



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LEPENÍ PET-G 3D TIŠTĚNÝCH DÍLŮ

BONDING OF 3D PRINTED PET-G PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Maxa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Ondřej Maxa
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Lepení PET–G 3D tištěných dílů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešerši problematiky možností lepení PET–G tištěných dílů. Následně navrhne a zvolí vhodné metody a materiály které podrobí experimentům. Výsledkem je doporučení materiálů vhodných pro různé typy PET–G lepených tištěných dílů včetně technicko ekonomického zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky
- volba testovaných materiálů
- návrh experimentu
- vyhodnocení experimentu
- technicko ekonomické zhodnocení a doporučení autora

Seznam doporučené literatury:

SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.

HABENICHT, Gerd. Applied Adhesive Bonding: A practical guide for flawless result. 4. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2006. ISBN 978-3-527-32014-1.

EBNESAJJAD, Sina a Cyrus F. EBNESAJJAD. Surface treatment of materials for adhesion bonding. Norwich, NY, U.S.A.: William Andrew Pub., c2006. ISBN 08-155-1523-5.

TROUGHTON, Michael John. Handbook of plastics joining: a practical guide. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce řeší problematiku lepení materiálu PET-G, který se využívá pro tisk 3D modelů v 3D tiskárnách. Cílem práce je vybrat a následně otestovat lepidla vhodná pro lepení uvedeného materiálu. Vhodnost doporučených lepidel byla stanovena na základě normovaných zkoušek na experimentálním trhacím zařízení. Na základě výsledků měření je vhodné využít k lepení materiálu PET-G jednosložková sekundová lepidla, jejichž výhodou je snadná manipulace a rychle dosažitelná manipulační pevnost.

KLÍČOVÁ SLOVA:

adheze, koheze, lepidla, lepený spoj, PET-G, tah, smyk

ABSTRACT

This bachelor thesis solves the problem of gluing PET-G material, which is used for printing 3D models in 3D printers. The goal is to select and then test the adhesive suitable for bonding the material. The suitability of the recommended adhesives was determined on the basis of standardized tests on experimental blasting equipment. Based on the measurement results, it is suitable to use one-component instant adhesives for gluing PET-G material, the advantage of which is easy handling and quickly achievable handling strength.

KEYWORDS:

adhesion, cohesion, adhesives, glued joint, PET-G, tensile, shear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAXA, Ondřej. *Lepení PET-G 3D tištěných dílů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124706>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto formou poděkoval panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D za jeho odborné vedení a cenné rady v průběhu vypracování této bakalářské práce. Dále chci poděkovat celé své rodině za podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci *Lepení PET-G 3D tištěných dílů* jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Oskara Zemčíka, Ph.D. Zároveň také prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů

V dne 24.6.2020

.....

Podpis

OBSAH

Obsah	9
Úvod	10
1 Technologická podstata lepení	11
1.1 Adheze	11
1.2 Smáčivost.....	12
1.3 Koheze	13
1.4 Vytvrzování lepidel	13
1.5 Úpravy lepených ploch termoplastu	15
1.6 Čištění	16
1.7 Poruchy lepených spojů	16
2 Materiál PET-G	18
3 Zkoušky lepených spojů.....	20
3.1 Smyková pevnost v tahu	20
3.2 Zkouška pevnosti na odlupování	20
3.3 Zkouška stárnutí lepených spojů	21
4 Experimentální část	23
4.1 Popis experimentu.....	23
4.2 Naměřené hodnoty	25
4.3 Vyhodnocení měření a technicko-ekonomické shrnutí	34
Závěr	36
Seznam použitých zdrojů.....	37
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	39

ÚVOD

Lepení je technologický proces, při kterém se tvoří nerozebíratelný spoj dvou stejných nebo různorodých materiálů za použití vybraného lepidla. Lepení materiálů se uplatňuje napříč všemi odvětvími strojírenství. Z tohoto důvodu je v dnešní době tato technologie velmi těžce nahraditelná a stává se stále více využívanou technologií. Jednou z největších výhod lepeného spoje patří skutečnost, že lepidlo tepelně neovlivňuje základový materiál. Lepený spoj se vyznačuje nízkou hmotností oproti konvenčním technologiím spojování materiálů.

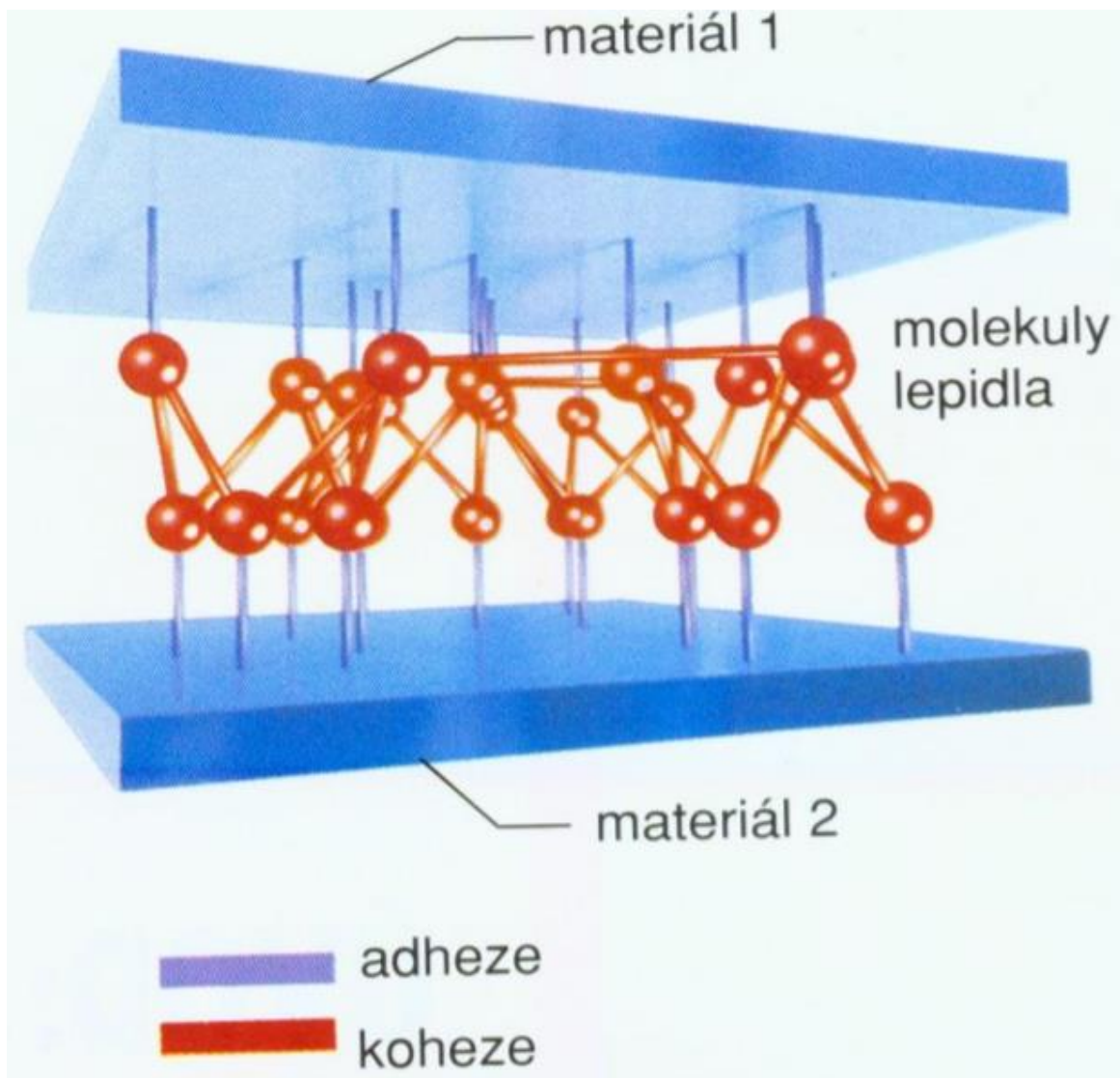
3D tisk je technologie, která se stává stále více rozšířenou, a to nejen v různých odvětvích průmyslu, ale vzhledem ke stále větší cenové dostupnosti také i mezi domácími uživateli. 3D tisk se obecně využívá nejen výrobu prototypů ale i finálních výrobků. Jednou z nejvíce rozšířených technologií 3D tisku je technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Právě na tomto druhu technologie 3D tisku je jedním z nejvíce oblíbených a využívaných materiálů pro tisk PET-G (Polyethylentereftalát – glykol).

Právě tento materiál je vhodný pro tisk velkých dílů. Má velké využití ve strojním průmyslu ale i potravinářském průmyslu. Jeho přední vlastností je chemická odolnost, z tohoto důvodu je tento materiál poměrně těžké lepit, popřípadě chemický ošetřit před aplikací lepidla.

Z důvodů obtížného vytvoření lepeného spoje v případě materiálu PET-G je cílem této práce najít vhodné lepidlo pro spojování uvedeného typu materiálu. Lepené spoje se následně budou testovat na experimentálním trhacím zařízení, přesněji zatížení v tahu a zatížení ve smyku. Z takto získaných výsledků lze posoudit vhodnost konkrétního lepidla pro lepení materiálu PET-G.

1 TECHNOLOGICKÁ PODSTATA LEPENÍ

Lepení je technologický proces, při kterém se tvoří nerozebíratelný pevný odolný spoj dvou stejných nebo různorodých materiálů za použití zvoleného adheziva (lepidla), viz Obr. 1. Teorie lepení je založena na teorii adheze, koheze a podporou existence Van der Waalsových sil. Pevnost lepeného spoje určují tyto základní parametry: adheze, smáčivost a koheze. Tento druh spoje lze nahradit například svařením. [1,2]



Obr. 1 Schéma principu lepení [1].

1.1 Adheze

Adheze neboli přilnavost je předpokladem pro lepení a existují dvě varianty vazeb mezi lepidlem a lepeným povrchem: Mechanická vazba a Chemická vazba.

V případě mechanické vazby dochází k adhezi při pronikání lepidla do pórů, dutin a jiných povrchových nepravidlostí povrchu. Pevnost adhezivní vazby záleží na povrchu materiálu, která vyplývá z vzájemného mechanického propojení. Lepidla často přilnou lépe k obrušovaným povrchům než k hladkým, jelikož u hladkých a leštěných povrchů je mechanická vazba zcela zanedbatelná.

Chemická vazba adheze je tvořena působením chemických sil. Obecně existují následující čtyři typy interakcí, které se vyskytují během chemické vazby [1]:

- Kovalentní,
- Vodíkové,
- Van der Waalsonovy síly,
- interakce kyselina-báze.

Vodíkové, kovalentní a vytvořené mezi lepidlem a přilnavostí jsou silnější než mechanické vazby tvořené povrchem materiálu. Přesný typ vazby záleží na chemickém složení lepidla. [1,3]

1.2 Smáčivost

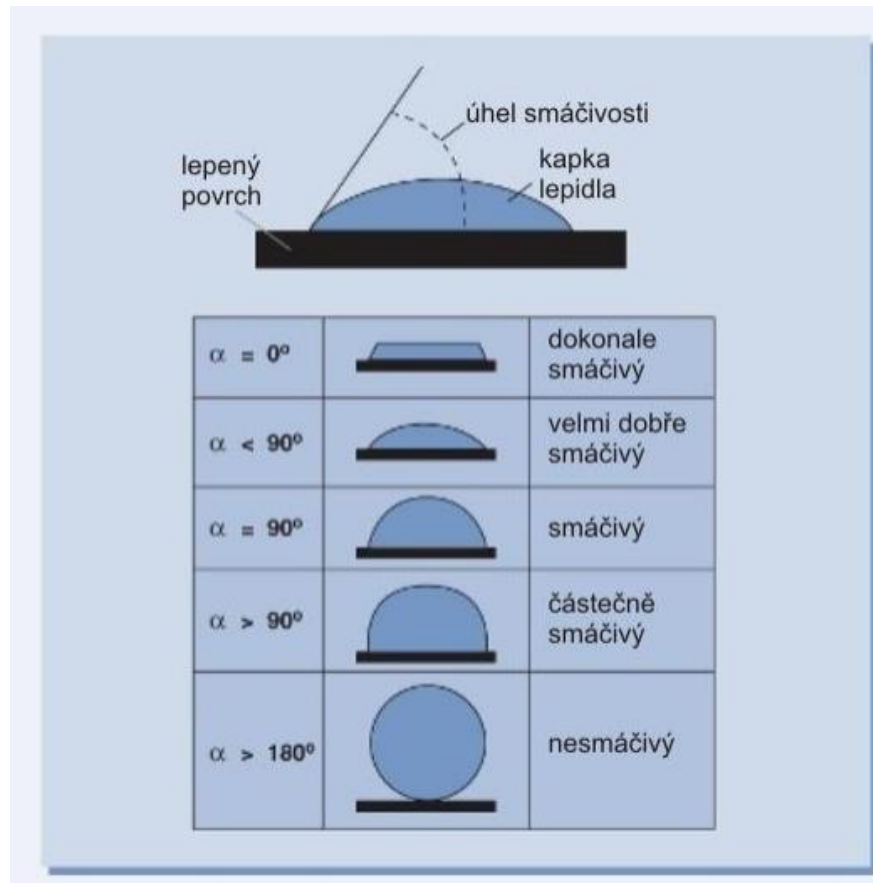
Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných látek a souvisí s povrchovou energií látek, kterou lze vyjádřit jako povrchové napětí, viz. Tab. 1. Podmínkou smáčivosti tuhého materiálu lepidlem je, že povrchové napětí kapaliny musí být nižší než povrchové napětí tuhého povrchu – potom dojde k rozlití kapaliny po povrchu. Díky přitažlivým silám (mezi molekulami uvnitř) mají tekutiny tendenci přijímat tvary, které minimalizují jejich povrchovou texturu. Pokud je povrchové napětí lepidla příliš vysoké bude tvořit kulatou kapičku na přilnavé ploše.

Tab. 1 Povrchové napětí látek [1].

Typ látky	Materiál	Povrchové napětí [$\text{nM}\cdot\text{m}^{-1}$]
Polární látky	Celulóza	>70
	Železo	2030
	PVC	42
Nepolární látky	Polyetylen	25
	Polypropylen	31
	Silikon	<20
	Teflon	<20
Kapaliny	Vody	73
	Voda+ saponát	24-40
	Toluen	28
	Ěthanol	23

Dobrá smáčivost bude dosažena v případě, pokud kontaktní úhel mezi podkladem a lepidlem bude menší než 60° , naopak velmi špatná smáčivost bude při velikosti kontaktního úhlu větší než 90° , viz. Obr. 2. níže.

Zatímco povrchové napětí je dané materiálem a chemickým složením, použitím vhodných předpřípravných technik lze špatnou smáčivost kompenzovat. [1,3,4]



Obr. 2 Smáčivost lepidel – úhel smáčivosti [1].

1.3 Koheze

Koheze vyjadřuje vlastní pevnost lepidla. Pevnost lepidla by měla být větší než pevnost adheze a pevnost lepeného materiálu. Tyto soudržné síly působí na všechny pevné a kapalné látky a čím silnější tyto soudržné síly jsou, tím je pevnost daného spoje vyšší. Nesprávné směšovací poměry složek nebo přimíchané vzduchové bubliny mohou mít na vytvořený lepený spoj rušivé negativní účinky. Takové další negativní ovlivnění kohezní vazby může být důsledkem nedodržení požadované doby vytvrzování lepidla, charakterem použitého lepidla nebo tepelným namáháním lepeného spoje. [1,5]

1.4 Vytvrzování lepidel

Lepidla, které jsou v běžné praxi využívána se aplikují zejména v kapalném stavu. K jejich tuhnutí/vytvrzování dochází za pomoci chemických reakcí. Vytvrzování nesmíme zaměnit s vysoušením – vysoušení je fyzikální reakce. Vytvrzování lze rozdělit do následujících skupin a na základě nich lze aplikovat vhodné lepidlo.

Anaerobní reakce

Jedná se o jednosložková lepidla, u kterých dojde k vytvrzení při pokojových teplotách (kolem 22 °C) bez přístupu atmosférického vzduchu. K zabránění přístupu vzduchu dojde při spojení materiálu a až poté se složka vytvrzení stává aktivní. K rychlému vytvrzení dochází při lepení kovových materiálů. Obecně lze materiály rozdělit na aktivní a pasivní.

U aktivních materiálů (např. mosaz, ocel, bronz, měď) dochází k běžnému anaerobnímu vytvrzování, jelikož aktivní materiál slouží jako katalyzátor.

U pasivních materiálů (např. nikl, cín, korozivzdorná ocel, plastické hmoty, keramické materiály) je katalytický účinek velmi slabý nebo žádný. Čas vytvrzování byl velmi dlouhý a proto lze použít tzv. aktivátory, které zrychlí proces vytvrzení. Aktivátor můžeme nanést na jednu nebo obě lepené plochy a poté nanášíme lepidlo.

Vlastnosti lepidel vytvrzené anaerobní reakcí [5]:

- vysoká pevnost ve smyku,
- tepelná odolnost od -55 °C do 230 °C,
- krátká doba vytvrzení,
- těsní s vysokou chemickou odolností,
- dobrá odolnost proti vibracím,
- dobrá odolnost proti dynamickému namáhání.

Faktory ovlivňující rychlost vytvrzení [5]:

- lepený materiál,
- tloušťka vrstvy lepidla,
- teplota,
- aktivátor.

Vytvrzování ultrafialovým zářením

Na rychlost vytvrzení skupiny lepidel má zásadní vliv intenzita a vlnová délka ultrafialového záření. Při shodě mezi lepidlem a expozicí ozářením nastává polymerace.

Vytvrzování ultrafialovým zářením lze dělit do tří skupin [5]:

- povrchové vytvrzování ultrafialovým zářením,
- hluboké vytvrzování ultrafialovým zářením,
- sekundární vytvrzování ultrafialovým zářením.

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných ultrafialovým zářením [5]:

- vysoká pevnost,
- schopnost lepit velké spáry,
- krátká doba vytvrzení na manipulační pevnost.

Vytvrzování aniontovou reakcí

Jedná se o takzvané kyanoakryláty, které polymerují se slabě alkalickými povrchy. Pro vytvrzení adhezivní vrstvy stačí okolní vlhkost vzduchu, kdy ideálním podmínkám odpovídá vlhkost 40—60 % při pokojové teplotě. Čím nižší je vlhkost vzduchu tím se prodlužuje rychlost vytvrzování a naopak při vysoké vlhkosti se rychlost vytvrzování zkracuje, ale v důsledku může dojít ke zhoršení pevnosti spoje.

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných aniontovou reakcí [4]:

- vysoká pevnost ve smyku a tahu,
- krátká doba vytvrzení (řádově vteřiny),
- univerzální lepidla,
- dobrá odolnost proti stárnutí.

Lepidla vytvrzovaná aktivátory

Po smíchání lepidla a aktivátoru dochází k vytvrzení spoje. Tato reakce probíhá za pokojové teploty. Pro smíchání aktivátoru a lepidla lze využít dva způsoby:

- a) Lepidlo a aktivátor se nanáší každý na jeden z povrchů lepených materiálů tak, aby se nepromíchaly. Ke smíchání dochází až po spojení a tím začne vytvrzení.
- b) Lepidlo a aktivátor smíchá před nanesením na lepený materiál.

V případě lepidla s aktivátorem hovoříme o dvousložkových lepidlech, které lze využít v případě, že nelze aplikovat kapalný aktivátor. U dvousložkových lepidlech má aktivátor stejnou konzistenci jako lepidlo a k vytvrzení dochází po spojení obou lepených povrchu, kdy se obě složky navzájem promíchají.

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných aktivátory [5]:

- vysoká pevnost ve smyku a tahu,
- vysoká houževnatost,
- dobře vyplňuje spáru.

Lepidla vytvrzovaná okolní vlhkostí

Tento způsob vytvrzování dělíme na podskupiny silikony a polyuretany.

Silikony – využívají molekuly vody k polymerickému zesílení. Vlhkost musí vniknout až do místa vytvrzení, pak během reakce vnikne molekula vody mezi zesílené molekuly silikonu a začne se uvolňovat vedlejší produkt. Tento produkt může být v závislosti na chemii vytvrzování kyselý (kyselina octová), neutrální (oxin nebo alkohol) nebo zásaditý (amin). Výhodou této podskupiny je vyšší odolnost než 230 °C, pružnost, houževnatost a vysoké prodloužení v tahu.

Polyuretany – jejich vytvrzování spočívá v reakci vody s chemickou přísadou, která obsahuje izokyanátové skupiny. U této podskupiny nedochází ke vzniku vedlejšího produktu. Výhodou polyuretanů je vynikající houževnatost, vyplnění spáry a vysoká chemická odolnost. [3,4,5]

1.5 Úpravy lepených ploch termoplastu

Důležitý a hlavní rozdíl mezi kovy a plasty je jejich povrchová energie. Za předpokladu, že plast neobsahuje nečistoty, tak má nižší povrchovou energii než kov. Z tohoto důvodu má polymer tendenci špatně tvořit adhezivní vazby, proto obvykle požadují fyzickou, chemickou nebo hromadnou metodu zpracování ke zvýšení adheze. Chemická úprava nejčastěji zahrnuje leptání za mokra, oxidaci vyvolanou kyselinou nebo plazmovou polymeraci. Fyzické ošetření zahrnuje iontový nebo elektronový paprsek, plazmový výboj nebo oxidaci plamenem. Hromadné metody

zahrnují přísady, míchání nebo rekrystalizaci, které ovlivňují objemové vlastnosti plastů.

Změny, ke kterým dochází na povrchu plastů použitím metody ošetření povrchu jsou výsledkem čtyř procesů [3]:

- čištění,
- odtavování,
- zesíťení,
- povrchové chemické modifikace.

Ke zvýšení povrchové energie plastu dochází povrchovou oxidací polymerních řetězců. Obecně můžeme povrchové úpravy chápat jako přenos energie na povrch plastů.[3]

1.6 Čištění

Jedná se o odstranění přilnavých povrchů adhezivních pevných vrstev, jako jsou nečistoty. Materiál by měl být před aplikací lepidla nejprve odmaštěn čistícím prostředkem a poté důkladně opláchnut čistou vodou a vysušen. Čistící prostředek může být nahrazen rozpouštědlem. Mezi účinná a vhodná rozpouštědla řadíme aceton, methanol, a to v závislosti na typu plastu. Odpor plastu musíme brát v úvahu při výběru rozpouštědla proto, aby se zabránilo rozpouštění nebo degradaci materiálu vlivem čištění. Chemické čištění není nutné pokud se například použije ošetření povrchu plazmou. [3,5]

1.7 Poruchy lepených spojů

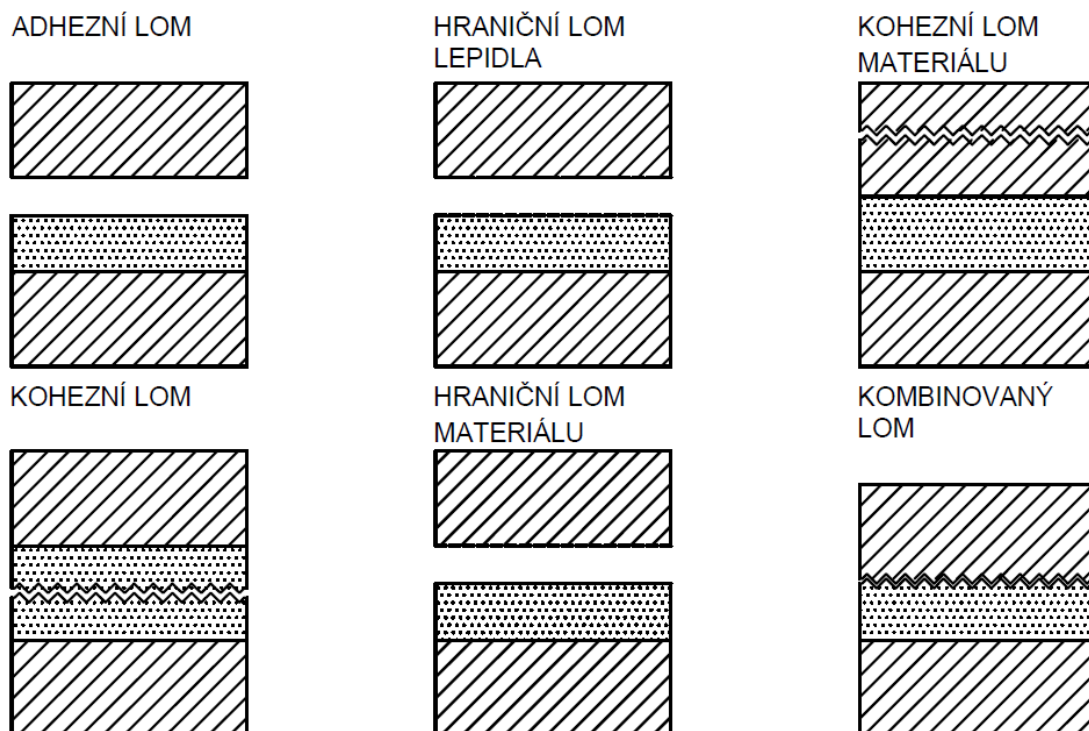
Pokud nebudeme dodržovat přesné instrukce výrobce lepidla (návod, předpis) je možný výskyt poruch lepených spojů, viz. Obr. 3. Do základních poruch lepených spojů zahrnujeme následující situace [5]:

- nedojde k potřebnému vytvrzení,
- nebyly dodrženy předepsané vrstvy,
- nedojde k přilnutí lepidla,
- bylo zvoleno nesprávné lepidlo.

Uvedené poruchy lepených spojů mají nejčastěji za následek částečné, nebo úplné porušení lepeného spoje. Pokud k porušení spoje dojde v oblasti adheze – jedná se o adhezní zlom; pokud k porušení spoje dojde v oblasti koheze – jedná se o kohezní zlom.

Adhezní lom rozeznáme na základě zbytků lepidla nebo může dojít až k úplnému oddělení lepidla od spojovaného materiálu.

Ke koheznímu lomu dochází ve vrstvě lepidla a tento lom dělíme na křehký a houževnatý lom. Ke křehkému lomu může docházet při vzrůstající rychlosti zatěžování. Elastický modul je náchylnost ke křehkému lomu, která je ovlivněna snižující se teplotou. Houževnatý lom je ovlivněn změkčením vnitřní a vnější lepené vrstvy. [5]



Obr. 3 Poruchy lepených spojů podle [6].

2 MATERIÁL PET-G

PET-G je zkratka pro polyethyltereftalát-glykol. Jedná se o termoplastický polyester, který má přednosti zejména v chemické odolnosti vůči kyselinám a rozpouštědlům, odolnosti vůči vysokým i nízkým teplotám, tvrdosti a rázová houževnatosti.

PET-G je čistý polyethyltereftalát (PET), který je během výrobního procesu modifikovaný glykolem. Tato modifikace přibližuje zpracovatelské vlastnosti čistého PET blíže požadovaným vlastnostem tisku, mezi které řadíme nižší teplotu a snížení krystalizace. Glykol také snižuje viskozitu PET a zejména tato charakteristika podporuje tisk materiálu a má přímý vliv na kvalitu tisku. Mezi nevýhody PET naopak řadíme vysokou absorpci vlhkosti, která se projevuje při tavení filamentu (vlákno na cívce pro tisk na 3D tiskárně), kdy dochází k odpařování vody, která následně přetrhává polymerní řetězce v materiálu, a to následně způsobuje jeho křehkost. Tento jev lze však odstranit vysoušením například v troubě.

PET-G je jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk, viz. Obr. 4, a má velmi malé smrštění při tisku a je také vhodný pro tisk větších součástí. Vzhledem k vlastnostem, viz. Tab. 2, a zejména vysoké pevnosti je vhodný pro tisk strojních součástí. Během 3D tisku je doporučováno využívat vyhřívanou podložku s teplotou 40–80 °C a teplotou tisku 220–250 °C pro průměr filamentu 1,75 mm. Tyto teploty v určitém intervalu stanovuje výrobce daného materiálu, z tohoto důvodu není obecně filament jednoduché využívat pro 3D tisk, protože je velmi obtížné nalezení optimální kombinace zmíněných teplot a odpovídající rychlosti tisku.

Tab. 2 Vlastnosti PET-G [8].

Vlastnosti	PET-G	Jednotka
Modul pružnosti	1,9	GPa
Pevnost v tahu	53	MPa
Pevnost v ohybu	64	MPa
Poměr pevnosti k hmotnosti	42	kN·m/kg

Mezi jednou z nevýhod během 3D tisku je stringování neboli tahání tenkých vláken tiskovou hlavou 3D tiskárny při změně směru tisku. Tuto chybu lze odstranit například snížením teploty extruderu (ohřívač filamentu v 3D tiskárně). Mezi další nevýhody PET-G řadíme větší náchylnost k poškrábání než u PET a také může docházet ke zhoršení mechanických vlastností vlivem UV světla. PET-G však není zdravotně závadný ani není toxický a lze jej proto využít jako obalový materiál a dále lze tento materiál využít i pro vodotěsné výtisky vzhledem k velmi dobrému spojování vrstev. Mnoho výrobců 3D tiskáren také proto využívá právě PET-G při tisku většiny plastových dílů samotných 3D tiskáren.



Obr. 4 Ukázka 3D tištěného dílu [9].

PET-G je materiál vhodný pro mnoho dalších náročných aplikací například ražení, ohýbání, tvarování a 3D tažení. Obecně jej lze využívat pro výrobu prototypů nebo maket, ortopedických pomůcek a krytů. [7-11]

U FDM 3D tisku je objem modelu tvořen jednotlivými vrstvami. Tyto vrstvy jsou na sebe nanášené v jednom směru, popřípadě ve více směrech a to v úhlu od 0° do 90° . Tento úhel je definován jako úhel, který svírají vlákna s delší hranou tělesa. Orientace vrstev, ve kterých se nejčastěji tiskne jsou s úhlem 0° , 45° , 90° . Toto vrstevní materiálu během 3D tisku má zásadní vliv na pevnost tištěného dílu. Rozeznáváme následující typy vrstevní [12,13,14]:

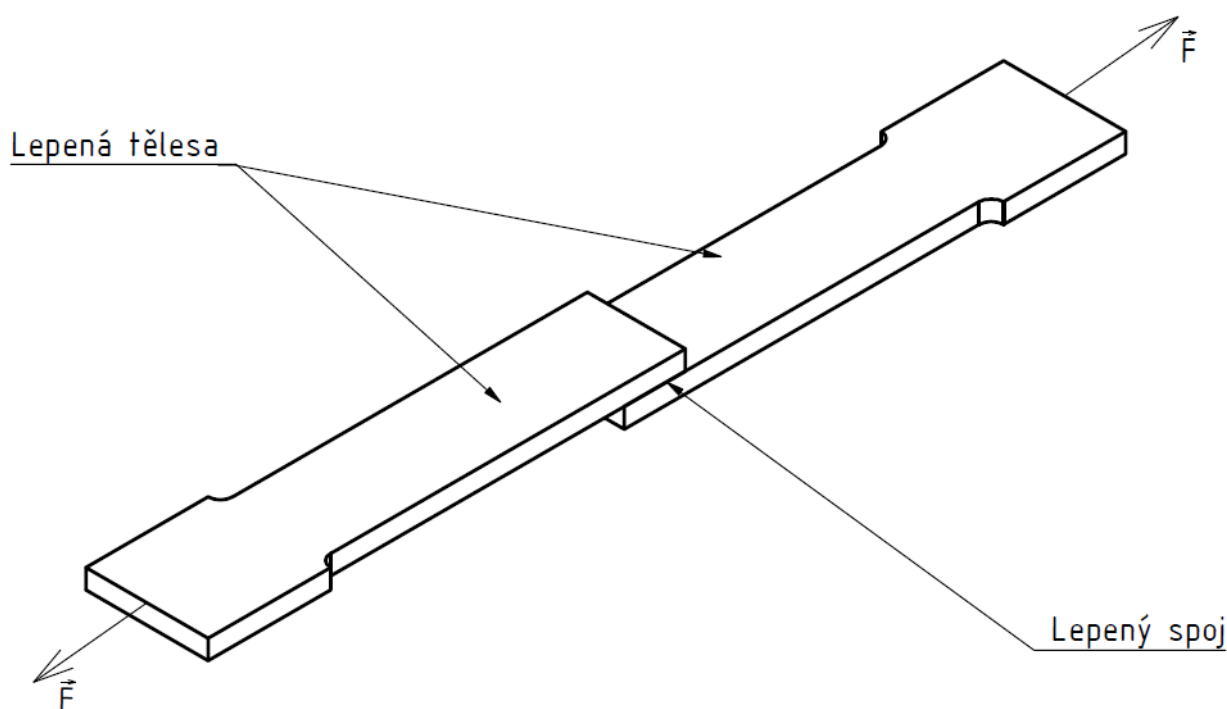
- s nižším úhlem – u tohoto vrstvení zabírá vlákno filamentu větší část objemu a nevznikají tak nevyplněné prostory. Tímto jsou jednotlivé vrstvy pevnější,
- s vyšším úhlem – u tohoto vrstvení je zabírá vlákno filamentu menší část objemu a vznikají tak nevyplněné prostory. Tímto jsou jednotlivé vrstvy slabší,
- s kombinovaným úhlem – lze kombinovat úhly $0^\circ/90^\circ$ a $+45^\circ/-45^\circ$ u tohoto vrstvení vlákna mají velmi husté rozmístění. Tímto způsobem se vlákna překrývají ve dvou směrech a zaplňují prázdná místa.

3 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

Pro praktické využití lepidel je nezbytné provést testování pevnosti lepených spojů v různých zatíženích. V následujících odstavcích jsou popsány vybrané zkoušky lepených spojů. Včetně odkazů na příslušnou normu, která danou zkoušku stanovuje.

3.1 Smyková pevnost v tahu

Zkouška spadá pod normu ČSN EN 1465, která principiálně stanovuje smykové namáhání pomocí dvou překrývajících se tuhých adheziv zatížených tahovým napětím. Toto napětí vede ke stříhovému zatížení adhezivního spoje. Výsledkem zkoušky je minimální síla potřebná k úplnému oddělení slepených dílů, viz. Obr 5.

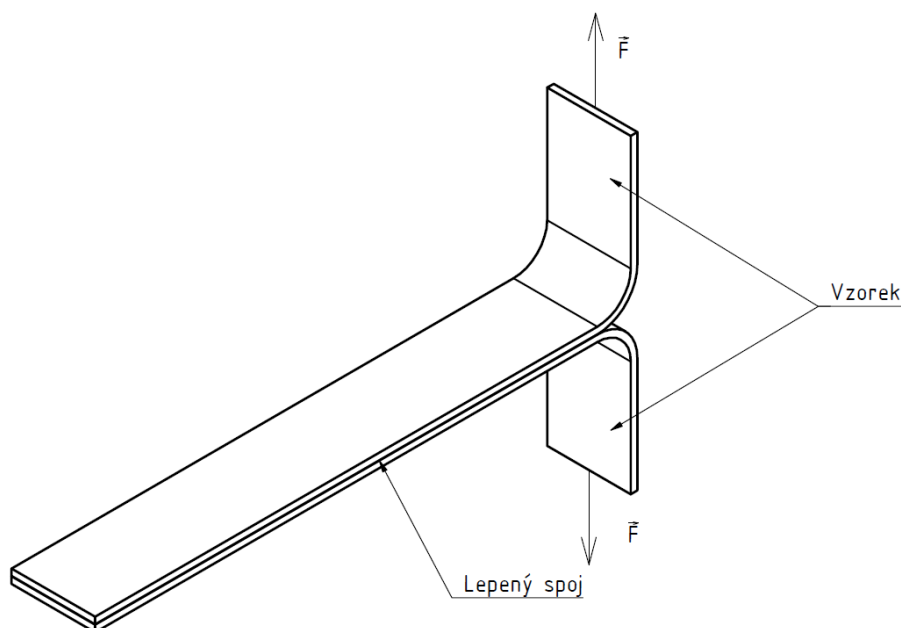


Obr. 5 Princip zatížení na smyk [15].

Během zkoušky je těleso upnuto v čelistích, které jsou umístěny symetricky v jedné rovině, stejným směrem působí síla. Doporučená délka překrytí je 12,5 mm. Zkušební těleso se zatěžuje konstantní rychlostí, až do přerušení spoje. Rychlost zatěžování by měla být volena tak, aby se lepený spoj přetrh po 65 sekundách. Trhací stroje ve většině případech tuto hodnotu vyhodnotí automaticky na základě nastavených hodnot a mezi tyto hodnoty lze zařadit plochu lepeného spoje, tloušťku materiálu, čas potřebný k přetržení zkušební vzorku a rychlost zatěžování. [15]

3.2 Zkouška pevnosti na odlupování

Zkouška spadá pod normu ČSN EN 11339. Tato zkouška zahrnuje pružné materiály, které se dají ohnout o libovolný úhel až 90° bez porušení a praskání. Principem zkoušky je působení tahového namáhání kolmo na lepený spoj. Rychlost zatěžování se pohybuje od 100 mm/min do 10 mm/min, kdy 100 mm/min se doporučuje pro kovové materiály a 10 mm/min pro ostatní materiály.



Obr. 6 Princip trhací zkoušky a měření zatížení na odlupování [16].

Předtím než se vzorky slepí se musí ohnout stejně jako, viz. Obr. 6. Následně se rovnoměrně aplikuje lepidlo a lepený spoj rovnoměrně zatížíme tak, aby vrstva lepidla byla konstatní po celé délce. Po vytvrzení lepidel se takto připravená lepidla upevní do čelistí trhacího stroje, kdy výsledkem zkoušky je síla, potřebná k přerušení lepeného spoje nebo přetržení zkoušeného vzorku. [16]

3.3 Zkouška stárnutí lepených spojů

Při výběru vhodného lepidla musíme také brát v úvahu změnu vlastností lepeného spoje vlivem času. Z tohoto důvodu vznikla norma ČSN EN 9142, která stanovuje laboratorní podmínky stárnutí. Dosažené výsledky, které získáme na základě postupů, nelze přímo využít pro určení životnosti spoje.

Zkoušku lze provést v následujících zařízeních [17]:

- klimatizační komora,
- sušárna,
- vlhkostní komora,
- chladicí komora,
- regulovaná tlaková komora.

Typ zkušebních vzorků záleží na měřených vlastnostech. Před začátkem zkušebních testů je potřeba vzorky kondicionovat v klimatizační komoře minimálně po dobu 24 hodin. Pro průběh zkoušky musíme volit podmínky tak, abychom se co nejvíce přiblížili reálnému způsobu zatěžování.

Příkladem může být cyklické stárnutí a způsoby cyklů [17]:

- cyklus zahřátí a vlhkost,
- cyklus zahřátí, ochlazení (teplotní šok) a vlhkost,

- cyklus zahřátí ochlazení a vlhkost,
- střídavé ponořování do vody a osušování,
- ponoření do vařící vody a osoušení.

Výše uvedené cykly mají dále předepsané cykly výdrže na jednotlivých teplotách, popřípadě v jednotlivých komorách. [17]

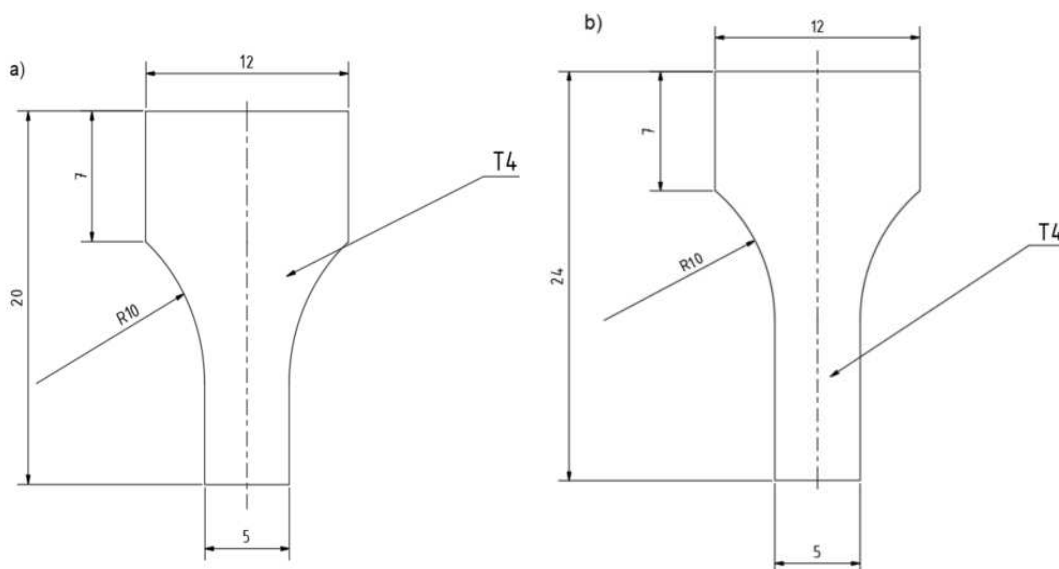
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části jsem se zaměřil na druhy lepidel, které by měly a mohly být vhodné pro lepení plastů. Tyto lepidla jsem následně otestoval v pevnosti lepeného spoje na smyk a v pevnosti lepeného spoje v tahu.

4.1 Popis experimentu

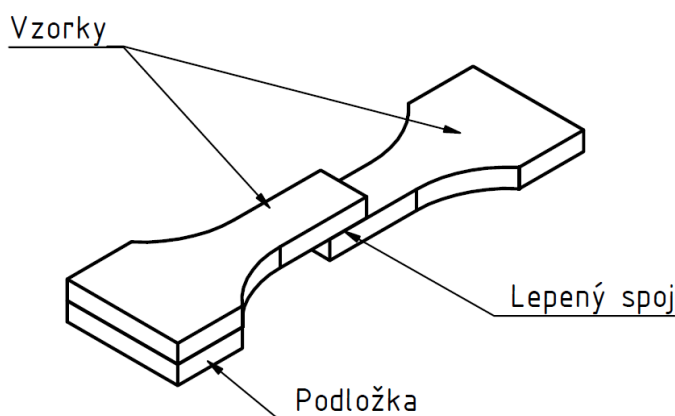
Vycházíme z teorie, že lepidlo se nanáší přímo na povrch materiálu PET-G a to bez jeho předešlé povrchové úpravy, kterou může být například lakování, barvení a podobně. V popsaném experimentu byl vybrán materiál PET-G od distributora ProWiDEr černé barvy. Vzorky jsou rozděleny na 2 skupiny, viz. Obr. 7:

- pro zatížení na tah,
- pro zatížení na smyk.



Obr. 7 Popis vzorků: a) zatížení tah, b) zatížení na smyk.

Vzorky pro zatížení na smyk byli vypodloženy podložkou a to z důvodu silového zatížení v rovině, viz. Obr. 8.



Obr. 8 Způsob uložení vzorku pro zatížení na smyk.

Spojované vzorky byly vždy odmaštěny za pomoci přípravku Novato Soltech A – jedná se o odmašťovač na bázi isopropylalkoholu. Dále byl pro lepidla od firmy Novato využit jejich aktivátor povrchu zvaný Novafix – Aktivátor.

Využitá lepidla od jmenované firmy Novato:

- Novax – jedná se o jednosložkové nízkoviskózní sekundové lepidlo na bázi ethylkyanoakrylátu s parametry, viz. Tab. 3. Charakteristikou tohoto lepidla je manipulační pevnost dosažena během několika sekund, k úplnému vytvrzení dochází přibližně po 6 hodinách od nanesení. Jedná se o bezbarvé lepidlo. [14]

Tab. 3 Parametry lepidla Novax [18].

Bod vzplanutí	>87 °C
Nejnižší teplota	-50 °C
Teplota měknutí	171 °C

- Novatit – jedná se o dvousložkové lepidlo, kde bázi tvoří metylmetakrylátová hmota s parametry, viz. Tab. 4. Charakteristikou tohoto lepidla je získaná manipulační pevnost přibližně po 20 minutách, k úplnému vytvrzení dochází přibližně po 6 hodinách od nanesení. Směs vytváří nažloutlý gel. [19]

Tab. 4 Parametry lepidla Novatit [19].

Bod vzplanutí	11 °C
Nejnižší teplota	-40 °C
Teplota měknutí	180 °C

- Novafix – jedná se o dvousložkové polyuretanové lepidlo s parametry, viz. Tab. 5. Charakteristikou tohoto lepidla je získaná manipulační pevnost do 5 minut, k úplnému vytvrzení dochází do 48 hodin od nanesení lepidla. Barva lepidla je černá. [20]

Tab. 5 Parametry lepidla Novafix [20].

Bod vzplanutí	>150 °C
Nejnižší teplota	-400 °C
Teplota měknutí	150 °C

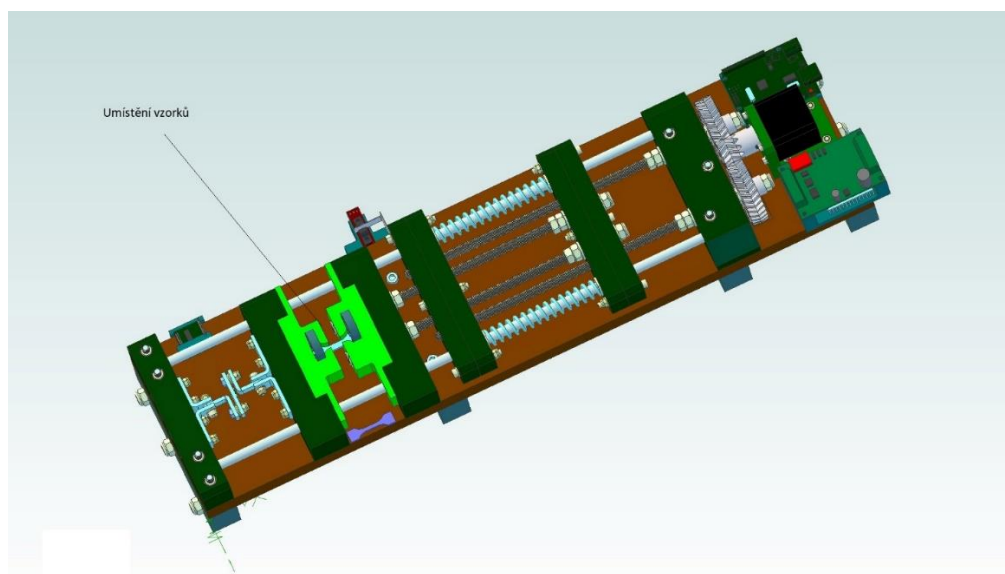
Dále jsem využíval lepidlo od firmy Loctite – konkrétně Loctite 406. Před použitím tohoto lepidla jsem použil odmašťovač Novato Soltech A. Následně jsem povrch aktivoval za pomoci aktivátoru Loctite 707 na bázi kyanoakrylátu. Loctite 406 je jednosložkové nízkoviskózní sekundové lepidlo na bázi kyanoakrylátu s parametry, viz. Tab. 6. Manipulační pevnost daného lepidla je do několika sekund, k úplnému vytvrzení dochází přibližně po 6 hodinách od nanesení. Jedná se o bezbarvé lepidlo. [21]

Tab. 6 Parametry lepidla Loctite 406 [21].

Bod vzplanutí	Neuvedeno
Nejnižší teplota	-40 °C
Teplota měknutí	120 °C

Po slepení zkušebních vzorků a ke ztuhnutí lepidla docházelo při pokojové teplotě (23 °C) nejméně 48 hodin. Zkušební vzorky byly následně testovány na experimentálním trhacím zařízením, viz. Obr. 9.

Toto trhací zařízení mělo omezenou trhací sílu do 500 N a poměrně malou velikost vzorku. Mezi menší nevýhodou zařízení bylo, že neumožňovalo vykreslení průběhu zatížení, ale pouze zaznamenávalo maximální zatěžovací sílu. V rámci experimentu bylo použito toto trhací zařízení z důvodu možnosti využít speciálně zhotovené upínací formy, do které se vzorek pouze vložil, což jiné trhací zařízení neumožňuje a testovaný vzorek by se upínal mezi dvě čelisti trhacího zařízení. Zvolené trhací zařízení považuji za dostatečně vhodné k provedení experimentu a jeho následné vyhodnocení.



Obr. 9 Experimentální trhací zařízení.

4.2 Naměřené hodnoty

Výsledky naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulkách, viz. Tab. 7—10, jsem rozdělil do dvou skupin lomu a to na Hraniční lom materiálu, popřípadě na Kohezní lom materiálu a na Hraniční lom lepidla, popřípadě na Kohezní lom lepidla, viz. Obr. 10—13.

Lepidlo Loctite 406/707

Tab. 7 Výsledky měření pro lepidlo Loctite 406/707.

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
1	153,7	7,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	102,0	5,1	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
2	221,7	11,1	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	130,0	6,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
3	32,0	1,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	117,7	5,9	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
4	31,5	1,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	290,7	14,5	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
5	184,2	9,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	152,8	7,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
6	70,6	3,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	108,9	5,4	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
7	165,1	8,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	162,1	8,1	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
8	220,7	11,0	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	130,0	6,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
9	173,0	8,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	151,1	7,6	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
10	206,7	10,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	120	6,0	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
\bar{x}	145,9	7,3		146,5	7,3	

Výpočet pro zatížení tah

$$S_t = a \cdot b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1)$$

Kde: S_t – plocha lepeného spoje tah [mm²]

a – výška vzorku [mm]

b – šířka vzorku [mm]

$$\tau_t = \frac{F}{S_t} [MPa] \quad (2)$$

Kde: F – silové zatížení [N]

S_t – plocha lepeného spoje tah [mm^2]

τ_t – pevnost v tahu [MPa]

Výpočet pevnosti ve smyku

$$S_s = a \cdot b [mm^2] \quad (3)$$

Kde: S_s – plocha přeplátování smyk [mm^2]

a – délka přeplátování [mm]

b – šířka vzorku [mm]

$$\tau_s = \frac{F}{S_s} [MPa] \quad (4)$$

Kde: F – silové zatížení [N]

S_s – plocha přeplátování smyk [mm^2]

τ_s – pevnost ve smyku [MPa]

Výpočet aritmetického průměru

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

Kde: x_i – hodnoty měření

n – počet hodnot

\bar{x} – aritmetický průměr

Vzorový výpočet pro zatížení na základě hodnot v prvním řádku Tab. 7.

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 4 \cdot 5 = 20 \text{ mm}^2$$

Kde: S_t – plocha lepeného spoje [mm^2]

a – výška vzorku [mm]

b – šířka vzorku [mm]

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$
$$\tau_t = \frac{153,7}{20} = 7,7 \text{ MPa}$$

Kde: F – silové zatížení [N]
 S_t – plocha lepeného spoje [mm^2]
 τ_t – pevnost v tahu [MPa]

$$S_s = a \cdot b$$
$$S_s = 4 \cdot 5 = 20 \text{ mm}^2$$

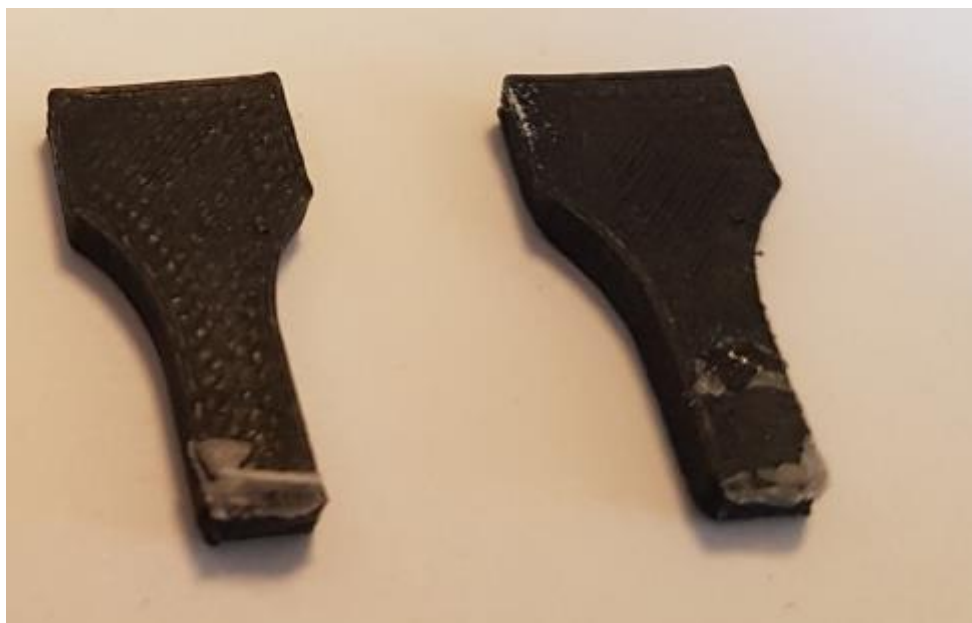
Kde: S_s – plocha přeplátování smyk [mm^2]
 a – délka přeplátování [mm]
 b – šířka vzorku [mm]

$$\tau_s = \frac{F}{S_s}$$
$$\tau_s = \frac{102}{20} = 5,1 \text{ MPa}$$

Kde: F – silové zatížení [N]
 S_s – plocha přeplátování [mm^2]
 τ_s – pevnost ve smyku [MPa]

Vzorový výpočet průměru pro první sloupec

$$\bar{x} = \frac{\sum_n^1 x_i}{n}$$
$$\bar{x} = \frac{153,7 + 221,7 + 32 + 31,5 + 184,2 + 70,6 + 165,1 + 220,7 + 173 + 206,7 + 145,92}{10}$$
$$= 145,9 \text{ N}$$



Obr. 10 Vzorky po zatížení na smyk s hraničním lomem lepidla Loctite.

Lepidlo Novafix

Tab. 8 Výsledky měření pro lepidlo Novafix.

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
1	16,0	0,8	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	0,0	0,0	Zmetek
2	24,0	1,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	57,3	2,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
3	0,0	0,0	Zmetek	0,0	0,0	Zmetek
4	0,0	0,0	Zmetek	136,1	6,8	Hraniční lom materiálu a kohezní lom materiálu
5	15,0	0,8	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	0,0	0,0	Zmetek
6	3,0	0,2	Zmetek	0,0	0,0	Zmetek
7	43,0	2,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	50,0	2,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
8	5,0	0,3	Zmetek	33,0	1,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
9	0,0	0,0	Zmetek	122,0	6,1	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
10	0,0	0,0	Zmetek	0,0	0,0	Zmetek
\bar{X}	10,6	0,5		39,8	2,0	

Vzorový výpočet pro zatížení na základě hodnot v prvním řádku Tab. 8.

Plocha S_t byla vypočtena vztahem (1)

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{16}{20} = 0,8 \text{ MPa}$$

Plocha S_s byla vypočtena vztahem (3)

$$\tau_s = \frac{F}{S_s}$$

$$\tau_s = \frac{0}{20} = 0 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet průměru pro první sloupec

$$\bar{x} = \frac{\sum_n^1 x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{16 + 24 + 0 + 0 + 15 + 3 + 43 + 5 + 0 + 0}{10} = 10,6 \text{ N}$$



Obr. 11 Vzorky po zatížení na smyk, kde nedošlo ke slepení lepidlem Novafix.

Lepidlo Novax

Tab. 9 Výsledky měření pro lepidlo Novax.

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
1	161,8	8,1	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	316,0	15,8	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
2	198,3	9,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	283,1	14,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
3	170,6	8,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	150,8	7,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
4	119,6	6,0	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	325,8	16,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
5	140,0	7,0	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	305,6	15,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
6	255,1	12,8	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	273,5	13,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
7	284,1	14,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	250,1	12,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
8	44,4	2,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	309,5	15,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
9	153,4	7,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	254,7	12,7	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
10	168,0	8,4	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	267,3	13,4	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
\bar{x}	169,5	8,5		273,6	13,7	

Vzorový výpočet pro zatížení na základě hodnot v prvním řádku Tab. 9.

Plocha S_t byla vypočtena vztahem (1)

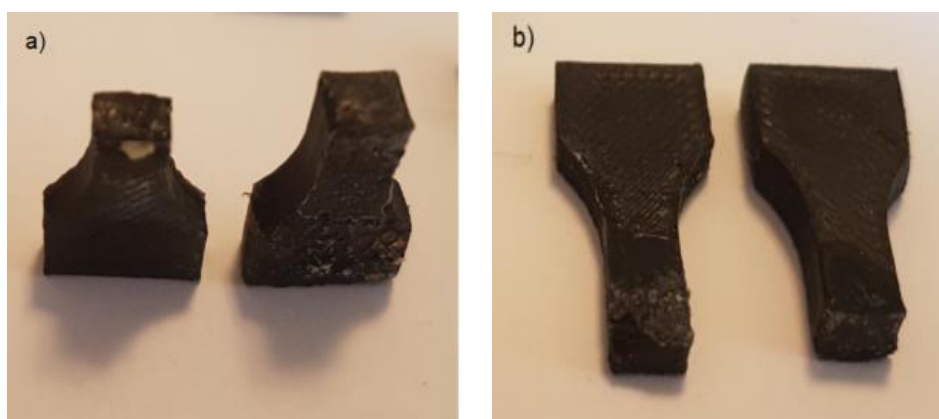
$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$
$$\tau_t = \frac{161,8}{20} = 8,1 \text{ MPa}$$

Plocha S_s byla vypočtena vztahem (3)

$$\tau_s = \frac{F}{S_s}$$
$$\tau_s = \frac{316}{20} = 15,8 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet průměru pro první sloupec

$$\bar{x} = \frac{\sum_n^1 x_i}{n}$$
$$\bar{x} = \frac{161,8 + 198,3 + 170,6 + 119,6 + 140 + 255,1 + 284,1 + 44,4 + 153,4 + 168}{10}$$
$$= 169,5 \text{ N}$$



Obr. 12 Vzorky a) po zatížení na tah s hraničním lomem lepidla Novax, b) po zatížení na smyk s hraničním lomem lepidla Novax.

Lepidlo Novatit

Tab. 10 Výsledky měření pro lepidlo Novatit.

Počet měření	Zatížení tah [N]	Zatížení tah [MPa]	Druh lomu	Zatížení smyk [N]	Zatížení smyk [MPa]	Druh lomu
1	161,8	10,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	316,0	9,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
2	198,3	4,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	283,1	8,8	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
3	170,6	4,4	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	150,8	14,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
4	119,6	4,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	325,8	8,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
5	140,0	7,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	305,6	4,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
6	255,1	5,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	273,5	13,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
7	284,1	7,2	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	250,1	10,1	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
8	44,4	3,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	309,5	9,5	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
9	153,4	2,9	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	254,7	18,0	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
10	168,0	6,3	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla	267,3	10,6	Hraniční lom lepidla a kohezní lom lepidla
\bar{x}	116,2	5,8		215,8	10,8	

Vzorový výpočet pro zatížení na základě hodnot v prvním řádku Tab. 10.

Plocha S_t byla vypočtena vztahem (1)

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{217,8}{20} = 10,9 \text{ MPa}$$

Plocha S_s byla vypočtena vztahem (3)

$$\tau_s = \frac{F}{S_s}$$

$$\tau_s = \frac{192,6}{20} = 9,6 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet průměru pro první sloupec

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{217,8 + 97 + 88 + 84 + 151 + 117,5 + 143,2 + 78,4 + 58,9 + 126,5}{10} = 116,2 \text{ N}$$



Obr. 13 Vzorky po zatížení na tah s lomem lepidla Novatit.

4.3 Vyhodnocení měření a technicko-ekonomické shrnutí

Celkově byla testována čtyři následující lepidla: Loctite 406, Novafix, Novax a Novatit s následujícími výsledky.

Lepidlo Loctite 406

- Průměrná pevnost pro zatížení na tah 7,3 MPa jednalo se spíše o adhezivní lom lepidla.
- Průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 7,3 MPa s kombinovanými lomy.

Lepidlo Novafix

- Průměrná pevnost pro zatížení na tah 0,5 MPa jednalo se spíše o hraniční lom lepidla.
- Průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 2,0 MPa jednalo se spíše o hraniční lom lepidla.

Hodnoty ukazují, že toto lepidlo je zcela nevhodné pro lepení PET-G. Jednalo se převážně o zmetky, popřípadě docházelo k lomu již při malém zatížení.

Lepidlo Novax

- Průměrná pevnost pro zatížení na tah 8,5 MPa jednoznačně převažoval adhezivní lom lepidla.
- Průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 13,7 MPa a také jednoznačně převažuje adhezivní lom lepidla.

Lepidlo Novatit

- Průměrná pevnost pro zatížení na tah 5,1 MPa s hraničním lomem lepidla.
- Průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 10,8 MPa také s hraničním lomem lepidla.

Obecně se potvrdil předpoklad, že při zatížení na tah bude dosaženo nižší pevnosti oproti zatížení ve smyku. U některých vzorků lepidel docházelo k lomu již při relativně nízkém zatížení, jak ukazují výsledky. Tyto odchylky byly pravděpodobně způsobeny špatným odmaštěním povrchů testovaných vzorků. Právě na této odchylce můžeme pozorovat důležitost povrchové úpravy před lepením, která má zásadní vliv na výsledek. Zejména u tahového zatížení má vliv na kvalitu spoje také rovnost spoje.

Vzhledem k dosaženým výsledkům měření lze přijmout následující závěr, že k lepení materiálu PET-G je vhodné využít převážně sekundová lepidla, jejichž výhodou je snadná manipulace a rychle dosažitelná manipulační pevnost.

Bližší údaje k aplikaci testovaných lepidel:

- Pro silově namáhané díly i nenamáhané spoje lze doporučit lepidlo Novax, které je vhodné zejména pro zatížení ve smyku, při kterém je dosažená pevnost značně vyšší než u lepidla Loctite 406. Cena lepidla Novax včetně aktivátoru Novatit se pohybuje kolem 630 Kč (v šaržích Novax-20 g a aktivátor Novatit-130 g).
- Pro silově nenamáhané díly lze také použít lepidlo Loctite 406, jeho pořizovací cena, která se spolu s aktivátorem Loctite 707 pohybuje kolem 880 Kč (v šaržích Loctite 406-20 g a Loctite 707-10 g), je však stále vyšší oproti univerzálnějšímu lepidlu Novax.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá lepením materiálu vhodného pro 3D tisk, kterým je v tomto případě materiál PET-G (Polyethylentereftalát-glykol). K lepení vzorků byla vybrána 2 jednosložková lepidla (Loctite 406 a Novax) a 2 dvousložková lepidla (Novatit a Novafix). Testované lepené vzorky byly vytištěny na 3D tiskárně a vlastní testování pevnosti lepených spojů proběhlo na experimentálním trhacím/tahovém zařízení na pevnost v tahu a na pevnost ve smyku.

Vzhledem k dosaženým hodnotám měření a výsledným výpočtům pevnosti lepených spojů lze přijmout následující závěr a sice, že k lepení materiálu PET-G je vhodné aplikovat jednosložková sekundová lepidla Loctite 406 nebo Novax, jejichž výhodou je snadná aplikace a rychle dosažitelná manipulační pevnost.

V případě jednosložkového lepidla Loctite 406 byla naměřená průměrná pevnost pro zatížení na tah 7,3 MPa a průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 7,3 MPa. Toto lepidlo je vhodné pro silově nenamáhané spoje a jeho pořizovací cena se spolu s aktivátorem Loctite 707 pohybuje kolem 880 Kč (v šaržích Loctite 406-20 g a Loctite 707-10 g) je však vyšší oproti univerzálnějšímu lepidlu Novax.

V případě druhého jednosložkového lepidla Novax byla naměřena průměrná pevnost pro zatížení na tah 8,5 MPa a průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 13,7 MPa. Toto lepidlo je tak vhodné zejména pro silově namáhané spoje. Cena lepidla Novax včetně aktivátoru Novatit se pohybuje kolem 630 Kč (v šaržích Novax-20 g a aktivátor Novatit-130 g) a jedná se o kvalitativně lepší lepidlo oproti lepidlu Loctite 406.

V případě dvousložkového lepidla Novatit bylo naměřena průměrná pevnost pro zatížení na tah 5,8 MPa průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 10,8 MPa. V porovnání s jednosložkovými lepidly bylo s tímto lepidlem dosaženo horších výsledků.

Nejhorších výsledků bylo dosaženo v případě použití dvousložkových lepidel, konkrétně v případě druhého dvousložkového lepidla Novafix byla naměřena průměrná pevnost pro zatížení na tah 0,5 MPa a průměrná pevnost pro zatížení ve smyku 2,0 MPa. Výsledky ukázaly, že toto lepidlo je zcela nevhodné pro lepení PET-G. Jednalo se převážně o zmetky, popřípadě docházelo k lomu již při malém zatížení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MRŇA, Libor. Lepení materiálů [online]. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství – Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf
- [2] Doplnkové technologie pro zpracovávání plastů [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
- [3] SINA, Ebnesajjad. Theories of Adhesion. Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding. William Andrew Publishing, 2006, s. 74-74. ISBN 9780815515234. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/>
- [4] TROUGHTON, Michael John. Handbook of plastics joining: a practical guide. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [5] HABENICHT, Gerd. Applied Adhesive Bonding: A Practical Guide for Flawless Results. 4th edition. 2006. ISBN 978-3-527-32014-1.
- [6] TESAŘ, Petr. TECHNOLOGIE VÝROBY DVEŘÍ KOLEJOVÝCH VOZIDEL POMOCÍ NOVÝCH LEPÍCÍCH SYSTÉMŮ. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.
- [7] Filament2print: What is PETG? [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/49_petg.html
- [8] Material pro 3D: ROZDÍL MEZI ABS, PLA, PETG [online]. 2017 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [9] Prusament PETG [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [10] Filament World: PETG [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.filamentworld.de/3d-druck-wissen/was-ist-petg/>
- [11] 3D natives: All you need to know about PETG for 3D printing [online]. 18.12.2019 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-18122019/>
- [12] CARNEIRO, O.S., A.F. SILVA a R. GOMESA. Fused deposition modeling with polypropylene [online]. 15.10.2015 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515004037>
- [13] WU, Wenzheng, Peng GENG, Guiwei LI, Di ZHAO, Haibo ZHANG a Ji ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. Materials [online]. 2015, 8(9), 5834-5846 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5271>
- [14] MOHAMED, Omar Ahmed. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment [online]. 10.7.2016 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-016-2157-6>
- [15] ČSN EN 1465. Lepidla – stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech. Praha : Český normalizační institut, 1997
- [16] ČSN EN 11339. Lepidla – T-zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů. Praha : Český normalizační institut, 2010
- [17] ČSN EN ISO 9142. Lepidla – směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů. Praha : Český normalizační institut, 2004.

- [18] Novato: Novax [online]. 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://novato.cz/sortiment/lepeni-a-tmeleni/lepidla/novax-r>
- [19] Novato: Novatit [online]. 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://novato.cz/sortiment/lepeni-a-tmeleni/lepidla/novatit-r>
- [20] Novato: Novafix [online]. 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://novato.cz/sortiment/lepeni-a-tmeleni/lepidla/novafix-r-1>
- [21] Prumex: Loctite 406 [online]. 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://www.prumex.cz/loctite-406-20-g-vterinove-lepidlo/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
F	Silové zatížení	N
FDM	Fused Deposition Modeling	
PET	Polyethylentereftalát	
PET-G	Polyethylentereftalát – glykol	
S_s	Plocha přeplátování smyk	mm^2
S_t	Plocha přeplátování tah	mm^2
a	Výška vzorku	mm
b	Šířka vzorku	mm
n	Počet hodnot	
x_i	Hodnota měření	
3D	Trojrozměrný	
τ_s	Pevnost ve smyku	MPa
τ_t	Pevnost v tahu	MPa