemickou podstatu na molekulové bázi.

Adheze je soudružnost dvou lepených materiálů adhezivními silami. Je základním předpokladem pro úspěšné lepení. Pokud není přilnavost lepidla k povrchu dostatečná, nedojde k úspěšnému slepení materiálu a k pevnému spoji. Uplatňují se zde fyzikální síly, chemické vazby a mezimolekulární síly. Základní vazby vznikají pomocí chemických a fyzikálních sil v pórech a nerovnostech na styčných plochách materiálů. Tento stav je možné popsat i pomocí Van der Waalsových sil. Tyto síly jsou velmi slabě přitažlivé a tím je jejich dosah nižší než hloubka drsnosti jednotlivých povrchů materiálů. Lepicí směs musí vniknout do nerovností, aby spoj byl kvalitní a nedošlo k jeho poškození a odtržení na hranici materiálu a lepidla. Adheze je přímo závislá na smáčivosti lepidla. Adhezí se rozumí stav na hranici mezi materiálem a lepidlem, viz obr. 6.

Koheze je soubor sil mezi molekulami lepidla, díky kterým jsou drženy jednotlivé částice směsi pohromadě. Zjednodušeně se jedná o pevnost lepicí hmoty. Pevnost lepidla je u každého druhu odlišná, především jedná-li se o jednosložkové či vícesložkové epoxidy. Přímou závislost má na vlastnostech a charakteru. Jednosložková lepidla, z důvodu zvyšování teplot, mají nižší kohezi a dochází k jejich měknutí. Naopak vícesložková lepidla, kde se pomocí směsi více složek dosáhne lepších vlastností, mají velmi vysokou kohezi. Koheze je pro kvalitu lepidla, tedy samotný lepený spoj, velice důležitá, protože jinak může dojít k poškození spoje na bázi roztržení samotné lepicí složky. Je zásadní dodržet míchaný poměr směsi a postup dle výrobce. Kde se v lepeném spoji jedná o kohezi lze vidět na obr. 6. [12], [15], [19], [21], [22]



Obr. 6 Adheze a koheze [24]

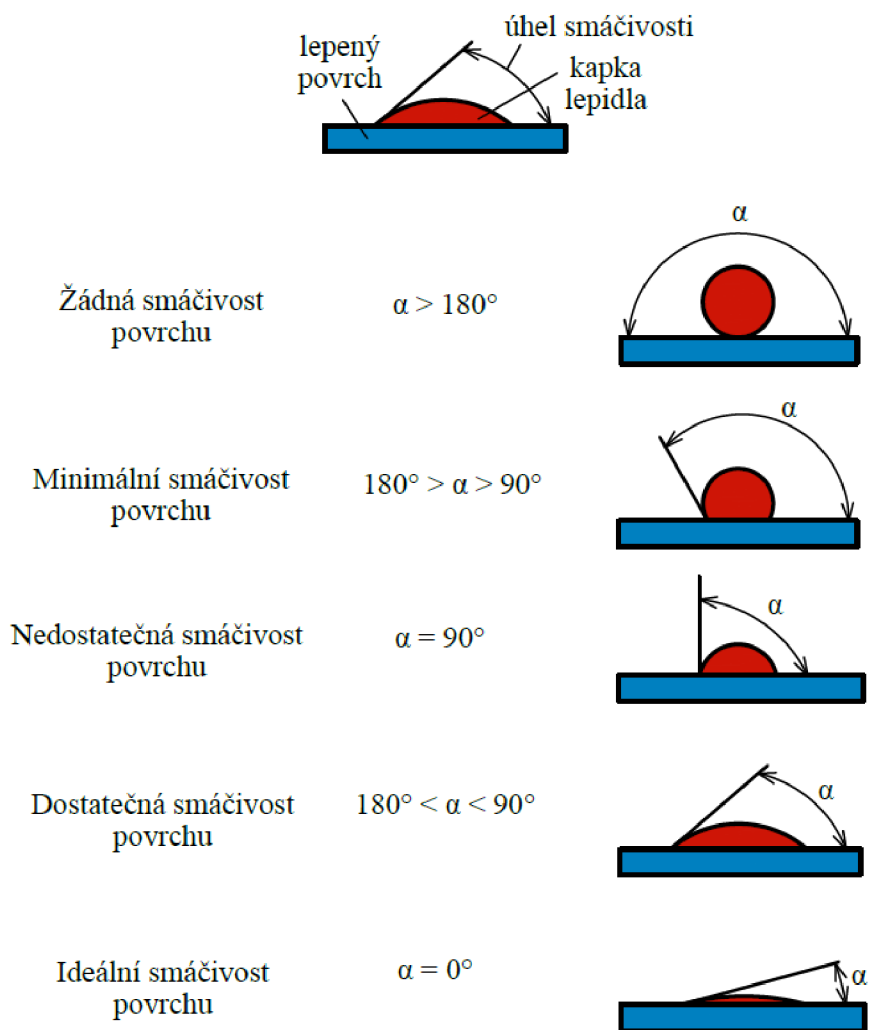
2.2.3 Smáčivost

Jedná se o vlastnost, která velice ovlivňuje kvalitu lepeného spoje. Je to schopnost materiálu rozprostření kapalného lepidla po dané ploše. Pokud není lepidlo schopné se rozprostřít rovnoměrně po celé ploše lepené části, nemůže vzniknout adhezní vazba. Úzce souvisí s povrchovým napětím mezi lepidlem a povrchem výrobku a polaritou samotného lepeného povrchu materiálu. Pokud je povrchové napětí povrchu vyšší než povrchové napětí kapaliny, dojde k jejímu rozlítí po povrchu materiálu. Cílem je dosáhnout maximální smáčivosti a tím vzniku adhezních vazeb. To znamená odstranění všech látek, nerovností a vrstev. Z pravidla platí, že čím je lepená plocha větší, tím je i pevnější samotný spoj.

Příprava povrchu může probíhat těmito způsoby:

- fyzikálními operacemi – v případě fyzikálních operací se jedná o úpravu povrchu působením jiného materiálu nebo síly, jako například broušením, sušením, pískováním, UV zářením
- chemickými operacemi – myšleno odmašťování, moření, fosfatizace či použití nátěru prim

Po těchto úpravách lze dosáhnout lepší smáčivosti povrchu. Příklad materiálu s nejvyšší povrchovou smáčivostí je voda. Toto se dá využít pro test, jestli bude povrch dostatečně očištěný a tím pádem dostatečně smáčivý. Pokud bude smáčet voda, bude s největší pravděpodobností smáčet i lepidlo. Toto se hodnotí kapkovou metodou. Z obr. 7 lze vidět, že pokud je úhel menší než 180° , jedná o nulovou smáčivost povrchu. Do úhlu 90° je to potom minimální smáčivost a teprve pod 90° to bude dostatečná smáčivost povrchu. Ideální smáčivost povrchu je při svírajícím úhlu 0° . [19], [21], [22], [23], [25]



Obr. 7 Smáčivost povrchu [26].

2.2.4 Rozdělení lepidel

Lepidla se rozdělí podle těchto základních kritérií.

Podle chemické struktury [18]:

- lepidla na bázi anorganické – jsou lepidla, jako například malty, cementy nebo rozpustné silikáty. Mezi ně lze zařadit i různé taveniny na bázi kyslíčků a silikátů, kterými se svařuje sklo.
- lepidla na bázi silikonů – polymerní látky na bázi křemíků. Jedná se o kombinaci či přechod mezi anorganickými a organickými sloučeninami. Většinou je to kombinace atomu křemíku a substituentů organického původu.
- lepidla na bázi organické – přírodní, semisyntetické a syntetické polymerní látky s atomem na bázi uhlíku. Přírodní lepidla mají základ v rostlinném nebo živočišném původu a jejich produktů. Jedná se například o škrob z mouky, latex, klovatinu či klíh zvířecího původu získaný z kostí či kůže. Tyto materiály mohou být dále upraveny, například latex se stabilizuje, aby se eliminovalo vysrážení. Semisyntetická lepidla mají základ v přírodním materiálu a následně se modifikuje pro získání požadovaných vlastností lepeného spoje. Prakticky se jedná o materiály se základem v celulóze. Tyto chemickou cestou upravené původně přírodní materiály se používají ve zdravotnictví. Syntetická lepidla jsou na bázi

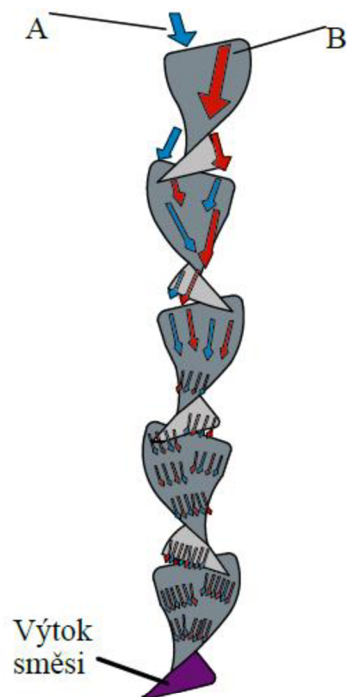
polymeru upraveného chemickou cestou. Z důvodu chemické reakce nemá lepidlo dobré vlastnosti a nezajistí kvalitní spoj. Poté má nízkou kohezní a adhezní pevnost. Proto se používají vícesložková lepidla tvořená více složkami s různými vlastnostmi pro dosažení požadované kvality spoje.

Podle fyzikální podstaty [18]:

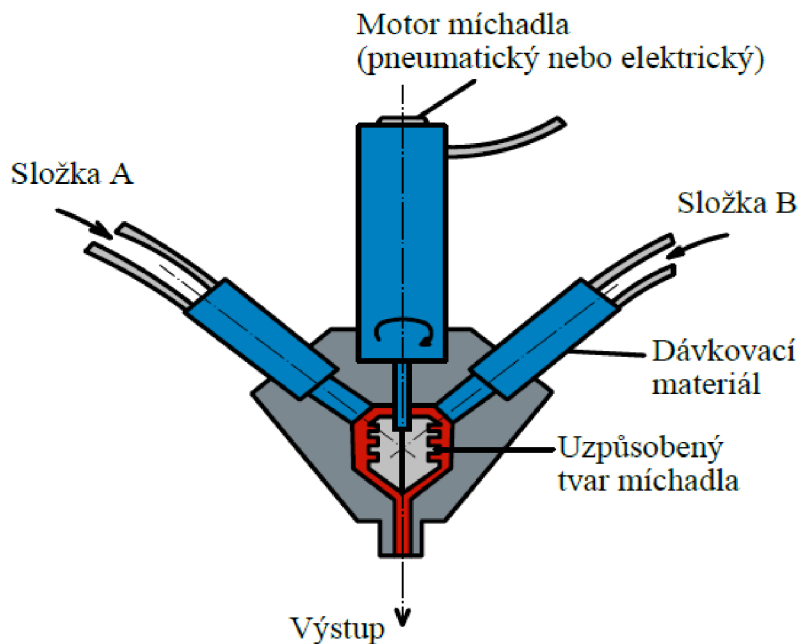
- lepidla kapalná – reaktivní monomery, reaktivní prepolymer, roztoková lepidla a disperzní lepidla
- lepidla plastická – fáze mezi kapalnou a tuhou látkou. Jedná se o tmely, kaučukové patche, některé cementy či pasty.
- lepidla tuhá – lepidla, která jsou v základu v tuhém stavu a svou strukturu mění účinkem tepla, například ohřátím přímým nebo frekvenčním. Tím se změní struktura na plastický stav a umožní adhezi k povrchu materiálu. Do této kategorie patří termolepidla či lepicí fólie.

Podle počtu složek [18]:

- Lepidla jednosložková – jednokomponentní a vícekomponentní. Jednokomponentní lepidla jsou na bázi taveniny nebo fólie termoplastického polymeru nebo na bázi reaktivních monomerů či polymerů. U nich dochází k vytvrzování účinkem vlhkosti. Vícekomponentní lepicí směsi jsou například anaerobní lepidla, kde při zamezení přístupu kyslíku dojde k polymerační reakci. Dále vytvrzovaná UV zářením a lepidla vyžadující k vytvrzení zvýšenou teplotu. Tato lepidla jsou při pokojové teplotě stabilní. Jsou to například epoxy pryskyřici a druhé látky.
- Lepidla vícesložková – lepidla, kdy ke vzniku samotné lepicí směsi dochází smícháním více složek. K míchání směsi může docházet při vlastní technologii lepení. Tato směs má omezenou dobu zpracovatelnosti, při které je možné ji nanášet a vytvořit spoj. Při sloučení složek lepidla dochází k chemické reakci, která ovlivňuje dobu zpracovatelnosti. V tomto případě přímo neplatí, že čím delší doba zpracovatelnosti, tím výhodnější, protože se tím prodlužuje doba, kdy oba adherendy nebudou mít požadovanou pevnost. Vhodně zvolenou technologií a okolními podmínkami lze dosáhnout ideální doby tuhnutí a spoje s požadovanou pevností. Vhodné je připravit pouze takového množství směsi, které bude využito. Faktor, který ovlivňuje dobu tuhnutí, je teplota. Lze jí ovlivnit dobu vytvrzování. Toho je možné docílit například nahřátím povrchů materiálů nebo samotnou lepicí směs vystavit vyšší teplotě. Zkrátí se doba vytvrzování i čas k získání pevného spoje. K urychlení vytvrzování lze použít také UV záření. Na zpracování dvousložkových směsí pro neprůmyslové využití se používá směšovač. V kartuších se nacházejí jednotlivé složky, které jsou mechanicky oddělené a pro vlastní použití a smíchání jsou vytlačeny přes směšovač. V něm dojde ke smíchání obou složek a směs je po poměrně krátké době schopná vytvořit pevný spoj. V průmyslovém využití se používají různá zařízení pro smíchání obou složek. Zde je žádoucí zajistit kontinuitu tvorby lepeného spoje, a proto je potřeba jistá pravidelnost a stálost stlačování. Pro tuto technologii je využíváno zařízení na obr. 8 a obr. 9. Také existují dvousložková lepidla, u kterých je možné na jeden povrch nanést první složku a na druhý složku druhou.

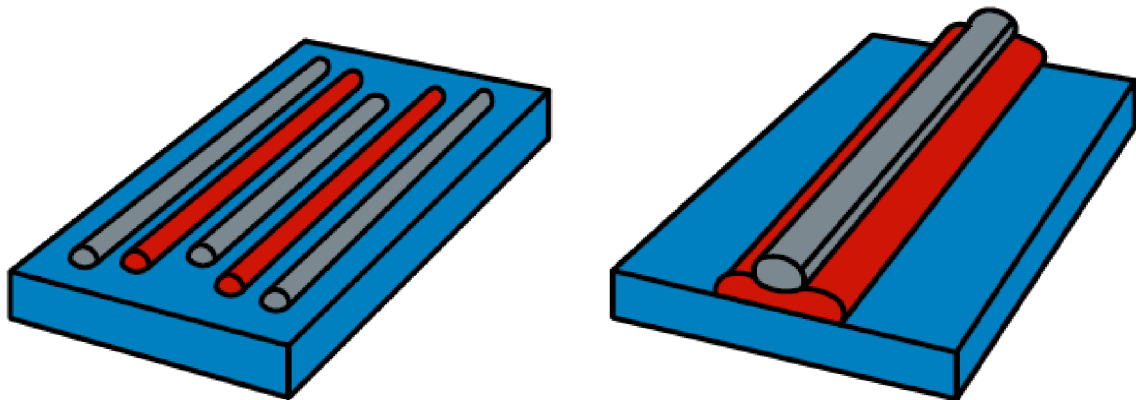


Obr. 8 Směšování pomocí směšovače [18].



Obr. 9 Dynamický směšovač pro dvoukomponentní lepidla [18].

Jakmile dojde k přitlačení obou ploch, dojde k promísení a rychlému vytvoření lepeného spoje. Použití této metody je pro lepicí vrstvy malé tloušťky. Pro větší tloušťky lepidel se využívají lepidla, kde obě složky mají vzhled pastelíny. Na plochu jednoho adherendu se nanese buď pruh vedle pruhu nebo pruh na pruh (obr. 10). Jakmile je přitlačen druhý materiál, dojde ke smíchání obou složek a vytvoření spoje. Doporučuje se s díly mírně pohybovat, aby došlo ke kvalitnímu spojení složek.



Obr. 10 Nanesení lepidla pruh vedle pruhu (nalevo) a pruh na pruh (napravo) [18].

2.2.5 Složení lepidel

Základní vlastnosti a složení lepicích přípravků. Převážná většina lepicích prvků se skládá minimálně z tvrdidel a pojidel. Přídavné složky jsou rozpouštědla, plnidla, změkčovadla, urychlovače a další přísady.

Tvrdidla neboli katalyzátory jsou základní složkou směsi. Jedná se o chemická činidla, která reagují se složkou pojidla. Sloučením dojde ke složité chemické reakci; vzniká úplně odlišná látka od původní. Použití tvrdidel je převážně při lepení syntetickými lepidly. Ta jsou přidávána k pryskyřici, která je základní složkou, a to ve velmi malých množstvích. Přibližný hmotnostní poměr je 1:100 až 5:100. Po smíchání těchto dvou prvků je již omezený čas pro použití směsi.

V závislosti na teplotě, poměru smíchaných prvků lepidla a probíhající chemické reakci směs brzy tuhne a stává se velice pevnou. Katalyzátory se používají například u polyesterových, epoxidových či polyuretanových lepidel.

Pojidla jsou převážně organické látky živočišného nebo rostlinného původu, ale také mohou být vyrobená jako syntetická. Jedná se o hlavní a objemově nejvýraznější složku lepicí směsi. Tato složka vytváří po zatuhnutí na vzduchu nebo chemickou reakcí s jinou látkou samotný lepený spoj.

Rozpouštědla jsou druhy látky, ve kterých se rozpouští pojidla. Slouží k tomu, aby se lepidlo lépe nanášelo. Snahou je zlepšit smáčivost lepidla. Rozpouštědlo nesmí pojidlo naleptávat. Příklady rozpouštědel jsou aceton, toluen, benzín a další.

Plnidla nejsou v rozpouštědlech rozpustná. Vytváří páteř pro pojidlovou složku nejvíce tam, kde se nachází větší vrstva lepidla. Pokud je například někde větší spára, plnidlo napomáhá jejímu slepení. Také zdrsňují plochu spoje, lepidlo se lépe dostane do spár a zlepší se vlastnost spoje. Jedná se o anorganické látky jako azbest nebo uhlíčitán vápenatý.

Změkčovadla zvláčňují a změkčují spoj. Spoj je následně více pružný, a ne tvrdý a křehký. Zlepší se odolnost vůči mechanickému namáhání, jako například ohyb, krut a další. Spoj má menší náchylnost k praskání a je více pevný. Změkčovadlo napomáhá k prodloužení času, kdy dojde k vytvrzení lepicí vrstvy. Příkladem změkčovadla je organický glycerin.

Urychlovače jsou sloučeniny, které se používají spolu s tvrdidly pro některá syntetická lepidla. Slouží k zrychlení probíhající chemické reakce ve směsi, ve spoji může dříve dojít k zatuhnutí. Používaný poměr je menší, než pro tvrdidla, a to 1:10 až 1:100 v poměru k základní lepicí směsi. Urychlovače se přidávají až po přidání tvrdidla. Jedná se o organická činidla.

Další přísady směsi (aditiva) se mohou přidat, pokud je potřeba zlepšit nebo upravit vlastnosti lepicí směsi. Tato aditiva nesmí ovlivnit základní vlastnosti lepidla, mohla by snížit pevnost lepeného spoje. Tyto přísady ovlivňují antistatické vlastnosti, tedy náboj statické elektřiny na povrchu tělesa, nebo mají vliv na hydrofobní vlastnosti povrchu. Také se mohou přidávat prvky, které ovlivní barvu nebo jas spoje a další vlastnosti. [18], [21]

2.2.6 Technologický postup lepení

Postup lepení se skládá v první řadě z přípravy povrchu, lepidla, jeho následného nanesení, montáže spoje, a nakonec vytvoření samotného lepeného spoje.

Příprava povrchu adherendu spočívá v tom, že se musí zvýšit smáčivost povrchu lepeného materiálu a tím zapříčinit vznik adhezních vazeb. Cílem je odstranění nečistot, nerovností a cizích vrstev. Pevnost lepeného spoje úměrně stoupá s rostoucí velikostí lepené plochy a jejích vazeb. Příprava povrchů je buď fyzikální nebo chemickou cestou.

Příprava lepidla většinou není potřeba, jelikož jsou lepidla již dodávána od výrobců pro přímé použití.

Podmínkou pro nanášení lepidla je souvislost vrstvy; lepidlo musí být rozprostřeno rovnoměrně, jinak nebude dosaženo požadované kvality spoje. Je nutné mít stálou tloušťku lepidla. Nanášení může být ruční (tuby, směšovače, štětce), pomocí přípravků (hojně v automobilovém průmyslu jsou to vytlačovací pistole či mechanické dávkovače) nebo strojní. Je možné taky využít možnosti tepelných procesů (žárové nástřiky, natavování).

Montáž lepeného spoje funguje tak, že každé lepidlo projeví svoji viskozitu a přilnavost k povrchu. Pro tuto část je důležitá montážní doba, během které má dojít k přiložení druhého polotovaru a jejich spojení, následného zafixování těles a působení tlaku, který zajistí přilnutí ploch. Tímto je dosažena požadovaná tloušťka lepidla a jeho zatečení do porů dílů. Vznikne

dokonalý spoj. Při příliš velkém tlaku může dojít k vytlačení lepidla z povrchů dílů, což znehodnotí spoj.

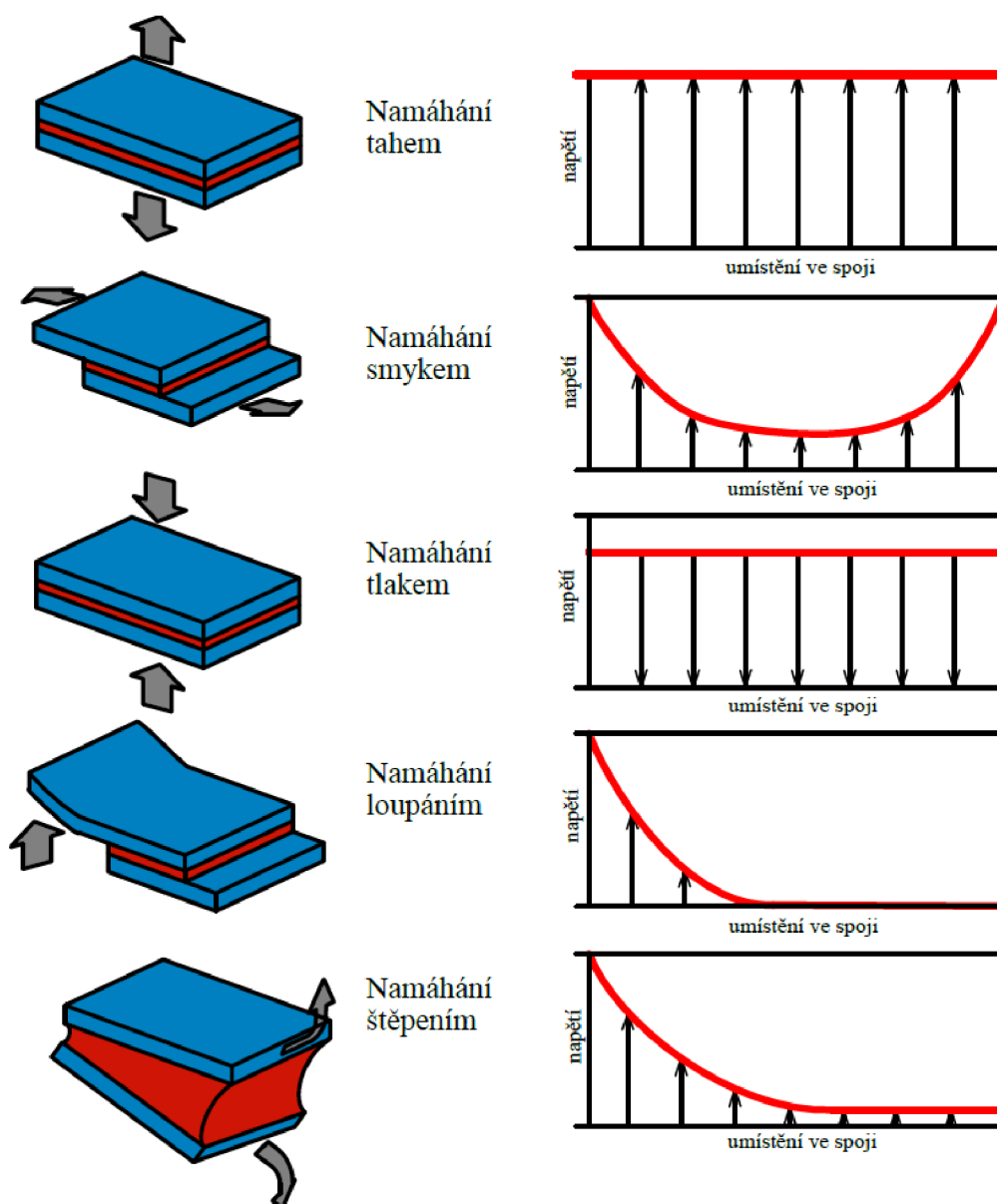
Působení teploty na lepidlo dojde k jeho vytvrzení a vytvoření pevného lepeného spoje. Za studena je to při teplotě 15 až 25 °C, za zvýšených teplot nad 25 °C a lepení za tepla probíhá od teplot 100 °C. [20], [21]

2.2.7 Běžné druhy namáhání lepených spojů

Existuje několik běžných druhů namáhání. Pochopení druhů namáhání na danou sestavu lepených dílů je velice důležité, jelikož na něm záleží konstrukce lepeného spoje. Volba lepeného spoje je nejideálnější pro dvojrozměrné namáhání, protože je rozptýleno po celé ploše spoje. Pokud je namáhání na spoj jednorozměrné, soustředí se namáhání na přední hranu linie spoje a spoj nefunguje ideálně. Převažuje namáhání jednorozměrné a je nutné volit vhodnou konstrukční úpravu spoje. Běžné způsoby namáhání jsou tyto:

- Namáhání tahem (obr. 11) – tah působí rovnoměrně na celou plochu spoje. Má přímý směr, působí mimo lepený spoj, jeho síla je rozložena po celé ploše.
- Namáhání smykem (obr. 11) – namáhání, kde se jedná o tah napříč lepeným spojem. Síla je vyvíjena na plochy a jsou nuceny po sobě smýkat. Síla je také v rovině a rozložena po celé ploše lepeného spoje.
- Namáhání tlakem (obr. 11) – podobné jako namáhání tahem, kdy kompresní síla působí na celý lepený spoj rovnoměrně, přímo a v rovině. Rozdíl je v tom, že síla působí přímo ve směru na lepidlo a je rozložena v celé části.
- Namáhání loupáním (obr. 11) – namáhání působí pouze na jedné hraně lepeného spoje. Namáhání je nejvíce soustředěno na přední hranu. Dochází k páčení, a to je způsobeno tím, že součást, na které působí namáhání, je pružná.
- Namáhání štěpením (obr. 11) – tahové namáhání je soustředěné jako u loupání na jednu hranu spoje. I zde dochází k páčení. Teoreticky na jedné hraně působí namáhání a na druhé je nulové.

Pokud je spoj dobře navržen, dochází nejvíce k tahovému, tlakovému nebo smykovému namáhání. Tímto se lze vyhnout namáhání na jedné hraně (jednorozměrnému) a bude se jednat o rovnoměrné namáhání na celou plochu. V případě jednorozměrného namáhání je větší pravděpodobnost poruchy lepeného spoje. Obecně platí, že spoje jsou nejméně odolné proti odlupování a ohybovému namáhání. Naopak vysokých pevností dosahují v případě smykového, tahového, popřípadě tlakového a dynamického namáhání. [15], [25]



Obr. 11 Běžné druhy namáhání lepených spojů [21].

2.2.8 Poruchy lepených spojů

Technologie lepení má mnoho výhod oproti jiným technologiím spojování materiálů. Ovšem má také nevýhody. Těm se dá z části vyhnout dodržím důkladného postupu lepení. To znamená dodržet dokumentaci, návody a jiné instrukce doporučené výrobcem. Příčiny, kvůli kterým může dojít k poškození spoje, jsou například tyto:

- nedostatečné přilnutí lepidla,
- nedostatečné vytvrzení lepidla při schnutí,
- nedodržení doporučené tloušťky vrstvy lepidla,
- nedodržení technologického postupu lepení.

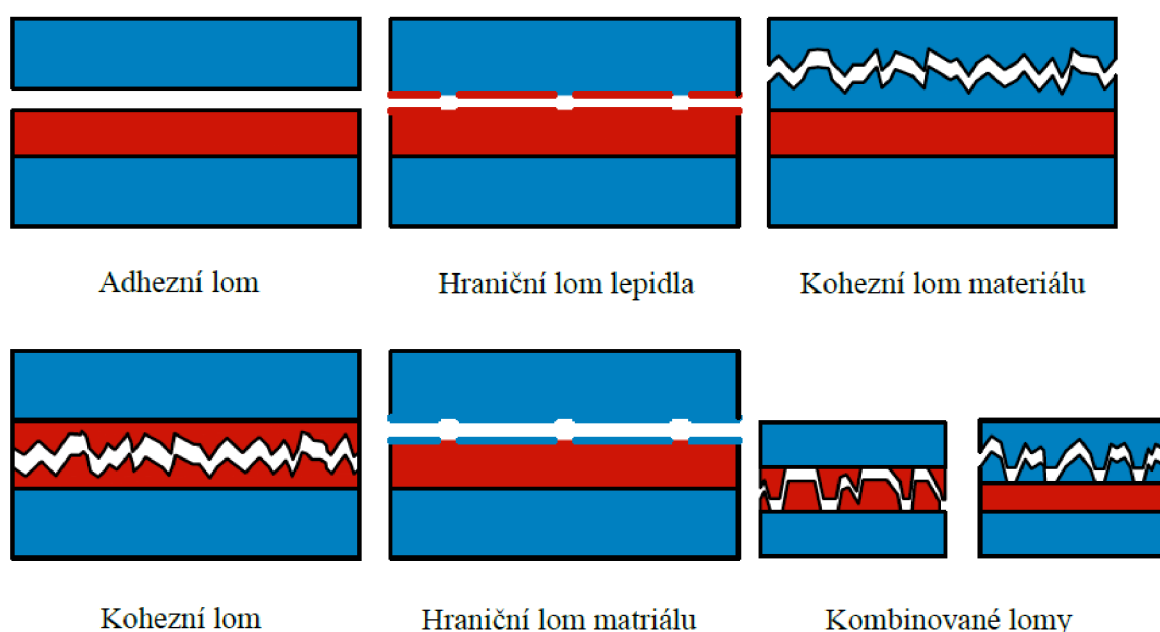
Existují dva základní typy poškození. Tato poškození jsou v různých kombinacích a v jiných místech lepeného spoje nebo materiálu, viz obr. 12.

Adhezní lom je typ poškození, které se dá poznat tak, že na lomové ploše zůstala zbývající vrstva lepidla nebo že lepidlo nepřilnulo k přilepovanému materiálu a bylo kompletně

odděleno. Jedná se o adhezní lom a hraniční lom lepidla. Jde o silnou kohezi a slabou adhezi lepidla.

Kohezní lom je křehký nebo houževnatý lom. Lom vzniká se vzrůstající rychlostí zatěžovací síly. Vyšší pravděpodobnost ke křehkému lomu nastává při nižších teplotách. Houževnatý lom je závislý na tvaru lepených plastových dílů. Ke koheznímu lomu může dojít poškozením jak v materiálu, tedy kohezní lom, tak v samotném lepidle, tedy hraniční lom materiálu. U tohoto poškození jde o silnou adhezi a slabou kohezi lepidla.

V některých případech může dojít ke kombinovaným lomům. Projevují se odtržením jak na hraně lepidla a materiálu, tedy koheznímu poškození, tak v samotném lepidle, tedy adheznímu poškození. V druhém případě se jedná o poškození v samotném materiálu, kde dojde ke koheznímu lomu a zároveň na hraně lepidla a materiálu dojde k odtržení z důvodu špatné adheze. [25]



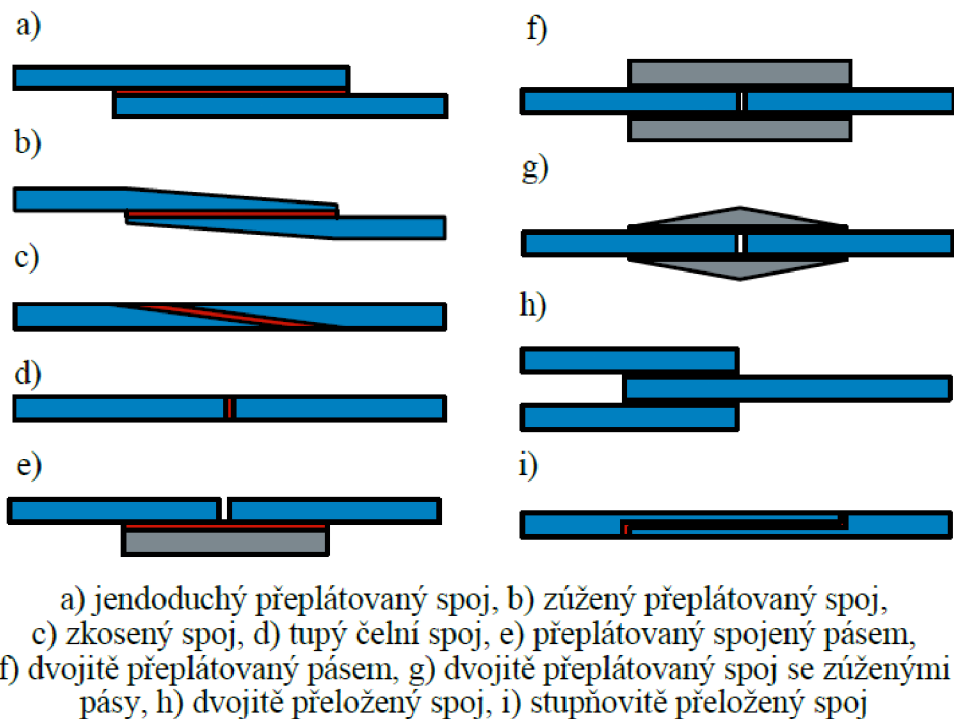
Obr. 12 Běžné poruchy lepených spojů [27].

2.2.9 Konstrukce lepených spojů

Existuje mnoho způsobů, jak daný spoj vytvořit. Vždy záleží na předpokládaném způsobu namáhání a použití. Některé spoje vyžadují speciální konstrukční úpravy. Jejich použití je omezené, protože zabírají více místa a spoj se poté nemusí vejít do zamýšlené zástavby, například dvojitě vyztužený. U jiných spojů je nutná konstrukční úprava. Pokud je díl vyrobený na 3D tiskárně, lze spoj navrhnout již při modelování v programu. To značně zjednoduší situaci a uspoří výrobní čas.

Nejběžnějším a nejjednodušším spojením je spoj tupý. Jedná se o spoj, kdy obě strany výrobku jsou rovné a spoj se následně slepí (obr. 13 a). Tento spoj není pro použití v lepení ideální, protože v tahu nemá dostatečnou pevnost. Jelikož je spoj nejodolnější ve smykovém namáhání, je vhodné použití například přeplátovaného spoje (obr. 13 b). Nevýhoda tohoto spoje je konstrukční. Lepené díly jsou vyoseny, což může při použití být nevhodné. Vhodným typem je například dvojitě přeplátovaný spoj spojený pásem (obr. 13 f) nebo dvojitě přeplátovaný se zúženými pásy (obr. 13 g). U těchto typů spojů je nevýhodou nutnost použití dalšího materiálu. Tento spoj má omezené možnosti využití například tam, kde není mnoho prostoru. Vhodným typem na namáhání je zkosený spoj (obr. 13 c), kdy jsou zešikmeny strany

polotovarů. V tomto případě se namáhání rozkládá do více směrů a je více odolné. Ideálním spojem je spoj stupňovitě přeložený, kdy je slepené velké množství ploch a zároveň je síla rozložená do více směrů. [20]



Obr. 13 Druhy lepených spojů [20].

2.2.10 Vhodné namáhání lepených spojů

Příklad vhodného konstrukčního řešení spojů lze vidět na obr. 14. Jedná se o optimalizaci namáhání spojů a zvolení, pokud je to možné, vhodnější konstrukce.

U přeplátovaného spoje, který je velmi častý, nemusí být vždy nejpevnější. U tohoto druhu spojení je namáhání obvykle ve smyku. Tím, že smyk při této konstrukci působí i mimo rovinu, čímž se protahuje, začne se měnit na štěpení. Tomu se dá zamezit například stupňovitě přeplátovaným spojem nebo tupým spojem s rovným čelem s vystužením. Popřípadě také zešíkmením (obr. 14 a).

Podobně zásady existují i pro rohové spoje. V případě spoje kolmého tupého, který není pro lepení vhodný, je hlavním namáháním štěpení. Tomuto lze zamezit například přidáním další součásti k zesílení původní konstrukce. Dojde k rozložení zatížení ze štěpení na částečně smykové. Nevýhoda tohoto spojení je ta, že je potřeba další kus materiálu pro zesílení a pravděpodobně dvoukrokový proces lepení (obr 14 d,e).

Další možnost je využití pouze dvou materiálů a přeložit je, kdy dojde ke stejnému rozložení síly. Ovšem zde se mění hlavně na tlakové namáhání, které je pro lepené spoje vhodné. Tento spoj nevyžaduje žádný další materiál ani delší proces lepení (obr 14 b). [25], [28]

Špatně	Dobře

Obr. 14 Ukázka vhodně zvolené konstrukce lepeného spoje [28].

2.3 Zkoušení materiálů

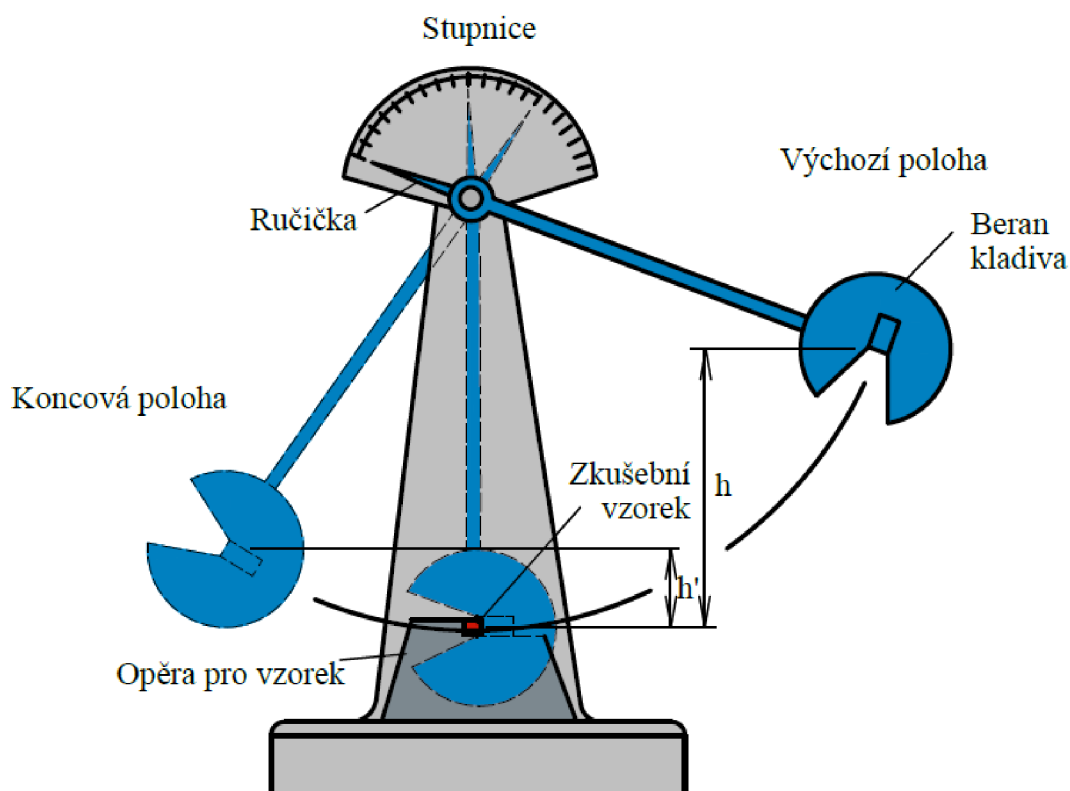
Zkoušení materiálů se v zásadě dělí na statické, dynamické a únavové. Statické fungují na principu zvětšování zatěžující síly. Při krátkodobých se jedná o minuty, při dlouhodobých i dny. Příkladem statické zkoušky je zkouška tahem. Dynamické jsou zkoušky takové, kdy zatěžující síla prudce vzroste nebo opakovaně mění. Při tomto namáhání dochází k poškození materiálu. Příkladem této zkoušky je zkouška rázem v ohybu pomocí Charpyho kladiva. [29], [30]

2.3.1 Zkouška rázem

Technologie zkoušeného materiálu slouží k zjištění, kolik energie nebo práce je spotřebováno na porušení definované zkušební tyče. Zkouška probíhá tak, že se na jeden ráz použije dostatečné množství energie. Zkoušení více rázy není tak obvyklé a v tomto případě se energie jednotlivých rázů sčítá. Rázem lze zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu i krutu.

Pro tuto zkoušku se využívá Charpyho kyvadlové kladivo (obr. 15). Jedná se o nejpoužívanější metodu zkoušení v rázu. Je schopno ukázat houževnatost a křehkost materiálu.

Zkouška vrubové houževnatosti probíhá dle ČSN 42 0381. Existuje ještě druhý typ zkoušky metodou IZOD. Zde je upnutá polovina vzorku a druhá se vahou kyvadla urazí.



Obr. 15 Charpyho kyvadlové kladivo [29].

Průběh zkoušky probíhá následovně. Kladivo vysoké hmotnosti se zdvihne otočením kolem osy a upevní v horní, počáteční, poloze. Následně se ve spodní poloze umístí zkoušený vzorek s V nebo U vrubem ve střední části. Poté se uvolní z horní polohy kladivo, které se pohybuje po kruhové dráze. V dolní poloze nárazem přerazí zkušební tyč a vykývne se do koncové polohy. Poloha konečná je nižší než poloha počáteční z důvodu spotřebování určité práce. Jedná se o spotřebovanou nárazovou práci KU nebo KV. Z tohoto vyplývá, že měřítkem odolnosti materiálu proti namáhání rázem je nárazová práce a zjišťuje se sklon ke křehkému lomu. [29], [30], [31]

Pro tuto práci platí vztah [32]:

$$KU = G \cdot (h_1 - h_2) \text{ [J]} \quad (2.3)$$

kde: KU [J] - spotřebovaná nárazová práce

G [N] - tíha kladiva

l [m] - výškový rozdíl počáteční a koncové polohy kladiva

Typy průřezu a výpočet nárazové práce:

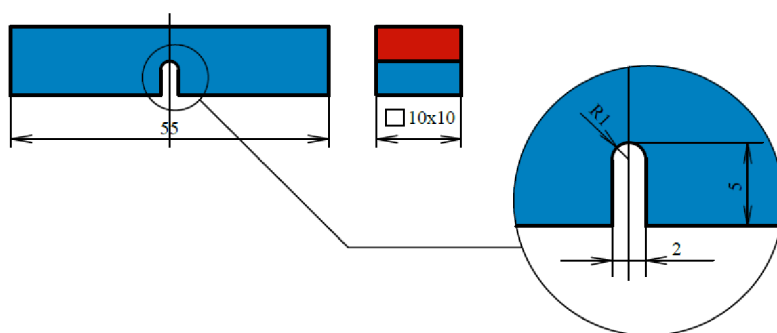
Používají se dva typy vrubů, a to tvaru U a tvaru V, viz obr. 16 a obr. 17. Jedná se o podíl spotřebované nárazové práce KCU a původního průřezu S_0 . Tento poměr se nazývá vrubová houževnatost KC.

Vztah pro vrub tvaru U [32]:

$$KCU = \frac{KU}{S_0} \text{ [J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (2.4)$$

kde: KCU [J·cm⁻²] - vrubová houževnatost U vrubu

S_0 [cm⁻²] - průřez nárazové plochy

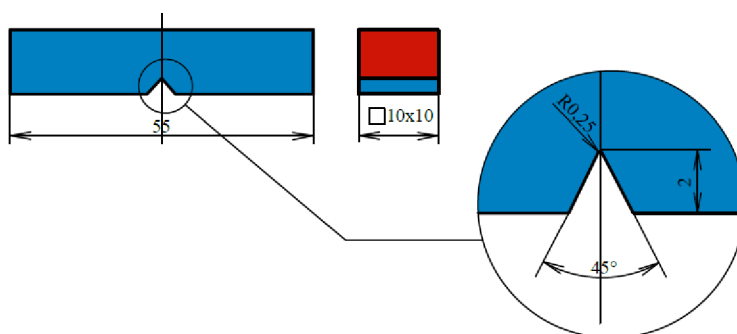


Obr. 16 Parametry zkušební tyčinky s U vrubem [32].

Vztah pro vrub tvaru V:

$$KCV = \frac{KU}{S_0} [J \cdot cm^{-2}] \quad (2.4)$$

kde: KCV [J·cm⁻²] - vrubová houževnatost V vrubu



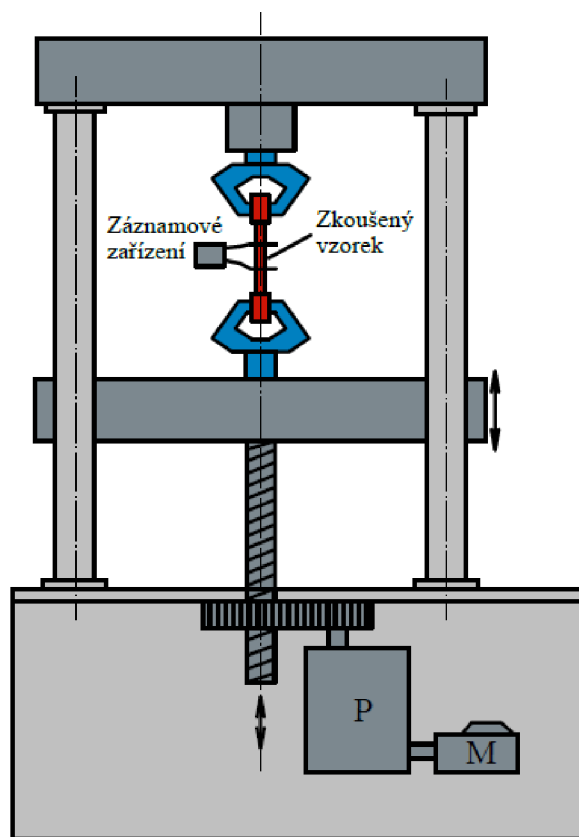
Obr. 17 Parametry zkušební tyčinky s V vrubem [32].

2.3.2 Zkouška tahem

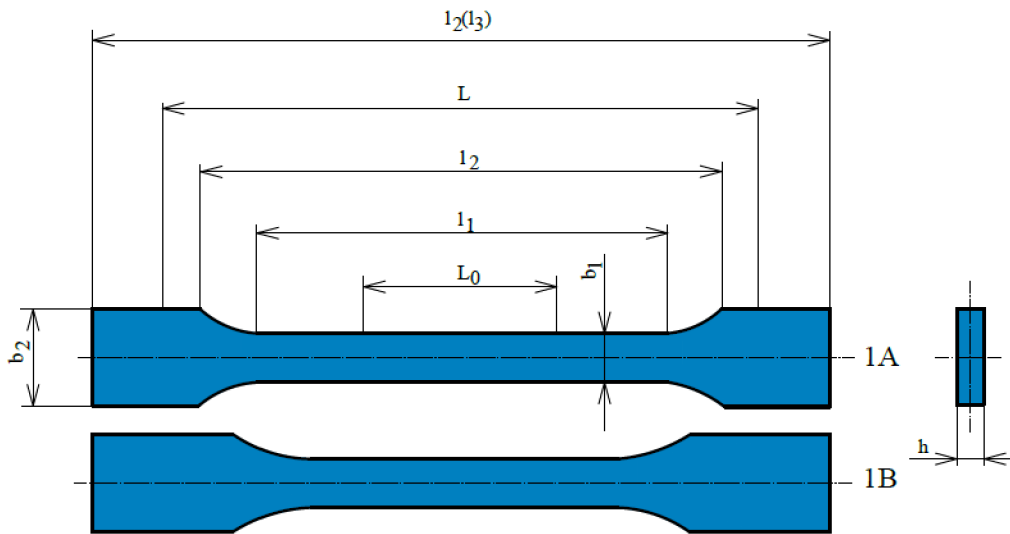
Tahová zkouška tvářených plastů dle ISO 527-2 je založena na principech z ISO 527-1, Jedná se o běžně používanou metodu zkoušení. Ve chvíli průběhu měření až do bodu zlomu lze zjistit mechanické vlastnosti materiálu. Díky těmto datům se zvyšuje možnost navrhnout ideální materiál a konstrukční řešení.

Vzorky pro tahovou zkoušku jsou buď kruhového nebo obdélníkového průřezu. V případě zkoušení plastů se využívají ty s obdélníkovým průřezem. Uvádí se použití vzorku tvaru oboustranných lopatek. Tento vzorek je umístěn mezi čelisti univerzálního trhacího stroje. Poté je stroj spuštěn a nárůstem tahové síly dosaženo bodu zlomu, kdy dojde k přetržení vzorku. Rychlost tahu předepisuje norma ISO 527. Pro vyhodnocení a naměření modulu pružnosti se obecně používá 1 % měřené délky za minutu. Tímto lze vyhodnotit například poměrné prodloužení, modul pružnosti v tahu nebo v případě lepeného spoje kvalitu spoje. Průběh zkoušky zobrazuje diagram znázorňující závislost napětí na poměrném prodloužení nebo síly na prodloužení. Měření lze provádět v nasimulovaném prostředí, například v komorách s různými teplotami. V případě polymerů jsou tyto zkoušky důležité. Materiál mění svoje vlastnosti v závislosti na teplotě. Simulované prostředí zkoušky má odpovídat pracovnímu prostředí spoje. Na obr. 18 lze vidět univerzální trhací stroj. [X10]

Typů vzorků existuje několik druhů a záleží na použití, viz obr. 19. Například vzorky typu 1A se běžně používají pro vstřikované nebo lisované výrobky, kdežto vzorky 1B pro výrobky zpracované obráběním. Důležitým faktorem je zvolení poměru délky a průřezu vzorku. [32], [33], [34]



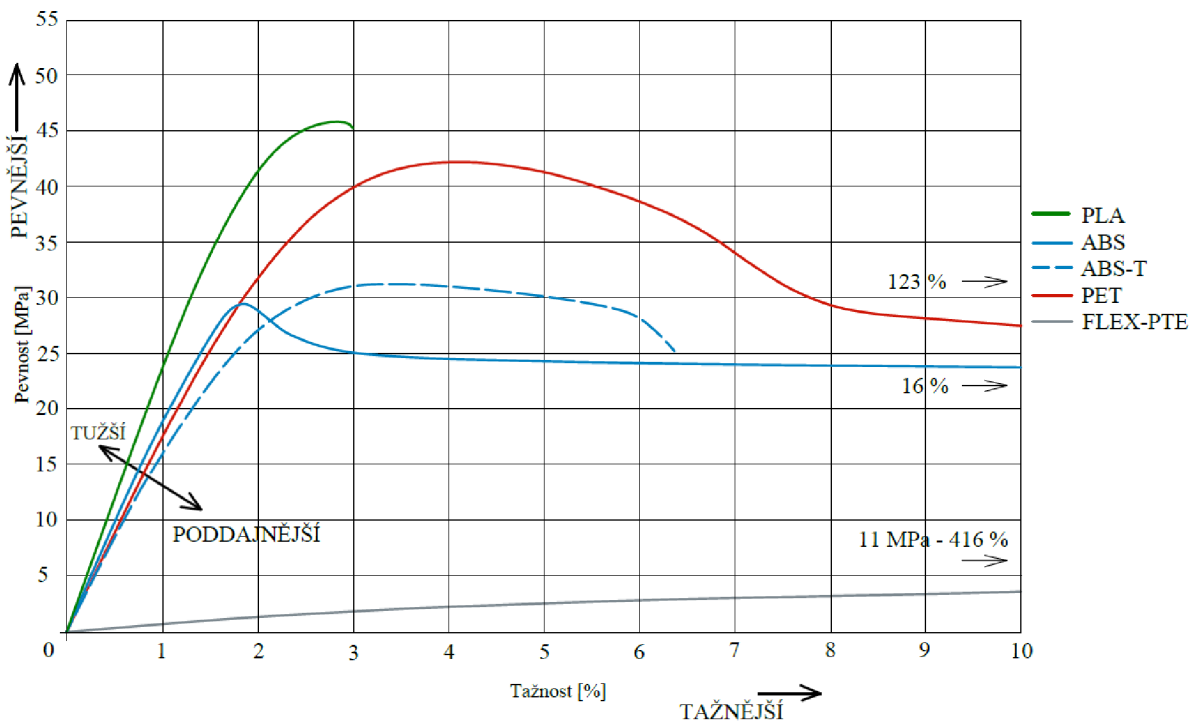
Obr. 18 Univerzální trhací stroj [31].



Obr. 19 Možné varianty vzorků pro tah pro polymery [33].

Za vyhodnocení procesu tahové zkoušky se považuje tahový diagram.

Na obr. 20 lze vidět závislost pevnosti a tažnosti pro vybrané typy materiálů. Z diagramu lze vidět, že nejvyšší pevnosti dosahuje PLA, ale má nízkou tažnost. Oproti tomu PET má příznivější vlastnosti. Má jak vysokou pevnost, tak vysokou tažnost. Materiál FLEX-PTE má oproti ostatním materiálům velmi vysokou tažnost, ovšem pouze při nízkém tahovém zatížení. Lze taky vidět, že ABS-T má vyšší pevnost než ABS, ale na úkor nižší tažnosti. [32], [33], [34]



Obr. 20 Tahová zkouška pro materiály z 3D tisku [36].

3 NÁVRH VÝROBY

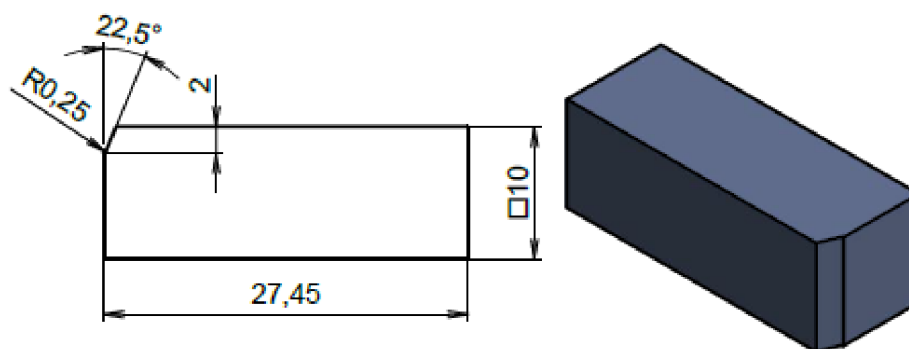
Veškeré vzorky byly vytištěny na tiskárně ENDER 3 PRO z černého ABS od firmy Gembird. Vzorky měly technologickou úpravu v podobě zkosení pro eliminaci napětí v rozích. Následně byly očištěny od podpěr a límce na odvádění tepla. Tisknuty byly na ležato z důvodu, že kdyby byly tisknuty nastojato, budou mít vrstvy se tendencí odloupat a experiment by byl znehodnocen. Výplň vzorků byla v podobě mřížky a výška vrstvy 0,28 mm a vyplň 20 %. Celý tisk probíhal v uzavřené komoře z důvodu kvalitního výhřevu prostředí. Pokud vyčnívaly rohy, byly zbroušeny. Povrch byl lehce očištěn a zdrsňen smirkovým papírem, odmaštěn technickým lihem.

Poté došlo na samotný proces lepení. Pro lepení byla vybrána čtyři lepidla. Prvním je polyuretanové lepidlo BISON Power Adhesive, druhé a třetí epoxidové BISON Epoxy Universal a PATTEX Repair Epoxy 5 min. a poslední směs acetonu s rozpuštěným ABS. Veškeré lepení bylo provedeno ve vytvořeném univerzálním přípravku pro všechny typy vzorků.

Po dostatečném zaschnutí a vytvrzení lepidla došlo na očištění ploch od přebytečného lepidla, aby nebyly zkresleny výsledky. Poté došlo na trhacím stroji ZD 10/90 100 kN a Charpyho kladivu od firmy WPM ke zkouškám. Hodnoty z obou zkušebních zařízení byly následně vyhodnoceny.

3.1 Návrh vzorků pro tisk

Vzorek pro tahovou zkoušku byl navržen v souladu s normou ČSN 42 0381, viz obr. 21. Byl rozdělen na dvě poloviny a zkrácen o 0,1 mm pro prostor na lepidlo. Testování odolnosti lepidel na vrubovou houževnatost proběhlo na Charpyho kladivu.



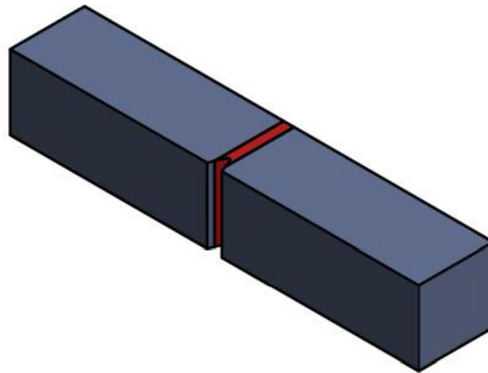
Obr. 21 Vzorek pro zkoušku rázem s V vrubem.

Navrhnut byl tedy tak, že je rozdělen na dvě poloviny přesně v části, kde je rádius s V vrubem. Tímto bude docíleno, že hlava kladiva udeří přesně na lepený spoj. Vzorek má celkové rozměry 55x10x10 mm. Na obr. 22 je vzhled vzorku po slepení.

Výpočet plochy lze provést vztahem:

$$S_{ch} = a_{ch} \cdot b_{ch} = 8 \cdot 10 = 80 \text{ mm}^2 \quad (3.1)$$

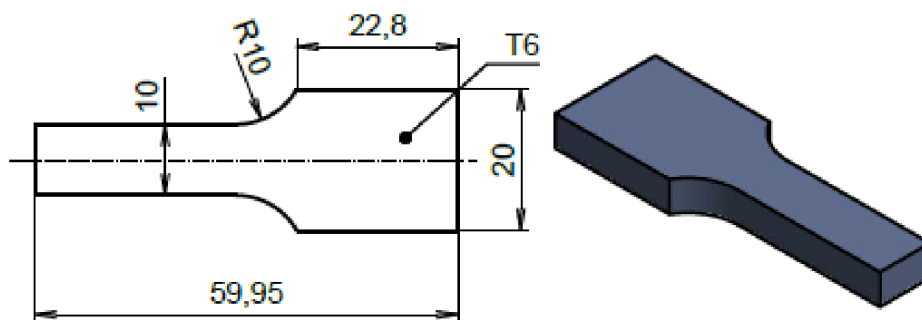
kde: S_{ch} [mm²] - lepená plocha vzorku pro rázovou zkoušku
 a_{ch} [mm] - šířka zkušebního vzorku pro rázovou zkoušku
 b_{ch} [mm] - výška zkušebního vzorku pro rázovou zkoušku



Obr. 22 Vzorek s V vrubem po slepení.

Dalším typem vzorků jsou vzorky pro tahovou zkoušku. Vzorky byly testovány na trhacím stroji. Na každém byla vytvořena nepatrná drážka po 57 mm z důvodu možnosti zhodnocení prodloužení vzorků v případě, že lepidlo mělo dostatečnou pevnost.

První typy vzorků mají rovná čela (obr. 23), která jsou sice nevhodná na dané namáhání, ale pro porovnání s ostatními typy ideální. Celková délka vzorku je 120 mm. Na obr. 25 lze vidět výsledný vzhled lepeného vzorku. Na obr. 24 je vzhled vzorku po slepení.

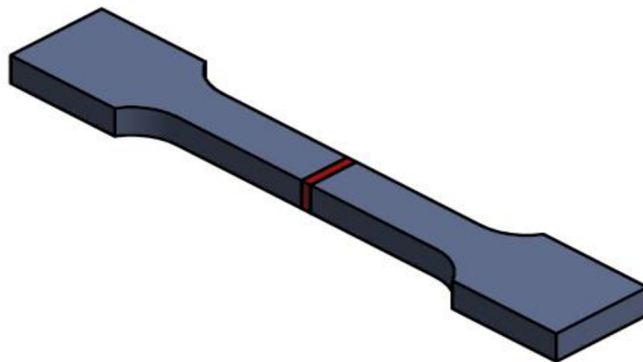


Obr. 23 Vzorek pro zkoušku tahem tupým čelním spojem.

Výpočet plochy lze provést vztahem:

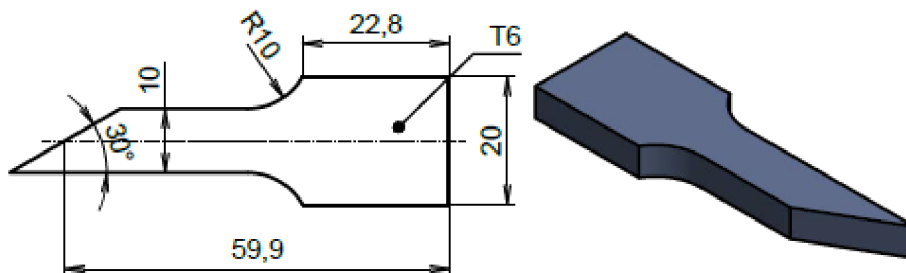
$$S_r = a_r \cdot b_v = 10 \cdot 6 = 60 \text{ mm}^2$$

- kde: S_r [mm²] - lepená plocha vzorku pro spoj s tupým čelním spojem
 a_r [mm] - šířka zkušebního vzorku pro spoj s tupým čelním spojem
 b_v [mm] - výška zkušebního vzorku



Obr. 24 Vzorek s tupým čelním spojem po slepení.

Další vzorky mají zešikmené čelo pod úhlem 30° (obr. 25). Prosté tahové namáhání přechází do smykového. Na obr. 26 je vzhled vzorku po slepení.



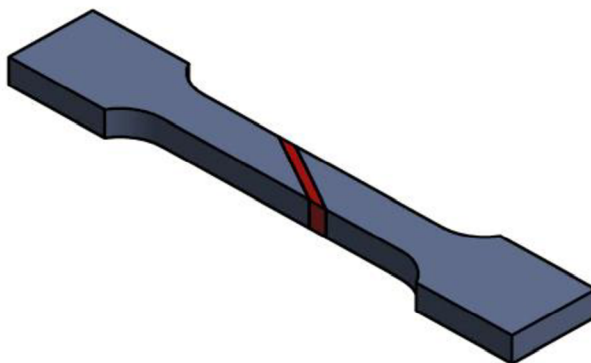
Obr. 25 Vzorek pro zkoušku tahem se zkoseným čelem.

Plocha pro lepení byla navržena tak, aby se jednalo o dvojnásobek plochy spoje s rovným čelem.

Výpočet plochy lze provést vztahem:

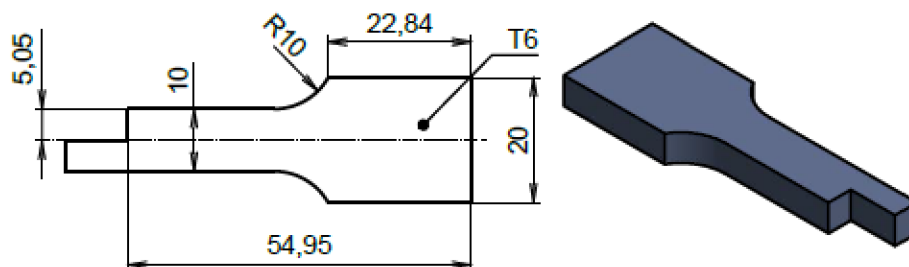
$$S_s = a_s \cdot b_v = 20 \cdot 6 = 120 \text{ mm}^2$$

kde: S_z [mm²] - lepená plocha vzorku pro spoj se zkoseným čelem
 a_z [mm] - šířka zkušební vzorku pro spoj se zkoseným čelem



Obr. 26 Vzorek se zkoseným čelem po slepení.

Posledním typem vzorků pro tah je konstrukce se stupňovitě přeloženým čelem (obr. 27). Zde dochází ke kombinaci namáhání tahem a smykem. Na obr 28 lze vidět vzhled vzorku po slepení.



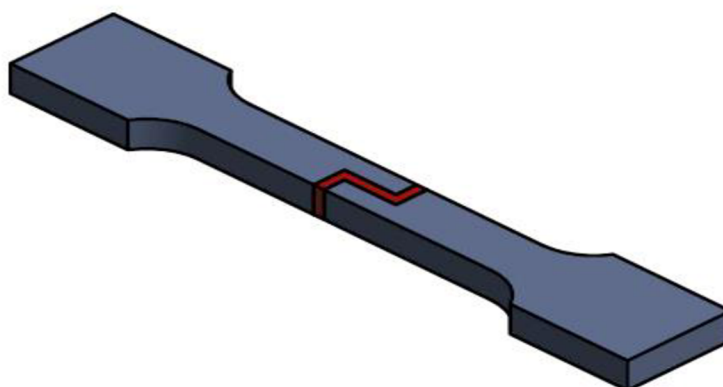
Obr. 27 Vzorek pro zkoušku tahem se stupňovitě přeloženým čelem.

Zvolená plocha lepeného spoje je shodná s plochou lepidla na spoji šikmém, a to z důvodu snadného porovnání.

Výpočet plochy lze provést vztahem:

$$S_p = a_{p1} \cdot b_v + a_{p2} \cdot b_v + a_{p3} \cdot b_v = 5,05 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 4,95 \cdot 6 = 120 \text{ mm}^2$$

kde: S_p [mm²] - lepená plocha vzorku pro spoj se stupňovitě překládaným čelem
 a_p [mm] - šířka zkušební vzorku pro spoj se stupňovitě překládaným čelem



Obr. 28 Vzorek se stupňovitě přeloženým čelem po slepení.

3.2 Použitá lepidla

Výběr lepidel spočíval na základě prostudování vhodnosti pro daný materiál. Vybrány byly tři typy dvousložkových lepidel, a to jedno na polyuretanové a dvě na pryskyřicové bázi. Nakonec pro porovnání byla vybrána směs acetonu s ABS.

3.2.1 BISON Bisonite Power Adhesive

Jedná se o dvousložkové polyuretanové lepidlo. Výrobce udává vysokou pevnost dosahující až 180 kg·cm². Je vhodné k lepení jak syntetických materiálů jako jsou plasty, tak i ocelových. Lepicí směs se skládá z pryskyřice a tvrdidla. Nutné je odmastit před samotným lepením povrch lepených vzorků. Následně namíchat poměr 1:5 tvrdidla ku pryskyřici a důkladně promíchat. Po nanesení na povrch má dojít ke stlačení materiálů a 48 hodin nechat vytvrdit. Výhoda tohoto lepidla je vysoká pevnost a poměrně dlouhá zpracovatelnost. Ovšem toto je i nevýhoda, protože během této doby musí působit zatěžující síla a nemůže se manipulovat s výrobky.

Další nevýhodou je výrobcem doporučená nutnost ochranných pomůcek jako rukavice, čímž se může zhoršit manipulovatelnost s výrobky. Toto lepidlo bylo vybráno z důvodu, že je na polyuretanové bázi, tudíž je odlišné než ostatní. Má také jiný poměr míchání než epoxidová lepidla. [36]

3.2.2 BISON Epoxy Universal

Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo na bázi pryskyřice. Vhodné na kovy, keramiku a většinu druhů plastů, ovšem s výjimkou PP a PE. Postup lepení probíhá nejprve v očištění obou povrchů a jejich odmaštění a následného slepení ploch. Směs je v poměru obou složek 1:1. Pomocí směšovače dojde ke smíchání obou složek v homogenní lepící hmotu. Možné je též použít na míchání misku. Nevýhoda je poměrně dlouhé schnutí, kdy musí být zajištěna vzájemná poloha po dobu 7 hodin. Výhoda je poměrně dlouhá doba zpracovatelnosti lepidla, která je 1,5 hodin. Následné vytvrzení proběhne po 24 hodinách. [36]

3.2.3 PATTEX Repair Epoxy 5 min.

Jedná se o dvousložkové lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice. Udávaná pevnost výrobcem je $130 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$. Vhodné k lepení dřeva, kovů a většiny plastů, až na výjimky jako jsou PP, PE. Je nutné, aby oba povrchy byly před lepením odmaštěné. Jedná se o směs v poměru 1:1. Díky dávkovači a mechanickému směšovači dojde k důkladnému promíchání směsi. Schnutí lepidla je poměrně krátké a možnost manipulace není tak dlouhá. Odstranění přebytečného lepidla je potřeba ihned. Možnost manipulace s výrobky je po 5 minutách, namáhání po 6 hodinách a konečné pevnosti dosáhne po 24 hodinách. [37]

3.2.4 Aceton+ABS

Jedná se o směs acetonu a ABS filamentu. Namíchání směsi probíhá v poměru 50 ml acetonu na 33 cm nastříhaného ABS filamentu. Tyto složky se vloží nejlépe do plechové nádoby, která se uzavře a protřepe, dokud se filament nerozpustí. Následně se tato namíchaná směs natře na oba díly a postupně se přitlakem spojí. Tím, že se rozpustí oba povrchy dochází k chemické reakci, naleptání povrchů a následným přitlakem dojde ke spojení. Výhoda tohoto způsobu je, že materiál není potřeba očistit a jedná se o spoj homogenní, jelikož vytváří jednotný povrch s lepeným (spojovaným) materiálem. K lepení ABS je více než vhodné, jelikož v ideálním případě není poznat, že se jedná o spoj a v materiálu se ztratí. [38], [39]

3.3 Označení vzorků

Bylo nutné označit vzorky. První číslo značí typ vzorku, tedy tupý čelní spoj má 1, zkosený spoj 2, stupňovitě přeložený spoj má 3 a tyčinka s V vrubem 4. Lepidlo BISON Power Adhesive má označení A, Bison Epoxy Universal B, PATTEX Repair Epoxy 5 min. má C a směs ABS rozpuštěného v acetonu má D. Poslední číslo označuje pořadí vzorku v dané skupině.

3.3.1 Označení vzorků pro lepidlo A

První lepidlo BISON Power Adhesive má označení v tab. 2.

Tab. 2 Označení vzorků pro BISON Power Adhesive

Lepidlo A – BISON Power Adhesive					
Druh a číslo vzorku	1	2	3	4	5
Tupý čelní spoj	1A1	1A2	1A3	1A4	1A5
Zkosený spoj	2A1	2A2	2A3	2A4	2A5
Stupňovitě přeložený spoj	3A1	3A2	3A3	3A4	3A5
Tyčinka s V vrubem	4A1	4A2	4A3	4A4	4A5

Druhé lepidlo BISON Epoxy Universal má označení v tab. 3.

Tab. 3 Označení vzorků pro BISON Epoxy Universal

Lepidlo B – BISON Epoxy Universal					
Druh a číslo vzorku	1	2	3	4	5
Tupý čelní spoj	1B1	1B2	1B3	1B4	1B5
Zkosený spoj	2B1	2B2	2B3	2B4	2B5
Stupňovitě přeložený spoj	3B1	3B2	3B3	3B4	3B5
Tyčinka s V vrubem	4B1	4B2	4B3	4B4	4B5

Třetí lepidlo PATTEX Repair Epoxy 5 min. má označení v tab. 4.

Tab. 4 Označení vzorků pro PATTEX Repair Epoxy 5 min.

Lepidlo C – PATTEX Repair Epoxy 5 min.					
Druh a číslo vzorku	1	2	3	4	5
Tupý čelní spoj	1C1	1C2	1C3	1C4	1C5
Zkosený spoj	2C1	2C2	2C3	2C4	2C5
Stupňovitě přeložený spoj	3C1	3C2	3C3	3C4	3C5
Tyčinka s V vrubem	4C1	4C2	4C3	4C4	4C5

Čtvrté lepidlo směs acetonu s ABS má označení v tab. 5.

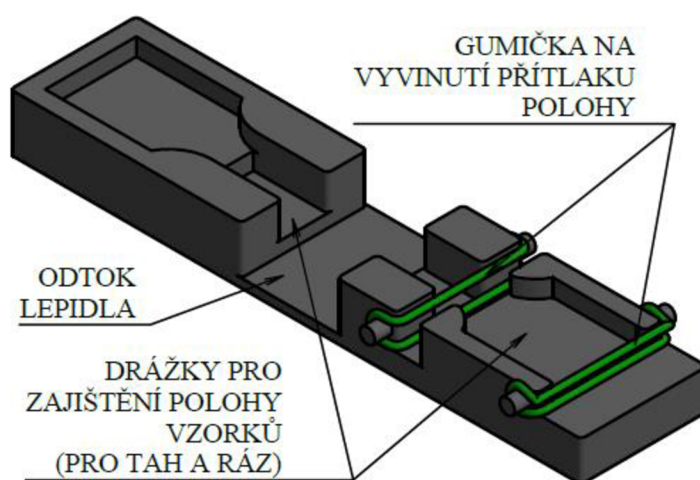
Tab. 5 Označení vzorků pro aceton s ABS.

Lepidlo D – Aceton+ABS					
Druh a číslo vzorku	1	2	3	4	5
Druh a číslo vzorku	1D1	1D2	1D3	1D4	1D5
Tupý čelní spoj	2D1	2D2	2D3	2D4	2D5
Zkosený spoj	3D1	3D2	3D3	3D4	3D5
Stupňovitě přeložený spoj	4D1	4D2	4D3	4D4	4D5

3.4 Přípravek

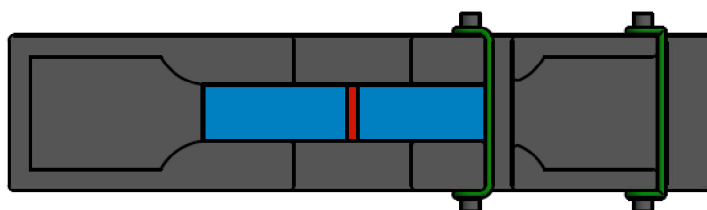
Pro zajištění souběžnosti stran vzorku a dostatečného a v čase stálého spoje s eliminací manipulace, je vhodné navrhnout a vyrobit přípravek. Vzhledem k možnosti využití 3D technologie se bude tisknout. Materiál byl zvolen z PET-G. Tento materiál je pružný, méně křehký a teplotně odolnější než například PLA. Snadno tiskne a nepodléhá tepelnému smrštění, tudíž při tisku nepotřebuje komoru. Také se snadno brousí. Tyto výhody ho předurčují pro tento přípravek, protože budou zaručeny správné a přesné rozměry otvorů pro zajištění vzorků.

Přípravek je vytisknutý z jednoho kusu, uprostřed se nachází mezera na odtok lepidla, aby se materiály nepřilepily k přípravku. Tato mezera je dostatečně široká i hluboká pro všechny typy lepených konstrukcí. Zřetel byl brán speciálně na zkosenou a stupňovitě přeloženou hranu, která dosahuje větších délek. Dále se na bocích nacházejí očka pro uchycení gumičky na přitlak. Není potřeba, aby byl přitlak příliš veliký, má zajistit pouze správnou polohu, viz obr. 29.



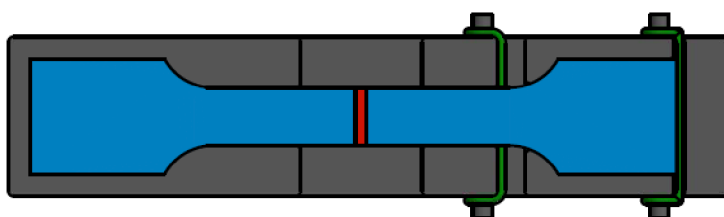
Obr. 29 Přípravek pro lepení.

Přípravek obsahuje drážku pro zajištění polohy vzorku pro rázovou zkoušku (obr. 30). Jedna polovina vzorku se vloží do nepohyblivé části. Následně na druhou polovinu se nanese lepidlo, vloží se do přípravku a poté se pomocí drážek zajistí poloha. Gumička způsobí lehké vzájemné přitlačení vzorků. Po zaschnutí lepidla se vzorek z přípravku vyjme a očistí se povrch.



Obr. 30 Usazení dílů pro rázovou zkoušku.

Pro vzorek na tahovou zkoušku je postup obdobný, tedy vloží se jedna část do nepohyblivé oblasti, na druhou polovinu se nanese lepidlo a vloží do druhé části. Gumičkou se přitlačí doraz a po požadované době vyjme vzorek. V přípravku jsou též pro tuto operaci určené drážky (obr.31).



Obr. 31 Usazení dílů pro tahovou zkoušku.

3.5 Volba zkušebních strojů

Aby bylo možné provést zkoušky, bylo nutné zvolit vhodné zkušební stroje s dostatečnými parametry.

3.5.1 Volba stroje pro tahovou zkoušku

Volba stroje pro tahovou zkoušku proběhla na základě závislosti na maximální zatěžovací síle tak, aby součást mohla být přetržena. Na základě tabulkových hodnot odolnosti ABS plastů je tento stroj vyhovující. ABS materiál má mez v tahu 42 MPa [40], ale to platí pro tvářený. Tištěný má předpoklad v nižší pevnosti. Stroj dokáže vyvinout sílu až 100 kN. Jedná se o elektromechanický trhací zkušební stroj určený pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku. Tento stroj je určen pro širokou škálu materiálů v závislosti na volbě upínacích čelistí. Lze zkoušet lepené i pájené spoje, kompozitní polymery atd. Jedná se o modernizovanou verzi s možností řízení zatěžovacího procesu a následné vyhodnocení zkoušky pomocí řídicí jednotky a připojení k počítači. Výhoda těchto strojů je, že pomocí měřících přípravků lze provádět zkoušky ohybem, tlakem či smykem. Uchycení vzorků probíhá tak, že se v čelistech upne nejdříve za vrchní část a potom za spodní část a ustálí. Stroj se spustí, tahová síla narůstá, dokud nedojde k přetržení. Ukázka stroje, viz obr. 32. [41]



Obr. 32 Trhací stroj [42].

Tab. 6 Tabulka s parametry stroje pro tahovou zkoušku [43].

Trhací stroj ZD 10/90 100 kN	
Měřicí rozsah	0 ÷ 100 kN
Příkon stroje	5,3 kW
Rozměry stroje	1150x850x2600 mm
Hmotnost stroje	1200 kg
Možnost zkoušení	Tah, tlak a ohyb
Čelisti	Výměnné

3.5.2 Volba stroje pro rázovou zkoušku

Vhodnost Chapryho kladiva závisí na jeho maximální rázové síle. Vzhledem k tomu, že lepené spoje jsou nejvíce náchylné na porušení ohybem, byl předpoklad takový, že hmotnost hlavy kladiva nebude muset být příliš vysoká. Kladivo bylo použito starší mechanické od firmy WPM. Toto kladivo má jak stupnici s maximální hodnotou 160° , tak druhou stupnici, která má maximální hodnotu 1,5 kpm, což odpovídá přibližně síle 15 J. Čelisti na uchycení vzorků má nastavitelné na různé typy délek zkušebních tyčinek. ABS má vrubovou houževnatost $4,12 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ [40], tudíž je kladivo vyhovující. Otestováno bude na třech zkušebních vzorcích. Na kladivu se odečítá hodnota z ciferníku pomocí ručičky, která se vychýlí do takové úrovně podle toho, jaká byla odolnost vzorku proti přeražení. Čím větší odolnost výrobku, tím menší vychýlení, menší stupně a větší hodnota joulu. [31]



Obr. 33 Charpy kladivo WPM.

Tab. 7 Tabulka s parametry stroje pro rázovou zkoušku.

Charpyho kladivo WPM	
Měřicí rozsah	$0 \div 160^\circ$
Měřicí rozsah	$0 \div 1,5 \text{ kpm}$
Možnost zkoušení	Vrbová houževnatost

3.6 Provedení zkoušek a vyhodnocení vzorků

Následně proběhne vyhodnocení jednotlivých zkoušek. Nejprve referenčních vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku, aby bylo možné s něčím porovnávat. Poté pro jednotlivá lepidla a konstrukce.

3.6.1 Vyhodnocení referenčních vzorků

Naměřené hodnoty zatížení referenčních vzorků pro tahovou zkoušku z trhacího stroje jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Výsledné hodnoty referenčních vzorků tahové zkoušky.

Tahová zkouška – Nelepený spoj			
	1	2	3
	Zatížení [kN]	Zatížení [kN]	Zatížení [kN]
	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
	1,785	1,756	1,687
	29,8	29,3	28,1
Druh lomu	Kohezní lom materiálu	Kohezní lom materiálu	Kohezní lom materiálu

U referenčních vzorků pro tahovou zkoušku a pro vzorky s tupým čelním spojem proběhl přepočítání hodnot na MPa. Tento výpočet proběhl pomocí vztahu:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{1785,4}{60} = 29,8 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Průměrnou hodnotu referenčních vzorků lze vypočítat vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1785,4 + 1756,0 + 1687,3}{3} = 1742,9 \text{ N} \quad (3.3)$$

kde: \bar{x} [N] - průměrná hodnota
 n [-] - počet vzorků

Vztah pro výpočet rozptylu:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma^2 = \frac{(29,757 - 29,049)^2 + (29,267 - 29,049)^2 + (28,122 - 29,049)^2}{3 - 1} = 0,704$$

kde: σ^2 [-] - rozptyl

Vztah pro výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.5)$$

kde: s [-] - směrodatná odchylka

Ostatní výpočty pro zbylé hodnoty byly provedeny v programu Microsoft Excel 2018.

Naměřené hodnoty zatížení referenčních vzorků pro tahovou zkoušku z trhacího stroje jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Výsledné hodnoty referenčních vzorků pro rázovou zkoušku.

Rázová zkouška – Nelepený spoj			
	1	2	3
	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]
	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]
	1,776	1,080	1,756
	2,220	1,349	2,195
Druh lomu	Kohezní lom materiálu	Kohezní lom materiálu	Kohezní lom materiálu

Ukázka výpočtu z naměřeného KV na KVVU:

$$KVVU = \frac{KV}{S_0} = \frac{1,776}{0,8} = 2,22 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (3.6)$$

Průměrnou hodnotu referenčních vzorků lze vypočítat vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{2,220 + 1,349 + 2,195}{3} = 1,537 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Tabulka s vypočtenými statistickými hodnotami dle Microsoft Excel 2018 (tab. 10).

Tab. 10 Statistické hodnoty referenčních vzorků.

Referenční vzorky		
	Tahová zkouška	Rázová zkouška
\bar{x} [N]	1743	/
\bar{x} [J]	/	1,537
\bar{x} [MPa]	29,049	/
\bar{x} [J·cm ⁻²]	/	1,921
σ^2 [-]	2534	0,157
s [-]	50,3	0,397

3.6.2 Vyhodnocení vzorků pro tahovou zkoušku

Vyhodnocení vzorků je rozděleno na vyhodnocení jednotlivých lepidel s každou konstrukcí a k nim příslušné výpočty a na porovnání závislosti vždy jen jednoho lepidla na různé konstrukce. Tím bude dosaženo snadné porovnatelnosti konstrukcí a lepidel. Dále jsou v tabulkách uvedeny typy lomů pro jednotlivé vzorky a ty jsou dále rozebrány podrobněji.

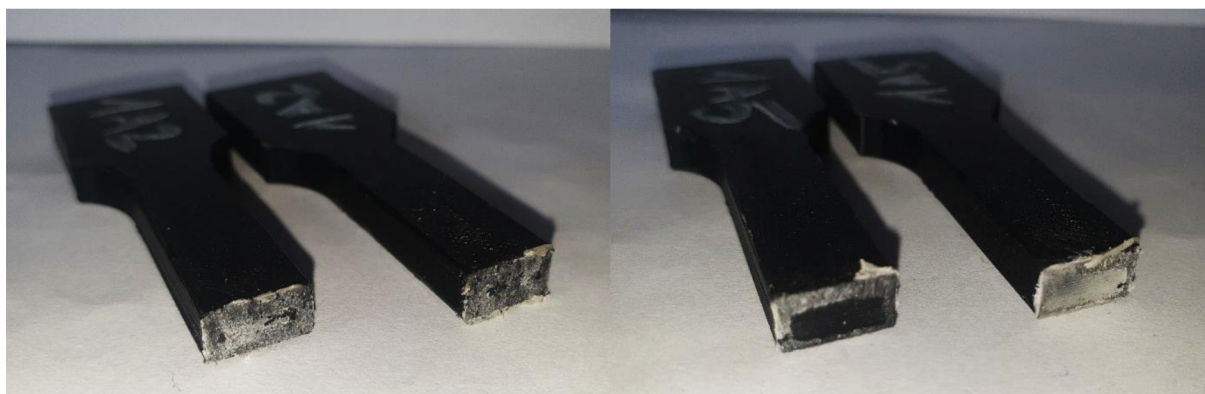
První typ konstrukce je tupý čelní spoj pro všechna čtyři lepidla. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Tabulka s vyhodnocením pro tupý čelní spoj.

Tahová zkouška – tupý čelní spoj (1)					
	1	2	3	4	5
	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]
	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Lepidlo A	9,8	98,1	176,6	500,3	539,6
	0,2	1,6	2,9	8,3	9,0
Druh lomu	Poškození při minimální síle, chyba spoje	Kohezní lom lepidla	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze
Lepidlo B	402,2	804,4	627,8	794,6	804,4
	6,7	13,4	10,5	13,2	13,4
Druh lomu	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Koheze a hraniční lom lepidla	Kohezní lom lepidla
Lepidlo C	843,7	892,7	892,7	912,3	882,9
	14,1	14,9	14,9	15,2	14,7
Druh lomu	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze
Lepidlo D	1108,5	1285,1	1432,3	1182,1	1334,2
	18,5	21,4	23,9	19,7	22,2
Druh lomu	Koheze lom materiálu nad spojem	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji

První sadou testovaných vzorků je vzorek tupým čelním spojem spojený lepidlem BISON Power Adhesive. Jsou označeny 1A1 až 1A5. První vzorek 1A1 prasknul při velmi malém zatížení. Tento problém mohl být způsoben špatným postupem lepení, avšak u ostatních vzorků tento problém nebyl. Na vzorku lze pozorovat špatnou adhezi uprostřed a po krajích kohezní poškození lepidla. Vzorek 1A2 vydržel větší zatížení, ale stále podprůměrné. Vzorek měl v podstatě pouze kohezní porušení. Další vzorek 1A3 byl přetržen tak, že poškození bylo uprostřed adhezního a po krajích kohezního typu, a to v lepidle. Zbylé vzorky 1A4 a 1A5 vydržely přibližně stejné zatížení a taky měly totožný lom. Tedy adhezní uprostřed a po krajích kohezní lepidla. Ukázky lomů, viz obr. 34.

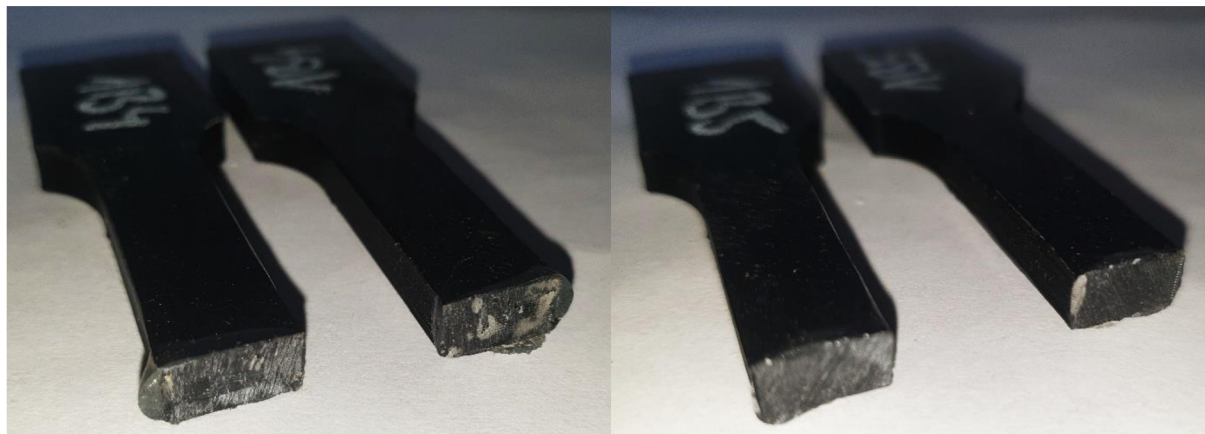
Hodnoty zatížení měly velký rozptyl. Mohlo to být způsobeno špatným postupem při lepení, jako například nedostatečné odmaštění povrch, malá přítlačná síla a krátká doba přítlaku. Průměrná hodnota zatížení u těchto vzorků je 265 N. Tuto hodnotu nelze brát jako směrodatnou. Kombinace tohoto lepidla a konstrukce není ideální. Zde se dá částečně pozorovat, že lom závisel na kvalitě spoje.



Obr. 34 Ukázka poškození vzorků 1A2 a 1A5.

Druhým typem lepidla je BISON Epoxy Universal. Tyto vzorky nesou označení 1B1 až 1B5. První tři vzorky 1B1, 1B2 a 1B3 měly stejné poškození, tedy kohezní lom lepidla, avšak velmi rozdílné hodnoty zatížení. Rozdíl mezi prvním a druhým vzorkem je téměř dvojnásobný. Třetí vzorek průměrné zatížení. Čtvrtý vzorek měl též kohezní lom lepidla, avšak na nějakých místech hraniční. Pátý vzorek měl opět kohezní poškození lepidla. Oba tyto vzorky vydržely nejvyšší zatížení. Ukázky lomů, viz obr. 35.

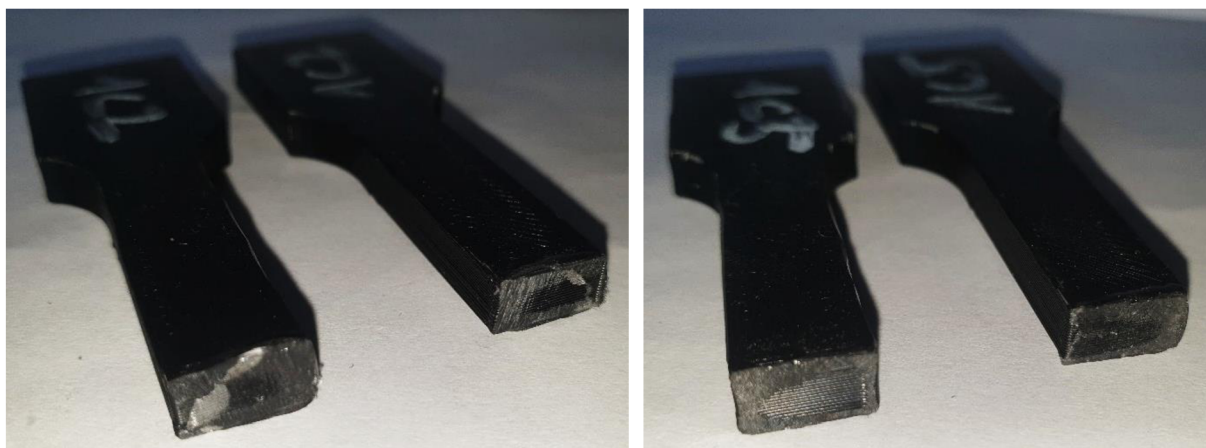
Velikosti zatížení nebyly u tohoto typu lepidla už tak rozdílné, až na první vzorek. Tyto odchylky mohly být způsobeny špatným technologickým postupem, popřípadě se toto může stát, když je každý vzorek lepený jinou směsí lepidla a nedodržen přesný, výrobcem udávaný, poměr směsi. Průměrná hodnota zatížení je 689 N, což je o dost více než u předchozího polyuretanového typu lepidla. U prvního vzorku mohlo být o něco méně lepicí směsi. Tím mohla být způsobena odchylka hodnoty.



Obr. 35 Ukázka poškození vzorků 1B4 a 1B5.

Dalším typem lepidla je PATTEX Repair Epoxy 5 min. Vzorky jsou označeny 1C1 až 1C5. U všech vzorků lze pozorovat téměř totožné poškození a to, že na kraji lepené plochy došlo ke koheznímu poškození lepidla a uprostřed ke špatné adhezi k povrchu. Mohlo to být špatnou smáčivostí lepidla nebo nedostatečným odmaštěním povrchu. I přesto dosáhlo nejvyšších hodnot na namáhání z dvousložkových lepidel. Ukázky lomů, viz obr. 36.

Rozptyl u těchto hodnot je velmi malý a hodnoty jsou téměř průměrné. Průměrné zatížení je 885 N. Vzhledem k tomu, že při měření nebyly velké odchylky, dá se říct, že spoj byl proveden stabilně. Typy lomů byly stejné a spoje měly navíc stejné poškození.



Obr. 36 Ukázka poškození vzorků 1C2 a 1C5.

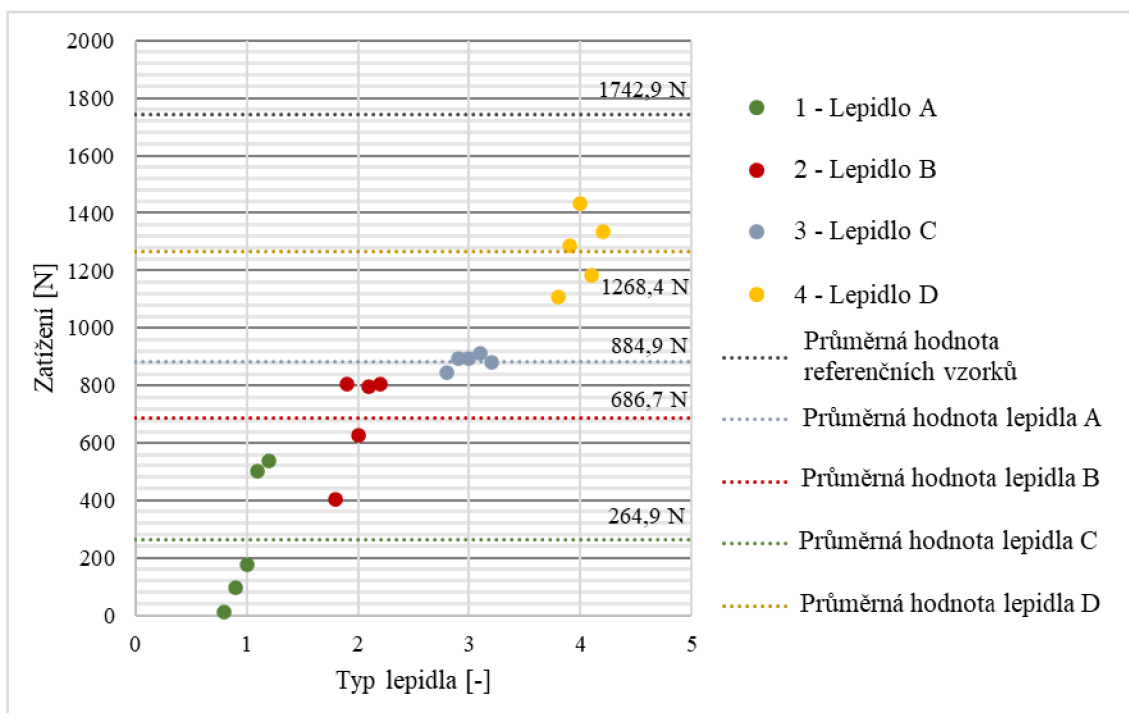
Posledním druhem spoje pro konstrukci s rovným čelem je spojení pomocí směsi acetonu a ABS. První vzorek 1D1 byl přetrhnut nad samotným spojem. Jedná se tedy o kohezní poškození materiálu. U druhého vzorku 1D2 lze vidět, že se materiál opravdu stal homogenním a slil se v jeden. Lom byl kohezní ve spoji. Struktura původního povrchu je na obou částech téměř neznatelná. U třetího vzorku 1D3 lze pozorovat jak kohezní lom v lepené části, tak kohezní lom v materiálu. Přetrhl se tedy ve větší šíři. Čtvrtý a pátý vzorek 1D4 a 1D5 mají stejný typ poškození, a navíc se uprostřed vytvořila bublina. Poškození bylo v kohezi lepicí směsi a také částečně v materiálu. Ukázky lomů, viz obr. 37.

Zatížení, která tyto vzorky vydržely, byla dost podobná a blížila se průměrné hodnotě. Ta byla 1269 N, což je nejvýše ze všech použitých lepidel. Všechny vzorky byly přetrženy kohezně v materiálu, z čehož se dá vyčíst, že spoj proběhl kvalitně a selhal na základě materiálu. Pouze poslední dva vzorky měly v sobě bublinu, kvůli které neproběhla homogenizace spoje, což mohlo způsobit to, že se dostal do směsi acetonu a ABS vzduch například z nějaké nečistoty. Tím k ovlivnění spoje pravděpodobně nedošlo, jelikož měl vysokou hodnotu zatížení.



Obr. 37 Ukázka poškození vzorků 1D1 a 1D2.

Z níže uvedeného grafu (obr. 38) lze vidět porovnání průměrných hodnot jednotlivých lepidel a hodnoty jednotlivých vzorků. Nejvyšší hodnoty dosáhlo lepidlo D, hodnoty vzorků byly nejstabilnější u lepidla C, které se nejvíc blížily průměru. Nejnížší hodnoty a nejvyšší rozptyl měla lepidla A a B. Tím jsou méně vhodná než ostatní.



Obr. 38 Graf porovnání jednotlivých lepidel pro tupý čelní spoj.

Tabulka s vypočtenými statistickými hodnotami dle Microsoft Excel 2018 (tab. 12).

Tab. 12 Statistické hodnoty vzorků první konstrukce.

Tahová zkouška – tupý čelní spoj – rozptyl a směrodatná odchylka				
	Lepidlo A	Lepidlo B	Lepidlo C	Lepidlo D
\bar{x} [N]	264,9	686,7	884,9	1268,4
\bar{x} [MPa]	4,3	12,4	15,0	21,7
σ^2 [-] pro N	57886	30940	645	16115
σ^2 [-] pro MPa	16,08	8,59	0,18	4,48
s [-] pro N	240,6	175,9	25,4	126,9
s [-] pro MPa	4,01	2,93	0,42	2,12

Druhý typ konstrukce je zkosený spoj pro všechna čtyři lepidla. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Tabulka s vyhodnocením pro zkosený spoj.

Tahová zkouška – zkosený spoj (2)					
	1	2	3	4	5
	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]
Lepidlo A	794,6	966,3	843,7	765,2	696,5
Druh lomu	Adheze lepidla s částečnou kohezí	Adhezní poškození lepidla	Adhezní s hraničním lomem lepidla	Adhezní s hraničním lomem lepidla	Kohezní lom lepidla
Lepidlo B	1108,5	1255,7	1236,1	1216,4	1059,5
Druh lomu	Adhezní lom s částečnou kohezí lepidla	Adhezní lom s částečnou kohezí lepidla	Adhezní lom s částečnou kohezí lepidla	Adhezní lom s částečnou kohezí lepidla	Adhezní lom s částečnou kohezí lepidla
Lepidlo C	1187,0	1039,9	1059,5	971,2	873,1
Druh lomu	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Uprostřed adheze, po krajích koheze	Adhezní s hraničním lomem lepidla
Lepidlo D	1726,6	1628,5	1706,9	1706,9	1854,1
Druh lomu	Koheze lom materiálu mimo spoj	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji	Koheze lom materiálu mimo spoj	Kohezní a hraniční lom materiálu ve spoji

Prvním použitým lepidlem pro zkosený spoj je BISON Power Adhesive. Vzorky mají označení 2A1 – 2A5. První vzorek 2A1 má převážně adhezní poškození, tedy lepidlo špatně přilnulo k povrchu a lehké kohezní poškození na hranici lepidla. Druhý vzorek 2A2 má uprostřed adhezní poruchu z obou stran uprostřed plochy a kohezní poškození po krajích plochy vzorku. Třetí a čtvrtý měřený vzorek mají téměř totožná poškození. Vždy na půlce vzorku je kohezní poškození na hranici lepidla a částečná adheze. Poslední vzorek 2A5 má nejvíce kohezní poškození, případně kohezní na hraně lepidla. Ukázky lomů, viz obr. 39.

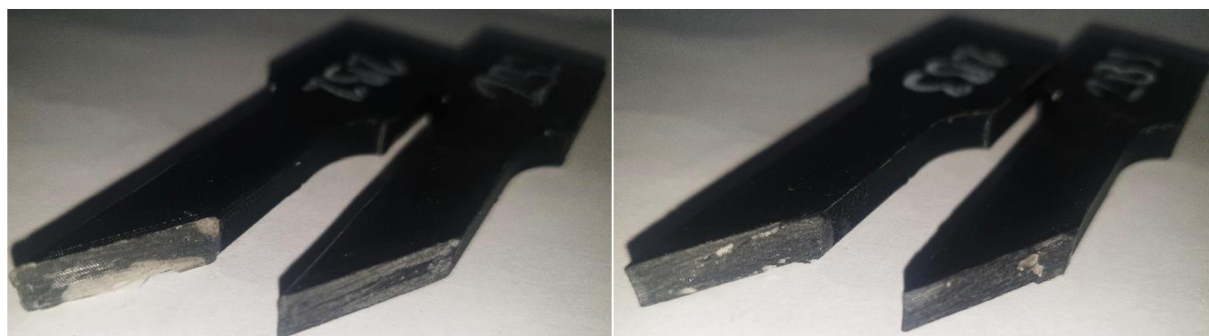
Průměrná hodnota zatížení je 813 N. Rozptyl zde není vysoký a hodnoty stabilní. Nejnížší od průměrné hodnoty byl vzorek 2A5, který měl také odlišný typ lomu. Nejvyšší měl vzorek 2A2, který měl ale stejný typ lomu jako vzorky 2A3 a 2A4. Lom tedy pravděpodobně nezávisel na zatěžovací síle.



Obr. 39 Ukázka poškození vzorků 2A2 a 2A4.

Pro druhý typ lepidla BISON Epoxy Universal mají vzorky označení 2B1 až 2B5. Veškeré vzorky pro tuto zkoušku měly stejné poškození. Na každém bylo primární adhezní poškození špatnou přilnavostí lepidla ke vzorku se stopami lepidla na té ploše, kde zůstala menší plocha lepidla. Ty stopy byly u většiny vzorků velmi malé a jednalo se o kohezní poškození. Ukázky lomů, viz obr. 40.

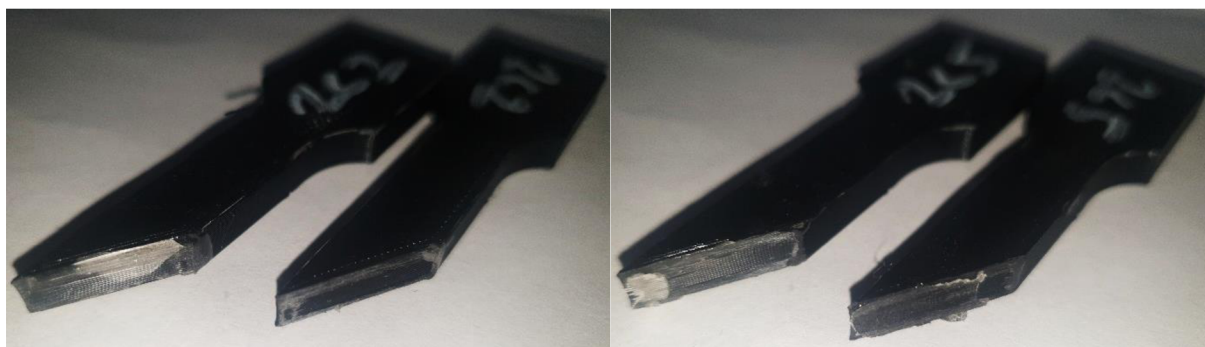
Dosažená hodnota napětí u těchto vzorků se u všech blížila průměrné hodnotě 1175 N. Vzhledem k tomu, že všechny vzorky měly stejné poškození a odchylka nebyla tak vysoká. Také u této konstrukce se jednalo s tímto lepidlem o nejvyšší hodnoty.



Obr. 40 Ukázka poškození vzorků 2B2 a 2B3.

Třetí typ lepidla pro konstrukci zkoseného čela je PATTEX Repair Epoxy 5 min. a vzorky jsou označeny jako 2C1 až 2C5. První čtyři vzorky nesou známky částečného kohezního poškození lepidla v kombinaci s hraničním lomem. Poškození je po krajích a uprostřed se lepidlo, jako u předchozí konstrukce, moc neuchytilo. Opět to mohlo být nedostatečnou smáčivostí či špatně odmaštěným povrchem. U vzorku 2C4 se navíc vytvořila uprostřed malá bublina, což mohlo zapříčinit to, že se dostal do směsi vzduch. Poslední vzorek má částečně hraniční lom a částečně adhezní lom lepidla. Ukázky lomů, viz obr. 41.

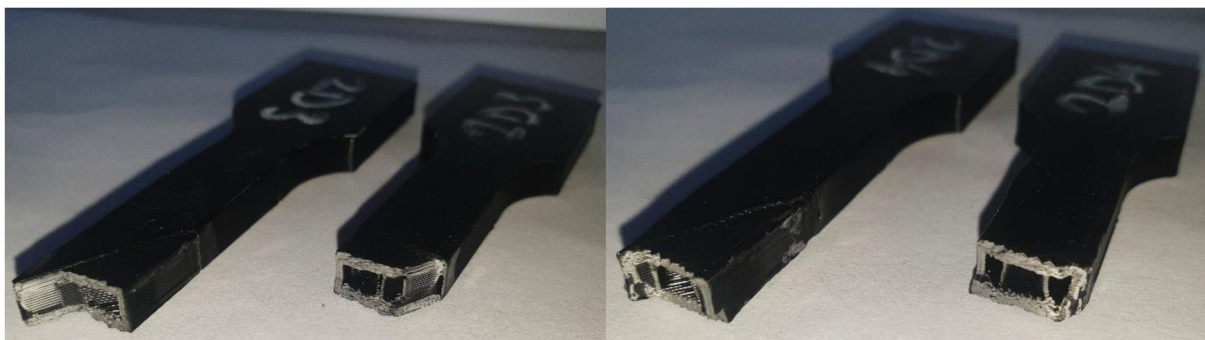
Průměrná hodnota zatížení byla 1026 N. V případě této konstrukce s porovnáním s druhým epoxidovým lepidlem je zatížení nižší. Mohlo to být špatným technologickým postupem nebo znamenat to, že tato konstrukce není tolik vhodná pro toto lepidlo. První tři vzorky měly podobnou hodnotu zatížení a stejný lom. Poslední 2 už měly podprůměrné a také jeden měl bublinu a druhý adhezní lom, z čehož se dá vyvodit, že tyto vady ovlivnily výsledky měření.



Obr. 41 Ukázka poškození vzorků 2C2 a 2C5.

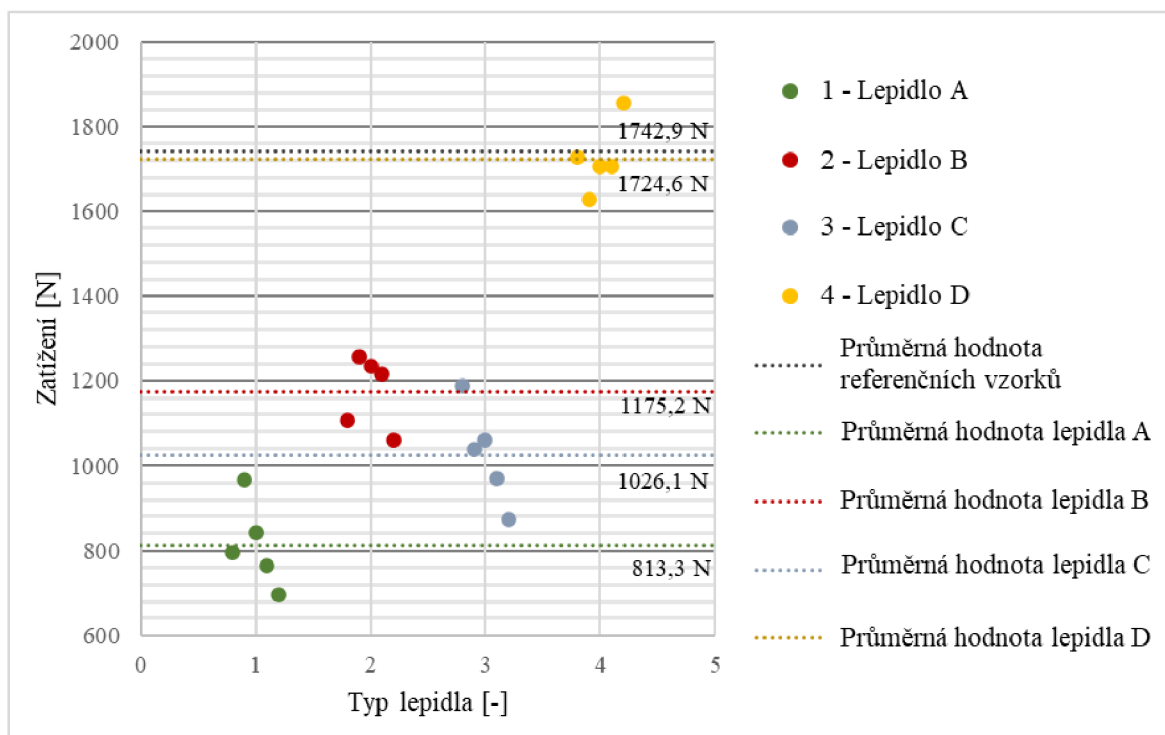
Posledním typem spoje pro tuto konstrukci je spojení pomocí ABS rozpuštěného v acetonu. Vzorky jsou označeny 2D1 až 2D5. Vzorek 2D1 byl přetržen několik milimetrů nad samotným spojem, tudíž selhal na kohezi materiálu. Druhý, třetí a pátý vzorek měly totožné poškození, a to, že v části šikmé části prasknul na kohezi materiálu a přibližně v polovině spoje bylo příčné kohezní poškození materiálu. Tím zůstala špička na druhé části vzorku. Vzorek 2D4 prasknul kohezně příčně v materiálu těsně u špičky spoje. Ukázky lomů, viz obr. 42.

Průměrná hodnota zatížení byla 1725 N. Tato hodnota byla ze všech zkušebních vzorků nejvyšší a všechny vzorky, i s různým poškozením, měly malý rozptyl hodnot. Nejvyšší hodnoty byly dosaženy u vzorku 2D5 1854 N. Druh lomu zde nejspíše nezávisel na kvalitě spoje.



Obr. 42 Ukázka poškození vzorků 2D3 a 2D4.

Z níže uvedeného grafu (obr. 43) lze vypožorovat, že nejvyšší hodnoty dosáhlo lepidlo D. Toto lepidlo také dosáhlo hodnot téměř stejných, jako hodnota referenčních vzorků bez slepení. Jeden ze vzorků přesáhl průměrnou hodnotu referenčních vzorků. Ostatní lepidla dosáhla navzájem podobných hodnot, z nichž nejlépe vyšlo lepidlo B a nejhůře lepidlo A. Lepidla A a C měla největší odchylky.



Obr. 43 Graf porovnání jednotlivých lepidel pro zkosený spoj.

Tabulka s vypočtenými statistickými hodnotami dle Microsoft Excel 2018 (tab. 14).

Tab. 14 Statistické hodnoty vzorků druhé konstrukce.

Tahová zkouška – zkosený spoj – rozptyl a směrodatná odchylka				
	Lepidlo A	Lepidlo B	Lepidlo C	Lepidlo D
\bar{x} [N]	813,2	1175,2	1026,1	1724,6
σ^2 [-] pro N	10158	7429	13406	6660
s [-] pro N	100,8	86,2	115,8	81,6

Třetí typ konstrukce je stupňovitě přeložený spoj. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 15. Tab. 15 Tabulka s vyhodnocením pro stupňovitě přeložený spoj.

Tahová zkouška – stupňovitě přeložený spoj					
	1	2	3	4	5
	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]	Zatížení [N]
Lepidlo A	519,9	225,6	470,9	637,7	98,1
Druh lomu	Kohezní lom lepidla	Kohezní a hraniční lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní a hraniční lom lepidla
Lepidlo B	863,3	932,0	833,9	824,0	804,4
Druh lomu	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla
Lepidlo C	887,8	878,0	892,7	868,2	912,3
Druh lomu	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla	Adhezní a hraniční lom lepidla
Lepidlo D	981,0	1187,0	1402,3	1049,7	1334,2
Druh lomu	Kohezní lom v materiálu a ve spoji	Kohezní lom v materiálu a nad spojem	Kohezní lom v materiálu a ve spoji	Kohezní lom v materiálu a ve spoji	Kohezní lom v materiálu a nad spojem

První lepidlo pro třetí sadu vzorků je BISON Power Adhesive a vzorky mají označení 3D1 až 3D5. První vzorek má převážně kohezní lom lepidla s částečným hraničním lomem lepidla, a to v příčném i podélném směru. Druhý má především hraniční lom lepidla, s částečným adhezním a kohezním lomem. Třetí a čtvrtý vzorek mají převažující kohezní lom lepidla též v obou směrech. Poslední vzorek 2D5 má v podélném směru kohezní s částečnou hraniční poruchou a v příčném u jedné části kohezní a u druhé spíše hraniční lom. Ukázky lomů, viz obr. 44.

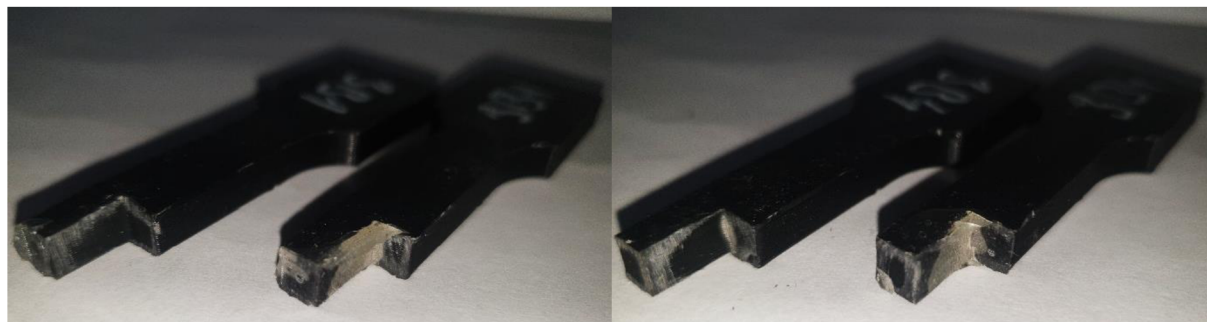
Průměrné zatížení je 390 N. První, třetí a čtvrtý vzorek měly podobné zatížení a všechny i velmi podobný typ lomu. Druhý vzorek měl oproti ostatním nižší zatížení a v tomto případě to odpovídalo i lomu. Poslední vzorek měl také jiný druh lomu a zatížení velice nízké a podprůměrné. Tím by se dalo říct, že lom zde odpovídal kvalitě spoje.



Obr. 44 Ukázka poškození vzorků 3A2 a 3A4.

Druhým typem lepidla je první z epoxidových. Vzorky jsou označeny 3B1 až 3B5. První vzorek má převážně v příčném i podélném směru adhezní poškození s minimálním hraničním lomem lepidla. Ostatně i ostatní ze vzorků mají stejné poškození. Lze pozorovat, že lepidlo z jedné plochy zůstává například i na obou plochách. To znamená, že půlka lepidla má adhezní lom na jednom vzorku a druhá půlka na druhém. Ukázky lomů, viz obr. 45.

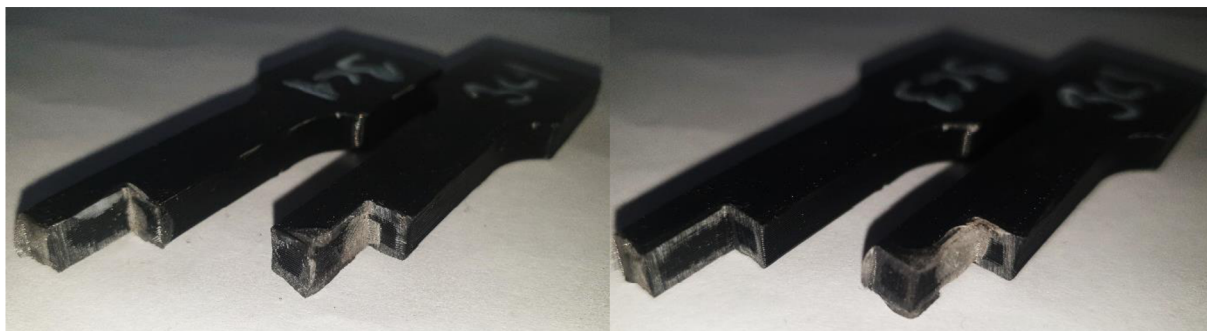
Průměrné zatížení u tohoto lepidla bylo 852 N. V tomto případě měly všechny vzorky stejný typ poškození a taky všechny hodnotu zatížení blízkou se průměru, kde nebyly velké odchylky.



Obr. 45 Ukázka poškození vzorků 3B1 a 3B4.

Třetí spoj má epoxidové lepidlo od firmy PATTEX. Vzorky nesou označení 3A1 až 3A5. U tohoto lepidla jako u předchozího jsou velmi podobné typy lomů. U všech vzorků v podélném i příčném směru mají hlavně adhezní poškození s náznakem hraničního lomu. Také v pár případech zůstala část lepidla na jedné ploše a část na druhé. Ukázky lomů, viz obr. 46.

Průměrné zatížení těchto vzorků je 888 N. I v tomto případě jako u předchozího lepidla byly lomy stejné a hodnoty též velmi průměrné. Také v porovnání s předchozím lepidlem je podobná hodnota zatížení.



Obr. 46 Ukázka poškození vzorků 3C1 a 3C3.

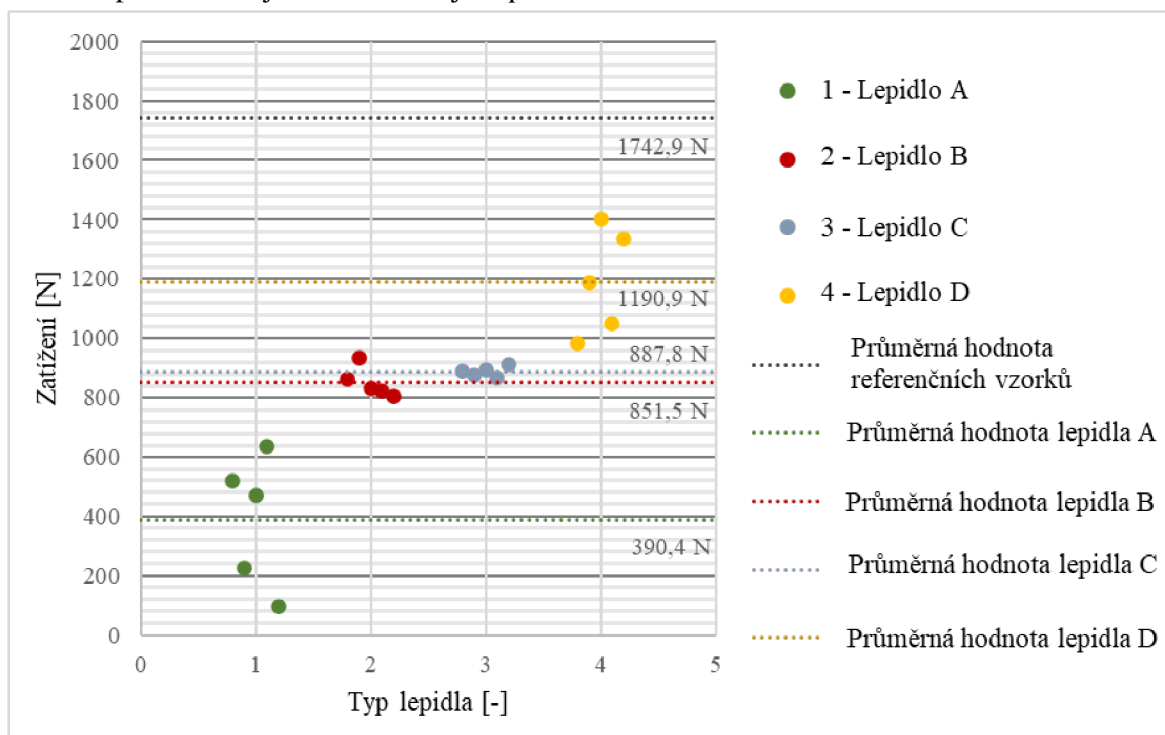
Čtvrtá sada vzorků se stupňovitě přeplátovaným spojem je spojena pomocí ABS a acetonu. Nesou označení 3D1 až 3D5. Všechny tyto vzorky byly poškozeny ve stejném místě, a to v tom, kde je materiál nejužší. První vzorek velmi držel v podélném směru, kde nebyl ani náznak poškození a prasknul v jedné části kohezně nad spojem a v druhé kohezně ve spoji. Totéž bylo i u druhého a čtvrtého vzorku z této sady. Vzorky 3D3 a 3D5 měly taktéž pevné podélné spojení a praskly na jedné straně v příčném spojení. V obou případech se jedná o kohezní poškození v materiálu těsně nad spojem. Ukázky lomů, viz obr. 47.

Průměrné zatížení u těchto vzorků je 1191 N. Byl zde větší rozptyl hodnot. Vzhledem k tomu, že docházelo k poškození materiálu, tak hodnota byla ovlivněna hlavně kvalitou vytisknutého vzorku. Docházelo k poškození v nejužší části materiálu.



Obr. 47 Ukázka poškození vzorků 3D2 a 3D5.

Graf pro porovnání lepidel stupňovitě přeložený spoj (obr. 48) znázorňuje, že nejvyšších hodnot dosáhlo lepidlo D. Odchylka byla nejvyšší u lepidla A a D. Epoxidová lepidla B a C měla podobné hodnoty a též velmi malé odchylky. Pro tuto konstrukci jsou vhodná epoxidová lepidla B a C a lepidlo D. Nejméně vhodné je lepidlo A.



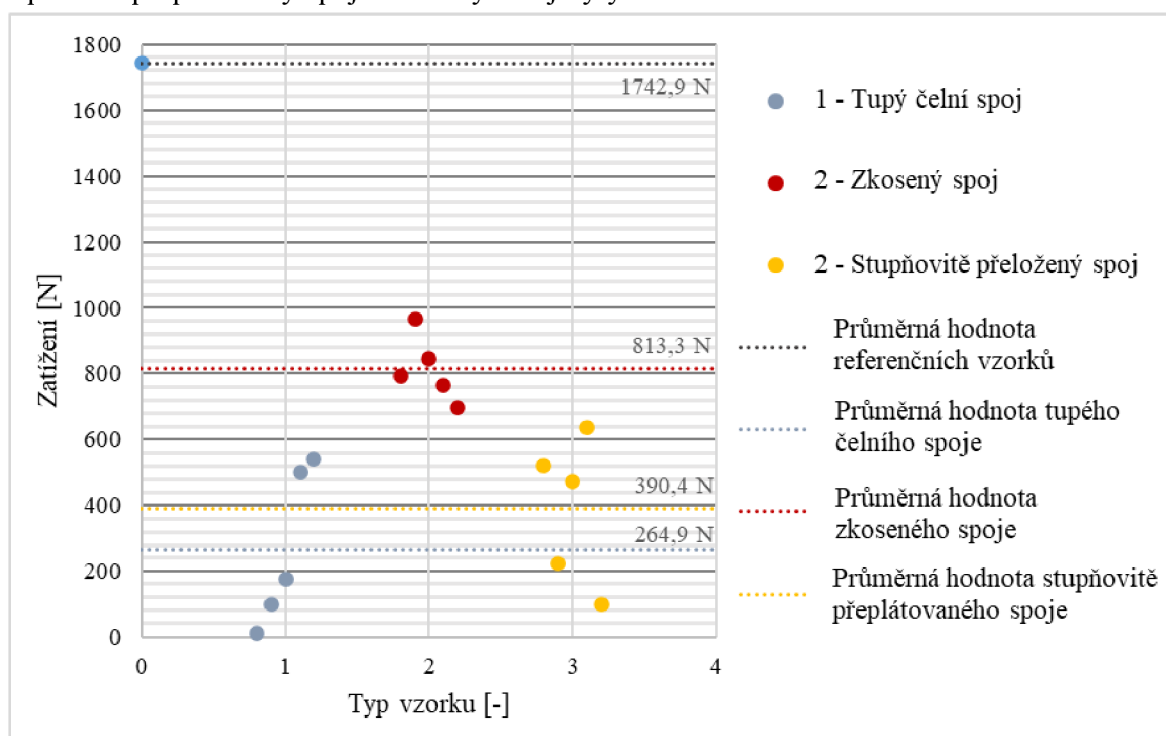
Obr. 48 Graf porovnání jednotlivých lepidel pro stupňovitě přeložený spoj.

Tabulka s vypočtenými statistickými hodnotami dle Microsoft Excel 2018 (tab. 16).

Tab. 16 Statistické hodnoty vzorků třetí konstrukce.

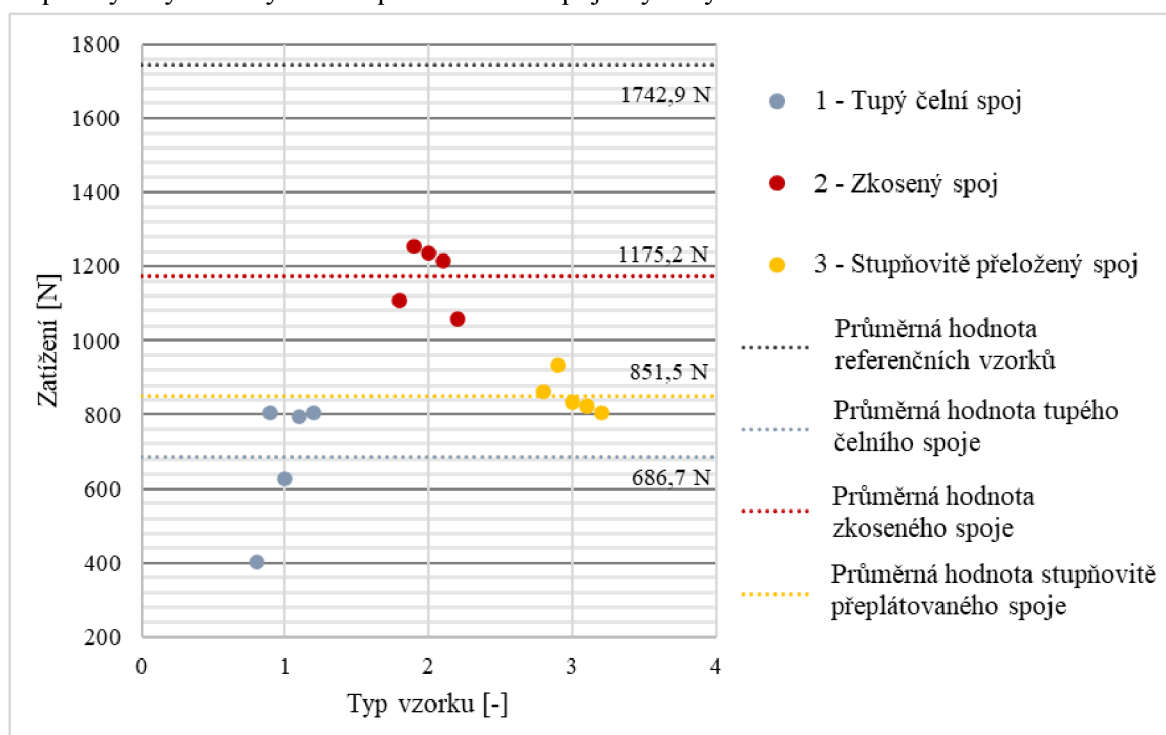
Tahová zkouška – stupňovitě přeložený spoj – rozptyl a směrodatná odchylka				
	Lepidlo A	Lepidlo B	Lepidlo C	Lepidlo D
\bar{x} [N]	390,4	851,5	887,8	1190,9
σ^2 [-] pro N	49244	2473	277	32364
s [-] pro N	221,9	49,7	16,6	179,9

Graf na obr. 49 ukazuje naměřené hodnoty vzorků pro lepidlo A. Vyšlo nejlépe pro spoj zkosený. Spoj tupý čelní vyšel nejméně odolný, ale některé vzorky byly odolnější, než pro stupňovitě přelátovaný spoj. Hodnoty u něj byly velice nestabilní.



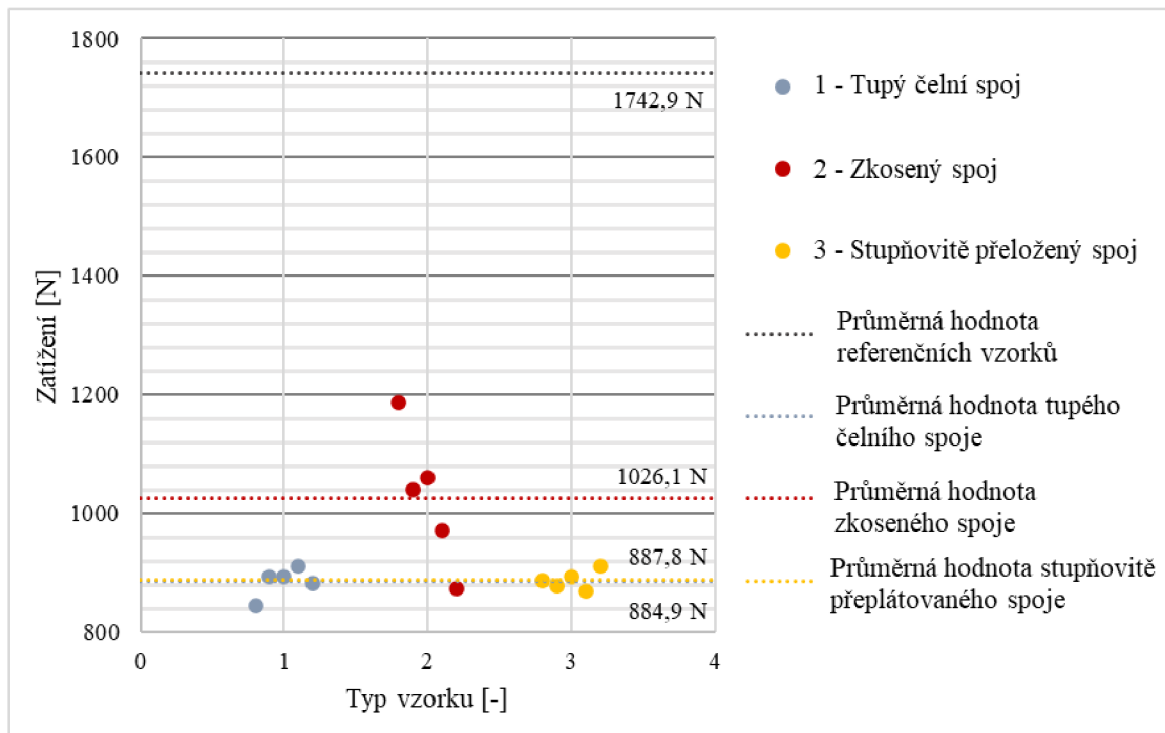
Obr. 49 Graf porovnání lepidla A pro jednotlivé konstrukce.

Hodnoty druhého lepidla jsou na obr. 50. Zde vyšel nejlépe zkosený spoj. Průměrné hodnoty tupého čelního a stupňovitě přeloženého se blížily podobným hodnotám a některé vzorky se i překrývaly. Odchylka u tupého čelního spoje byla vyšší než u ostatních.



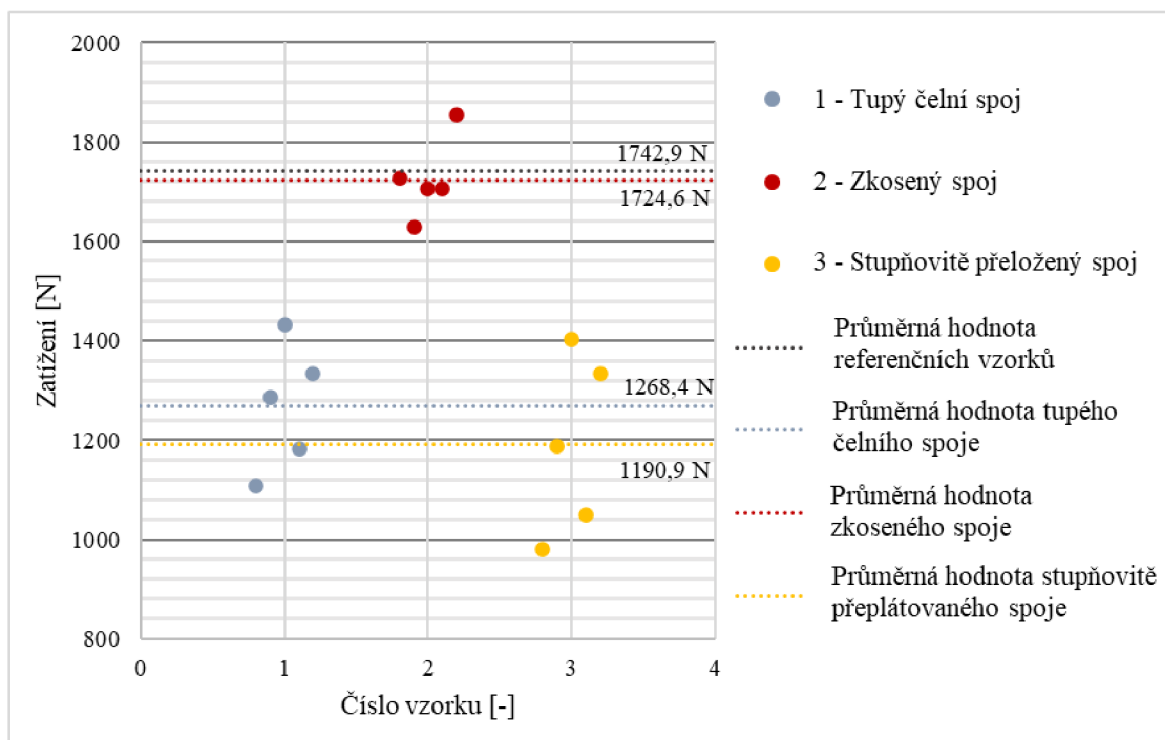
Obr. 50 Graf porovnání lepidla B pro jednotlivé konstrukce.

Následující graf (obr. 51) ukazuje porovnání Lepidla A, tedy PATTEX Repair Epoxy 5 min., a jeho vliv na jednotlivé konstrukce. Nejvyšší průměrné hodnoty dosáhl spoj zkosený, ale s vysokými odchylkami. První a třetí konstrukce měla stabilní hodnoty a dosáhly téměř totožných hodnot.



Obr. 51 Graf porovnání lepidla C pro jednotlivé konstrukce.

Poslední lepidlo D mělo nejlepší hodnoty pro zkosený spoj. Zbylé dva typy spojů dosahovaly vysokých hodnot. V případě tohoto lepidla docházelo většinou ke kohezním lomům. U zkoseného spoje se jednalo hlavně o lom v materiálu a praskal v nejužších místech konstrukce. Stupňovitě přeložený spoj v podélném směru vydržel, prasknul v nejužším místě v příčném směru v materiálu. Porovnání lze vidět na obr. 52.



Obr. 52 Graf porovnání lepidla D pro jednotlivé konstrukce.

3.6.3 Vyhodnocení vzorků pro rázovou zkoušku

Naměřené hodnoty vzorků pro jednotlivá lepidla jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 17 Naměřené hodnoty pro rázovou zkoušku.

Rázová zkouška – tyčinka s V vrubem (4)					
	1	2	3	4	5
	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]	Spotřebovaná nárazová práce [J]
Lepidlo A	0,471	0,186	0,186	0,196	0,186
Lepidlo B	1,756	0,275	0,206	0,265	0,196
Lepidlo C	0,589	0,177	0,177	0,196	0,186
Lepidlo D	0,226	2,747	2,943	0,383	0,265

Přepočet hodnot ze spotřebované nárazové práce na vrubovou houževnatost je uveden v tab. 14. Hodnoty jsou vypočteny pomocí programu Microsoft Excel 2018.

Tab. 18 Tabulka s vyhodnocením pro rázovou zkoušku.

Rázová zkouška – tyčinka s V vrubem (4)					
	1	2	3	4	5
	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]	Vrubová houževnatost [J·cm ⁻²]
Lepidlo A	0,589	0,233	0,233	0,245	0,233
Druh lomu	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom s hraničním lomem lepidla	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom s hraničním lomem lepidla	Adhezní lom lepidla
Lepidlo B	2,195	0,343	0,258	0,331	0,245
Druh lomu	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom s hraničním lomem lepidla	Adhezní lom lepidla
Lepidlo C	0,736	0,221	0,221	0,245	0,233
Druh lomu	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom s hraničním lomem lepidla	Adhezní lom lepidla	Adhezní lom lepidla
Lepidlo D	0,282	3,434	3,679	0,478	0,331
Druh lomu	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla	Kohezní lom lepidla

První sada vzorků je lepená pomocí lepidla BISON Power Adhesive. Označeny jsou 4A1 až 4A5. U prvního vzorku zůstalo lepidlo pouze na jedné polovině. Na druhém, třetím, čtvrtém a pátém vzorku byla část na jedné a část na druhé polovině. Vzorky 4A2 a 4A4 mají adhezní lom, ale s částečným hraničním lomem lepidla, zejména po krajích lepené plochy (obr. 53).

Průměrná hodnota byla 0,245 J·cm⁻². První vzorek dosáhl nejvyšší, nadprůměrné, odolnosti a zbylé čtyři měly již rázovou odolnost velmi nízkou. U prvního vzorku lepidlo přesahovalo částečně do mezery ve V vrubu, čímž mohlo dojít k odchylce.



Obr. 53 Ukázka poškození vzorků 4A3 a 4A4.

Druhá pětice vzorků pro lepidlo BISON Epoxy Universal má označení 4B1 až 4B5. První vzorek měl pozůstatek lepidla hlavně na jedné polovině, ale částečně i na druhé. To stejné bylo i u třetího vzorku. Druhý a pátý měly pouze na jedné polovině. Čtvrtý vzorek měl navíc náznak hraničního lomu lepidla (obr. 54).

Hodnota, které průměrně dosáhly tyto vzorky, byla vyšší než u předchozího, polyuretanového, lepidla. Vzorky průměrně dosáhly $0,54 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Je také nejvyšší z obou epoxidových lepidel. První vzorek se ovšem od ostatních dost odchyloval a byl z nich nejpevnější. Zde lepidlo přesahovalo částečně přes lepenou plochu. Tím mohlo dojít k ovlivnění výsledku.



Obr. 54 Ukázka poškození vzorků 4B2 a 4B4.

Třetí lepidlo, PATTEX Repair Epoxy 5 min. pro tuto konstrukci má označení 4C1 až 4C5. První a čtvrtý vzorek měl kohezní lom lepidla s tím, že část lepidla zůstala na jednom vzorku a část na druhém. Druhý vzorek měl kohezní lom. Lepidlo zůstalo převážně na jedné části. Na třetím vzorku byl kohezní lom s částečným hraničním lomem lepidla. Vzorek 4C5 měl čistě kohezní lom s pozůstatkem lepidla pouze na jedné polovině (obr. 55).

Průměrná hodnota vrubové houževnatosti u těchto vzorků byla $0,265 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. První vzorek zaznamenal větší odchylku od ostatních a měl mnohem vyšší odolnost. Zde opět mohlo dojít k většímu přesahu lepidla.



Obr. 55 Ukázka poškození vzorků 4C2 a 4C3.

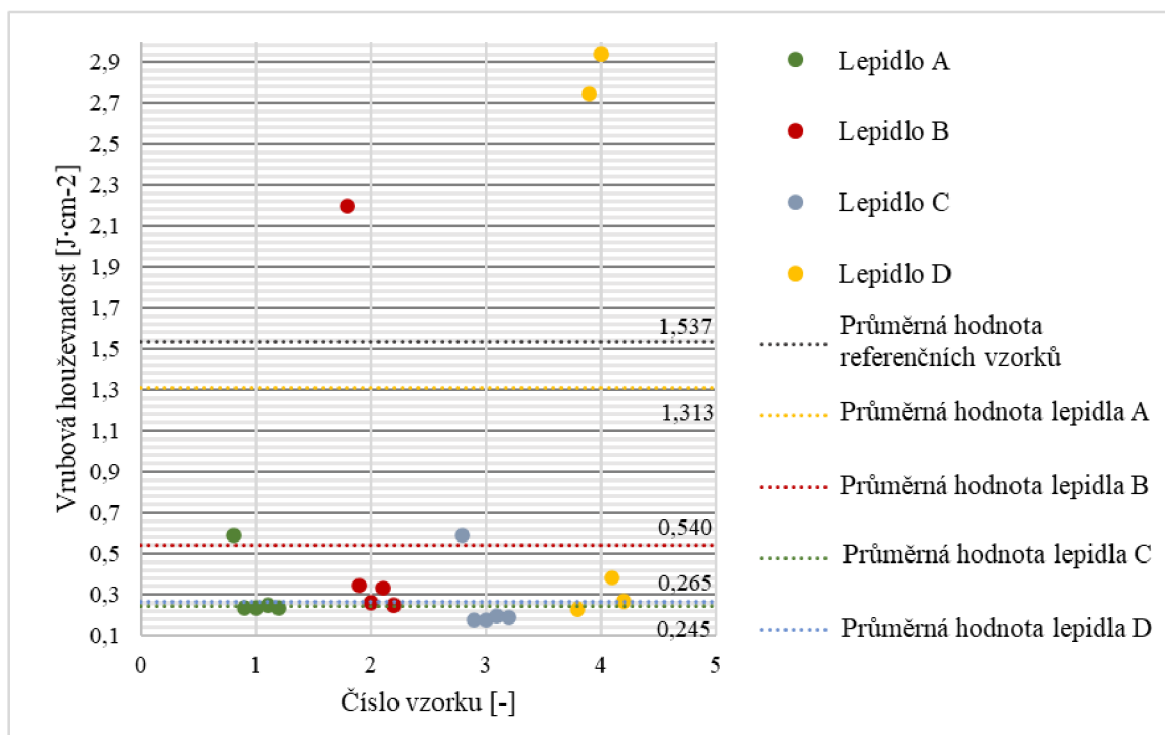
Poslední sada vzorků je slepena pomocí naleptaného povrchu směsi acetonu s ABS. Vzorky mají označení 4D1 až 4D5. První, čtvrtý a pátý vzorek měly poškození v místě spoje. Jednalo se tedy o kohezní lom ve spoji. Druhý a třetí mírně nad spojem. Jednalo se o kohezní poškození materiálu mírně nad spojem (obr. 56).

Průměrná hodnota vrubové houževnatosti u těchto vzorků je $1,313 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Jedná se o nejvyšší hodnotu u zkoušených lepidel. Vzorky 4D1, 4D4 a 4D5 dosáhly podobných hodnot a měly také stejný styl poškození. Druhý a třetí vzorek měly kohezní poškození materiálu nad spojem. To mohlo ovlivnit tuto vyšší nadprůměrnou odolnost.



Obr. 56 Ukázka poškození vzorků 4D1 a 4D3.

V následujícím grafu (obr. 57) je porovnání vlivu jednotlivých lepidel a vzorků na vrubovou houževnatost. Lepidlo A a C dosáhly nejnižších hodnot. Lepidlo A mělo všechny vzorky průměrně stejné. Tímto se ukázalo poměrně nevhodné pro toto namáhání. Lepidlo C mělo jeden vzorek s větší odchylkou. Na lepené ploše vzorku bylo vidět, že lepidlo zasáhlo trochu do mezery ve vrubu a tím bylo dosaženo větší lepené plochy, což mohlo způsobit větší odchylku. K tomuto došlo z důvodu velkého přetečení lepidla a nedostatečného očištění okolí. Lepidlo B dosáhlo podobných hodnot. Jeden vzorek měl větší odchylku, a i když měl stejný typ lomu, měl několikanásobně vyšší hodnotu. Toto bylo pravděpodobně dosaženo tím, že lepidlo trochu přesahovalo do vrubu a zvýšila se plocha lepení a tím odolnost proti rázu. Lepidlo D mělo dva vzorky s vyšší hodnotou než je průměrná. Na vzorcích lze vidět, že slití materiálu dosáhlo do větší hloubky, došlo ke kvalitnějšímu propojení materiálů a tím se spoj mohl stát odolnějším. Tím se mohl stát i odolnějším než referenční vzorek vyplněný pouze mřížkou. Z tohoto lze vyvodit, že pokud je požadavek na odolnou plochu proti rázu, lze místo tisku z jednoho dílu zvolit lepený spoj lepidlem D. ze dvou dílů. Pokud je proveden kvalitně, lze dosáhnout vyšší pevnosti s kvalitní pohledovou plochou.



Obr. 57 Graf porovnání jednotlivých lepidel pro rázovou zkoušku.

Tabulka s vypočtenými statistickými hodnotami dle Microsoft Excel 2018 (tab. 19).

Tab. 19 Statistické hodnoty rázové zkoušky.

Rázová zkouška – tyčinka s V vrubem – rozptyl a směrodatná odchylka				
	Lepidlo A	Lepidlo B	Lepidlo C	Lepidlo D
\bar{x} [J·cm ⁻²]	0,307	0,674	0,331	1,641
σ^2 [-]	0,025	0,724	0,051	3,070
s [-]	0,158	0,851	0,226	1,752

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V technicko-ekonomickém zhodnocení je vyhodnoceno, jak bylo obtížné dané vzorky tisknout a následně lepit. Jsou rozebrány výhody a nevýhody jednotlivých lepidel s přihlédnutím jednoduchosti lepicího procesu v přípravku. Nakonec bude rozebrán ekonomický faktor.

4.1 Vyhodnocení tisku a lepení vzorků

Vyhodnocení vzorků proběhlo v jednotlivých kategoriích, a to s přihlédnutím ke konstrukci při tisku, k druhu lepidla a k následujícímu samotnému procesu lepení a zkoušených mechanických vlastností.

4.1.1 Dle konstrukce

- Tahová zkouška na vzorku s tupým čelním spojem – tisk vzorků proběhl bez větších problémů. Bylo potřeba zkosit hrany. Materiál má v rozích tendenci hromadit napětí, což vede ke vzduchovým rohům. Přípravek je velice vhodný, bez něj je obtížné dosáhnout rovnoběžnosti. Je potřeba ho v něm nechat důkladně zaschnout, aby se nepohnul a nedošlo ke znehodnocení vzorku neodbornou manipulací.
- Tahová zkouška na vzorku se zkoseným spojem – tisk těchto vzorků proběhl bez větších problémů. Pouze muselo dojít k opravdu kvalitnímu přilnutí k tiskové podložce. Špičatý roh se měl tendenci od podložky odlupovat. Vznikla by tak plocha s menším průřezem a vzorek by měl lepenou plochu lichoběžníkovou a ne obdélníkovou. Zde u lepení je přípravek velice vhodný, protože je problémové u šikmého spoje zajistit správnou rovnoběžnou polohu obou částí.
- Tahová zkouška na vzorku stupňovitě přeloženým spojem – tisk byl o něco složitější než tisk vzorků s rovnou plochou, jelikož se měly strany tendenci deformovat, a tak v případě prvního vzorku rohy vyčnívaly více než stěny. Rohy byly zbroušeny. Zkosení je vhodné provádět, pokud je to možné, na všech hranách.
- Vzorek s V vrubem na rázovou zkoušku – s tímto vzorkem byly obdobné problémy jako u předcházejících. Jelikož byl vzorek o něco větší, nebyla taková deformace jako u těch s menším rozměrem. Ovšem jako u předchozích, pokud je to možné, je vhodné provést sražení hran.

4.1.2 Dle lepidel

- BISON Power Adhesive – výhodou je dlouhá možnost manipulace, ale s tím je spojená nevýhoda s dlouhé doby schnutí. Vzorky je nutné nechat v přípravku delší dobu na teplém místě, než dojde k vytvrzení. Je nutné namíchat správný poměr lepicí směsi z pryskyřice a tvrdidla. Namíchaná směs vydrží přibližně 15 minut, než ji není možné nanášet. Doporučená doba schnutí je 48 hodin, což je oproti ostatním lepidlům dlouhá doba. Také je potřebné před samotným lepením povrch zdrsnit a dostatečně odmastit. Další výhodou tohoto lepidla je, že po zaschnutí je poměrně dobře opracovatelné a lze lepené okolí dostatečně očistit.
- BISON Epoxy Universal – výhodou lepidla je dlouhá doba zpracovatelnosti, tudíž se nestane, že je potřeba míchat několik menších směsí a lze nalepit celou dávku najednou, čímž se zkracuje čas pro přípravu. Ovšem toto je zároveň velkou nevýhodou, jelikož se musí vzorkům dlouho zajistit stabilní poloha, aby se nepohnuly a zabírá místo v přípravku. Po zaschnutí zanechává mechanicky lehce odstranitelnou vrstvu lepidla. Povrch je potřeba očistit, zdrsnit a odmastit, aby mohlo dojít k dokonalému spoji. Pomocí smirkového papíru

Lze odstranit přečnívající hrany a zlepšit přilnavost povrchů. Po zaschnutí je lepidlo transparentní.

- PATTEX Repair Epoxy 5 min. – výhoda je rychlé schnutí lepidla, s čímž se pojí nevýhoda, že manipulace je zkrácená a tím rychleji namíchaná směs tuhne a zkracuje se doba možnosti manipulace. Výrobce uvádí dobu schnutí 5 minut, což přibližně odpovídá. Další výhodou je transparentnost lepidla, kdy nezanechává na výrobku takovou stopu po lepení jako například BISON Power Adhesive. Před samotným lepením je jako u BISON Epoxy Universal potřeba povrch srovnat, zdrsnit a odmastit, jinak nedojde ke kvalitnímu spoji. Také jako u předchozího lepidla je potřeba, aby hrany nevyčnívaly. Nevýhoda tohoto lepidla je, že po zaschnutí je velice těžko opracovatelné a velmi obtížně se okolí čistí.
- Aceton+ABS – z pozorování se lépe rozpouští bílé ABS v acetonu než černé. ABS v černé barvě zanechává i na černých vzorcích stopy po směsi. Nutné je namíchat směs ve správném poměru. Směs je dobré mít přikrytou, protože aceton se postupně odpařuje. Také je směs vhodné jednou za čas odkrýt kvůli úniku plynů. Nanáší se snadno. Spoj rychle schne a již po hodině až dvou lze vzorky manipulovat. Velikou výhodou je, že není nutné plochu před samotným lepením nijak upravovat. Spoj se vytvoří rozleptáním obou povrchů, nerovnosti i hrany se vzájemným spojením ztratí.

4.1.3 Dle lepicího procesu

- Tahová zkouška na vzorku s tupým čelním spojem – u tohoto vzorku bylo nejjednodušší lepení směsí acetonu a ABS. Všechna dvousložková lepidla byla přibližně na stejné úrovni pohodlnosti lepení a bylo možné s nimi manipulovat po přibližně stejné době.
- Tahová zkouška na vzorku se zkoseným spojem – při lepení acetonem s ABS nebyl větší problém. U lepidla PATTEX Repair Epoxy byla poloha stabilní po delší době než u obou lepidel firmy BISON. Nejlépe pro tuto konstrukci vyšla směs acetonu s ABS.
- Tahová zkouška na vzorku stupňovitě přeloženým spojem – spoj velmi dobře přilne a drží ve všech směrech. Toto bylo u všech třech druhů lepidel, jelikož konstrukce sama o sobě zajišťuje správnou polohu.
- Vzorek s V vrubem na rázovou zkoušku – lepení pomocí BISON Power Adhesive nebylo ideální, protože má dlouhou dobu schnutí. Vhodnější byla epoxidová lepidla od BISON a PATTEX, která schnou po kratší dobu. Se směsí acetonu a ABS proběhlo lepení bez problému.

4.1.4 Dle kvality spoje

- Tahová zkouška na vzorku s tupým čelním spojem – první lepidlo mělo hodnoty s velkým rozptylem a malé zatěžovací síly. Druhé a třetí, epoxidové, dosáhly lepších výsledků. Druhé mělo odchylky, ale třetí velmi stabilní hodnoty. Čtvrté lepidlo dosáhlo nejvyšších výsledků. Pro tento typ spoje je vhodné lepidlo C, jelikož mělo vysoké a stabilní hodnoty namáhání. Lepidlo D je pro použití vhodnější. První 3 lepidla byla porušena kohezně nebo adhezně v lepidle a čtvrté lepidlo kohezně v materiálu i v lepidle.
- Tahová zkouška na vzorku se zkoseným spojem – zde u všech těchto lepidel byl podobný rozptyl hodnot. Tento typ spoje dosáhl nejvyšších hodnot u všech lepidel. Tato konstrukce se jeví jako nejvhodnější pro lepení. Lepidlo A, B a C měly lomy v lepidle, lepidlo D hlavně v materiálu a praskalo přibližně ve třetině lepené plochy vzorku. Nejvhodnější lepidla jsou zde dvousložkové lepidlo B a lepidlo D.
- Tahová zkouška na vzorku se stupňovitě přeloženým spojem – u této konstrukce vyšly nejhorší výsledky s velkým rozptylem u lepidla A, které je nejméně vhodné pro lepení. Obě epoxidová lepidla B a C dosáhla velmi stabilních hodnot s malým rozptylem, a navíc velmi podobných. Obě jsou vhodná pro lepení konstrukce tohoto typu. Lepidlo D dosáhlo nižších

hodnot než stejné lepidlo u zkoseného spoje. Spoj praskal hlavně v materiálu, a to v nejužší části. V podélném směru spoj vydržel a prasknul na příčném.

- Vzorek s V vrubem na rázovou zkoušku – jeden ze vzorků se zde vychýlil a po přezkoumání bylo vidět, že lepidlo zasáhlo do vrubu. To mohlo způsobit větší odolnost a odchylku. U posledního lepidla byly také podobné hodnoty, ale dva vzorky dosáhly hodnot vyšších. To bylo způsobeno tím, že při naleptání došlo ke kvalitnějšímu spojení ploch bez bubliny a spojila se celá plocha. Tím bylo dosaženo vyšší hodnoty než u retenčního a při správně aplikaci lze tento spoj doporučit.

4.2 Ekonomické zhodnocení

V následujícím ekonomickém zhodnocení proběhne pohled na cenu materiálu při 3D tisku, spotřebovaného lepidla na každou konstrukci a náročnost na zpracování po tisku před lepením.

V tab. 20 jsou uvedeny hmotnosti spotřebovaného materiálu, jeho cena a tiskový čas na jednotlivé vzorky.

Tab. 20 Cena tištěných dílů a časová náročnost.

Cena tištěných dílů a časová náročnost			
	Spotřebovaný materiál [g]	Cena spotřebovaného materiálu [Kč]	Tiskový čas [min]
Referenční vzorky	34,08	10,70	185
Tupý čelní spoj	118,16	37,00	639
Zešíkmený spoj	119,2	37,30	645
Stupňovitě přeložený spoj	119,2	37,30	667
Tyčinka s V vrubem	53,19	2,747	315

Časová náročnost na výrobu vzorků byla nejkratší pro tupý čelní spoj a nejdéle zabral čas na výrobu stupňovitě přeloženého spoje. Rozdíl ovšem nebyl tak velký, aby to ovlivnilo volbu kvalitnější spoje na úkor času. Spotřebovaný materiál u všech vzorků byl téměř stejný. Z toho vyplývá, že neproběhne ušetření na úkor volby kvalitnějšího spoje.

Zjištění spotřeby lepidla proběhlo na základě zvážení tuby s lepidlem před a po lepení. Z tohoto byly zjištěny hodnoty uvedeny v tab. 21. Z cen lepidel proběhl přepočít na jednotlivé spoje a konstrukce.

Tab. 21 Spotřebované množství lepidel a jejich cena.

Spotřebované množství lepidel a jejich cena				
	Tupý čelní spoj	Zkosený spoj	Stupňovitě přeložený spoj	Tyčinka s V vrubem
Lepidlo A [g]	0,504	1,0	1,0	0,7
[Kč]	1,6	3,1	3,1	2,1
Lepidlo B [g]	0,414	0,8	0,8	0,6
[Kč]	2,6	3,1	5,1	3,4
Lepidlo C [g]	2,937	0,9	0,9	0,6
[Kč]	3,0	5,1	5,9	4,0
Lepidlo D [Kč]	0,08	0,8	0,8	0,53

Z výše uvedené tabulky (tab. 21) lze vidět hmotnosti a náklady spotřebovaných lepidel na jednotlivé konstrukce vzorků. Nejvýhodněji vychází lepidlo D, kde jsou náklady minimální a s rostoucím počtem vzorků se nezvyšují tolik. U epoxidových lepidel jsou náklady vyšší než u polyuretanového.

Z pohledu operací nezbytných pro umožnění a dokončení lepení požadovalo nejméně úprav lepení lepidlem D. Vzhledem k tomu, že se plochy rozleptaly a následně slily dohromady, mohly být plochy trochu nerovné. Samotné lepidlo schnulo nejkratší dobu a lze s ním po chvíli manipulovat. Tím ho lze hodnotit jako nejekonomičtější. U zbylých lepidel bylo nutné případně nerovnosti srovnat. Pokud vyčnívaly hrany, bylo nutné je zbrousit, aby plochy doléhaly. Také bylo potřeba plochy očistit a odmastit. Tím byl proces dražší na materiál i na práci. Epoxidová měla kratší dobu schnutí, tím byla vhodnější než polyuretanové. To bylo z hlediska schnutí nejméně ekonomické, protože zabíralo přípravku po velmi dlouhou dobu.

5 ZÁVĚRY

Cílem diplomové práce bylo navrhnout vhodný způsob spojování pro tištěné díly z ABS plastu na FDM 3D tiskárně. Způsobem spojování bylo zvoleno lepení. S tím souvisel vhodný návrh zkoušek. Aby bylo možné zkoušky provést, bylo nutné navrhnout konstrukce pro jednotlivě zkoušky a následně lepidla. Byla zvolena tahová a rázová zkouška.

3D tisk proběhl na tiskárně ENDER 3 PRO a jako materiál vzorků byl zvolen ABS od firmy Gembird v černé barvě. Konstrukce pro lepení byly zvoleny pro tahovou zkoušku ve variantách tupého čelního spoje, zkoseného spoje a stupňovitě přeplátovaného spoje v celkové délce 120 mm a průřezu vzorku 60 mm². Lepené plochy byly pro tupý čelní spoj 60 mm², pro zkosený 120 mm² a pro stupňovitě přeplátovaný 120 mm². Pro tahovou zkoušku byl navrhnut vzorek s rozměry 55x10x10 mm s V vrubem. Pro každou konstrukci a lepidlo bylo slepeno 5 vzorků. Na tahovou zkoušku bylo 60 kusů vzorků ve třech konstrukčních variantách a čtyřech lepidlech. Lepidla byla zvolena čtyři, a to BISON Power Adhesive, BISON Epoxy Universal, PATTEX Repair Epoxy 5 min. a směs acetonu s ABS.

Průměrná dosažená hodnota referenčních vzorků byla 1743 N, což odpovídá 29 MPa. Pro tupý čelní spoj byly hodnoty prvního lepidla 265 N – 4,4 MPa, pro druhé 687 N – 11,4 MPa, pro třetí 885 N – 14,7 MPa a pro poslední 1268 N – 21,1 MPa. Tento druh spoje byl ze všech tří nejméně kvalitní a hodnoty měly velké rozptyly. Nejvhodnější je lepidlo D. Zde byl spoj kvalitní pevnostně i pohledově. Z komerčních lepidlo C, které mělo vysoké a stabilní hodnoty.

Dosažené hodnoty zkoseného spoje byly pro první lepidlo 813 N, pro druhé 1175 N, pro třetí 1026 N a pro čtvrté 1725 N. Zde u všech těchto lepidel byl podobný rozptyl hodnot. Tento typ spoje dosáhl nejvyšších hodnot u všech lepidel. Hodnoty zde nebyly stabilní, ovšem velmi vysoké. Tato konstrukce se jeví jako nejvhodnější pro lepení. Nejvhodnější lepidla jsou zde dvousložkové lepidlo B a lepidlo D.

Hodnoty třetí konstrukce pro tahovou zkoušku byly u prvního lepidla 390 N, pro druhé 852 N, pro třetí 888 N a pro čtvrté 1191 N. Nejvyšší rozptyl mělo lepidlo A. Je nejméně vhodné pro lepení. Lepidla A a B měly velmi malý rozptyl a téměř stejné hodnoty a jsou tedy vhodná. Lepidlo D mělo větší rozptyl než epoxidová, ale nejvyšší hodnotu. Lze doporučit pro lepení.

Nejhorších hodnot dosáhl spoj tupý. Stupňovitě přeložený spoj lze doporučit při větší ploše, aby nedocházelo k trhání materiálů. Zde se velmi dobře zajišťovala poloha. Jako nejvhodnější spoj se jeví spoj zkosený, jelikož dosáhl nejvyšší hodnot. Ovšem hůře se zajišťovala stabilní poloha při lepení. Avšak i přes to ho lze nejvíce doporučit.

U vzorků na rázovou zkoušku vyšly hodnoty pro referenční vzorky 1,537 J·cm⁻², pro lepidlo A 0,245 J·cm⁻², pro lepidlo B 0,54 J·cm⁻², pro lepidlo C 0,265 J·cm⁻² a pro lepidlo D 1,313 J·cm⁻². U vzorků se vyskytly odchylky, které byly pravděpodobně způsobené zasáhnutím lepidla do vrubu. Lepidla A, B, C jsou pro toto namáhání nevhodná. Lepidlo D je při správném postupu pevnější, než spoj tištěný z jednoho dílu. Je to způsobeno tím, že jsou plochy v místě namáhání celistvé a zvýší se odolnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [44]

1. BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.
2. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. *Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
3. CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. *Computer-Aided Manufacturing*. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.
4. CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
5. PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
6. *Materialpro3D* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
7. *PRUSAPRINTERS BLOG* [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/>
8. *HOSPODÁŘSKÉ NOVINY* [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://ictrevue.ihned.cz/>
9. *Toner partner* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>
10. *Gembird* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://gmb-online.nl/egmb/ProductSheet.aspx?id=8835&lang=1>
11. *Alza* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/creality-ender-3-pro-3d-printer-d5522742.htm>
12. PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980, 792 s.
13. *Technické laboratoře Opava* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.tlo.cz/>
14. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>
15. *Lepidla* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/>
16. *COTU* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/>
17. *Tiefziehen* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/>
18. BRIŠ, Petr, Jiří KUBĚNA a Jan ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada publishing, 2017, 144 s. ISBN 978-80-271-9260-1.

19. *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20%20LEAR.pdf
20. *KSP TUL* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
21. *UST FME VUTBR* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf
22. *Lepidla online* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.lepidla-online.cz/>
23. *Základy teorie lepení* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4987396-Zaklady-teorie-lepeni.html>
24. *ČESKÉSTAVBY* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/>
25. *3M* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.3mcesko.cz/>
26. AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. © Code Creator, s.r.o.: distribuce publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-77-9.
27. OČADLÍK, Zdeněk. *Návrh a testování lepených spojů u modulu tramvaje* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/71i9oz/>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.
28. *SubsTech* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <http://www.substech.com/>
29. *ELUC* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/>
30. *Chemikalie* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
31. *SPSTRPLZ* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/tah/stroj1.jpg
32. *Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~lic098/files/10.cviceni_VZM.pdf
33. *TESTSYSTEME* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/iso-527-2-stanoveni-tahovych-vlastnosti-tvarenych-plastu>
34. *MFF CUNI* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
35. *3Dtisk-online* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/>
36. *BISON* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.bison-lepidla.cz/>
37. *Pattex* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.pattex.cz/>
38. *Matterhackers* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/news/>

39. *Levné 3D Tiskárny* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.levne3dtiskarny.cz/>
40. *E-konstrukter* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
41. *ÚFMI FT UTB* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
42. *Tempos* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje-bazar>
43. *Limetech* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.limetech.cz/trhaci-stroj-zd-10-9/2452>
44. *Citace PRO* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Plocha přeplátovaného spoje	[mm ²]
a _{ch}	Šířka zkušebního vzorku pro rázovou zkoušku	[mm]
a _r	Šířka zkušebního vzorku pro spoj tupý čelní	[mm]
a _p	Šířka zkušebního vzorku pro spoj stupňovitě přeložený	[mm]
a _z	Šířka zkušebního vzorku pro spoj zešikmený	[mm]
b _l	Šířka přeplátovaného spoje	[mm]
b _{ch}	Výška zkušebního vzorku pro rázovou zkoušku	[mm]
b _v	Výška zkušebního vzorku	[MPa]
G	Tíha kladiva	[MPa]
h	Výškový rozdíl počáteční a koncové polohy kladiva	[m]
KU	Spotřebovaná nárazová práce	[J]
l	Délka přeplátovaného spoje	[mm]
n	Počet vzorků	[-]
s	Směrodatná odchylka	[mm]
S _{ch}	Lepená plocha vzorku pro rázovou zkoušku	[mm ²]
S _r	Lepená plocha vzorku pro spoj s tupým čelním spojem	[mm ²]
S _p	Lepená plocha vzorku pro spoj stupňovitě přeložený	[mm ²]
S _z	Lepená plocha vzorku pro spoj zešikmený	[mm ²]
x	Průměrná hodnota	[-]
σ ²	Rozptyl	[-]
τ	Pevnost v tahu	[MPa]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technický list lepidla BISON Power Adhesive [36]

Příloha 2 Technický list lepidla BISON Epoxy Universal [36]

Příloha 3 Technický list lepidla PATTEX Repair Epoxy 5 min. [37]

Příloha 1 Technický list lepidla BISON Power Adhesive [36]

0505494 - BISON POWER ADHESIVE CARD 65 ML MULTILANGUAGE

POWER ADHESIVE BISONITE

UNIVERSAL POLYURETHANE ADHESIVE FOR THE MOST DIFFICULT JOINTS.



PRODUCT DESCRIPTION

Universal dual-component polyurethane adhesive, for the most difficult joints.

FIELD OF APPLICATION

Bonds many materials where other adhesives fail, such as metal, iron, stainless steel, aluminium, zinc, concrete, stone, marble, ceramic wall and floor tiles, wood, glass, rubber and many synthetics. Especially suitable for adhesive bonding of synthetics material with other materials. Not suitable for bonding Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), PTFE and silicone.

PROPERTIES

- For the toughest connections
- (Sea)water resistant
- Cold and heat resistant between -30°C and +100°C
- Strength 180 kg/cm²

PREPARATION

Working conditions: Do not apply at temperatures below +5°C. The wood moisture content should not exceed 18%.

Personal safety: It is recommended that rubber or plastic gloves are worn.

Surface requirements: The surface must be clean, dry, free of dust and grease.

Preliminary surface treatment: If necessary, degrease with Bison Degreaser or acetone. With smooth surfaces light sanding provides a stronger bond.

Tools: Enclosed spatula

APPLICATION

Dilute: May not be diluted.

Mixture ratio: 1 part hardener to 4 parts resin

Coverage: 0.15 m² - 0.30 m²/65 ml, depending on the substrate and whether

the materials to be bonded are coated completely or dot-wise.

Directions for use:

The adhesive consists of two components: Resin and hardener. Press gently out both tubes two equally long lines of product. This way you get exactly the correct mixture ratio of resin and hardener (4 vol. parts resin to 1 vol. part hardener). Mix both components thoroughly with the supplied spatula into a mass of homogeneous color. The adhesive mix, depending on the temperature and the nature of the material, remains workable for about 15 minutes. Apply the adhesive mixture on one side of the substrate or the materials to be bonded, join the parts and keep them firmly in place (preferably clamp or support). Remove excess adhesive immediately with a cloth.

Potlife: 15 minutes

Stains/residue: Remove adhesive residue immediately with acetone. Dry adhesive residue can only be removed mechanically.

Advice: Some types of synthetics can not be joined such as polyethylene and polypropylene. This can be tested by holding a glowing copper wire against the synthetics. Does it smell of wax? Then you can not bond it.

Use a piece of adhesive tape in order to keep the parts in place while the adhesive is curing.

CURE TIMES

Handling time: approx. 1 hour

Full bond strength: Full bond strength after approx. 48 hours

* Curing time may vary depending on a.o. surface, product quantity used, humidity level and ambient temperature.

TECHNICAL PROPERTIES

Water resistance: Very good

Temperature resistance: -30°C to +100°C

UV resistance: Very good

Chemicals resistance: Very good

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Chemical base: Resin: polyol, hardener: isocyanate

Colour: Beige (mixture)

Viscosity: Thixotropic

Solid contents: approx. 100 %

Density: approx. 1.4 g/cm³

Final bond strength: approx. 1800 N/cm²

STORAGE CONDITIONS

Minimum 24 months if stored in properly sealed packaging in a dry place at a temperature between +10°C and +20°C. Close packaging well after use. The individual components may not come in contact with each other or with water. Store dry in sealed packaging between +10°C and +20°C.

Příloha 2 Technický list lepidla BISON Epoxy Universal [36]

6305438 - BISON EPOXY UNIVERSAL CARD 24 ML MULTI LANGUAGE

EPOXY UNIVERSAL

UNIVERSAL, STRONG, TWO-PART EPOXY ADHESIVE



PRODUCT DESCRIPTION

Universal, strong, two-part epoxy adhesive.

FIELD OF APPLICATION

Ideal for repairs to metals, pottery, porcelain, crystal, glass, ivory, pearls, precious stones and numerous synthetics (such as polyester, bakelite, Formica, rigid polystyrene and acrylic glass (Perspex®)). Not suitable for Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), P.T.F.E. and silicone rubber.

PROPERTIES

- Strong
- Temperature resistant from -50°C to +80°C
- Filling
- Water resistant
- Chemicals resistant
- Paintable

PREPARATION

Working conditions: Use only at temperatures between 5°C and +35°C.

Product cures after mixing resin and hardener.

Personal safety: Preferably wear gloves during use.

Surface requirements: Materials to be bonded should be dry, clean and free of grease.

Preliminary surface treatment: Degrease parts to be bonded with Bison Thinner for Bison Kit or acetone. Roughen up smooth materials (sand paper).

Tools: Mix and apply with plastic spatula. Clean tools with warm water and soap directly after use.

APPLICATION

Mixture ratio: 1:1

Coverage: 24 ml = approx. 240cm² (coat of 1mm)

Directions for use:

Remove spatula from side of double syringe and cap from handle. Break safety seal of double syringe. Dispense equal quantities of both parts into enclosed mixing tray. Stir well using enclosed spatula until mixture has a uniform colour. At room temperature (+20°C), mixture remains workable for approx. 1,5 hours. Apply a thin layer to one surface. Join immediately and hold in place for 7 hours. Do not move bonded parts until after complete cure. After use, clean nozzles with a cloth and place special double cap from handle on double syringe. Do not mix resin and hardener unless for bonding.

Potlife: 1,5 hours.

Stains/residue: Remove fresh stains immediately with warm water and soap. Cured adhesive residue can only be removed mechanically.

CURE TIMES

Handling time: approx. 7 hours.

Dry/Cure time: approx. 24 hours. Curing takes longer at lower temperatures, and shorter at higher temperatures

* Curing time may vary depending on a.o. surface, product quantity used, humidity level and ambient temperature.

TECHNICAL PROPERTIES

Moisture resistance: Good

Temperature resistance: -20°C to + 60°C

Chemicals resistance: Good

Paintability: Good

Filling capacity: Good

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Chemical base: Resin: epoxy resin. Hardener: modified amide

Colour: Light yellow

Viscosity: Liquid

Solid contents: approx. 100 %

Density: approx. 1.15 g/cm³

STORAGE CONDITIONS

At least 24 months after date of manufacture. Limited shelf life after opening. Store in a dry, cool and frost-free place.

Příloha 3 Technický list lepidla PATTEX Repair Epoxy 5 min. [37]



TECHNICKÝ LIST

Pattex Repair Epoxy Ultra Strong 5 min Dvousložkové epoxidové lepidlo

VLASTNOSTI

- univerzální využití
- vytvrzuje již do 5 minut
- odolné proti vodě, oleji a běžným rozpouštědélům
- při vytvrzování se nesmrštuje ani nerozpíná
- po vytvrzení lze přetírat, brousit, vrtat či jinak mechanicky upravovat
- jednoduchá aplikace pomocí směšovače
- ideální na sklo

OBLASTI POUŽITÍ

Pattex Repair Epoxy Ultra Strong 5 min je dvouložkové epoxidové lepidlo bez těkavých rozpouštědel, univerzálně využitelné. Určené k lepení, opravám a fixaci téměř všech materiálů: dřevo, kov, sklo, keramika, guma, kámen, beton, mramor a většina plastů. Nedoporučuje se k lepení PP, PE, PTFE (Teflon®) a polystyrénu.

PŘÍPRAVA PLOCHY

Lepené povrchy musí být suché, čisté a zbavené mastnoty. Pokud je to možné, lepené povrchy před lepením zdrsňte.

ZPRACOVÁNÍ

Vydejte z obalu uzavírací ochranný kryt. Stříkačku s lepidlem držte tak, aby tryska směřovala nahoru. Odlomte bezpečnostní uzávěr na špičce stříkačky. Nasadte a zašroubujte směšovač až na doraz. Při stlačení stříkačky se obě složky ve směšovači důkladně promíchají. Poměr míchání složek A a B je 1:1. Naneste lepidlo na jeden z lepených povrchů. Obě lepené plochy k sobě pevně přitiskněte. Přebytečné lepidlo ihned odstraňte pomocí čistého líhu. Po aplikaci odšroubujte směšovač, dříve než lepidlo uvnitř vytvrdne. Špičku stříkačky otřete hadříkem. Nasadte ochranný kryt. Stříkačku skladujte v původním obalu.

NEPŘEHLEDMĚTE

Ihned po použití lze odstranit zbytky lepidla pomocí etanolu či jiného univerzálního rozpouštědla. Po vytvrzení lze lepidlo odstranit pouze mechanicky. Po vytvrzení nespotebovaného obsahu odložte na místo určené obcí k ukládání odpadu. Malé množství lze přidat do domovního odpadu. Prázdné obaly předejte k recyklaci. Velké množství likvidujte odděleně. Více informací naleznete v bezpečnostním listu produktu.

První pomoc: Při kontaktu s pokožkou omyjte vodou a mýdlem, ošetřete regeneračním krémem. Při vniknutí do očí vyplachujte pod tekoucí vodou cca 15 minut a vyhledejte lékaře. Při požití vypláchněte ústní dutinu, vypijte 1-2 sklenice vody a vyhledejte lékaře. Při nadýchání dopravte postiženého mimo kontaminované prostředí a poradte se s lékařem.



BALENÍ

Stříkačka: 11 ml

SKLADOVÁNÍ

36 měsíců od data výroby při skladování v originálním uzavřeném balení. Chraňte před teplotami nižšími než +10 °C a vyššími než +30 °C.

TECHNICKÉ ÚDAJE

Báze	epoxidová pryskyřice	
Barva	transparentní	
Hustota	1,10 - 1,18 g/cm ³ (složka A)	
	1,00 - 1,10 g/cm ³ (složka B)	
Teplotná odolnost*	od -30 °C do +150 °C	
Otevřená doba	max. 3 minuty po smísení složek	
Doba vytvrzení	5 min (při +20 °C až +25 °C)	
Možnost manipulace	po 5 min	
Možnost namáhání spoje	po 6 hod.	
Konečná pevnost	po 24 hod.	
Konečná síla	cca 130 kg/cm ²	
	složka A	složka B
Obsah TOC	0,77 kg/kg	0,49 kg/kg
Obsah VOC	0,10 kg/kg	0,15 kg/kg

*Vysoc namáhané lepené díly by neměly být vystavovány teplotám vyšším než +70 °C.

