



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYHODNOCENÍ VLIVU OPLACHU NA VLASTNOSTI MATERIÁLU PO 3D DLP TISKU

EVALUATION OF WASHING EFFECT ON MATERIAL PROPERTIES AFTER 3D DLP PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Uvíra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Dominik Uvíra**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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:

Vyhodnocení vlivu oplachu na vlastnosti materiálu po 3D DLP tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor navrhne a provede experimenty sloužící k vyhodnocení vlivu druhu a délky oplachu, na mechanické a funkční vlastnosti 3D tištěných dílů metodou DLP 3D tisku. K tomuto účelu provede potřebnou rešerši zvolené problematiky, navrhne testované materiály a vlastní experimenty, které následně provede a vyhodnotí a navrhne případné využití v praxi.

Cíle diplomové práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh experimentu
- provedení experimentu
- vyhodnocení výsledných technických parametrů
- technicko–ekonomické zhodnocení

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.

FOŘT, 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. ISBN978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje vlivu oplachu na mechanické vlastnosti 3D DLP tištěných dílů. Cílem práce bylo experimentálně určit vliv oplachových látek při různých délkách oplachu na mechanické vlastnosti 3D tištěných dílů technologií DLP. V práci jsou popsány zařízení a materiály. Dále je proveden rozbor oplachu 3D DLP tištěných dílů, včetně popisu rozpouštění polymerů, druhů oplachových látek a způsobů oplachu. Na základě rešeršní práce byly vybrány materiály, kterými jsou pryskyřice Standard, ABS-like a Tough. Použité oplachové látky jsou IPA, průmyslový odmašťovač Simple Green, DPM a speciální prostředek k odstraňování nevytvrzené pryskyřice EasyClean. Vzorky byly vyráběny na DLP 3D tiskárně Anycubic Photon D2, tiskové profily byly stanoveny na základě rešeršní části a vlastní kalibrace. V prvním experimentu byla sledována efektivita látek odstranit nevytvrzenou pryskyřici. Následovalo experimentální vyhodnocení změn tahových vlastností připravených vzorků. Dále byla vyhodnocena změna vrubové houževnatosti jednotlivých materiálů. V obou případech byla provedena analýza lomových ploch. Na základě dosažených výsledků byly pro všechny kombinace materiálů a oplachových látek stanoveny optimální délky oplachu a byly doporučeny oblasti využití. Poté byla navržena vlastní oplachová látka kombinující nízkou cenu a dobré mechanické vlastnosti. Poslední částí práce je ekonomické zhodnocení jednotlivých oplachů, ze kterých vzešla konkrétní doporučení pro nákup oplachových látek a dobu oplachu.

Klíčová slova

3D tisk, DLP, IPA, oplach, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This thesis focuses on the influence of washing on the mechanical properties of 3D DLP printed parts. The aim of the thesis was to experimentally determine the impact of washing agents with different wash durations on the mechanical properties of 3D printed parts using DLP technology. The research describes the devices and materials used. Furthermore, an analysis of washing 3D DLP printed parts is conducted, including a description of polymer dissolution, types of washing agents, and washing methods. Based on the research, materials were selected, including Standard resin, ABS-like resin, and Tough resin. The used washing agents are IPA, Simple Green industrial degreaser, DPM, and a special uncured resin remover called EasyClean. Samples were produced on the DLP 3D printer Anycubic Photon D2, and printing profiles were established based on the research part and own calibration. In the first experiment, the effectiveness of the agents in removing uncured resin was monitored. This was followed by an experimental evaluation of the tensile properties of the prepared samples. Furthermore, the notch toughness of each material was evaluated. In both cases, an analysis of fracture surfaces was conducted. Based on the achieved results, optimal washing durations were determined for all material and rinsing agent combinations, and areas of application were recommended. Subsequently, a custom rinsing agent combining low cost and good mechanical properties was proposed. The final part of the work consists of an economic evaluation of the various rinsing agents, resulting in specific recommendations for purchasing rinsing agents and rinsing duration.

Keywords

3D printing, DLP, IPA, washing, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

UVÍRA, Dominik. *Vyhodnocení vlivu oplachu na vlastnosti materiálu po 3D DLP tisku* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145882>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vyhodnocení vlivu oplachu na vlastnosti materiálu po 3D DLP tisku vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Dominik Uvíra

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskarovi Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji všem svým blízkým za podporu při vypracování této práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Analýza problému	10
1.2 Cíle práce.....	11
2 REŠERŠE	12
2.1 3D tisk	12
2.2 3D tisk fotopolymerizací	12
2.2.1 Proces výroby	13
2.2.2 Princip fotopolymerizace.....	14
2.3 Druhy 3D tiskáren využívajících fotopolymerizaci	15
2.4 Materiály pro 3D tisk fotopolymerizací	18
2.5 Vliv výrobních parametrů na mechanické vlastnosti	22
2.6 Oplach DLP 3D tištěných dílů	25
2.6.1 Rozpouštění polymerů.....	25
2.6.2 Druhy oplachových látek pro DLP 3D tisk	26
2.6.3 Způsoby oplachu DLP 3D tištěných dílů	28
2.7 Dotvrzování DLP tištěných dílů.....	29
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
3.1 Výroba vzorků	33
3.1.1 Kalibrace tiskárny.....	33
3.1.2 Stanovení tiskových profilů.....	33
3.1.3 Oplach a dotvrzování.....	35
3.2 Efektivita oplachových látek	36
3.3 Tahová zkouška	37
3.4 Zkouška vrubové houževnatosti	39
4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	41
4.1 Efektivita oplachových látek	41
4.2 Tahová zkouška	43
4.3 Zkouška vrubové houževnatosti	55
4.4 Doporučení využití jednotlivých oplachových látek.....	58
4.5 Návrh vlastního oplachu.....	59
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	62
ZÁVĚR.....	63

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

3D tisk je metoda výroby, kdy je díl tvořen postupným nanášením vrstev materiálu na sebe. Díky neustálému snižování cen 3D tiskáren, vývoji uživatelsky přístupných programů pro přípravu výroby a výborné flexibilitě zažil 3D tisk v posledních letech obrovský rozmach a stal se běžnou součástí výrobního procesu napříč strojírenstvím, elektrotechnickým průmyslem, stavebnictvím i lékařstvím. Jednou z největších výhod 3D tisku je široké spektrum materiálů, ze kterých lze touto metodou vyrábět, jako jsou například plasty, kovy, keramika, beton, ale dokonce i čokoláda či tkáň. Nabízí tak novou alternativu ke konvenčním způsobům výroby jako je tváření a obrábění.

Po současně nejrozšířenější a nejznámější metodě 3D tisku FDM (Fused Deposition Modeling) následuje fotopolymerizace, tedy metoda, která k výrobě dílů využívá vytvrzování kapalné pryskyřice. Popularita fotopolymerizace v oblasti domácího využití vzrostla zejména nástupem levných a spolehlivých tiskáren čínských výrobců, současně ale tiskárny na tento princip nabízí většina známých firem v oblasti 3D tisku, jako je například česká společnost Prusa Research. S rostoucím zájmem o tuto technologii se na trhu objevuje také stále širší nabídka materiálů a doplňujících zařízení.

Díky vysoké rozměrové přesnosti a široké škále dostupných pryskyřic s různými vlastnostmi je fotopolymerizace hojně využívána v řadě odvětví. V oblasti zubního lékařství jsou tímto způsobem vyráběny zubní náhrady, které jsou uvedeny na obr. 1, a ve slévárenství jsou vyráběny vytavitelné modely. Schopnost tisknout i drobné detaily je využívána pro výrobu šperků či náhradních dílů.



Obr. 1 Využití 3D tisku v zubním lékařství [1].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

V současnosti jsou na trhu kladeny stále větší požadavky na vývoj výrobních procesů. Mimo požadavků na zlepšování kvality a flexibility je kladen důraz i na snížení nákladů, a to zejména zkracováním času na vývoj a samotnou výrobu. Nový trend viditelný v určitých segmentech trhu je opuštění od velkosériové výroby a přechod na výrobu v menším měřítku, která je často personalizovaná konkrétnímu zákazníkovi. [2]

V reakci na tyto požadavky byly od druhé poloviny 80. let minulého století vyvíjeny a používány moderní metody aditivní výroby. Hlavním principem těchto technologií je nanášení materiálu, vrstvu po vrstvě, dokud není vytvořen celý konečný produkt. [2]

Jednou z nejpřesnějších metod aditivních technologií pro výrobu geometricky komplexních dílů je 3D tisk fotonopolymerizací, pod který se řadí například DLP (Digital Light Processing) a SLA (Stereolitografie). Obě technologie využívají k tvoření dílů postupné vytvrzování tekuté pryskyřice pomocí působení záření různých vlnových délek, nejčastěji UV záření. Takto vyrobené díly je poté nutné důkladně opláchnout od nevytvrzené pryskyřice, která na nich zůstává vlivem povrchového napětí. Závěrem jsou díly dodatečně vytvrzeny ve speciálním zařízení či na slunci. [3]

Mimo rychlosti tisku, délky expozice dané vrstvy záření a výšky vrstvy má na konečné vlastnosti takto vyráběných dílů vliv také délka oplachu a látka, ve které je díl oplachován. Bohužel i přes popularitu této technologie nebyly dosud na vliv oplachu na mechanické a optické vlastnosti dílů provedeny téměř žádné studie. [4]

1.1 Analýza problému

Důkladný oplach dílů vyrobených pomocí DLP či SLA je nedílnou součástí výrobního procesu. Je nutné odstranit veškerý nevytvrzený polymer, aby se předešlo jeho opožděnému vytvrzení působením UV záření z okolních zdrojů, zejména slunečního záření. Oplach má také výrazný vliv na konečný vzhled vyrobeného dílu, rozdíl mezi opláchnutým a neopláchnutým dílem je uveden na obr. 2.[5]

K oplachu dílů vyrobených pomocí DLP či SLA je na trhu dostupná řada látek. V současnosti se standardně používá k oplachu IPA (isopropylalkohol). Mezi domácími kutily je populární technický líh nebo běžně dostupné čisticí prostředky. Výrobci 3D tiskáren také často prodávají vlastní alternativní látky na oplach dílů, které slibují rychlejší a kvalitnější oplach než IPA. [6]

Podstatnou roli hraje také způsob oplachu. Nejméně efektivní způsobem je díly ponořit do čisticího média na určitou dobu a poté vytáhnout. Efektivnější způsob oplachu přináší specializované oplachové stanice opatřené vrtulí na rozdmýchání čisticího média, která periodicky mění směr otáčení. V profesionálním prostředí jsou používány ultrazvukové čisticí stanice. [7]



Obr. 2 Vlevo výrobek před oplachem a vytvrzením, vpravo výrobek po oplachu a vytvrzení [8].

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je poskytnout ucelený pohled na závislost vlivu jednotlivých čistících látek a délky oplachu na mechanické a optické vlastnosti 3D DLP tištěného dílu z vybraných materiálů. Tyto závislosti budou zjištěny experimentálně na základě znalostí z rešeršní části práce, která se bude zabývat jednotlivými metodami 3D tisku metodou fotopolymerizace a materiály určených pro tyto technologie. Příprava podmínek k tisku, samotný tisk a post-processing dílů bude proveden strukturovaně dle jasně definovaného postupu a parametrů. Zjištěné výsledky budou následně použity k návrhu vlastní efektivní varianty oplachu. V technologicko-ekonomickém zhodnocení bude srovnána účinnost jednotlivých látek a jejich vliv na mechanické vlastnosti použitých materiálů v závislosti na ceně těchto látek. Výsledky této práce budou užitečné pro výzkumné pracovníky v oblasti 3D tisku, kteří se zabývají optimalizací procesu tisku a zlepšení vlastností tisknutých materiálů. Získané informace budou také přínosné při výběru vhodné varianty oplachu při výrobě pomocí DLP/SLA tisku.

2 REŠERŠE

Ke správnému návržení a vypracování experimentální části je nutné pochopit podstatu použité technologie. Princip fotopolymerizace, technologie 3D tisku pryskyřic, vliv tiskových parametrů na mechanické vlastnosti dílů, materiály, typy oplachových látek, způsoby oplachování a konečné vytvrzování jsou teoretické úseky, které je nutné chápat pro úspěšné dosažení cílů práce.

Na vlastnosti vyrobeného dílu má vliv celý proces 3D tisku, od přípravy modelu, přes samotný tisk až po dokončování. Vhodné nastavení tiskových parametrů tak, aby byl minimalizován vliv samotného tisku na sledované vlastnosti je nezbytné pro dosažení relevantních výsledků.

2.1 3D tisk

3D tisk je automatizovaný proces, při kterém se z digitální předlohy vytváří fyzický objekt. Jedná se o aditivní výrobu, kde je materiál postupně přidáván, což je protipól k subtraktivní výrobě, která spočívá v obrábění materiálu. Zpočátku byl 3D tisk označován primárně jako Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů) a s tímto označením se lze setkat i v současnosti. Před příchodem dostupných tiskáren byla totiž technologie 3D tisku využívána výlučně pro výrobu prototypů. Jako vznik 3D tisku by se dal považovat rok 1984, kdy Charles W. Hull nechal patentovat technologii zvanou stereolitografie. Nejspíše nejvýznamnějším rokem v novodobé historii 3D tisku byl rok 2005, kdy na University of Bath doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap. Podstatou bylo navrhnout 3D tiskárnu, která bude schopna vytisknout co nejvíce vlastních dílů. V současnosti jsou RepRap tiskárny nejrozšířenějším druhem tiskáren na světě. [4, 9]

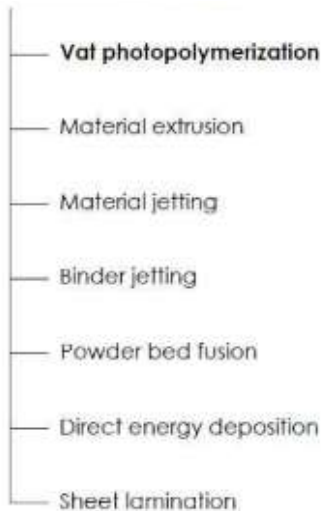
Technologie 3D tisku otevírá nové možnosti pro firmy hledající způsoby zefektivnění výroby. Díky způsobu výroby dílů, vrstvu po vrstvě, je možné vyrábět geometricky velmi složité díly, které by konvenčními metodami výroby byly vyrobitelné velice náročně či vůbec. Mezi materiály, ze kterých je možné 3D tiskem vyrábět patří termoplasty, fotosenzitivní pryskyřice, keramika, kovy, ale i biologické tkáně či potraviny. Adaptace 3D tisku ve více oblastech výroby má potenciál zvýšit rychlost výroby a současně snížit náklady na nástroje a přípravky. Flexibilita této technologie také umožňuje rychlou úpravu produktu dle specifických požadavků zákazníka. V současnosti je 3D tisk stále více využíván v oblastech agrikultury, zdravotnictví, automobilového průmyslu a leteckého průmyslu. [10, 11]

Na druhou stranu přináší širší využití 3D tisku také řadu nevýhod. Při výrobě pomocí 3D tisku klesne potřeba zaměstnávat pracovníky s nízkou kvalifikací, čímž bude automaticky výrazně ovlivněna ekonomika států, které závisí na velkém počtu těchto pracovních pozic. 3D tisk může být také zneužit k výrobě nebezpečných předmětů jako jsou například neoznačené střelné zbraně. [12]

2.2 3D tisk fotopolymerizací

Aditivní technologie jsou rozděleny dle ČSN EN ISO 17296-2. Každá technologie se liší od ostatních v oblasti aplikace, způsobu tvorby jednotlivých vrstev a původním stavem materiálu. Tato kapitola se zabývá nejstarší aditivní technologií, a to fotopolymerizací. Rozdělení jednotlivých technologií je uvedeno na obr. 3.

Technologie aditivní výroby



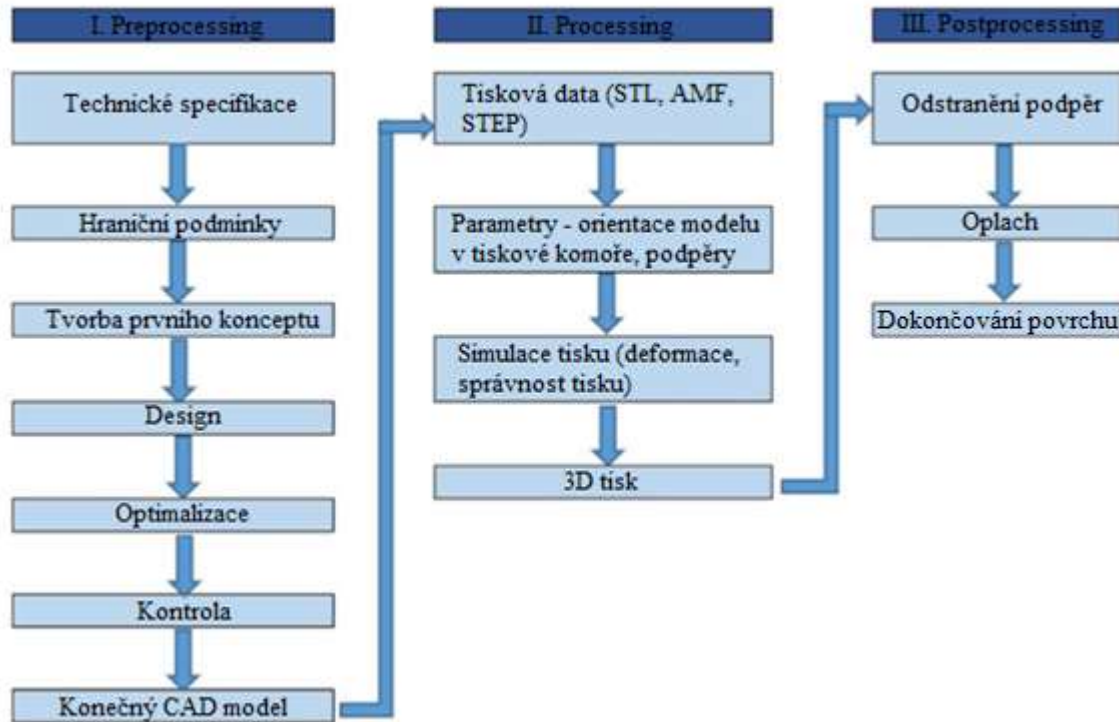
Obr. 3 Rozdělení technologií aditivní výroby dle ČSN EN ISO 17296-2 [13].

2.2.1 Proces výroby

K výrobě pomocí 3D tisku je nutné mít k dispozici geometrii dílu v podobě 3D modelu, který je vytvořen pomocí CAD (computer-aided design) softwaru, jako je například SolidWorks, Autodesk Inventor nebo Catia, či naskenován z fyzického objektu pomocí 3D skeneru. 3D model je poté převeden na formát STL (standard triangulation language). STL formát popisuje povrch 3D modelu pomocí sítě trojúhelníků různých velikostí, v závislosti na požadovaném rozlišení. Čím menší trojúhelníky jsou, tím přesněji jejich síť popisuje zvolený povrch, což vede k hladšímu povrchu tištěného dílu. Dalším prominentním formátem je AMF (additive manufacturing file format) Fáze přípravy tohoto síťového modelu se nazývá preprocessing (předzpracování). [14,15]

Druhé fázi se říká processing (výroba). Dochází k samotné výrobě 3D tištěného objektu vrstvu po vrstvě. Každá následující vrstva musí být podepřena buď tiskovou podložkou, předešlou vrstvou nebo přidavnými podpůrnými prvky. Po výběru optimální orientace modelu a podpěr je STL model nařezán na vrstvy rovnoběžné s tiskovou podložkou, jmenovitě rovinou XY. Každá vrstva je poté postupně tvořena ve směru osy Z. Výška jednotlivých vrstev je závislá na použité tiskárně, technologii aditivní výroby a požadavcích na kvalitu. Nařezaný model je poté pomocí paměťové karty či flash disku předán tiskárně. Na rozdíl od tradičních subtraktivních výrobních procesů (obrábění), kde je materiál z polotovaru odebírán, nabízí aditivní technologie efektivnější využití materiálu. [14, 15]

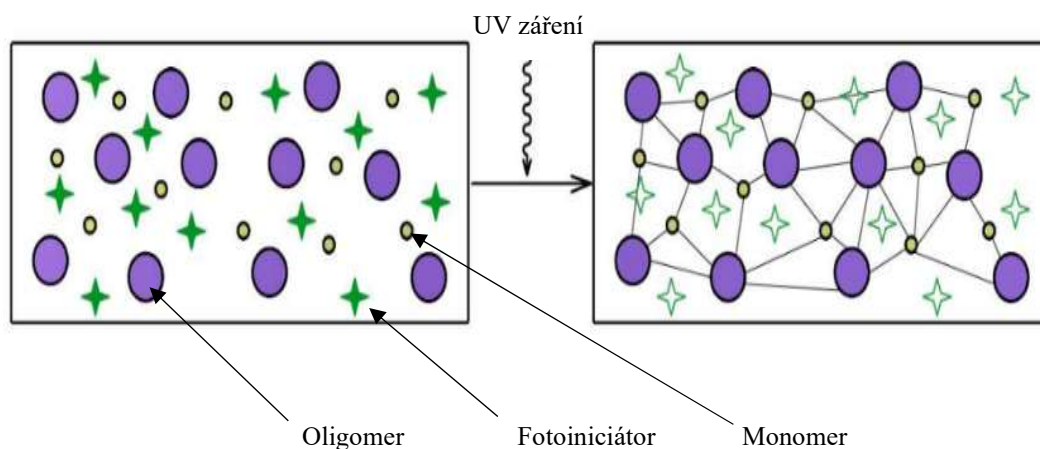
Poté, co je tisk dokončen, je výrobek odebrán z podložky a navazuje další technické zpracování. To slouží ke zdokonalení vytištěného dílu. Tento proces se nazývá postprocessing (dokončování). V případě fotopolymerizace je vytištěný díl očištěn v oplachovém roztoku, nejčastěji IPA, aby byla odstraněna tekutá vrstva pryskyřice. Pro zlepšení mechanických vlastností jsou poté díly dodatečně vytvrzeny pomocí UV záření či přirozeného slunečního světla. Další procesy zahrnují odstranění podpěr, broušení, lepení, barvení, povlakování, sterilizaci, kontrolu a měření. Je podstatné podotknout, že délka a druh oplachu, teplota a trvání vytvrzování hrají důležitou roli v určení mechanických vlastností hotového dílu. Celý harmonogram procesu výroby je uveden na obr. 4.[14, 15]



Obr. 4 Typický proces 3D tisku fotopolymerizací [13].

2.2.2 Princip fotopolymerizace

Při procesu fotopolymerizace je fotopolymer, což je světlem vytvrditelná pryskyřice, uložen v nádobě, kde na něj působí buď viditelné nebo UV světlo. Působením tohoto světla započiná polymerizační reakce, díky které poté dochází k tvorbě řetězců polymerů nebo jejich síťování, čímž vzniká pevná pryskyřice. V roztoku fotopolymerů se nachází tři prvky, a to monomery, oligomery a fotoiniciátory, viz obr. 5. Když jsou fotoiniciátory vystaveny vytvrzujícímu světlu, přecházejí do excitovaného stavu a slouží jako katalyzátory tvorby řetězců mezi monomery a oligomery. Tento chemicko-termický proces je nevratný a díly nemůžou být navráceny do kapalné formy. Za použití tohoto principu jsou postupně vytvrzovány vrstvy pryskyřice na základě předlohy zvoleného modelu. [16]



Obr. 5 Kapalný fotopolymer (vlevo), polymerizace indukovaná světlem (vpravo) [12].

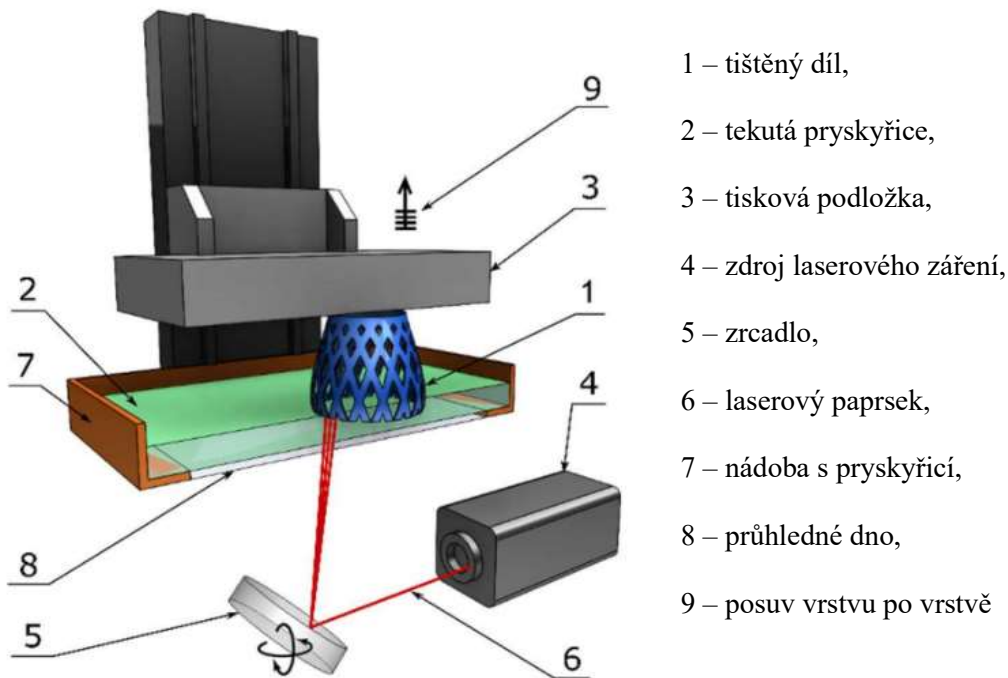
2.3 Druhy 3D tiskáren využívajících fotopolymerizaci

Fotopolymerizace je dělena na základě metody vytvrzování pryskyřice. Pokud je využit laser, jedná se o SLA, při použití digitální projekce se jedná o DLP, a v případě vytvrzování pomocí LED (elektroluminiscenčních diod) s kyslíkem jde o CDLP (Continuous Digital Light Processing), či CLIP (Continuous Liquid Interface Production). Nejmodernější metoda využívá k vytvrzování uskupení LED svítilen a k promítnutí dané vrstvy je využit displej z tekutých krystalů, podle kterého je tato metoda označována jako LCD (Liquid Crystal Display). [17]

Stereolitografie

3D tiskárna s technologií SLA využívá platformu ponořenou v nádobě s transparentním dnem, která je naplněná světlem vytvrditelnou pryskyřicí (dále jen pryskyřicí). Zatímco je platforma ponořená v pryskyřici, paprsek laseru projíždí výrobní plochou a vytvrzuje oblasti dle předlohy STL modelu. Poté, co je vrstva vytvořena, vyjede platforma o konstantní vzdálenost shodnou s výškou vrstvy nahoru či dolů, podle toho, zdali tiskárna používá proces tisku shora-dolů či zdola-nahoru. Vytvrzovací proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není hotový celý 3D tištěný díl. Výška vrstvy se pohybuje v rozmezí 12 až 150 μm . V praxi je nejvyužívanější výška vrstvy 100 μm . Rychlost tisku standardní SLA tiskárny je 10-20 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Princip 3D tiskárny využívající SLA technologii je uvedena na obr. 6. Přesnost SLA v produkci je určena průměrem paprsku laseru v bodě, kde dochází k vytvrzování. Například u tiskárny Formlabs Form 2 SLA je tento průměr roven 140 μm . [18, 19]

SLA je nejstarší technologií rapid prototyping díky čemuž je vyspělá, má stabilní proces tisku a nespočet dodavatelů tiskáren a náhradních dílů. Do teď je SLA jedinou fotopolymerizační technologií 3D tisku, která je schopna tisknout objekty velkých rozměrů. Problémem je vysoká doba tisku, která je závislá na rychlosti pohybu vytvrzujícího laseru. SLA je stále důležitou technologií 3D tisku a je využívána v mnoha oblastech, jako jsou například zubní lékařství, hračky, automobilový průmysl a letecký průmysl. [20]

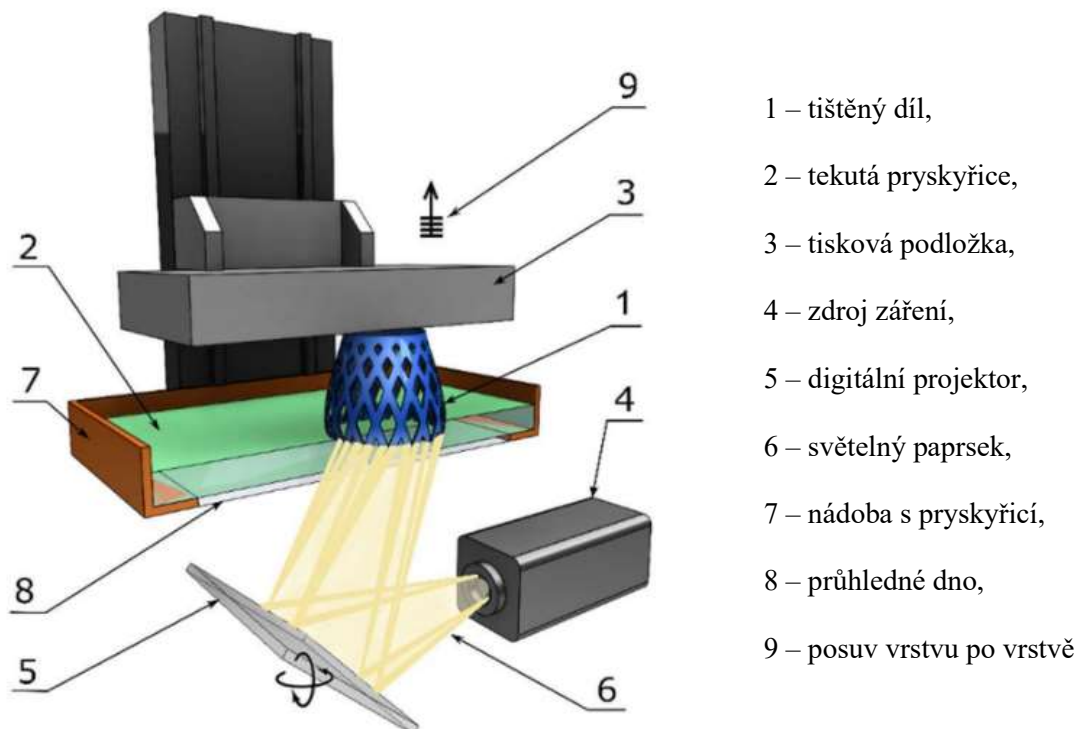


Obr. 6 Komponenty typické SLA tiskárny [13].

Digital Light Processing

DLP technologie se od SLA liší pouze v metodě vytvrzování. Namísto zrcadla odrážejícího laserový paprsek se zde nachází digitální projektor světla. Toto zařízení bylo vyvinuto firmou Texas Instruments Incorporated. Jedná se o malý čip, který obsahuje až miliony miniaturních zrcadel v závislosti na jeho velikosti. Každé zrcadlo má tři fyzické vrstvy oddělené dvěma vrstvami vzduchu. Vrstvy vzduchu umožňují zrcadlům naklonění o $+10$ nebo -10 stupňů. Pokud je zařízení dodáno napětí, zrcadla se naklopí dle digitálního signálu „ON“ či „OFF“. Pokud světlo z projektoru svítí na zrcadlo, které má signál „ON“, je paprsek odražen na průhledné dno nádoby. Paprsky svítící na zrcadla se signálem „OFF“ budou odraženy na absorbér světla. Tudíž zrcadla „ON“ tvoří na průhledném dně nádoby světlá místa, zatímco zrcadla „OFF“ tvoří místa tmavé. Každé zrcadlo je individuálně ovládáno a naprosto nezávislé na ostatních zrcadlech. Kombinací těchto tmavých a světlých míst na celé ploše dna v závislosti na naklonění zrcadel vzniká průřez dané tištěné vrstvy na dně nádoby. Ve srovnání s SLA technologií je DLP rychlejší, protože je každá vrstva vystavena vytvrzujícímu záření v celém průřezu. Jelikož DLP technologie využívá digitální projektor světla, je každá vrstva složena z hranatých pixelů a přesnost tištěného dílu vysoce závisí na rozlišení projektoru. Typická DLP tiskárna a její komponenty je uvedena na obrázku 7. [19, 21]

Největší výhodou DLP 3D tisku je vysoká přesnost. K jejímu dosažení je ale limitována velikost projektovaného obrazu. Tudíž lze pomocí DLP 3D tisku vyrábět pouze malé objekty. Tato technologie je také dominována firmou Texas Instruments Incorporated což vede k velmi vysokým pořizovacím cenám těchto tiskáren. Vzhledem k vysoké preciznosti a malým rozměrům vyráběných objektů je tato technologie využívána především v oblastech zubního lékařství a forem na šperky. [22]

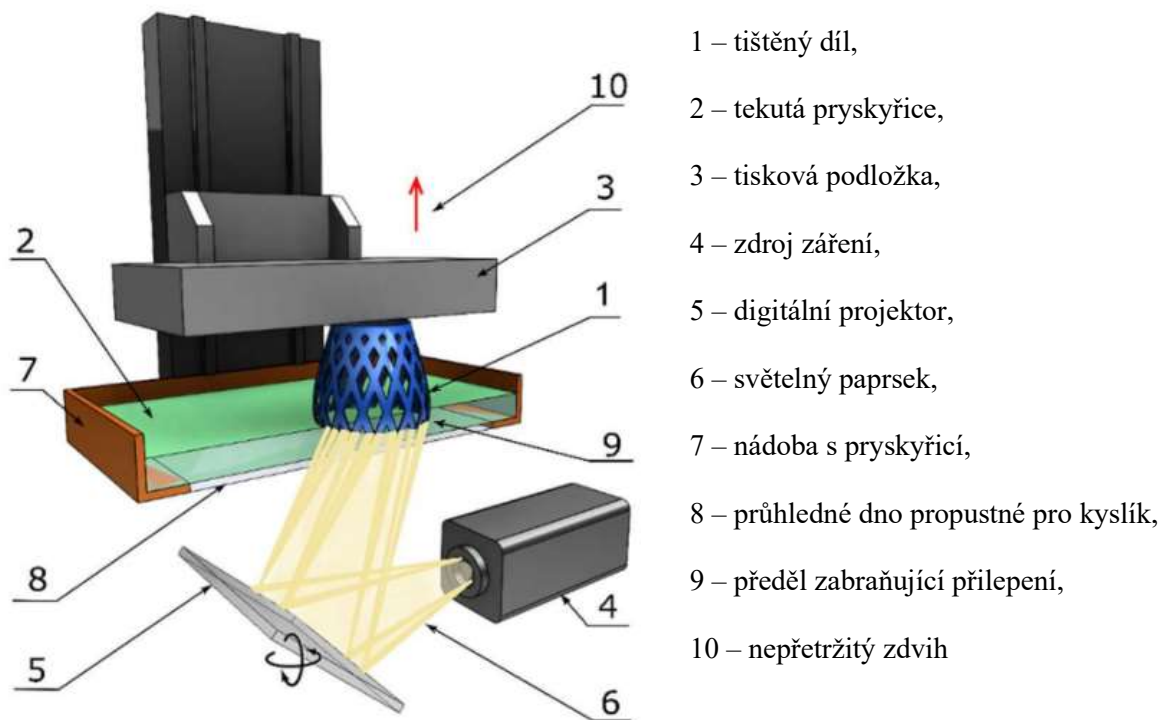


Obr. 7 Komponenty typické DLP tiskárny [13].

Continuous Digital Light Processing/Continuous Liquid Interface Production

CDLP/CLIP technologie je inovací založenou na DLP technologii. Konkrétním rozdílem od SLA a DLP technologie je, že CDLP/CLIP využívá digitální projekci s LED světly a speciální průhledné dno propustné pro kyslík namísto klasického skleněného dna. Toto dno tvoří předěl zabraňující přilepení podložky široký podobně jako lidský vlas, který umožňuje tekuté pryskyřici téct v rozhraní mezi tištěným dílem a průhledným dnem nádoby. Tato nevytvrzená pryskyřice mimořádně zvyšuje rozlišení tištěného dílu, a také snižuje riziko chyby tisku z důvodu odloupení dílu od tiskové podložky. Dále, na rozdíl od metody tisku vrstvu po vrstvě, jsou CDLP/CLIP tiskárny designované pro nepřetržitý pohyb tiskové podložky, čímž je umožněno nerušený tisk prototypů v rychlostech stovek milimetrů za hodinu. Typická CDLP/CLIP tiskárna je vyobrazena níže v obrázku 8. [23, 24]

Díky nepřetržitému procesu tisku je odstraněn problém se soudržností vrstev a efekt viditelných přechodů vrstev je minimalizován. Tudíž tímto způsobem vyrobené díly mají izotropní mechanické vlastnosti i přes to, že mohou vzhledově působit jako anizotropní. [23, 24]



Obr. 8 Komponenty typické CDLP/CLIP tiskárny [13].

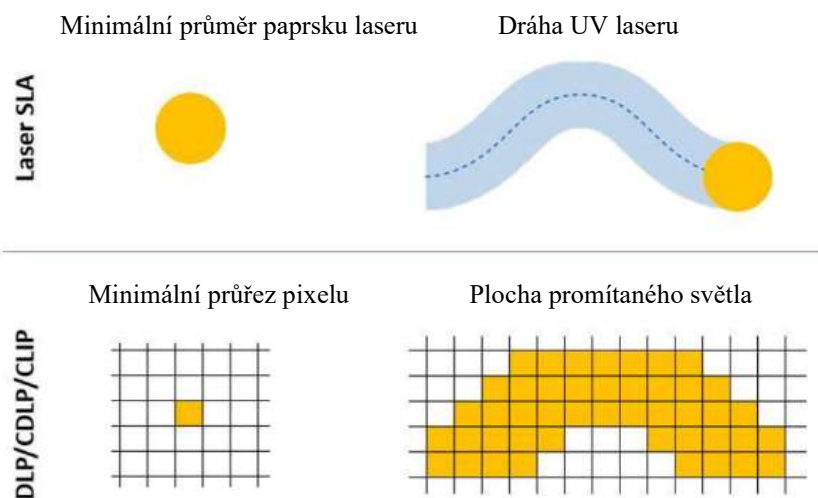
LCD

Napříč všemi fotopolymerizačními technologiemi 3D tisku, od laserového SLA, přes digitální projekci DLP až po nejnovější LCD (liquid crystal display) technologie je hlavním rozdílem zdroj světla a zobrazovací systém, zatímco řídicí a pohybové prvky mají jen drobné rozdíly. Největším rozdílem mezi DLP a LCD technologiemi 3D tisku je zobrazovací systém. V LCD 3D tisku je jako zobrazovací systém využíván displej z tekutých krystalů. Když je tekutý krystal vystaven elektrickému poli, změní svou molekulární strukturu a zabrání průchodu světla. Díky pokrokům v technologii displejů z tekutých krystalů je rozlišení těchto displejů velmi vysoké. Nicméně v průběhu změn elektrického pole se malé množství molekul tekutých krystalů nemůže přeskupit a dochází k slabému průniku světla. Toto zapříčiňuje nižší přesnost LCD 3D tiskové technologie ve srovnání s DLP. [25]

LCD tiskárny jsou velmi levné a poskytují dobré rozlišení. Na druhou stranu mají displeje krátkou životnost a musí být pravidelně měněny. Intenzita světla poskytovaná touto technologií je velmi slabá, protože pouze 10 % světla je schopno proniknout skrz LCD obrazovku a zbylých 90 % je obrazovkou pohlceno. Dále, částečný průnik světla může vést k vytvrzení pryskyřice na dně nádoby, proto musí být pravidelně čištěna. V současnosti se LCD 3D tisk používá v oblasti zubního lékařství, šperkařství, hraček a kutilů. [22]

Přesnost

Vytvrzující zdroj světla a metoda projekce světla hrají klíčovou roli v určení přesnosti tištěných dílů. Pro SLA, přesnost závisí na průměru paprsku vytvrzujícího laseru v místě dopadu na průhledné dno nádoby. Zatímco u DLP a CDLP/CLIP je přesnost závislá na mřížce pixelů, která je dána rozlišením digitálního projektoru. V kontrastu s flexibilitou nabízenou SLA, zajištěnou díky volnému pohybu paprsku laseru, jsou DLP a CDLP/CLIP omezeny na síť pixelů digitální obrazovky, která je osvětlena vždy celá pro každou vrstvu. Výsledkem je, že DLP a CDLP/CLIP hranatější díly v porovnání s SLA i přes mnohonásobně menší průřez jednotlivých pixelů. Porovnání výrobních přesností je vyobrazeno na obrázku MNH níže, kde je dráha SLA aproximována pomocí voxelů v DLP a CDLP/CLIP. Je ale nutné vzít v potaz, že větší přesnost SLA technologie je na úkor rychlosti výroby. Dodatečně, jak již bylo zmíněno, CDLP/CLIP je schopné vyrábět díly s větší přesností a mechanickými vlastnostmi než DLP díky nepřetržitému pohybu tiskové podložky a existenci předělu zabraňujícího přilepení. Nejnížší přesnost ze zmíněných technologií má LCD z důvodu slabého průniku světla při přeskupování molekul tekutých krystalů. Vizualní srovnání přesnosti daných technologií je uvedeno na obr. 9. [19, 21, 23]



Obr. 9 Srovnání přesnosti mezi SLA a DLP/CDLP/CLIP v závislosti na jejich průmětu na tiskovou podložku [13].

2.4 Materiály pro 3D tisk fotopolymerizací

Díky všestrannosti DLP 3D tisku je na trhu dostupná celá řada materiálů s rozdílnými mechanickými vlastnostmi, cenou, kvalitou povrchu a složitostí detailů, kterých je možné dosáhnout. Je zásadní zvolit vhodný materiál pro danou aplikaci z pohledu požadovaných mechanických vlastností, ekonomičnosti či opracování vytištěných dílů. Také je nutné zkontrolovat, je-li pryskyřice určena pro zvolený typ tiskárny, jelikož každá technologie vyzařuje záření s rozdílnou vlnovou délkou a každý druh pryskyřice polymerizuje pouze v určitém rozsahu.

Standardní pryskyřice

Standardní pryskyřice mají ze všech pryskyřic nejšířší využití. Nejčastějšími barvami jsou šedá, bílá, černá, transparentní a modrá. Velkou výhodou těchto pryskyřic je, že na vytvrnutí potřebují nejkratší dobu osvětlení. Nabízí pevné výtisky s vysokou úrovní detailů a hladkým povrchem. Jedná se o nejlevnější typ pryskyřice pro DLP 3D tisk, díky čemuž je výbornou volbou pro rapid prototyping. Jsou vhodné pro díly vyžadující vysokou rozměrovou stálost a nízké smrštění. Obvykle jsou určeny pro zařízení s vlnovou délkou v rozsahu 385–420 nm. Zajímavou vlastností standardních pryskyřic je, že jejich barva má vliv na jejich vlastnosti. Například bílá barva je vhodná pro výrobky, kde je důležité mít hladký povrch, zatímco šedá je vhodná pro díly se složitými detaily. Na obr. 10 je vyobrazena figurka se složitými detaily vyrobená ze standardní pryskyřice. [5, 26]



Obr. 10 Tištěný díl ze standardní pryskyřice [27].

Houževnatá pryskyřice

Houževnatá pryskyřice je určena pro aplikace zahrnující vysoké úrovně napětí a velké zatěžující síly. Díly tištěné z těchto materiálů mají obvykle mez kluzu i modul pružnosti v tahu velmi podobné, jako akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Další výhodou je, že nejsou křehké, jsou tedy vhodné například pro výrobu přezek. Nevýhodou je nízká teplotní odolnost. Na obr. 11 jsou uvedeny příklady výtisků. [5, 26]



Obr. 11 tištěné díly z Houževnaté pryskyřice [28].

Odolná pryskyřice

Odolné pryskyřice jsou navrženy tak, aby měly zlepšené mechanické vlastnosti, včetně vysoké odolnosti proti nárazům a odolnosti vůči opotřebení a deformaci, což z nich dělá ideální materiál pro výrobu dílů a prototypů, které potřebují odolávat náročným podmínkám. Mohou být vyrobeny z různých materiálů, jako jsou epoxidy, akryláty a uretany, a mohou být použity v široké škále aplikací, od automobilního po letecký průmysl. Díly tištěné z těchto pryskyřic mají velmi hladké povrchy, což z tohoto druhu pryskyřic dělá dobrou volbu pro výrobu pohyblivých dílů využívaných v situacích s malým třením či kulových kloubů. Nevýhodou je nízká tepelná odolnost. Typický díl vyrobený z odolné pryskyřice je uveden na obr. 12. [5, 26]



Obr. 12 Tištěný díl z Odolné pryskyřice [29].

Tepelně odolná pryskyřice

Tepelně odolné pryskyřice jsou schopné vystát vysoké teploty, aniž by došlo k degradaci jejich tvaru a mechanických vlastností. Jsou určeny pro aplikace, kde je tepelná odolnost nezbytná, jako je automobilní, letecký a elektronický průmysl. Taktéž mohou být použity pro výrobu forem a nástrojů pro vstřikování či tepelně odolných armatur na odlévání a tepelné tváření. Tepelně odolné pryskyřice mohou být vyrobeny z řady materiálů, jako například polyetherimid (PEI), polyfenylsulfon (PPSF) a polyetherketonketon (PEKK) a jsou dostupné v různých variantách s odlišnými úrovněmi tepelné odolnosti. Tepelná odolnost těchto materiálů se pohybuje v rozmezí 200-300 °C. Nevýhodou tepelně odolných pryskyřic je jejich vysoká cena. Na obr. 13 jsou uvedeny dílce z tepelně odolné pryskyřice. [5, 26]



Obr. 13 Tištěné díly z Teplotně odolné pryskyřice [30].

Flexibilní pryskyřice

Flexibilní pryskyřice umožňují napodobovat gumové díly. Tudiž mají vysoké prodloužení při přetržení a nízký modul pružnosti. Většina 3D tištěných flexibilních pryskyřic má tvrdost okolo 80A metodou dle Shore, což je ekvivalentní tvrdosti podrážky tenisek. Flexibilní pryskyřice bývají nejčastěji transparentní, díky čemuž je do nich možné přidat barviva a zvolit si barvu dle vlastního uvážení. Je také možné smíchat určité množství flexibilní pryskyřice s jiným druhem pryskyřic a dosáhnout tím lepších tahových charakteristik. [5, 26]

Díky těmto vlastnostem je možné vyrábět díly, které budou stlačovány či ohýbány. Také jsou vhodné pro ergonomické přídatky jako jsou rukojeti a úchyty. Kvůli nižší rozměrové přesnosti jsou nevhodné pro výrobu složitých dílů. Na obr. 14 je uveden výrobek z flexibilní pryskyřice. [5, 26]



Obr. 14 Tištěný díl z flexibilní pryskyřice [31].

Vyztužená pryskyřice

Tyto materiály jsou vyztužené mikročásticemi a vlákny organických či neorganických materiálů, jako jsou minerály, keramika či částice uhlíku, čímž je dosaženo vyšší pevnosti a modulu pružnosti než u jiných pryskyřic. Dále jsou tepelně stabilní a odolné vůči teplu a opotřebením. Na druhou stranu jsou ale křehčí než houževnaté pryskyřice. Tyto vlastnosti umožňují použití vyztužených pryskyřic na formy a nástroje, či pouzdra na automobilové a elektrické komponenty. [5, 26, 32]

Biokompatibilní pryskyřice

Aplikace fotopolymerizace v lékařských aplikacích získala v posledních letech enormní pozornost. To vedlo k neúspěšné snaze vyvinout netoxické, biokompatibilní pryskyřice. Tyto materiály jsou hojně užívány pro ortopedické a protetické účely. Hlavní výhodou 3D tisku v medicíně je zejména možnost uzpůsobit výrobky dle potřeb specifických pacientů. To je využíváno při použití 3D skenů či počítačové tomografie k získání reálné reference pro 3D tiskárnu. Jsou schopné vystát sterilizaci parou pomocí autoklávy, díky čemuž je možné je využít na operačním sále. Mimo to jsou biokompatibilní materiály biologicky odbouratelné, tudíž nemají žádný negativní efekt na životní prostředí. [5, 26]

Nejpoužívanějšími biokompatibilními materiály jsou dentální pryskyřice, které jsou kategorizovány jako třída I dle ČSN EN ISO 10993-1. Typickým příkladem je Surgical Guide Resin firmy Formlabs, který byl používán pro výrobu testů pro COVID-19, což prokazuje využitelnost těchto materiálů pro řešení reálných problémů. Vzhledem k tomu, že jsou tyto materiály v kontaktu s lidským tělem, musí projít biologickou evaluací a testováním pro cytotoxicitu, genotoxicitu, opožděnou hypersensitivitu a dále. Na obr. 15 jsou uvedeny vytištěné zubní implantáty. [33]



Obr. 15 Tištěné díly z biokompatibilní pryskyřice [34].

Odlévací pryskyřice

Odlévací pryskyřice jsou vhodné pro výrobu 3D tištěných dílů se složitými detaily a hladkým povrchem, které jsou následně používány jako vytavitelné modely pro odlévání kovů jako je bronz, měď, hliník či mosaz. Na rozdíl od tradičních voskových modelů, které se rozpouští při zvýšení teploty, odlévací pryskyřice sublimují v plyn. Tento proces probíhá pomalu, aby se předešlo případnému prasknutí formy z důvodu expanze jejího objemu. Jejich hlavní výhodou je, že po vyhoření zanechávají minimum popela. Tyto vlastnosti umožňují výrobu malých, složitých výrobků jako jsou šperky. Ve srovnání s ostatními materiály se jedná o velmi drahé pryskyřice. Na obr. 16 jsou uvedeny modely šperků z odlévací pryskyřice. [5, 26, 35, 36]



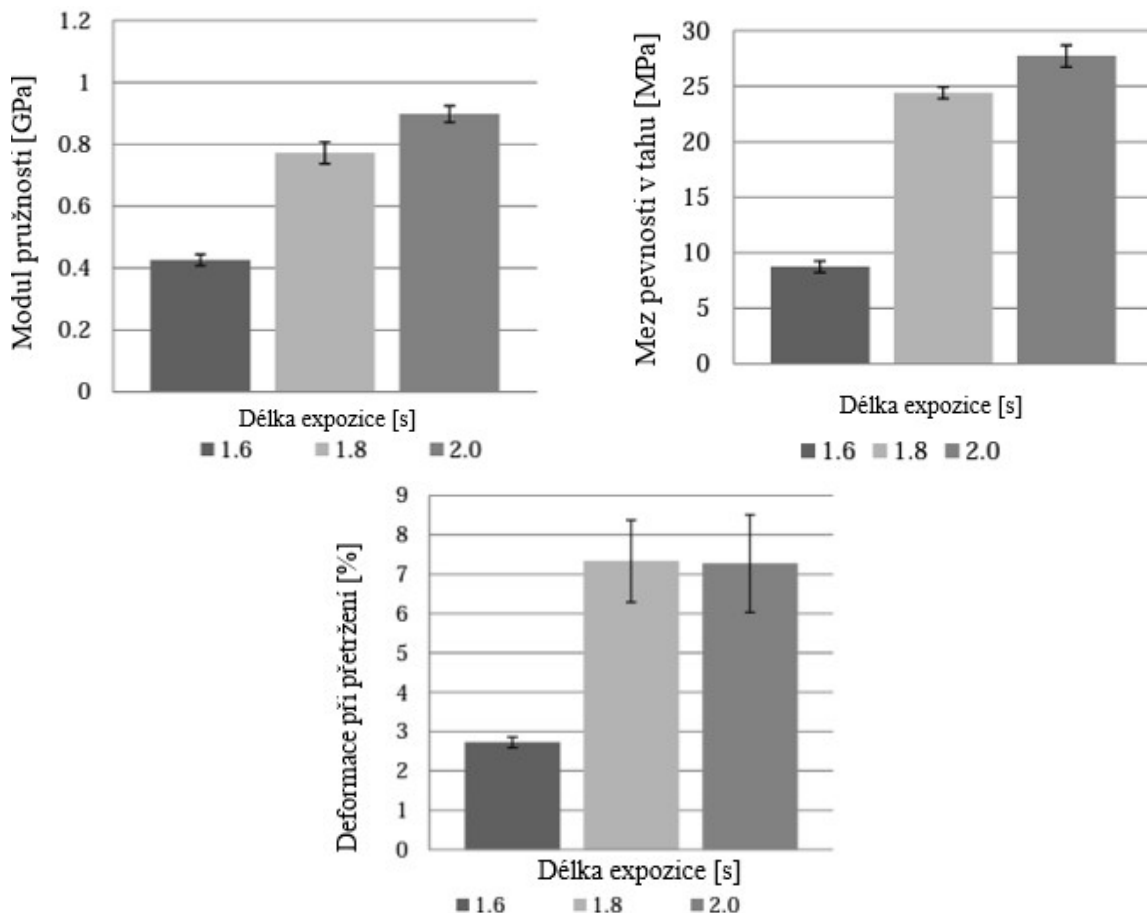
Obr. 16 Tištěné díly z odlévací pryskyřice [37].

2.5 Vliv výrobních parametrů na mechanické vlastnosti

Pro správné navržení a vyhodnocení experimentální části práce je nutné znát veškeré faktory ovlivňující vlastnosti 3D DLP tištěných dílů. Pro přesnost a opakovatelnost zjištěných výsledků je třeba zvolit parametry s co nejnižším rozptylem hodnot mechanických vlastností.

Vliv délky expozice

Délka expozice je doba, po kterou na pryskyřici působí vytvrzující světlo. Delší expozice materiálu vytvrzujícímu světlu zapříčiní vyšší stupeň polymerizace. Při delší expozici taktéž více světla pronikne k předchozím již vytvrzeným vrstvám, což vede k jejich lepší přilnavosti. Při příliš krátké expozici nedojde k úplnému vytvrzení pryskyřice, což má za následek výrazně nižší mechanické vlastnosti tištěného dílu. S vyšší délkou expozice se tudíž zvyšuje modul pružnosti, mez pevnosti i deformace při přetržení. Doba expozice je pro každou konkrétní pryskyřici a tiskárnu nutné stanovit experimentálně. Závislost délky expozice na mechanické vlastnosti je uvedena na obr. 17. [38]



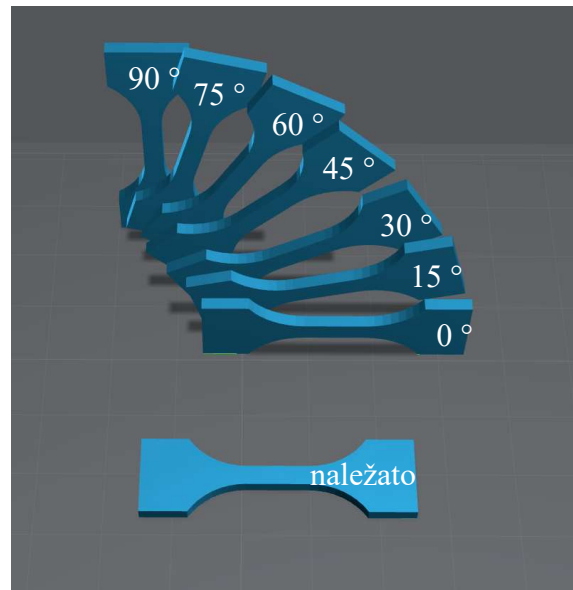
Obr. 17 vliv délky expozice na mechanické vlastnosti tištěných dílů [38].

Vliv výšky vrstvy

S rostoucí výškou vrstvy klesá schopnost vytvrzujícího světla proniknout skrz všechny materiál, který je nutné vytvrdit. Následkem je nižší stupeň vytvrzení dané vrstvy a menší soudržnost jednotlivých vrstev. Modul pružnosti a mez pevnosti v tahu s rostoucí výškou vrstvy klesají. U deformace při přetržení se objevuje opačný trend, kdy s rostoucí výškou vrstvy dochází k jejímu nárůstu. [38, 39, 40]

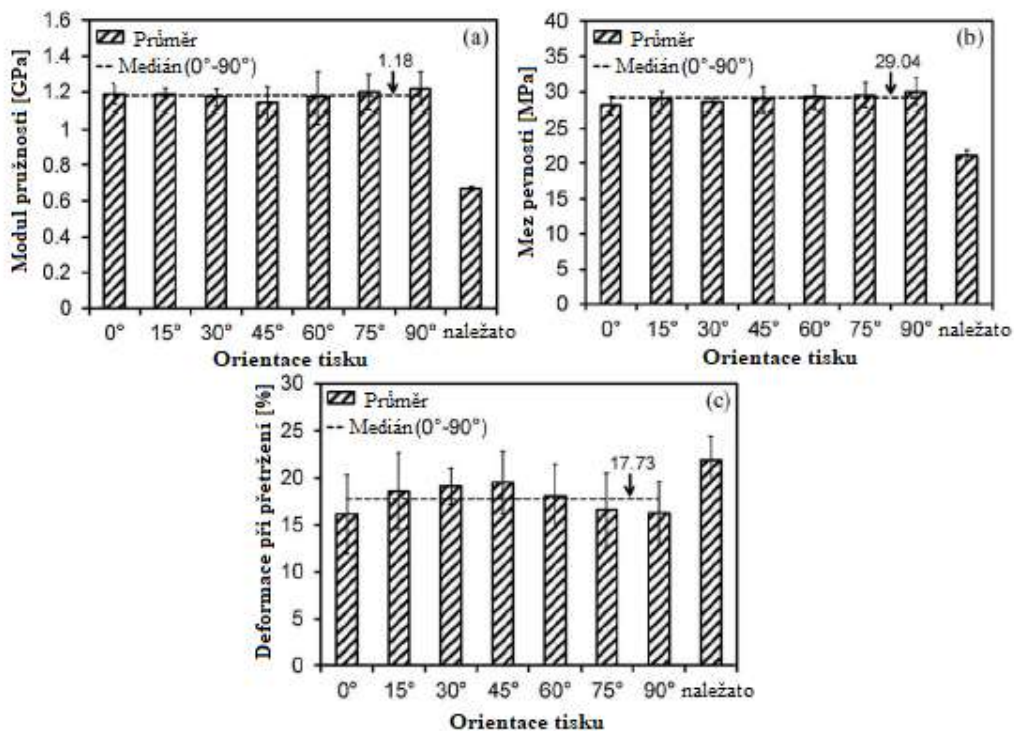
Vliv orientace dílu

Fotopolymerizace produkuje téměř izotropní díly. Tudíž jejich mechanické vlastnosti jsou ve všech směrech totožné. Orientace dílu během tisku i přes to hraje významnou roli. Studie zabývající se touto problematikou došly k závěru, že při tisku dílu naležato přímo na tiskovou podložku je dosaženo zásadně odlišných mechanických vlastností než při tisku totožného dílu natočeného na hranu, nezávisle na úhlu natočení. Orientace dílů je uvedena na obr. 18. [39, 40]



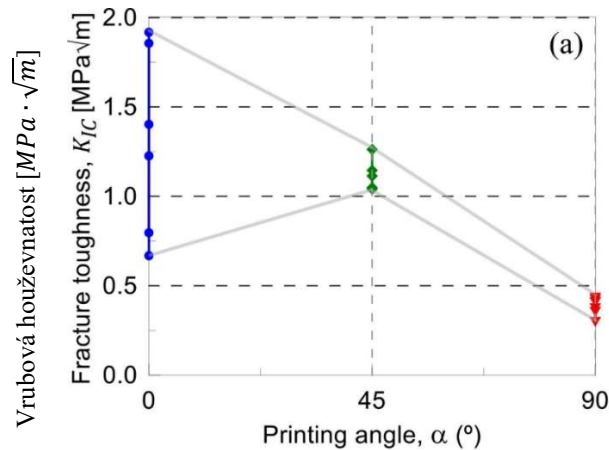
Obr. 18 orientace dílů na tiskové podložce, podle [39].

Díl tištěný v orientaci naležato dosahuje o 27 % nižší meze pevnosti než díl tištěný na hraně. Současně je ale odchylka měření pro orientaci naležato výrazně nižší než pro orientaci na hraně. Dalším rozdílem je vyšší deformace při přetržení pro díly tištěné naležato, která je o 24 % vyšší než průměrná deformace při přetržení dílů tištěných na hraně. Odlišné natočení dílů v orientaci na hraně nemá na jejich tahové charakteristiky vliv. Závislost tahových charakteristik na orientaci dílu je uvedena na obr. 19. [39]



Obr. 19 Vliv orientace dílu na mechanické vlastnosti tištěných dílů [39].

Natočení má ovšem vliv na vrubovou houževnatost, která je při natočení 0° nejvyšší, vyskytuje se zde ale i největší rozptyl naměřených hodnot. Vrubová houževnatost i rozptyl se s rostoucím úhlem natočení snižují až do natočení 90° , kdy vrubová houževnatost dosahuje o 71 % nižší hodnoty než při natočení 0° . Závislost je uvedena na obr. 20. [41]



Obr. 20 Vliv orientace Úhel tisku [°]

2.6 Oplach DLP 3D tištěných dílů

Po vytvoření 3D tištěných dílů metodou DLP je nutné ho opláchnout, aby se odstranily zbytky nevytvrzené pryskyřice. Většina látek používaných pro oplach těchto dílů nevytvrzenou pryskyřici rozpouští. Tato kapitola se zaměřuje na princip rozpouštění polymerů a jeho vliv na vlastnosti materiálu. Budou rozebrány různé typy oplachových roztoků a popsány způsoby, jakými lze 3D tištěné díly oplachovat.

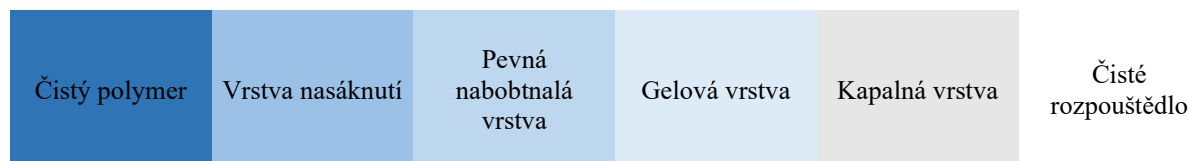
2.6.1 Rozpouštění polymerů

Princip rozpouštění polymerů je velmi komplexní téma a již nějakou dobu předmětem intenzivního výzkumu, během kterého byly charakterizovány určité obecné principy. Rozpouštění nepolymerních materiálů se od polymerů liší, protože k jejich rozpuštění dochází okamžitě a proces rozpouštění je obecně ovládan vnějším odporem proti přenosu hmoty skrz kapalnou vrstvu sousedící s rozhraním pevné rozpouštěné látky a rozpouštědla. Nicméně chování polymerů je při rozpouštění poměrně rozmanité. Rozpouštění polymeru do rozpouštědla zahrnuje dva přechodové procesy, a to rozplétání řetězců a difuze rozpouštědla. Když dojde ke styku polymeru ve sklovitém stavu s termodynamicky kompatibilním rozpouštědlem, dojde k difuzi rozpouštědla do polymeru. Z důvodu plastifikace polymeru rozpouštědlem je na rozhraní těchto dvou látek vytvořena nabobtnalá gelová vrstva. Po uplynutí určité doby je polymer rozpuštěn. Existují ale i případy, kdy dojde k prasknutí polymeru a žádná gelová vrstva vytvořena není. V této kapitole budou shrnuty dosavadní vědomosti o mechanismech rozpouštění polymerů. [42]

Tvorba povrchové vrstvy a mechanismy rozpouštění

Jedním z prvních zjištění o rozpouštění polymerů byl proces tvorby povrchových vrstev. Struktura povrchových vrstev v průběhu rozpouštění polymerů od čistého polymeru po čisté rozpouštědlo vypadá následovně. Vrstva nasáknutí, pevná nabobtnalá vrstva, gelová vrstva, a kapalná vrstva (jednotlivé vrstvy jsou uvedeny na obr. 21). Vrstva nasáknutí je první vrstvou sousedící se čistým polymerem. V této vrstvě obsahuje polymer ve sklovitém stavu volný objem v podobě množství dutin a drážek molekulárních velikostí, které jsou zaplněny prvními penetrujícími molekulami rozpouštědla, čímž začíná proces difuze bez nutnosti tvorby žádných dalších dutin. Molekuly rozpouštědla poté oddalují molekuly polymeru od sebe, čímž přerušují sekundární vazby mezi nimi. V důsledku toho se zvyšuje pohyblivost makromolekul, vzrůstá elasticita polymeru a snižuje se jeho pevnost. Další vrstvou je pevná nabobtnalá vrstva, ve které je systém polymer-rozpouštědlo stále ve sklovitém stavu. Pevnou nabobtnalou vrstvou následuje

gelová vrstva, která obsahuje materiál polymeru v gumovitém stavu, a kapalná vrstva jenž obklopuje každou pevnou částici polymeru proudící kapalinou. [42]



Obr. 21 Schématické znázornění složení povrchové vrstvy [42].

Existují dva druhy rozpouštění. Prvním typem rozpouštění, nazývaným „normální rozpouštění“ je proces, při němž jsou tvořeny všechny vrstvy zmíněné výše. Druhý typ rozpouštění nastává tehdy, když nedojde k vytvoření gelové vrstvy. PMMA (Polymethylmethakrylát) byl rozpouštěn v několika rozpouštědlech a prokazoval normální rozpouštění začínající na teplotě skelného přechodu. Snižováním teploty experimentu byl zpozorován postupný pokles tloušťky gelové vrstvy až do teploty, kdy byla tato vrstva příliš tenká na to, aby byla viditelná. Pod touto teplotou byly ve vnitřní struktuře polymeru vidět trhliny sbíhající se do jednoho místa, kde došlo k oddělení bloků polymeru z povrchu. Šíření těchto trhlin bylo zdůvodněno zamrazením značného množství vnitřního napětí ve struktuře polymeru. Na základě tohoto experimentu byla definována gelová teplota, tedy teplota, při které zanikne gelová vrstva a normální rozpouštění přechází na vznik trhlin. [42]

Vliv druhu rozpouštědla

Velmi podstatným průlomem se stalo zjištění, že při použití rychlejších a efektivnějších rozpouštědel dochází k dřívějšímu vzniku trhlin než při použití horších rozpouštědel. Dřívější vznik trhlin byl způsoben vyšší rychlostí difuze a vyšší schopností molekul těchto rozpouštědel narůstat na objemu. Závěrem studie bylo, že pokud vnitřní napětí ve struktuře polymeru převyší schopnost polymeru toto napětí uvolňovat postupným nabobtnáváním, dojde vlivem vzniku vnitřních trhlin k jeho porušení. [43]

Vliv procesních podmínek

Vnější parametry jako je víření rozpouštědla či teplota mohou ovlivnit rozpouštěcí proces. Rychlost rozpouštění se zvyšuje s frekvencí agitace a víření rozpouštědla z důvodu snížení tloušťky povrchové vrstvy. Bez agitace molekuly rozpouštědla sice penetrují polymer a dochází ke vzniku gelové vrstvy, ale s postupem času se velikost této vrstvy zmenšuje vlivem desorpce polymerních řetězců. Za to při agitaci rozpouštědla nedochází k tvorbě gelové vrstvy, jelikož je vlivem víření z povrchu polymeru strhávána. V tomto případě po absorpci molekul rozpouštědla bezprostředně následuje desorpce polymerních řetězců z nabobtnalé vrstvy. [42]

Mimo tyto parametry má na rozpustnost polymerů výrazný vliv také molekulární hmotnost, polymerní struktura, kompozice a konformace. Tyto vlastnosti ovšem výrobci pryskyřic pro 3D tisk neuvádí a jejich vliv nelze v rámci této práce zjistit. [42]

2.6.2 Druhy oplachových látek pro DLP 3D tisk

S kontinuálním rozvojem DLP a SLA 3D tisku se na trhu objevuje stále více látek pro oplach dílů vyrobených těmito technologiemi. Tyto látky se od sebe odlišují řadou vlastností, a to například účinností, dopadem na životní prostředí, hořlavostí, cenou či dobou, než je potřeba látku vyměnit.

Existují jak profesionálně užívané prostředky, tak prostředky používané především v domácím prostředí. Každý z těchto prostředků s sebou nese určité klady a zápory a vhodnost jejich použití se liší v závislosti na objemu výroby, dostupných finančních prostředků a zvolené oplachové technologii.

Isopropylalkohol (IPA)

Isopropylalkohol je organická sloučenina se sumárním vzorcem C_3H_8O . Jedná se o nejjednodušší příklad sekundárního alkoholu, kde je alkoholový uhlík vázán se dvěma dalšími uhlíky. Jedná se o hořlavou bezbarvou kapalinu s ostrým alkoholovým zápachem, která silně dráždí oči a sliznice. Velmi dobře se vstřebává do krve při vdechování jeho par, do těla prochází také kůží, a to i neporušenou. V oblasti 3D tisku se díky schopnosti rozpouštět nevytvrzenou pryskyřici a dostupnosti jedná o nejběžněji používanou oplachovou látku. Prodává se v koncentracích 60 % až 99,9 %. Pro využití v oblasti 3D tisku se doporučuje minimální koncentrace 90 %. Z důvodu nízké teploty vzplanutí není vhodné jej používat v ultrazvukových čistících zařízeních. [44, 45]

Dipropylenglykol methyl ether (DPM)

DPM je bezbarvá, nehořlavá kapalina s malou těkavostí. Má specifický zápach a olejovitou konzistenci. Lze jej opláchnout vodou a mýdlem. Dokáže rozpustit více pryskyřice než IPA před tím, než začne ztrácet efektivitu. Další výhodou nad IPA je, že díky nehořlavosti a nižší reaktivitě je možné DPM používat v ultrazvukových čistících zařízeních. Podobnou látkou je tripropylenglykol methyl ether (TPM), která má nižší reaktivitu. Obě jsou hojně využívány v průmyslovém 3D tisku. Testování inhalace na zvířatech ukázalo, že vdechnutí není smrtelné, ovšem způsobuje slabou reversibilní narkózu. Při kontaktu s pokožkou ji nezpůsobuje podráždění ani zvýšenou citlivost, ovšem může způsobit podráždění očí, nosu a krku. Studie neprokázaly výskyt karcinogenních účinků této látky. I přes to DPM v současnosti není certifikovaný k použití s biokompatibilními pryskyřicemi. Studie o negativním dopadu DPM na životní prostředí došly k závěru, že vzhledem k jeho nízké toxicitě nepředstavuje DPM hrozbu pro rostliny, bakterie ani živočichy. [46, 47, 48]

Všestranná odmašťovadla

Další čistidla populární mezi kutily jsou všestranná čistidla. Rozšířily se v době pandemie, a to kvůli vysoké ceně IPA v tomto období. Dalším důvodem jsou rizika spojené s užíváním IPA, jako je například již zmíněná hořlavost. Na rozdíl od ostatních oplachových látek, které pryskyřici rozpouští, jsou tyto čistidla většinou založené na bázi tenzidů, které nevytvrzenou pryskyřici z povrchu dílu nerozpouští, ale pouze strhávají. V důsledku rozdílného mechanismu oplachu tvoří tyto čistidla sraženiny opláchnuté pryskyřice, které se usazují na dně čistící nádoby. Pro zefektivnění oplachu může být použito ultrazvukové čistící zařízení. [49]

Denaturovaný ethanol

Denaturovaný ethanol je ethanol, ke kterému byla přidána aditiva za účelem zabránění požití jako alkoholického nápoje. V oblasti 3D tisku je stejně jako všeobecná čistidla využíván hlavně mezi kutily. Pro účely oplachu 3D tištěných pryskyřic má velmi podobné účinky jako IPA. Jediným rozdílem mezi těmito látkami z hlediska dané problematiky je, že díly opláchnuté denaturovaným ethanolem jsou mírně matnější než díly omyté IPA. [50]

Specializované prostředky výrobců 3D tiskáren a pryskyřic

Řada výrobců doporučuje k oplachu svých pryskyřic vlastní čistidla. Například firma Merck Group nabízí produkt Poly-Flush, který je oproti jiným výše zmíněným variantám oplachu schopný oplachovat rychleji a s menším dopadem na mechanické vlastnosti dílu. Prostředky mají také vysokou recyklovatelnost, lze je tedy používat déle než jiné varianty. Specializované oplachové látky jsou ovšem také ze všech zmíněných nejdražší. [51]

2.6.3 Způsoby oplachu DLP 3D tištěných dílů

Díly tištěné pomocí DLP technologie je možné oplachovat několika způsoby. V kutilském a poloprofesionálním prostředí jsou nejpoužívanější oplachové stanice, zatímco v profesionálním prostředí jako jsou například zubní laboratoře jsou využívány ultrazvukové čistící zařízení. Díly je také možné čistit ručně.

Ruční oplach

Technologicky nejjednodušším způsobem oplachu 3D DLP či SLA tištěných dílů je ruční oplach. Díl je ponořen do nádoby naplněné zvoleným čistícím médiem po dobu alespoň deseti minut a poté vytažen a dále zpracován. Pro zvýšení efektivity se doporučuje médium průběžně jemně promíchávat, čímž v nádobě vzniknou proudy, které z dílu odstraní kapalnou pryskyřici. Pro odstranění pryskyřice usazené v dutinách a jemných detailech je potřeba po prvotním oplachu díl ručně vyčistit pomocí kartáčku namočeného v čistícím prostředku. Tento proces je velmi zdoluhavý a může vést k poškození povrchu dílu – viz obr. 22. [52]

Tento způsob oplachu je ze všech nejlevnější, protože k němu není potřeba žádných specializovaných oplachových stanic či nástrojů. Na druhou stranu je ale časově nejnáročnější a v celém procesu vyžaduje lidskou práci. U ostatních metod obsluha pouze nastaví délku oplachu a samotného čistícího procesu se neúčastní. [52]



Obr. 22 Ukázka poškození povrchu 3D tištěného dílu po ručním oplachu [53].

Oplachové stanice

Oplachové stanice jsou nejběžnější metodou oplachu 3D DLP tištěných dílů. Skládají se z několika komponentů, a to uzavíratelné nádoby na oplachové médium, koše, do kterého je umístěn díl určený pro oplach, mechanismu pro nastavení délky oplachu a vrtule, která má za úkol nepřetržitě vířit oplachovou látku. V průběhu čištění vrtule několikrát změni směr otáček, aby došlo k co nejdůkladnějšímu opláchnutí dílu. V současnosti jsou tyto stanice často dodávány ve variantě 2v1 s vytvrzovací stanicí pro zjednodušení celého procesu postprocessingu a ušetření místa na pracovní ploše. Cena těchto zařízení se pohybuje v řádu jednotek tisíců korun pro domácí stanice až po řády stovek tisíc pro profesionální stanice. [54]

Proces oplachu touto metodou je přímočarý a jednoduchý. Díl je v košíku ponořen do nádoby s oplachovou látkou, která je následně uzavřena. Poté se zvolí délka oplachu a stanice je uvedena do provozu. Typická oplachová stanice je vyobrazena na obrázku 23. [54]



Obr. 23 Oplachová stanice firmy Creality [55].

Ultrazukové čistící zařízení

Ultrazukové čištění je moderní, efektivní, progresivní a šetrný způsob čištění 3D tištěných dílů. Při provozu ultrazukového zdroje vzniká jev zvaný kavitace, při kterém se v čistícím médiu vytváří miliony mikroskopických bublinek, které vzápětí implodují a uvolněná energie strhává nečistoty z povrchu čištěného předmětu z jeho vnějších i vnitřních částí. Čištěné předměty se ultrazukem mechanicky nepoškozuji. Cena ultrazukových čistíček pro 3D tištěné díly je obdobná jako cena oplachových stanic. [56]

Metoda je omezená volbou čistícího média, jelikož kavitace způsobuje prudký nárůst teploty. Hořlavé látky jako je IPA a řada specializovaných čisticidel jsou tedy s touto metodou nekompatibilní. Ultrazukové čistící zařízení je uvedeno na obr. 24. [56]



Obr. 24 Ultrazukové čistící zařízení firmy Phrozen [57].

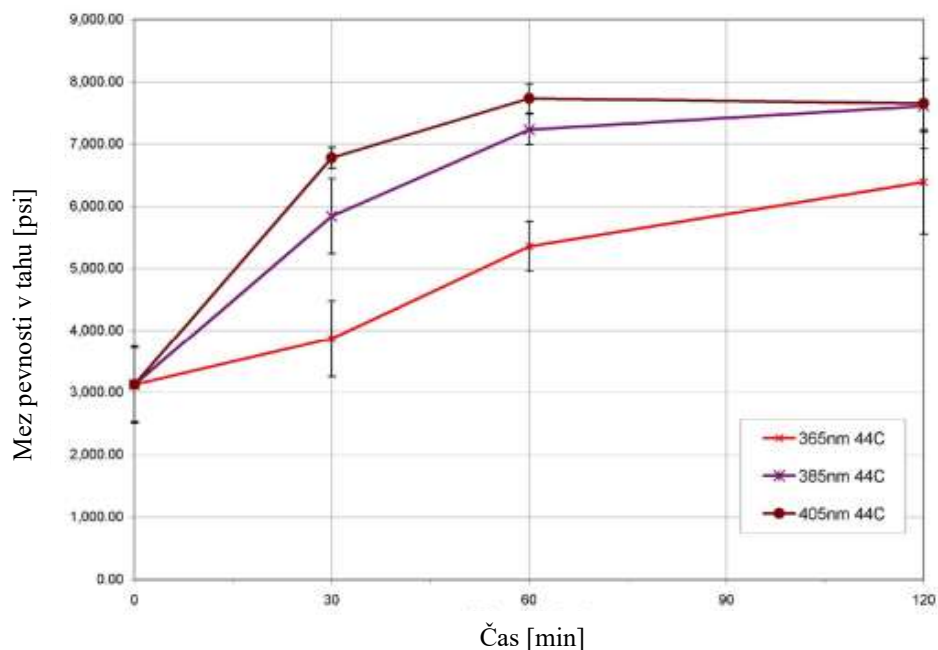
2.7 Dotvrzování DLP tištěných dílů

Posledním krokem výroby 3D tiskem fotopolymerizací je dotvrzování. To probíhá buď ve speciálních zařízeních za pokojové či zvýšené teploty po dobu až několika desítek minut, nebo působením slunečního záření po dobu několika hodin. Vlnová délka vytvrzujícího záření a doba vytvrzování mají vliv na mechanické i tvarové vlastnosti vyráběných dílů.

Různé vlnové délky dotvrzujícího světla mají výrazný vliv na finální mechanické vlastnosti materiálu, zejména pro kratší časy dotvrzování. Nejlepších mechanických vlastností je dosaženo při dotvrzování pomocí světelného zdroje o vlnové délce 405 nm. Pro srovnání, při použití světelného zdroje o vlnové délce 365 nm je dosaženo pouze 67 % modulu pružnosti oproti světelnému zdroji o vlnové délce 405 nm. Při použití zdroje světla o vlnové délce 405 nm je také dosaženo nejnižšího rozptylu dosažených hodnot mezi jednotlivými vzorky. [58]

Mechanické vlastnosti jsou také ovlivněny délkou dotvrzování. K největšímu nárůstu mechanických vlastností dochází během prvních 30 minut dotvrzování. Poté se nárůst zpomaluje a od 60 minut začíná stagnovat. Toto platí zejména pro statické zkoušky materiálu, kde se projevuje nízký rozptyl měřených vlastností mezi jednotlivými vzorky. U dynamických zkoušek lze sledovat podobný trend, ale vyskytuje se zde vyšší rozptyl, což vede k nižší přesnosti výsledků a opakovatelnosti. [58, 59]

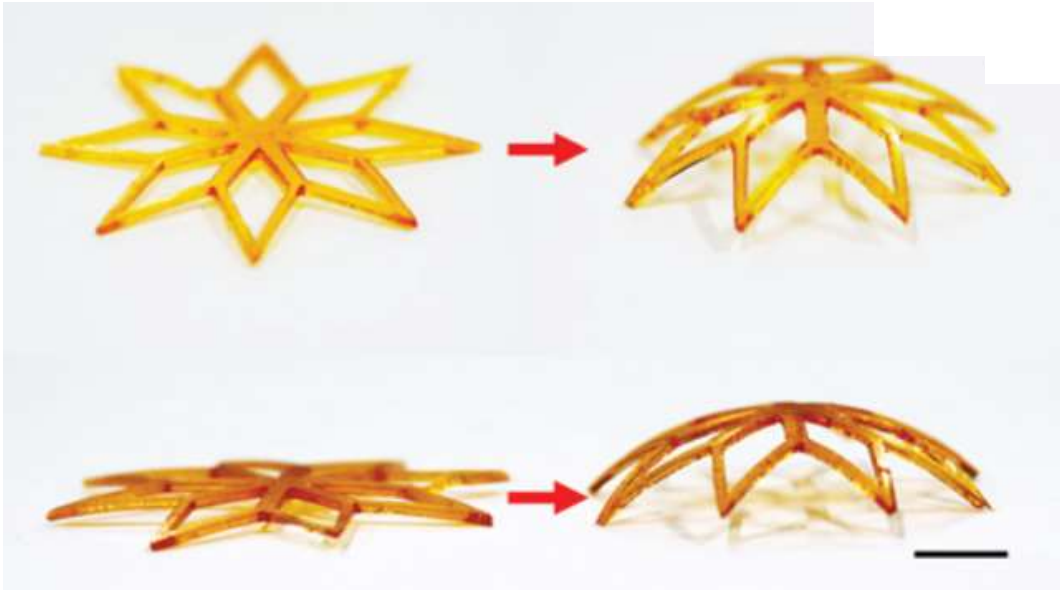
Závislosti meze pevnosti na těchto parametrech je vyobrazen na obr. 25.



Obr. 25 Závislost meze pevnosti v tahu na vlnové délce a času dotvrzování [58].

Zvláštností při dotvrzování je možnost změnit tvar vytištěného dílu. Při nerovnoměrném působení UV záření na povrch dílu v průběhu jeho dotvrzování dochází k nerovnoměrnému smrštění objemu. To vede k tvorbě nehomogenního napětí ve vnitřní struktuře, což zapříčiňuje zakřivení dílu směrem ke zdroji UV záření. [60]

Hlavní vliv na míru změny tvaru má délka expozice, výška vrstvy a intenzita dotvrzujícího záření. Při příliš dlouhé době dotvrzování zejména tenkých dílů může dojít k výraznému prohnutí. Toto chování materiálu lze využít pro výrobu specifických 3D struktur bez nutnosti použití podpěr, ovšem při výrobě vzorků využitých v experimentální části této práce je nezbytné se jakékoliv změně tvaru v důsledku dotvrzování vyhnout. Typický příklad změny tvaru vlivem dotvrzování je uveden na obr. 26. [60]



Obr. 26 Deformace vlivem vzniku napjatosti v průběhu dotvrzování [60].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě rešeršní části práce, která popisuje zařízení, materiály a vliv jednotlivých procesů výroby na konečné vlastnosti výrobku byly zvoleny konkrétní zařízení a materiály. K výrobě vzorků byla použita 3D DLP tiskárna Anycubic Photon D2, uvedena na obr. 27. Jedná se o jedinou domácí 3D tiskárnu tohoto typu na trhu. Zařízení je schopno tisknout všechny druhy pryskyřic, nicméně pro zkoumání dopadu druhu oplachové látky a délky oplachu na mechanické vlastnosti byly zvoleny tři nejpoužívanější typy, a to standardní pryskyřice (Standard) od společnosti Anycubic, houževnatá pryskyřice (ABS Like Resin) od společnosti Creality a odolná flexibilní pryskyřice (UV Tough Resin) od společnosti Anycubic. Pro oplach vzorků byla zvolena oplachová a dotvrzovací stanice Anycubic Wash & Cure Machine 2.0. Stanice poskytuje nastavitelnou délku oplachu a dotvrzování v intervalech 1 minuty. Vlnová délka dotvrzovacího UV záření je 405 nm. Vzorky budou oplachovány v oplachových látkách 99,5% IPA, DPM od společnosti 3D-basics, univerzálním čisticím prostředku SIMPLE GREEN Crystal (dále SG) a specializovaném prostředku na oplach 3D tištěných dílů EasyClean (dále EC) od společnosti Formfutura. Zkušební vzorky pro stanovení mechanických vlastností budou v každém oplachovém médiu čištěny po dobu 2, 4, 6, 8 a 10 minut. Pro srovnání dosažených výsledků budou také vyrobeny kontrolní vzorky, které oplachem neprojdou.



Obr. 27 Použitá 3D DLP tiskárna Anycubic Photon D2 [61].

3.1 Výroba vzorků

3.1.1 Kalibrace tiskárny

Základem pro úspěšný tisk je nutné 3D tiskárnu zkalibrovat a vytvořit tiskové profily pro použité materiály. Výrobci materiálů dodávají v technických listech rozmezí doporučených parametrů, ale jelikož se intenzita vytvrzujícího UV záření může u každé tiskárny lišit, je nutné optimální parametry stanovit experimentálně. Hlavními parametry, které je potřeba optimalizovat jsou doba expozice vrstev, jejich výška a výška vyzdvižení tiskové podložky po dokončení vrstvy. Značný důraz bude také kladen na nastavení parametrů dle znalostí z rešeršní části tak, aby byl minimalizován vliv procesu tisku na rozptyl zjišťovaných vlastností.

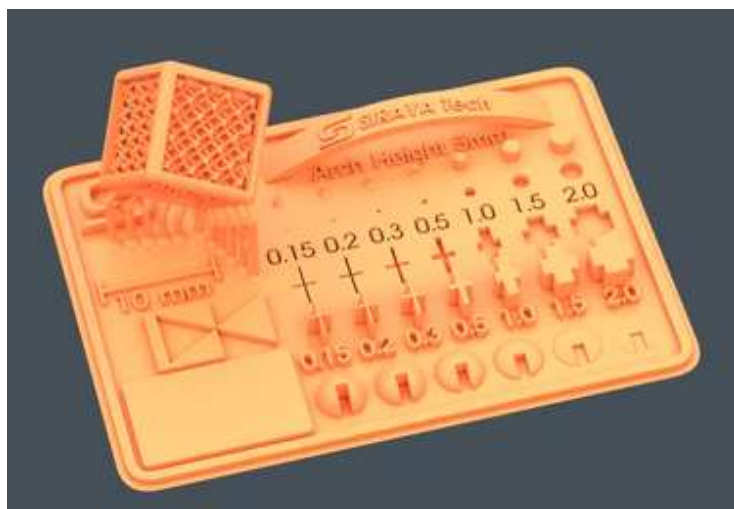
Prvním krokem výroby je seřízení 3D tiskárny. Tisková podložka je k nádobě s pryskyřicí vedena lineárním vedením a její pohyb zajišťuje vodící šroub poháněný krokovým motorem. Lineární vedení i vodící šroub byly pro hladký chod promazány. Pro zajištění chlazení řídicí jednotky a krokového motoru byl z větráčku uvnitř tiskárny stlačeným vzduchem vyfoukán prach.

Dále byla z tiskárny odebrána nádoba na pryskyřici, která byla následně důkladně očištěna od zbytku staré pryskyřice. Nádoba byla rozebrána a došlo k výměně průhledné FEP (Fluorovaný ethylen-propylen) fólie na jejím dně za novou. Špinavá či poškrábaná fólie může pozměnit dráhu vytvrzujícího paprsku a vytvrzovat tak pryskyřici mimo vyráběný díl.

V poslední řadě došlo ke kalibraci tiskové podložky, která musí na dno nádoby doléhat naprosto rovnoměrně. Pokud by podložka nebyla se základnou tiskárny rovnoběžná, došlo by k negativnímu dopadu na rozměrovou přesnost dílu, a především jeho adhezi k podložce. Natočení podložky je zajištěno čtyřmi šrouby, které byly povoleny, podložka poté byla snížena k základně tiskárny. Mezi základnu a podložku byl pro ochranu tiskárny umístěn kancelářský papír a došlo k přitlačení podložky. Po jejím vyrovnaní byly dotaženy jistící šrouby a současná poloha nastavena jako domovská, tedy poloha, ze které bude začínat každý tisk.

3.1.2 Stanovení tiskových profilů

Po úspěšném seřízení tiskárny následuje optimalizace tiskových parametrů. Na internetu se nachází nespočet kalibračních modelů. Zde byl použit komplexní model zahrnující testy všech podstatných tiskových parametrů, model je uveden na obr. 28.



Obr. 28 Komplexní kalibrační model [62].

Primárním sledovaným parametrem je ideální doba expozice. Při optimalizovaném nastavení jsou všechny vyčnívající i všechny propadlé prvky na pravé straně vytištěného modelu viditelné. Pokud nedojde k vytištění vyčnívajících prvků, znamená to, že je expozice příliš krátká. To může mít za následek nedostatečné vytvrzení v průběhu tisku, což může vést k odtržení vrstev od sebe z důvodu nízké přilnavosti. Dalším výrazným negativem je slabá adheze k tiskové podložce, což v krajním případě může vést k tomu, že se tištěný díl od tiskové podložky odlepí a spadne zpět do nádoby s pryskyřicí, čímž může poškodit FEP fólii. Naopak nevytištění propadlých prvků znamená příliš dlouhou expozici. Dlouhá expozice penetruje a vytvrzuje materiál až moc hluboko, což způsobuje rozměrovou nepřesnost v ose Z. Dále může zveličt vychylování rovných paprsků vytvrzujícího světla mimo požadovanou oblast a tím polymerizovat v nevyžádaných směrech. Dalším ze sledovaných parametrů je rozměrová přesnost tisku. K jejímu vyhodnocení slouží ryska o délce 10 mm na levé straně modelu. V průběhu tisku je pryskyřice vlivem působení záření zahřívána a během následného chladnutí může dojít ke smrštění objemu tištěného dílu. Posledním prvkem kalibračního modelu je krychle vyplněná komplexní geometrií. Krychle je umístěna na tenkých podpěrách, které slouží k určení přilnavosti vrstev. Pokud by přilnavost byla příliš nízká, krychle by se z podpěr během tisku odtrhla. V poslední řadě se subjektivně hodnotí vizuální kvalita vytištěné krychle.

Dle doporučení výrobců materiálů a vlastních experimentů při kalibraci tiskárny byla pro všechny materiály zvolena výška vrstvy 50 μm . Jedná se o standardně nejčastěji používanou hodnotu napříč DLP i LCD tiskárnami a její použití tudíž poskytne nejrelevantnější informace. Použití nižších výšek by dle kapitoly 2.4 vedlo k lepším tahovým charakteristikám za cenu vyššího času tisku.

Pro zajištění dostatečné přilnavosti tištěného dílu k podložce jsou využívány takzvané spodní vrstvy. Jedná se o prvních několik vytištěných vrstev, které se od běžných vrstev vyskytujících se na zbytku modelu liší výrazně delší dobou expozice. K zajištění dostatečné přilnavosti stačí pouze 1 spodní vrstva, nicméně je výhodné používat těchto vrstev více pro vyrovnání nepřesností na povrchu tiskové podložky. Pro plynulé navázání spodních a běžných vrstev se využívají takzvané přechodné vrstvy. Během tisku těchto vrstev se postupně snižuje doba expozice, dokud není dosaženo doby expozice pro běžnou vrstvu.

Posledními parametry, které je nutné nastavit, jsou pohyby tiskové podložky. Výška zdvihu podložky slouží k odlepení vytištěného dílu od FEP fólie. Důležité je také určit rychlost zdvihu, jelikož pokud by byla příliš vysoká, došlo by k poškození tištěného dílu i FEP fólie. Po zdvihu podložky následuje opětovné ponoření do pryskyřice. Tento pohyb se nazývá retrakce a taktéž je nutné nastavit její rychlost. Při příliš vysoké rychlosti retrakce může dojít ke vzniku bublin v pryskyřici. K zamezení negativního dopadu bublin je využívána prodleva vytvrzovacího světla. Při této prodlevě je po retrakci podložky vypnuto vytvrzovací světlo, aby bylo pryskyřici umožněno stabilizovat se.

Na základě výsledků kalibrace a informací z kapitoly 2.3 byly pro tisk vzorků z jednotlivých materiálů stanoveny tiskové profily, které jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Tiskové profily jednotlivých materiálů.

Materiál	Standard	ABS-like	Tough
Výška vrstvy	50 μm	50 μm	50 μm
Doba expozice	2,3 s	2,6 s	2,5 s
Počet spodních vrstev	5	6	5
Doba expozice spodních vrstev	25 s	25 s	25 s
Počet přechodných vrstev	5	4	5
Výška zdvihu podložky	3 mm	4 mm	5 mm
Rychlost zdvihu podložky	120 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	60 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	70 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Rychlost retrakce	180 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	180 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	180 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Prodleva vytvrzovacího světla	1 s	3 s	3 s

3.1.3 Oplach a dotvrzování

Vytištěné vzorky je nezbytné opláchnout. Jak již bylo řečeno, při vypracovávání experimentální části byly použity 4 různé oplachové látky a vzorky byly čišťeny v oplachové a dotvrzovací stanici Wash and Cure 2.0 firmy Anycubic, uvedena na obr. 29. Stanice je na dně nádoby vybavená vrtulí, kterou je pro zvýšení efektivity oplachu vířeno oplachové médium. Směr točení vrtule se každých 60 s mění. Pro následné srovnání výdrže oplachových látek byl z každého druhu použit 1 litr. Oplachové látky byly v průběhu práce na experimentech často střídány, 1 se vždy vyskytovala v nádobě oplachové stanice, zatímco zbylé byly skladovány v původních lahvích. Pro zamezení smíchání těchto látek byla nádoba oplachové stanice po přelití kapaliny důkladně vyčištěna, opláchnuta tekoucí vodou a poté vysušena kombinací papírových utěrek a stlačeného vzduchu.

Do oplachové stanice byla vždy vložena celá skupina vzorků pro daný experiment a při oplachu byly v intervalech 2 minut jednotlivé vzorky postupně odebírány. Ty byly poté opláchnuty tekoucí vodou a vysušeny stlačeným vzduchem.

Po očištění a osušení celé skupiny vzorků byla oplachová stanice přepnuta do režimu dotvrzování. Vzorky byly položeny na rotující stolek a byly dotvrzovány po dobu 2 min, čímž byl proces výroby dokončen.

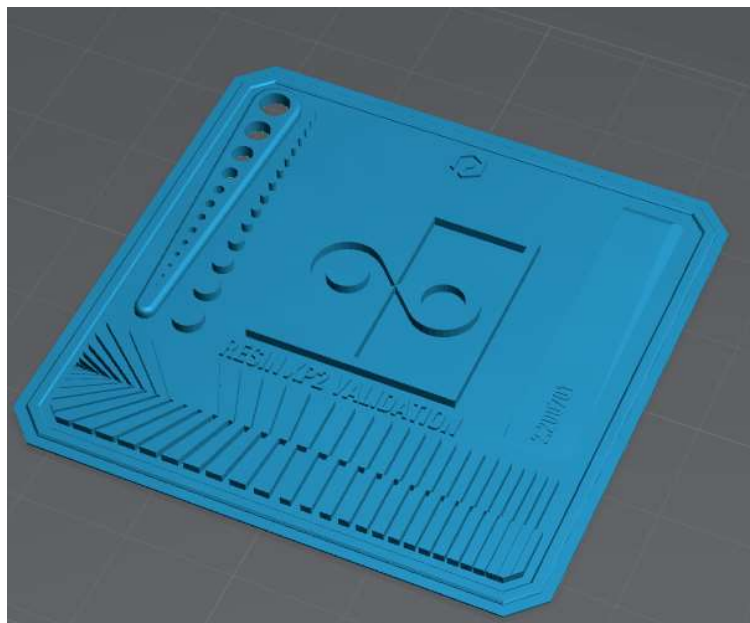


Obr. 29 použitá oplachová stanice Anycubic Wash and Cure 2.0 [63].

3.2 Efektivita oplachových látek

Při výběru vhodného oplachového média je velmi podstatným faktorem jejich efektivita. Pro stanovení efektivy byla změřena hmotnost vytištěných vzorků před oplachem a po oplachu. Po vytištění byl každý vzorek ponechán na tiskové podložce po dobu 2 hodin, aby většina nevytvrzené pryskyřice ztekla ze vzorku zpět do nádoby. Experiment byl proveden pro každou oplachovou látku, při čemž byla upravována délka oplachu v rozsahu od 2 min do 10 min, odstupňovaného po 2 min.

Vzorkem použitým pro tento experiment byla obdoba kalibračního modelu použitého pro stanovení tiskových profilů. Model je uveden na obr. 30. Složitá geometrie vzorku obsahuje řadu drobných dutin a výčnělků, ze kterých je v průběhu oplachu nejsložitější odstranit nevytvrzenou pryskyřici.



Obr. 30 Model použitý ke stanovení efektivy oplachu.

Dalším experimentem bylo stanovení vlivu oplachu na vzhled průsvitné pryskyřice. Častým jevem dílů tištěných z tohoto druhu pryskyřice je, že po oplachu dojde k zamlžení jejich povrchu, podobně jako je uvedeno na obr. 31.



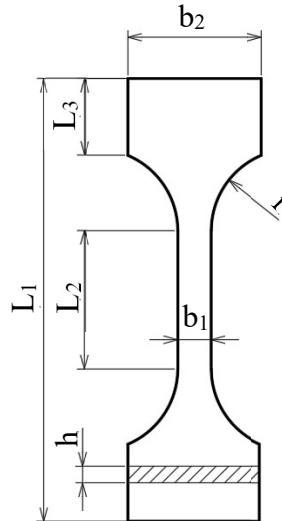
Obr. 31 Vlevo zamlžený povrch modelu, vpravo transparentní povrch modelu [64].

Míra zamlžení lze jednoduše zjistit určením intenzity osvětlení, která je měřena luxmetry. Přičemž čím více je materiál zamlžený, tím menší intenzita osvětlení je luxmetrem změřena. Zkušební vzorek ve tvaru válce o průměru 30 mm a výšce 5 mm byl umístěn před přijímač s fotočlánkem luxmetru. Na luxmetr bylo svíceno zdrojem světla o světelném toku 200 lm, vzdáleném 200 mm od luxmetru. Pro zamezení dopadu okolního světla na přijímač luxmetru byla celá měřicí soustava zakrytována. Pro srovnání výsledků bylo provedeno také kontrolní měření, kdy před přijímač luxmetru nebyl umístěn tištěný vzorek. [65]

3.3 Tahová zkouška

Tahová zkouška je nejstarší mechanickou zkouškou materiálu. Je základem pro stanovení mechanických charakteristik polymerních materiálů. Výstupem jsou deformační křivky sledující poměrné prodloužení vzorku způsobené jednoosým namáháním v závislosti na normálovém napětí. Jedná se o destruktivní zkoušku, jelikož experimentální měření probíhá až do meze pevnosti materiálu.

Vzhledem k limitovanému tiskovému prostoru DLP 3D tiskáren byla zvolena zmenšenina normovaných zkušebních vzorků, uvedena na obr. 32. Geometrie byla inspirována studií, ve které bylo prokázáno, že deformační křivky vzorků z hliníku s délkou zúžené části 50 mm při kvazistatickém namáhání odpovídají deformačním křivkám zmenšených vzorků s délkou zúžené části 12,5 mm. Stejné chování bylo později potvrzeno i pro ocel. Rozdílem při použití této geometrie je mírně vyšší maximální deformace při přetržení. Rozměry lopatek na koncích vzorku byly navrženy dle čelistí použitého trhacího zařízení. Jednotlivé rozměry vzorku jsou uvedeny v tab. 2. [66, 67]

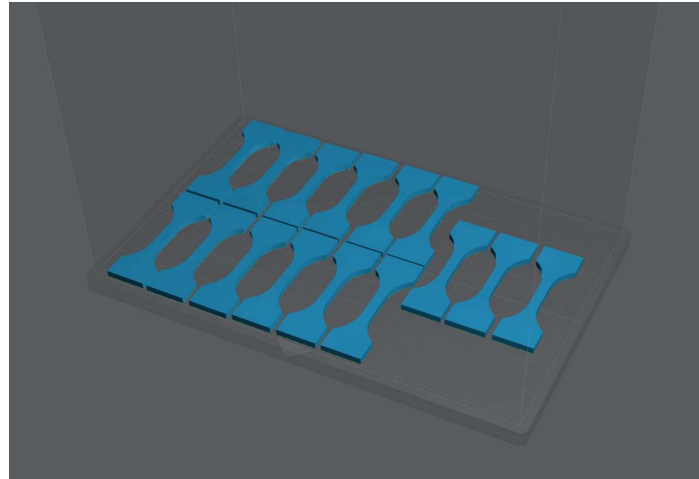


Obr. 32 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku se zakótovanými rozměry.

Tab. 2 Jednotlivé rozměry zkušebních vzorků.

Celková délka	L_1	40 mm
Délka zúžené části	L_2	12,5 mm
Délka konců	L_3	6,9 mm
Šířka zúžené části	b_1	3 mm
Šířka konců	b_2	12 mm
Tloušťka vzorku	h	2 mm
Poloměr zúžené části	r	7,4 mm

Zkušební vzorky byly vyrobeny za použití dřívě stanovených tiskových profilů pro jednotlivé materiály. V kapitole 2.4 je jasně vidět, že orientace dílu v ose Z přináší výrazné snížení pevnostních charakteristik. Lze sledovat i rozdílné chování po vytištění v ose X a v ose Y. Z tohoto důvodu byla pro tisk všech testovaných vzorků zvolena orientace v ose Y. Každá skupina 15 zkušebních vzorků byla ve snaze eliminovat okolní vlivy tištěna současně. Skupina vzorků je uvedena na obr. 33.

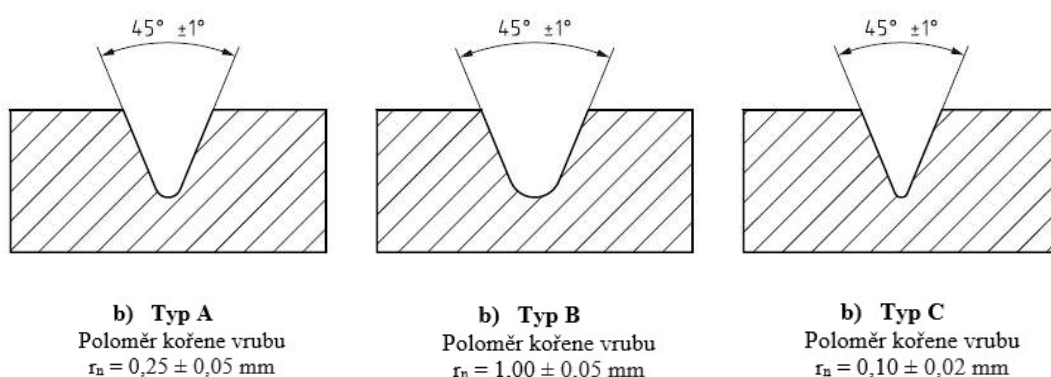


Obr. 33 Skupina 15 vzorků pro tahovou zkoušku.

Tahová zkouška probíhala vložení zkušební vzorku do čelistí trhacího zařízení, uvedení jedné z čelistí do pohybu, čímž byl vzorek zatěžován až do meze pevnosti. Po přetržení vzorku bylo měření odesláno do počítače a zařízení navráceno do původní pozice. Poté došlo ke vložení nového vzorku. Tento postup byl opakován pro všech 189 zkušebních těles. Zkouška probíhala za teploty okolí 22 °C.

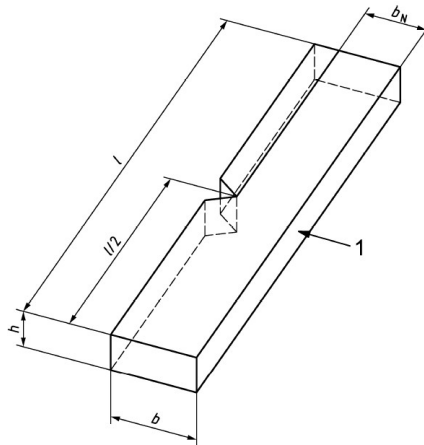
3.4 Zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška rázové a vrubové houževnatosti byla vynalezena v roce 1900 Georgesem Charpym a jedná se o jednu z nejběžněji používaných zkoušek pro určení houževnatosti materiálu rychlým a ekonomickým způsobem. Zkouška sleduje energii absorbovanou normovaným zkuševým tělesem při jeho lomu pod zátěží. Průběh zkoušky spočívá v přeražení vzorku kladivem upevněným na kyvadle vedeným na střed vzorku a následným odečtením absorbované energie. Ta závisí na materiálu, okolní teplotě, nominální energii použitého zařízení a parametrech zkušebního tělesa. Pro snazší přeražení vzorku se využívá vrubu umístěného uprostřed delší strany vzorku, který slouží jako koncentrátor napětí. Typy vrubů jsou uvedeny na obr. 34. [68]



Obr. 34 Typy jednotlivých vrubů [69].

Průběh zkoušky je definován dle ČSN EN ISO 179-1 určené ke stanovení rázové houževnatosti plastů metodou Charpy. Norma definuje ráz kladiva na užší a širší stranu zkušebního tělesa, zde je zvolena varianta na užší stranu, uvedena na obr. 35. Rozměry zkušebního tělesa pro tuto variantu jsou uvedeny v tab. 3. Norma také definuje rozpětí vodorovných podpěr, na kterých při zkoušce leží vzorky, tato hodnota je rovna $62_{-0,0}^{+0,5} \text{ mm}$.

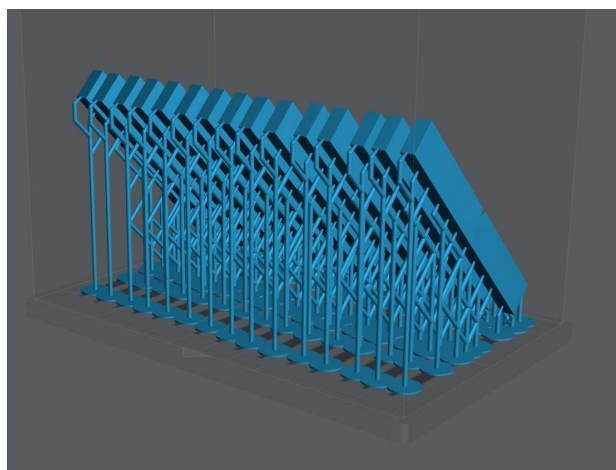


Obr. 35 Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti se zakótovanými rozměry [70].

Tab. 3 Jednotlivé rozměry zkušebních vzorků.

Délka	l	80 ± 2 mm
Šířka	b	$10 \pm 0,2$ mm
Tloušťka	h	$4 \pm 0,2$ mm

Obdobně jako při tahové zkoušce byly vzorky vyrobeny dle tiskových profilů jednotlivých materiálů. Rozdílem byla orientace vzorků na tiskové podložce, která byla v tomto případě nastavena na 45° . Důvodem byly informace z kapitoly 2.4, podle kterých byla průměrná vrubová houževnatost takto tištěných vzorků srovnatelná se vzorky tištěnými pod úhlem 0° , ale rozptyl jednotlivých měření byl výrazně nižší. Orientace tisku vzorků je uvedena na obr. 36. Zkouška vrubové houževnatosti probíhala následujícím způsobem. Nejprve bylo kladivo spuštěno několikrát naprázdno, aby byl určen odpor vzduchu a tření ložisek. Zjištěná hodnota byla poté odečtena od všech zjištěných výsledků. Následně byl na vodorovné podpěry umístěn vzorek tak, aby kladivo dopadlo na střed protější strany vrubu. Nakonec došlo ke spuštění kladiva a přeražení vzorku. Po zajištění kladiva do původní pozice se celý proces opakoval pro další vzorek. Zkouška probíhala za teploty okolí 21°C .



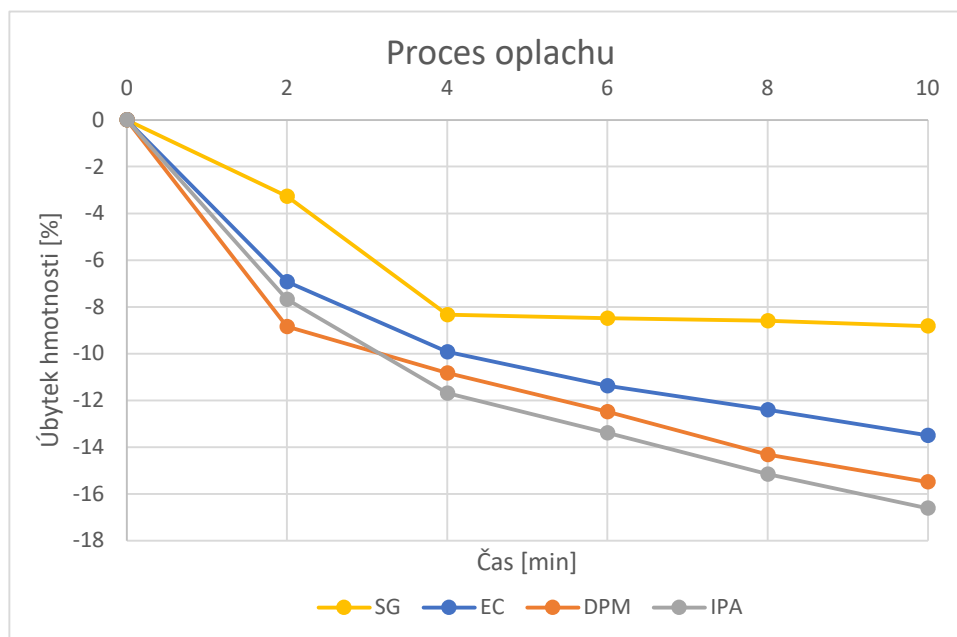
Obr. 36 Skupina 15 vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti.

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Veškeré výsledky provedených experimentů byly vyhodnoceny na základě průměrných hodnot jednotlivých iterací měření. Výsledky tahové zkoušky byly určeny na základě průměrných hodnot 3 iterací z celkem 189 vzorků. Stejně byly určeny i výsledky zkoušky vrubové houževnatosti, a to ze 3 iterací z celkem 189 vzorků. Výsledky z experimentů pro zjištění efektivity jednotlivých oplachových látek byly stanoveny na základě průměrných hodnot ze 2 iterací z celkem 40 vzorků.

4.1 Efektivita oplachových látek

Efektivita oplachových látek byla zjišťována zvážením vzorku před oplachem a po oplachu a následným určením úbytku hmotnosti. Grafické vyjádření závislosti délky oplachu na úbytku hmotnosti vzorku je uvedeno na obr. 37. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1.

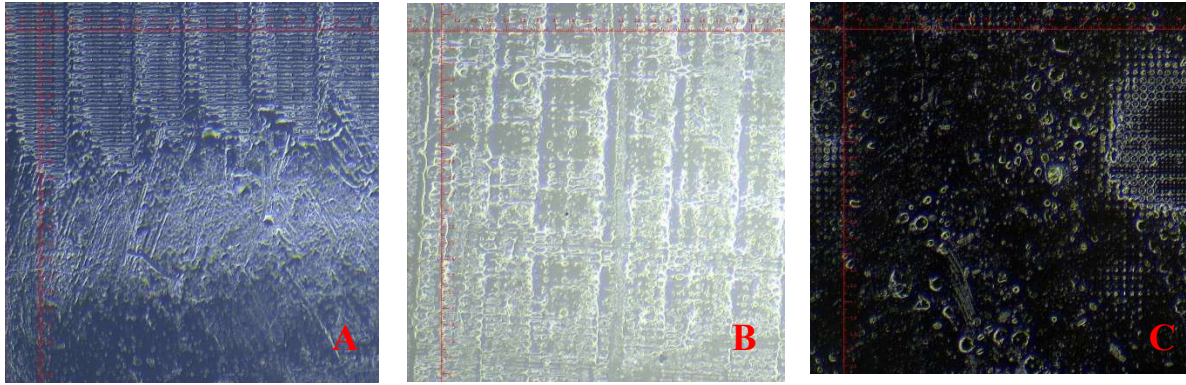


Obr. 37 Výsledky efektivity jednotlivých oplachových látek.

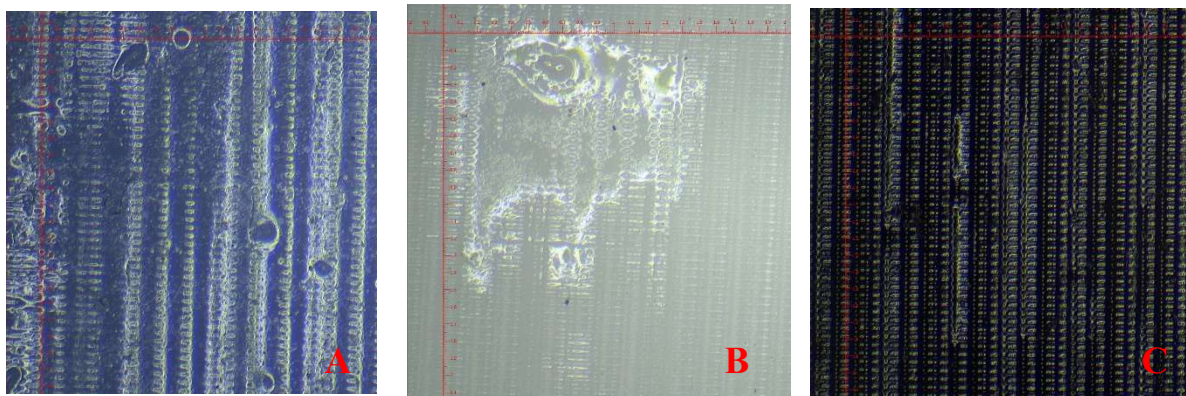
Úbytek více než 16 % původní hmotnosti se může zdát nepřiměřený, je ale třeba brát v potaz, že průměrná hmotnost neopláchnutého vzorku je pouze 3,85 g. Pro rozměrnější vzorky by byl procentuální úbytek řádově nižší.

Nejvyšší úbytek hmotnosti lze pro všechny oplachové látky sledovat v prvních 4 min oplachu. Při delším oplachu množství odstraněné pryskyřice zpomaluje. V případě látky SG začne po 4 min oplachu úbytek hmotnosti téměř stagnovat, kdy rozdíl mezi 4 min a 10 min oplachu činí pouze 0,48 %. Dále je jasně viditelné, že nejvíce nevytvrzené pryskyřice očistil IPA, který po 10 min oplachu odstranil 16,61 % původní hmotnosti vzorku. Zatímco DPM a EC po této době odstranily 15,49 % a 13,50 %. Ovšem na povrchu vzorků nebyl po oplachu těmito látkami znatelný rozdíl. Odlišné hodnoty úbytku hmotnosti byly tudíž způsobeny účinnějším odstraněním pryskyřice z drobných dutin nacházejících se na modelu vzorku.

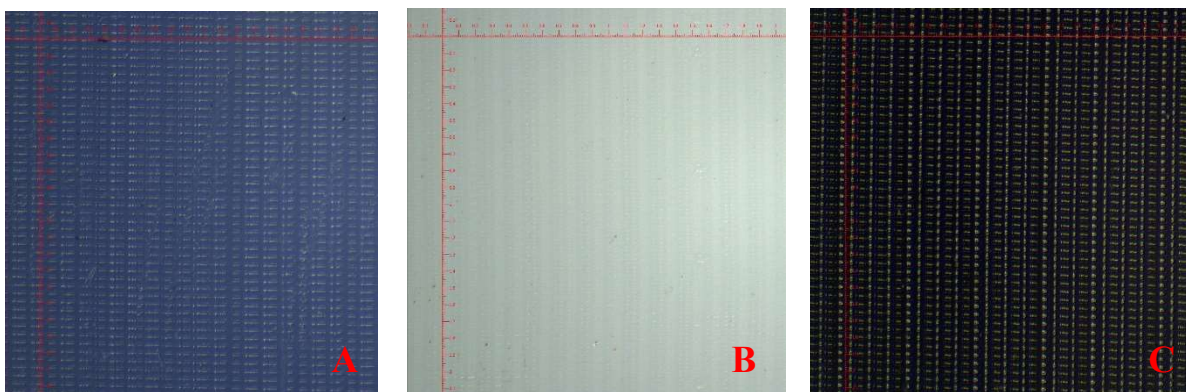
Pro vysvětlení tak výrazného rozdílu mezi SG a ostatními oplachy byly pořízeny snímky povrchů všech testovaných materiálů. Vzorky bez oplachu jsou uvedeny na obr. 38, vzorky po oplachu SG jsou uvedeny na obr. 39 a vzorky po oplachu IPA jsou uvedeny na obr. 40.



Obr. 38 Povrch vzorků bez oplachu z materiálu A-Standard, B-ABS-like, C-Tough.



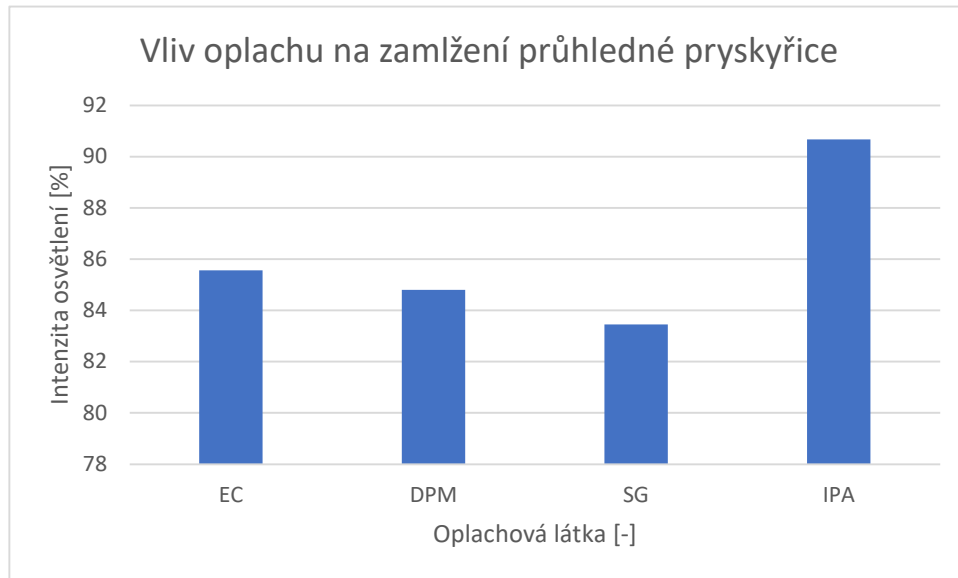
Obr. 39 Povrch vzorků po 10 min oplachu SG z materiálu A-Standard, B-ABS-like, C-Tough.



Obr. 40 Povrch vzorků po 2 min oplachu IPA z materiálu A-Standard, B-ABS-like, C-Tough.

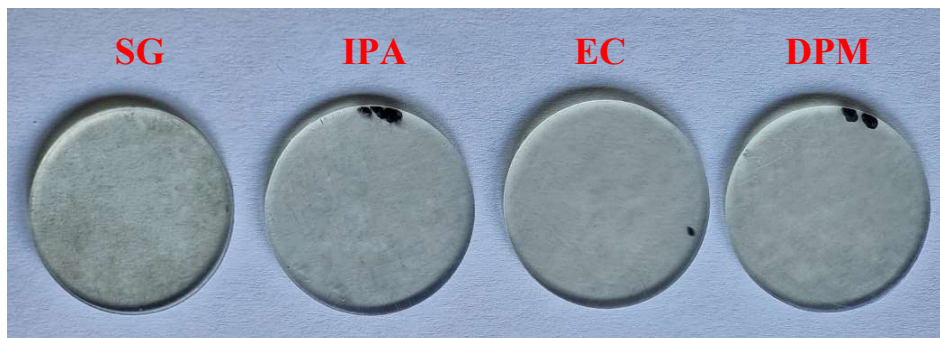
Na obr. 38 lze na povrchu vzorků vidět rozlehlé skvrny vzniklé vytvrzením přebytečné pryskyřice, kdy jednotlivé pixely téměř nejsou viditelné. Na obr. 39 se na povrchu vzorků po oplachu SG stále nachází skvrny a kapky neodstraněné pryskyřice, což vysvětluje nízkou efektivitu tohoto oplachu. Stejně jako povrch neopláchnutých vzorků byl povrch těchto vzorků kvůli neodstraněné pryskyřici na dotek lepkavý. Na posledním obr. 40 jsou dokonale opláchnuté povrchy všech materiálů, jednotlivé pixely jsou zde zřetelně viditelné a vzorky na dotek nelepi. Povrchy vzorků po oplachu EC a DPM vypadaly totožně jako po oplachu IPA.

Dalším experimentem pro zjištění efektivitu oplachu byl jeho vliv na zamlžení průhledné pryskyřice. Závislost intenzity osvětlení na oplachových látkách je uvedena obr. 41.



Obr. 41 Výsledky vlivu oplachu na zamlžení průhledné pryskyřice.

Kontrolní měření, kdy před snímač luxmetru nebyl vložen vzorek dosahovalo intenzity osvětlení 15,65 klx. Na grafickém srovnání jsou uvedeny procentuální závislosti vztažené k této hodnotě. Z grafického srovnání lze vidět, že látky EC, DPM a SG měly na průhlednost podobný vliv, kdy se hodnoty intenzity osvětlení rovnaly 13,39 klx, 13,27 klx a 13,06 klx respektive. Nejmenší zamlžení bylo zaznamenáno po oplachu látkou IPA, kdy byla intenzita osvětlení rovna 14,19 klx, oproti kontrolní hodnotě 15,65 klx šlo tedy o úbytek pouze 9,33 %. Vzorky jsou uvedeny na obr. 42. Po oplachu SG se na ulepený povrch vzorku lepí prach a nečistoty, proto je na fotce vzorek znečištěný. Na vzorku po oplachu IPA lze vidět nejmenší zamlžení, které vedlo k nejvyšší naměřené intenzitě osvětlení.

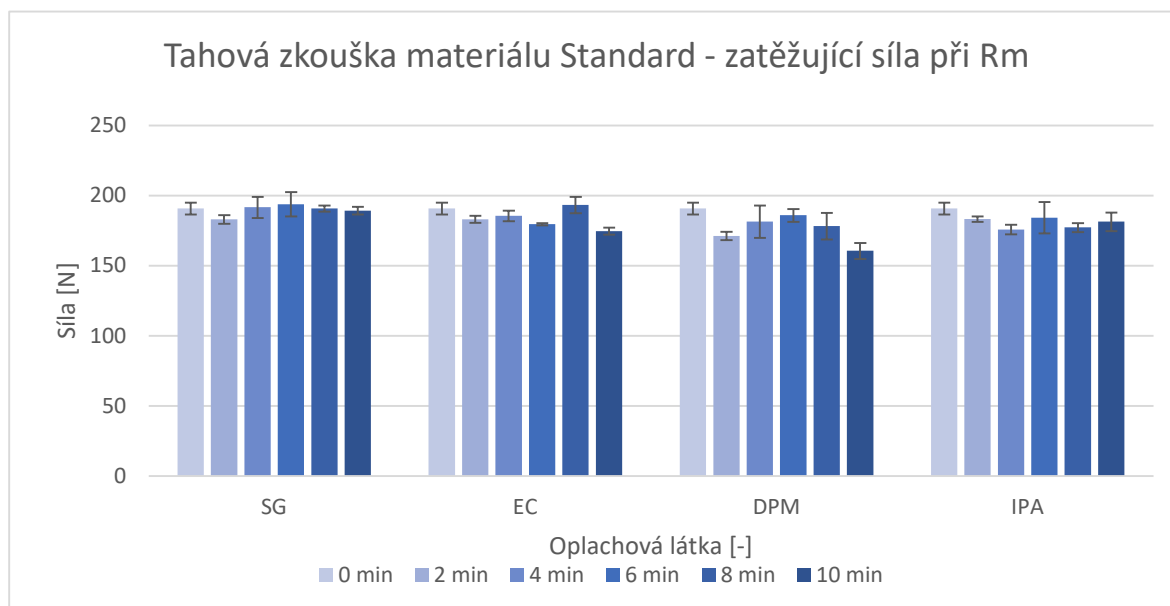


Obr. 42 Vzorky použité pro stanovení vlivu oplachu na zamlžení průhledné pryskyřice.

Z obou provedených experimentů je jasně vidět, že nejméně efektivní oplach poskytuje látka SG. Zatímco nejefektivnějšího oplachu je dosaženo pomocí látky IPA, ovšem rozdíl mezi IPA, EC a DPM je z pohledové stránky téměř nerozeznatelný.

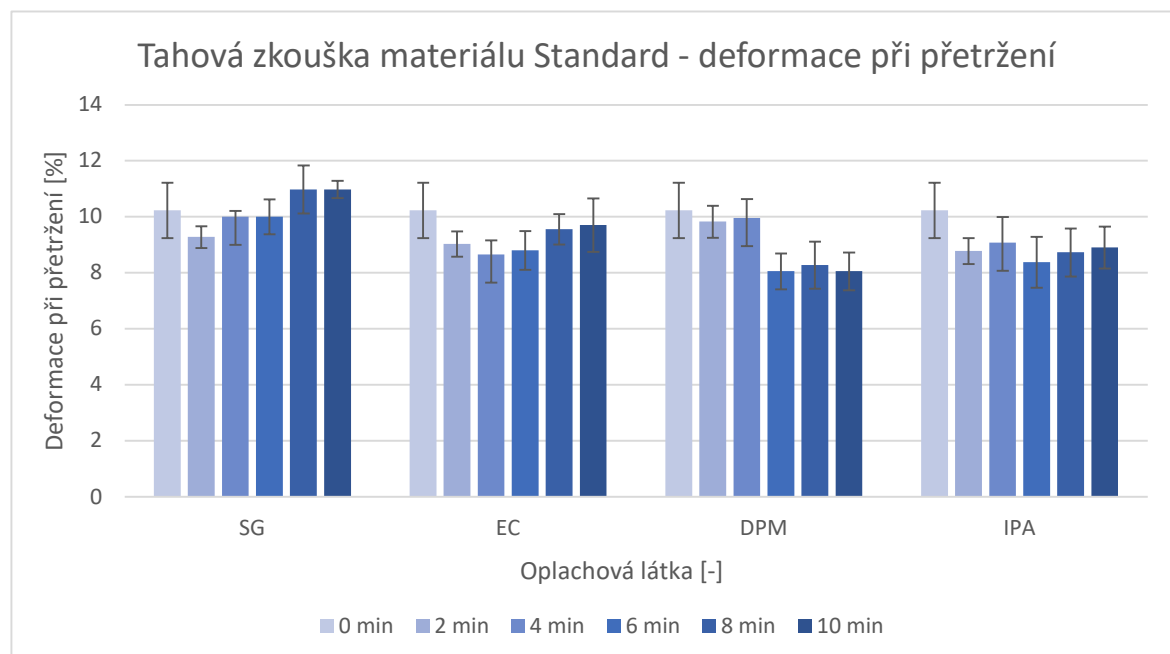
4.2 Tahová zkouška

Při určování meze pevnosti a deformace při přetržení tahovou zkouškou bylo přetrženo všech 189 testovaných vzorků (63 pro každý materiál). Průměrné hodnoty zatěžujících sil při mezi pevnosti, stanovené na základě 3 iterací, jsou pro materiál Standard uvedeny na obr. 43. Konkrétní hodnoty měření jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 43 Výsledky zatěžujících sil při Rm v průběhu tahové zkoušky materiálu Standard.

U vzorků, které neprošly oplachem, měla zatěžující síla na mezi pevnosti hodnotu 190,848 N. Po oplachu látkou SG nedošlo k výrazné změně této hodnoty, nehledě na délku oplachu. Oplach látkou EC vedl k poklesu zatěžující síly na mezi pevnosti napříč všemi délkami oplachu průměrně o 5,75 %, oplach látkou IPA o 6,29 %. Po oplachu látkou DPM po dobu 10 min byl zaznamenán nejvyšší pokles zatěžující síly na mezi pevnosti, kdy klesla na 160,540 N, tedy o 15,88 %. Na obr. 44 jsou vyobrazeny průměrné hodnoty deformací při přetržení.

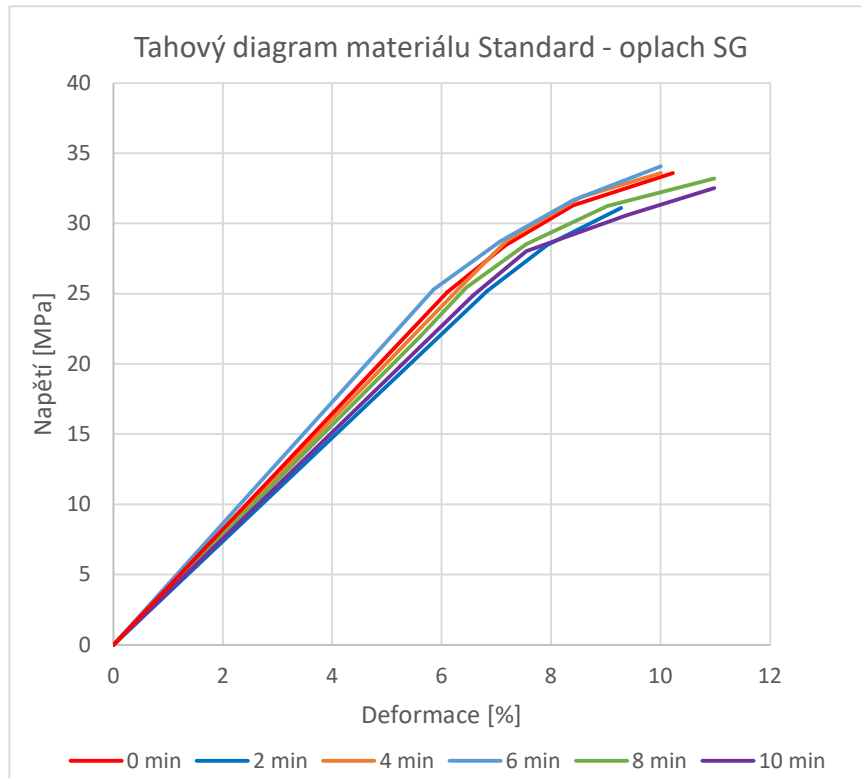


Obr. 44 Výsledky deformací při přetržení v průběhu tahové zkoušky materiálu Standard.

Zde lze sledovat naprosto odlišné chování materiálu po oplachu každou látkou, s výjimkou původního poklesu deformace při přetržení po 2 min oplachu, ke kterému dojde u každé z nich. SG a EC po prvotním poklesu postupně s rostoucí délkou oplachu deformaci při přetržení zvyšují, přičemž SG dokonce přesáhne původní hodnotu bez oplachu, a to o 7,34 % po oplachu

po dobu 10 min. Zatímco u DPM dochází po 4 min k prudkému poklesu, kdy rozdíl mezi 4 min a 6 min činí 19,09 %. V případě IPA nedochází po prvotním poklesu s délkou oplachu k výrazným změnám.

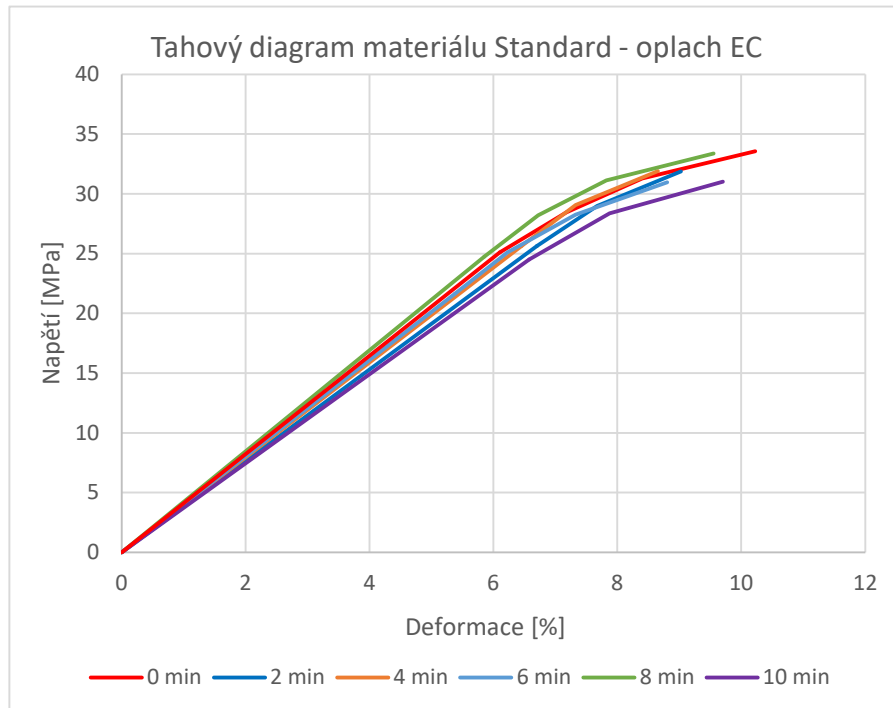
Pro vizualizaci tahových charakteristik byl pro každou oplachovou látku zhotoven tahový diagram. Průběh zatížení při tahové zkoušce byl vždy sledován do přetržení vzorku a byl vyhotoven pro střední hodnotu vypočtenou ze 3 iterací. Tahový diagram pro SG je uveden na obr. 45.



Obr. 45 Tahový diagram materiálu Standard po oplachu látkou SG.

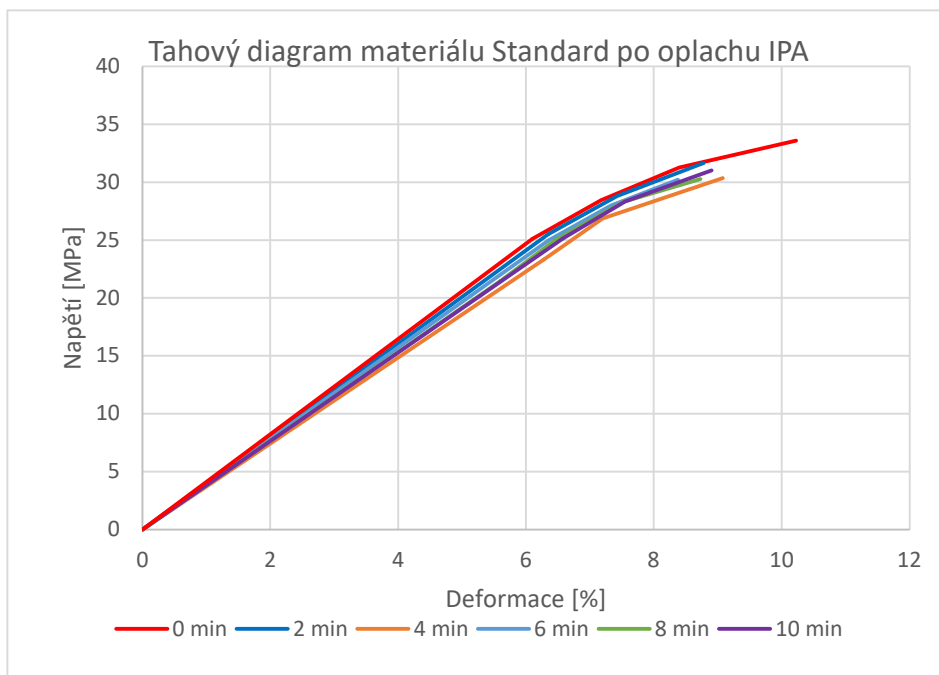
Z diagramu lze sledovat vliv délky oplachu na jednotlivé deformační křivky. Pozoruhodný je rozdíl v deformaci mezi délkou oplachu 2 min a 10 min, který činí 15,49 %. Sledovat lze také nárůst maximálního napětí až do 6 min oplachu, po kterých dochází k poklesu. Po délce oplachu 8 min převyšuje hodnota deformace při přetržení její hodnotu v původním stavu. Látka SG je jedinou z testovaných, jejíž použití vedlo ke zvýšení této charakteristiky.

Taktéž u tahového diagramu po oplachu EC lze po původním poklesu sledovat tendenci růstu deformace při přetržení, v tomto případě ale na rozdíl od SG nedochází ke zlepšení oproti původnímu stavu. Po 10 min oplachu klesá mez pevnosti oproti původnímu stavu o 8,51 %. Tahový diagram pro tento oplach je uveden na obr. 46.



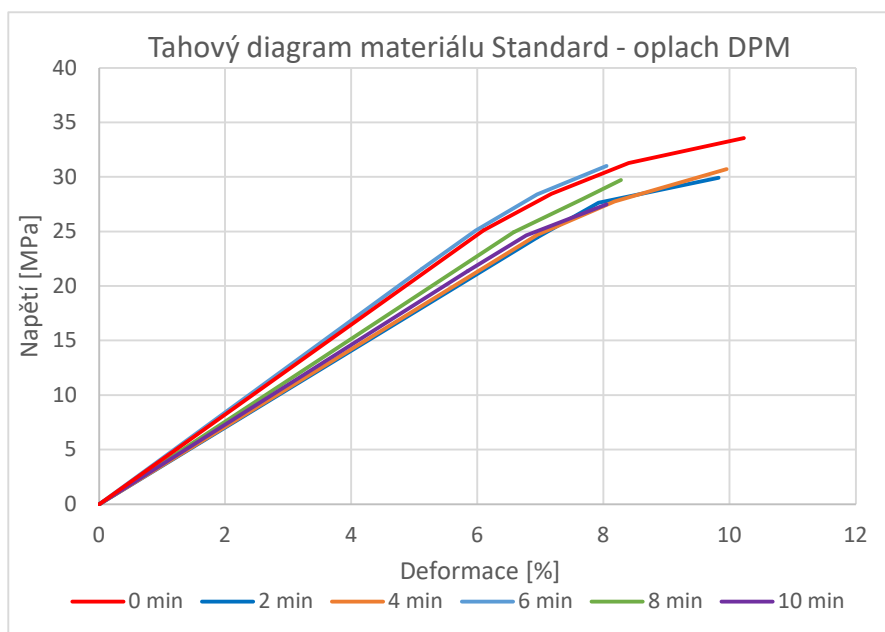
Obr. 46 Tahový diagram materiálu Standard po oplachu látkou EC.

Při oplachu látkou IPA bylo dosaženo nejnižšího rozptylu mezi jednotlivými délkami oplachu. Nejnižší mez pevnosti byla naměřena při délce oplachu 8 min, kdy její hodnota dosahovala 30,284 MPa. Oproti původnímu stavu se jednalo o pokles o 7,62 %. Nízký rozptyl naměřených hodnot je výhodný pro predikci chování materiálu při jakékoliv délce oplachu. Na rozdíl od EC a DPM nedošlo při oplachu po dobu 10 min k markantnímu poklesu tahových charakteristik, IPA je tedy vhodnější pro oplachy po delší dobu. Tahový diagram pro materiál Standard oplachovaný v IPA je uveden na obr. 47.



Obr. 47 Tahový diagram materiálu Standard po oplachu látkou IPA.

U tahového diagramu po oplachu DPM, uvedeného na obr. 48, lze po 10 min oplachu vidět výrazný pokles jak meze pevnosti, kdy oproti původnímu stavu došlo k propadu o 15,88 %, tak deformace, kdy rozdíl činí 21,27 %. Z výsledku lze usoudit, že při kontaktu tohoto materiálu s DPM po dobu 10 min a déle dochází k zásadnímu poklesu meze pevnosti v tahu a materiál se stává křehčím. Důvodem může být oslabení vazeb řetězců oligomerů a monomerů tvořících strukturu materiálu vlivem rozpouštěcích účinků DPM. Pro objasnění byly pořízeny snímky lomových ploch pod mikroskopem, které jsou vyobrazeny na obr. 49 a 50.



Obr. 48 Tahový diagram materiálu Standard po oplachu látkou DPM.

Na snímcích je viditelný značný rozdíl mezi strukturou lomu neopláchnutého vzorku proti vzorku opláchnutému v DPM. V případě neopláchnutého vzorku lze vidět trhliny vycházející z levé strany, přičemž zbytek lomové plochy žádné trhliny neobsahuje. Zatímco u lomu dílu opláchnutého v DPM se trhliny vyskytují po celé ploše. Molekuly DPM tudíž zřejmě penetrovaly materiál a zeslabily polymerní řetězce, což při namáhání materiálu vedlo ke vzniku těchto mikrotrhlin na průřezu vzorku.

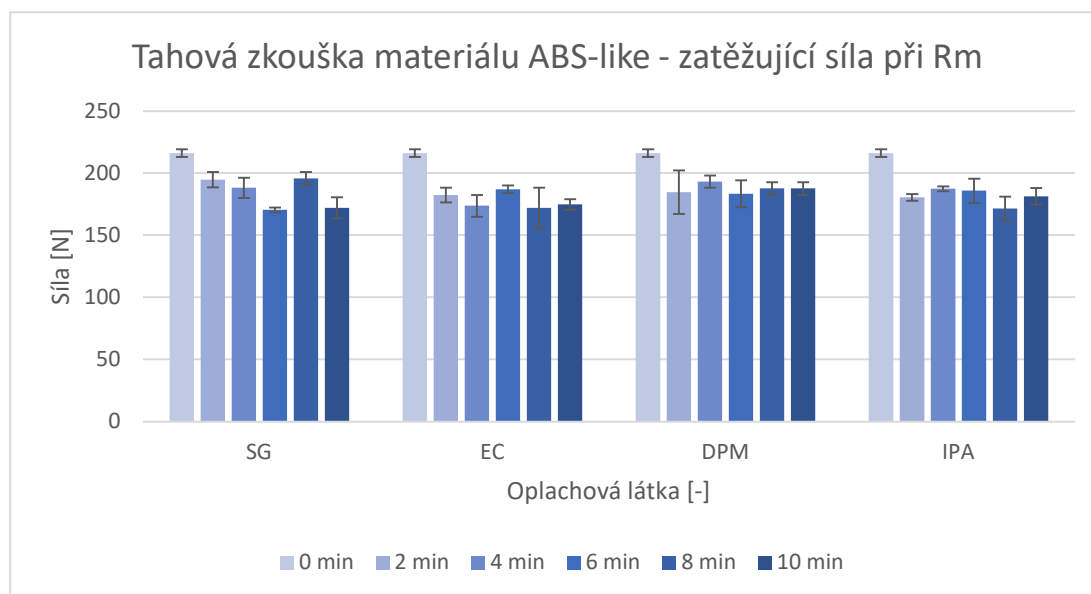


Obr. 49 Lom materiálu Standard bez oplachu.



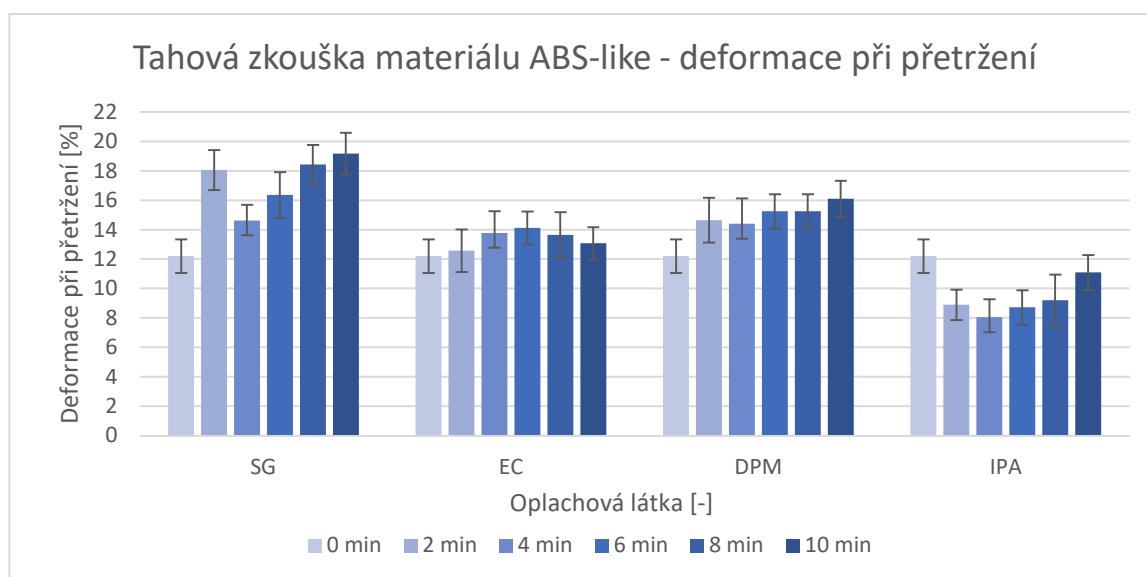
Obr. 50 Lom materiálu Standard po 10 min oplachu DPM.

Dalším z testovaných materiálů byl ABS-like. Průměrné hodnoty zatěžujících sil při mezi pevnosti tohoto materiálu jsou uvedeny na obr. 51. Na rozdíl od materiálu Standard zde došlo k poklesu zatěžující síly při použití všech oplachových látek. Nejvyšší propad byl zaznamenán po oplachu látkou SG při délce oplachu 6 min, kdy z původní hodnoty 216,102 N došlo k poklesu na 170,466 N, tedy o 21,12 %. Zajímavé je, že při použití tohoto oplachu byla taktéž naměřena nejvyšší zatěžující síla s výjimkou vzorků bez oplachu, a to 195,796 N po 8 min oplachu, oproti původnímu stavu tedy pokles o 9,40 %.



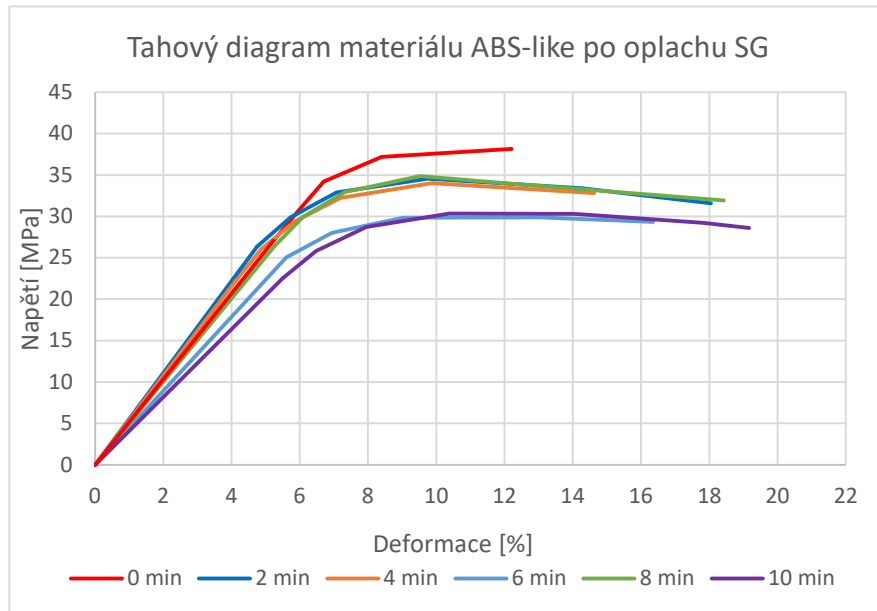
Obr. 51 Výsledky zatěžujících sil při Rm v průběhu tahové zkoušky materiálu ABS-like.

I pro tento materiál byly vyobrazeny průměrné deformace při přetržení, uvedeny na obr. 52. V tomto případě došlo oproti stavu bez oplachu k navýšení deformace při přetržení po použití všech oplachových látek kromě IPA, kdy došlo k nejvyššímu poklesu po 4 min oplachu, kdy z původní hodnoty 12,20 % poklesla deformace při přetržení na 8,05 %, což je pokles o 34,02 %. Naopak u SG došlo k navýšení o více než třetinu oproti původní hodnotě, a to na 19,16 %, tedy navýšení o 36,33 %.



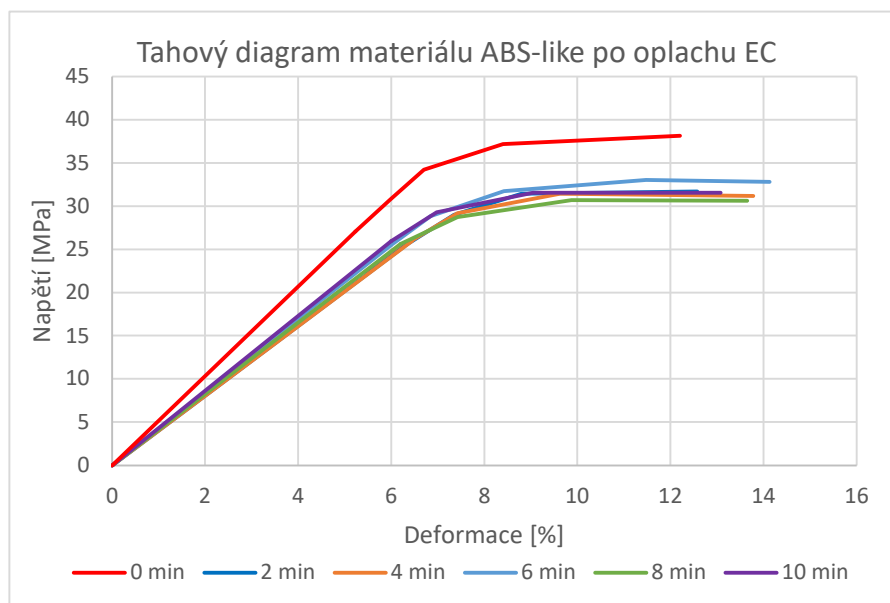
Obr. 52 Výsledky deformací při přetržení v průběhu tahové zkoušky materiálu ABS-like.

Pro jednotlivé oplachy byly znovu zhotoveny tahové diagramy, opět na základě průměrných hodnot ze 3 iterací. Tahový diagram pro látku SG je uveden na obr. 53. Pozoruhodný je pokles deformace při přetržení při délce oplachu 4 min, po kterém následuje postupné navyšování až do maximální hodnoty při 10 min. Po oplachu po dobu 6 a 10 min došlo k výraznému poklesu meze pevnosti, ale jelikož po oplachu po dobu 8 min byla naměřena nejvyšší mez pevnosti, je tento pokles pravděpodobně způsoben okolními vlivy.



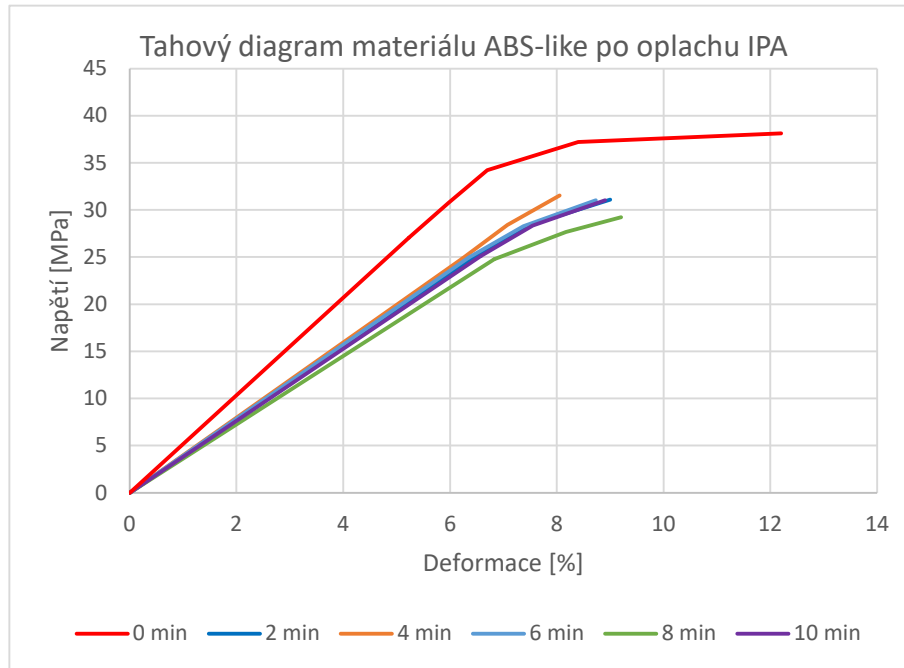
Obr. 53 Tahový diagram materiálu ABS-like po oplachu látkou SG.

V případě oplachu materiálu ABS-like látkou EC je výhodný nízký rozptyl naměřených hodnot při jednotlivých délkách oplachu. Mimo prvotní pokles meze pevnosti neměla délka expozice materiálu vůči této látce vliv na jeho tahové charakteristiky. Průměrný pokles meze pevnosti bych napříč všemi délkami oplachu oproti stavu bez oplachu 17,63 %. Průměrné zvýšení deformace při přetržení činilo 9,23 %. Tahový diagram po oplachu EC je uveden na obr. 54.



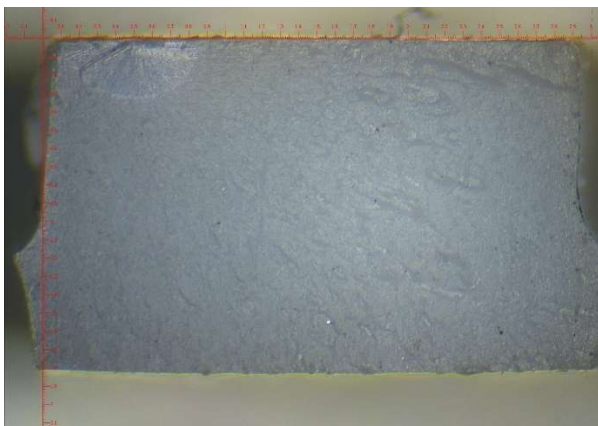
Obr. 54 Tahový diagram materiálu ABS-like po oplachu látkou EC.

Na obr. 55 je uveden tahový diagram po oplachu IPA. Tady lze vidět zdaleka nejvyšší pokles deformace při přetržení ve srovnání s ostatními oplachovými látkami, a to napříč všemi délkami oplachu. Průměrný pokles oproti stavu bez oplachu je 24,63 %. Pro porozumění důvodu takto výrazného rozdílu byly pořízeny fotografie lomových ploch pod mikroskopem, které jsou uvedeny na obr. 56 a 57.

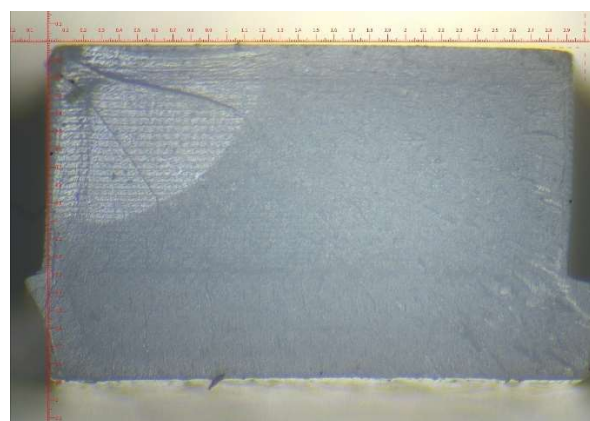


Obr. 55 Tahový diagram materiálu ABS-like po oplachu látkou IPA.

Ze snímků je jasně vidět, že kritickým místem byl v obou případech levý horní roh, kde bylo koncentrováno napětí a došlo k odštěpení části materiálu. Ovšem po oplachu je plocha tohoto místa zásadně rozsáhlejší než v případě bez oplachu. Lze dedukovat, že IPA oslabil povrch materiálu po jeho obvodu, čímž došlo ke zhoršení houževnatosti materiálu. Na snímku po oplachu jsou také na levé části vzorku dobře viditelné jednotlivé vrstvy materiálu, které na snímku bez oplachu viditelné nejsou.

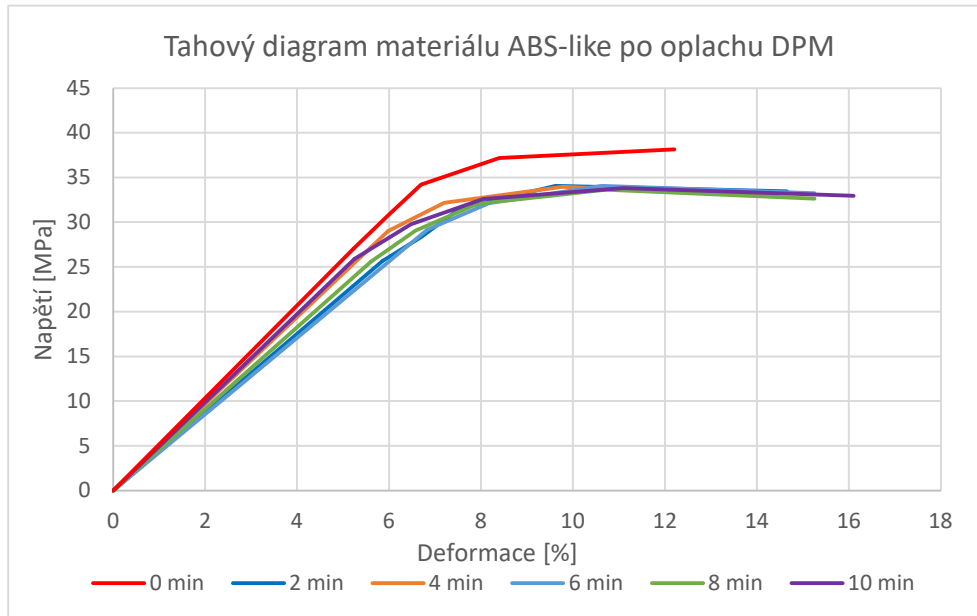


Obr. 56 Lom materiálu ABS-like bez oplachu.



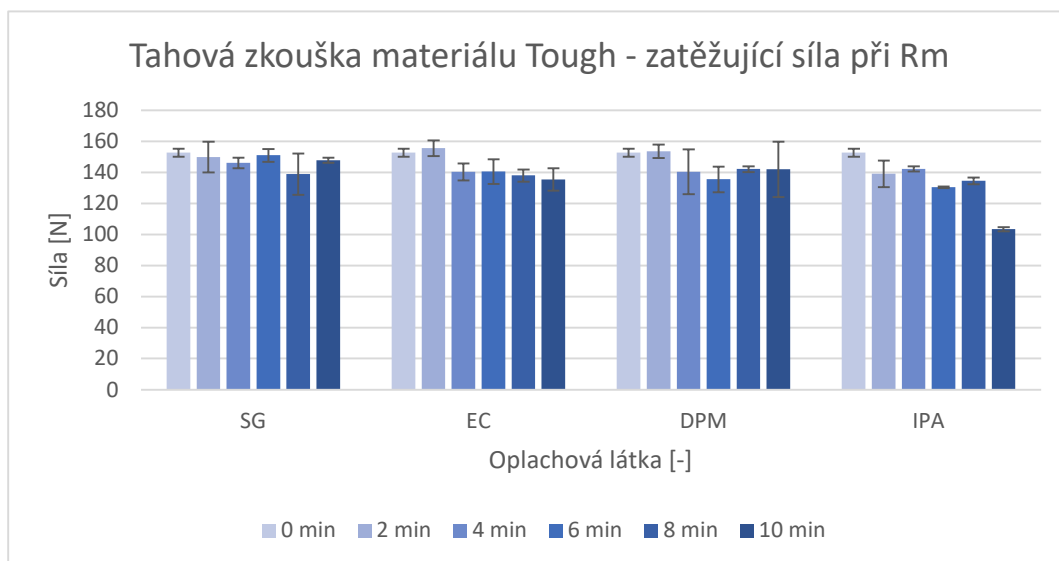
Obr. 57 Lom materiálu ABS-like po 10 min oplachu IPA.

Po oplachu DPM bylo v případě ABS-like dosaženo absolutně nejnižšího rozptylu naměřených hodnot. Materiál se zdá být v přítomnosti této látky stabilní po celou dobu oplachu. I v tomto případě ovšem došlo oproti původnímu stavu k poklesu meze pevnosti, a to průměrně o 13,32 %, což je ve srovnání s ostatními oplachy nejnižší naměřená hodnota. Deformace při přetržení byla zvýšena průměrně o 19,37 %. Průběh tahové zkoušky je vyobrazen na obr. 58.



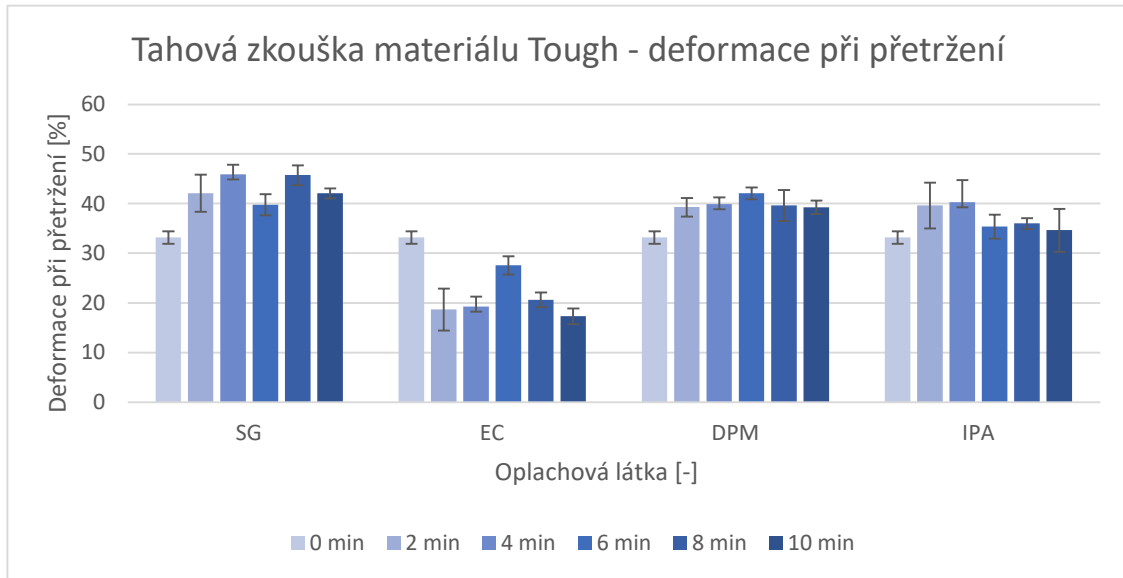
Obr. 58 Tahový diagram materiálu ABS-like po oplachu látkou DPM.

Posledním z testovaných materiálů byl materiál Tough firmy Anycubic. I pro tento materiál byl zhotoven graf srovnávající průměrnou zatěžující sílu při mezi pevnosti pro jednotlivé čisticí média a délky oplachu, uveden na obr. 59. Nejvyšší síla byla naměřena při použití látky EC po dobu 2 min, kdy oproti stavu bez oplachu došlo k navýšení z 152,739 N na 155,510 N, tedy o 1,78 %. Nejnižší síla byla naměřena po 10 min oplachu látkou IPA, a to 103,380 N, oproti původnímu stavu pokles o 32,32 %.



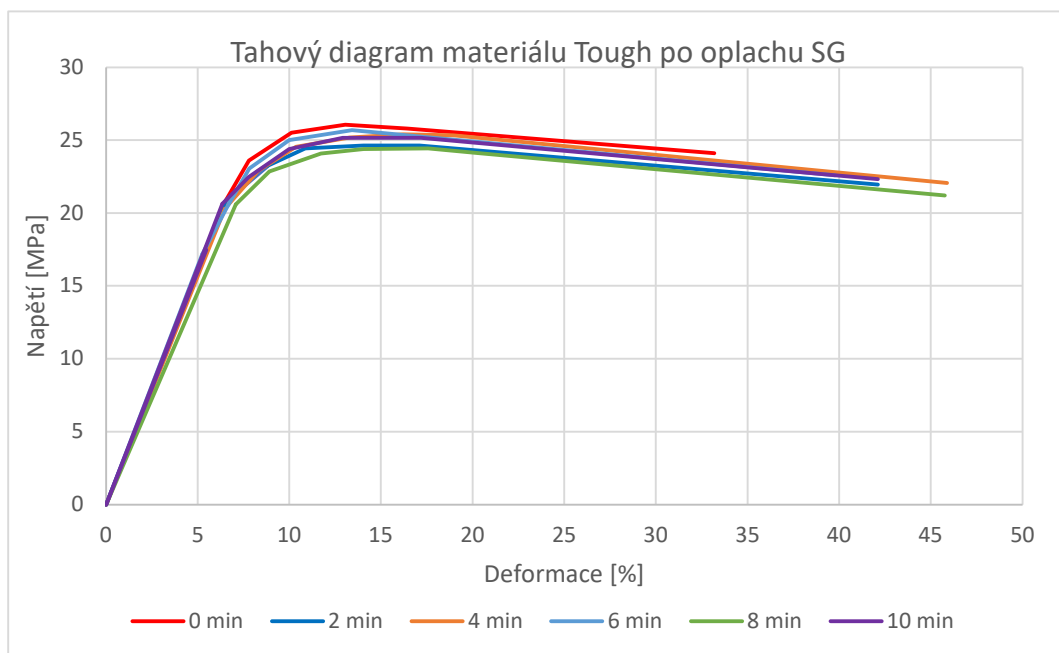
Obr. 59 Výsledky zatěžujících sil při Rm v průběhu tahové zkoušky materiálu Tough.

Stejně jako u předchozích materiálů došlo k největšímu navýšení deformace při přetržení po oplachu v látce SG. V tomto případě byla z původních 33,18 % po 4 min oplachu zvýšena až na 45,88 %, tedy o 27,68 %. Velmi negativní dopad měla látka EC, kde po oplachu po dobu 10 min došlo ke snížení o 47,78 % na deformaci při přetržení rovnou 17,33 %. Grafické srovnání je uvedeno na obr. 60.



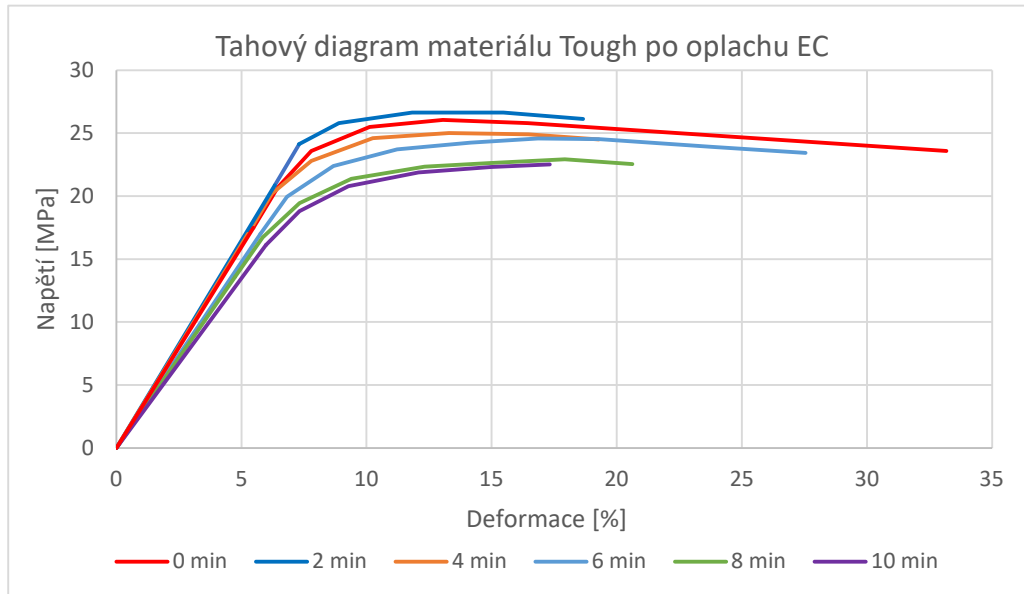
Obr. 60 Výsledky deformací při přetržení v průběhu tahové zkoušky materiálu Tough.

V tahovém diagramu po oplachu SG, uvedeném na obr. 61, je jasně vidět mírný pokles mezi pevnosti oproti stavu bez oplachu. Průměrně se napříč délkami oplachu jedná o pokles o 3,94 %. Stejně jako u materiálů Standard a ABS-like bylo díky oplachu v SG dosaženo značného zvýšení deformace při přetržení, v tomto případě průměrně o 23,06 %. Rozdílem je ovšem fakt, že v tomto případě neměl materiál tendenci zvyšovat deformaci při přetržení s rostoucí délkou oplachu a hodnota mezi jednotlivými časy kolísala.



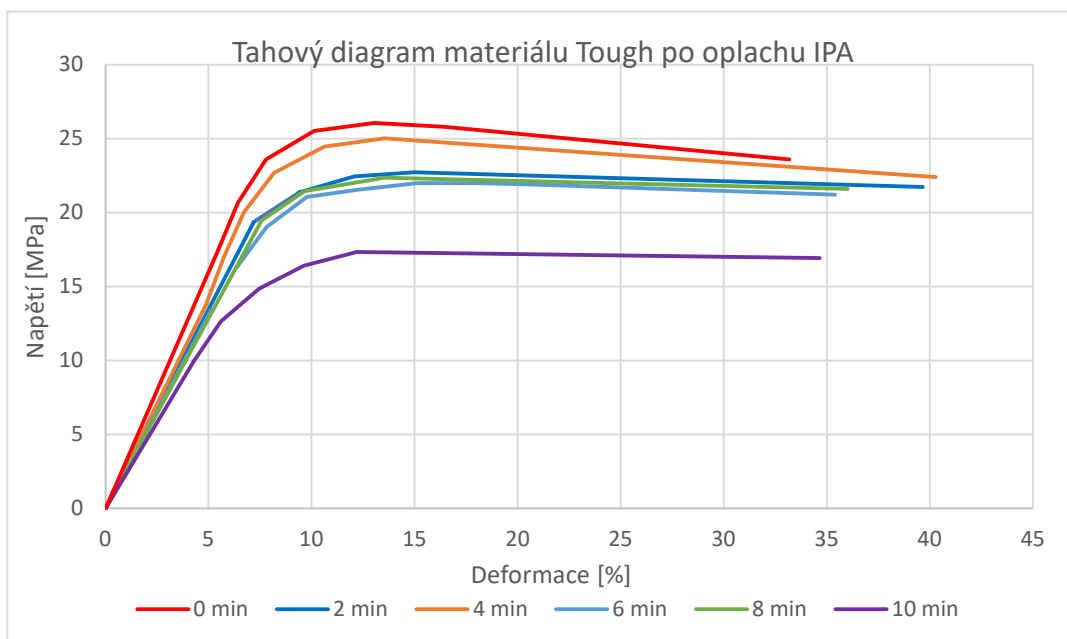
Obr. 61 Tahový diagram materiálu Tough po oplachu látkou SG.

Na tahovém diagramu po oplachu látkou EC, uvedeném na obr. 62, lze po navýšení napětí na mezi pevnosti po 2 min oplachu sledovat postupný pokles. Celkově nejhorších výsledků, jak meze pevnosti, tak deformace při přetržení bylo dosaženo po 10 min oplachu, kdy oproti původním hodnotám poklesly o 11,30 % a 47,78 % respektive. Z hlediska prodloužení při přetržení měla pro materiál Tough tato látka nejhorší výsledky ze všech testovaných.



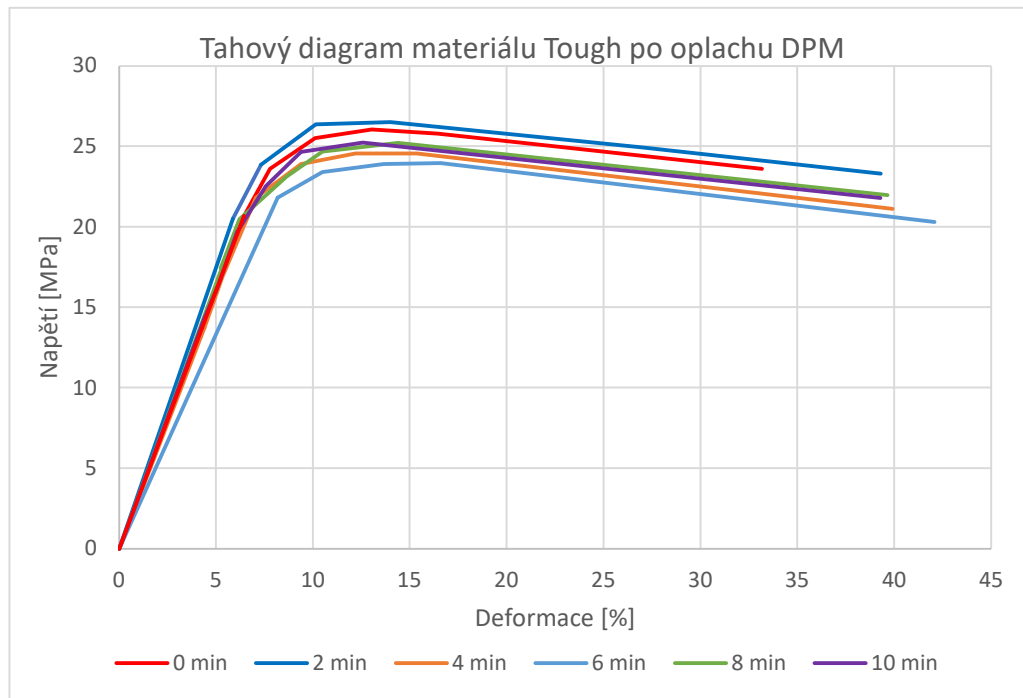
Obr. 62 Tahový diagram materiálu Tough po oplachu látkou EC.

Při pohledu na tahový diagram po oplachu látkou IPA na obr. 63 lze ihned vidět, že při délce oplachu 10 min výrazně klesá napětí při mezi pevnosti. Díly z materiálu Tough tudíž není vhodné v této látce oplachovat déle než 8 min. Napříč všemi délkami oplachu došlo k navýšení deformace při přetržení, a celkově nejlepších výsledků bylo dosaženo při délce oplachu 4 min. V tomto stavu došlo oproti stavu bez oplachu k zvýšení deformace při přetržení o 17,63 % a poklesu meze pevnosti o 4,67 %.



Obr. 63 Tahový diagram materiálu Tough po oplachu látkou IPA.

Na tahovém diagramu po oplachu látkou DPM, uvedeném na obr. 64, lze vidět, že mez pevnosti byla po oplachu po dobu 2 min oproti stavu bez oplachu zvýšena o 0,58 %. Delší doby oplachu vedly k jejímu snížení. Mimo stav po 2 min oplachu je mezi jednotlivými délkami oplachu relativně malá odchylka a materiál nemění své chování.



Obr. 64 Tahový diagram materiálu Tough po oplachu látkou DPM.

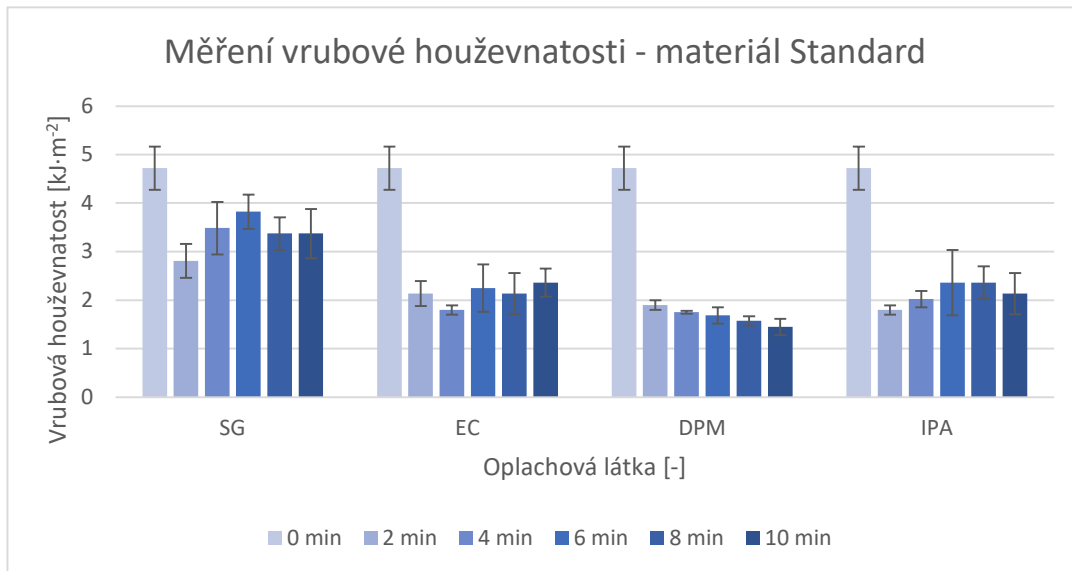
Jednotlivé látky používané pro oplach 3D DLP dílů měly na tahové charakteristiky testovaných materiálů obecně tyto účinky. Mimo několik výjimek došlo po oplachu ke snížení meze pevnosti, kdy nejzásadnější pokles byl zaznamenán při oplachu o délce 10 min. Jinak byl vliv všech oplachových roztoků na mez pevnosti srovnatelný.

Na deformaci při přetržení měla látka SG pro všechny testované materiály velmi pozitivní vliv, kdy ve všech případech došlo po určité době oplachu k navýšení této hodnoty. Je možné, že oplach touto látkou způsobil částečné vstřebání tenzidů z roztoku SG do polymerové matrice. S ohledem na pronikavé vlastnosti molekul tenzidů je pravděpodobné, že zlepšená houževnatost polymerů byla způsobena zlepšením intermolekulárních skluzových efektů polymerních řetězců, které jsou způsobeny interakcí molekul tenzidů s polymerovými maticemi, čímž dochází k plastifikaci. Tato téze je podporována studií, která dokazuje, že surfaktanty mohou působit jako plastifikátory, které způsobují, že se určité polymery stávají více plastickými prostřednictvím solvatace a plastifikace [71]. Vliv může mít také stopové množství neopláchnuté pryskyřice, která byla v průběhu dotvrzování vytvrzena.

Zatímco při použití IPA byl prokázán negativní dopad na materiály Standard a ABS-like. Deformace při přetržení materiálu Tough byla negativně ovlivněna oplachem látkou EC. Tyto výsledky jsou v souladu s teorií, že efektivnější a rychlejší rozpouštědla mohou mít negativní vliv na mechanické vlastnosti polymerů. Pozoruhodný je také strmý propad deformace při přetržení materiálu Standard při oplachu látkou DPM po dobu delší než 4 min. Rozdílné reakce každého z materiálů na různé oplachové látky jsou způsobeny rozdílným složením každé z pryskyřic.

4.3 Zkouška vrubové houževnatosti

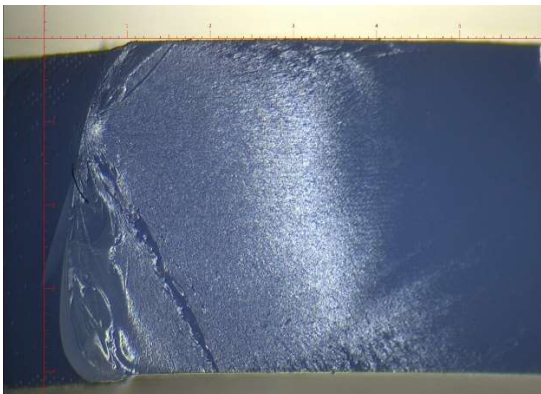
Při určování vrubové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva bylo přeraženo všech 189 zkušebních vzorků (63 pro každý materiál). Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti materiálu Standard po oplachu jednotlivými médii, stanovené na základě 3 iterací, jsou uvedeny na obr. 65. U všech vzorků došlo k přeražení typu C, tedy úplnému. Díly byly při testování orientovány typem edgewise. Vrbová houževnatost byla stanovena pro plochu o rozměrech $8,0 \pm 0,2$ mm na $4,0 \pm 0,2$ mm. Konkrétní hodnoty měření se nachází v příloze 3.



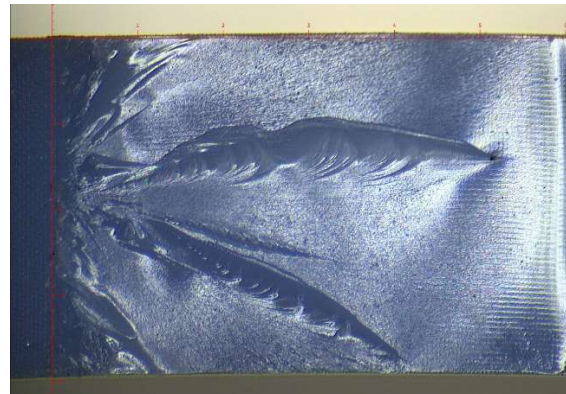
Obr. 65 Výsledky vrubové houževnatosti materiálu Standard.

Z uvedeného srovnání lze okamžitě vidět zřetelný úbytek vrubové houževnatosti po oplachu látkami EC, DPM a IPA. Vliv látek EC a IPA se zdá s časem oplachu neměnný, zatímco u DPM lze sledovat tendenci vrubové houževnatosti s rostoucí délkou oplachu klesat až na hodnotu $1,451 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ po 10 min oplachu, která je oproti původní hodnotě $4,723 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ nižší o 69,29 %. Tento trend je konzistentní s výsledky tahové zkoušky, kdy mělo DPM na tento materiál taktéž nejhorší dopad.

Pro potvrzení byly pořízeny snímky lomu neopláchnutého vzorku a vzorku opláchnutého v DPM, uvedené na obr. 66 a 67. Zdaleka nejméně byla vrubová houževnatost ovlivněna oplachem látkou SG, kdy po 6 min oplachu byla naměřena hodnota $3,824 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$, oproti původnímu stavu tedy pokles o 19,05 %.



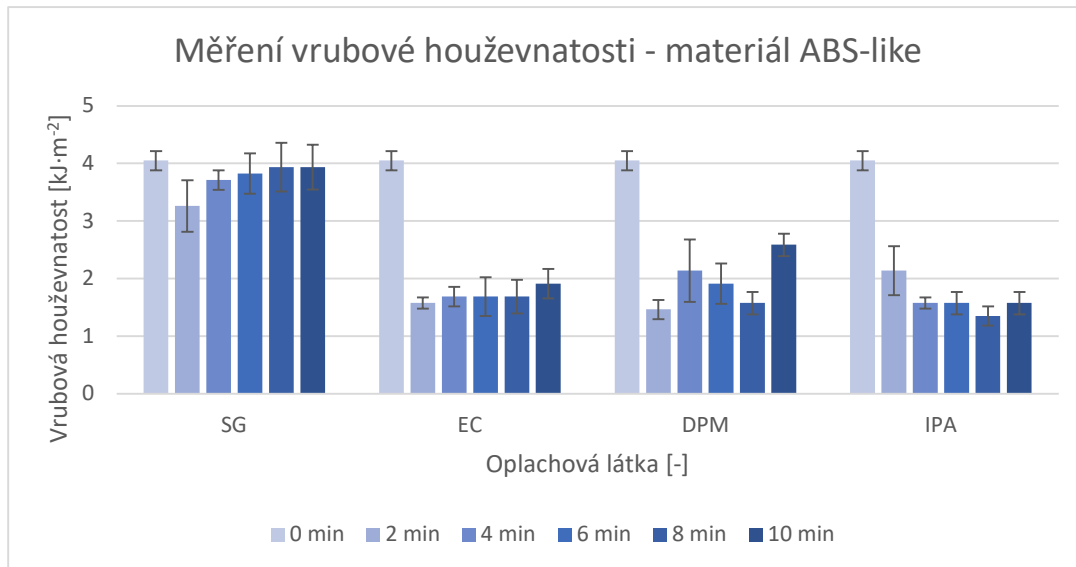
Obr. 66 Lom materiálu Standard bez oplachu.



Obr. 67 Lom materiálu Standard po 10 min oplachu DPM.

Na lomové ploše neopláchnutého vzorku je viditelná jedna trhлина drobných rozměrů vycházející z vrubu vlevo. Také je viditelná kapka neopláchnuté pryskyřice. Neodstraněný materiál v místě vrubu zapříčiňuje nižší koncentraci napětí v tomto místě. Přitom lomová plocha opláchnutého vzorku obsahuje dvě masivní trhliny procházející do více než poloviny šířky vzorku. DPM zjevně skutečně oslabuje strukturu tohoto druhu pryskyřice, což vede k nesoudržnosti materiálu při namáhání.

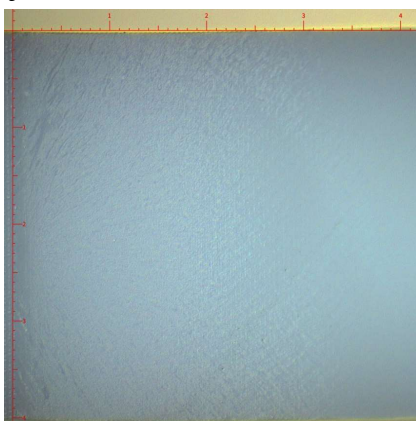
Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti byly dále stanovy pro materiál ABS-like, které jsou uvedeny na obr. 68.



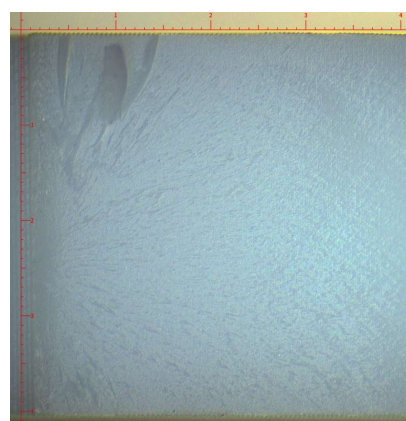
Obr. 68 Výsledky vrubové houževnatosti materiálu ABS-like.

I v tomto případě dojde k nejnižšímu snížení vrubové houževnatosti po oplachu SG. Po 10 min oplachu touto látkou je vrubová houževnatost z původních $4,049 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ snížena na $3,936 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, tedy pouze o 2,77 %. Na rozdíl od materiálu Standard, kdy bylo nejnižších hodnot dosaženo po oplachu DPM, byla nejnižší hodnota vrubové houževnatosti pro materiál ABS-like naměřena po 8 min oplachu IPA, kdy dosahovala $1,350 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, oproti stavu bez oplachu tedy zhoršení o 66,67 %. Podobné účinky měla také látka EC. U DPM se vyskytoval značný rozdíl naměřených hodnot mezi jednotlivými délkami oplachu.

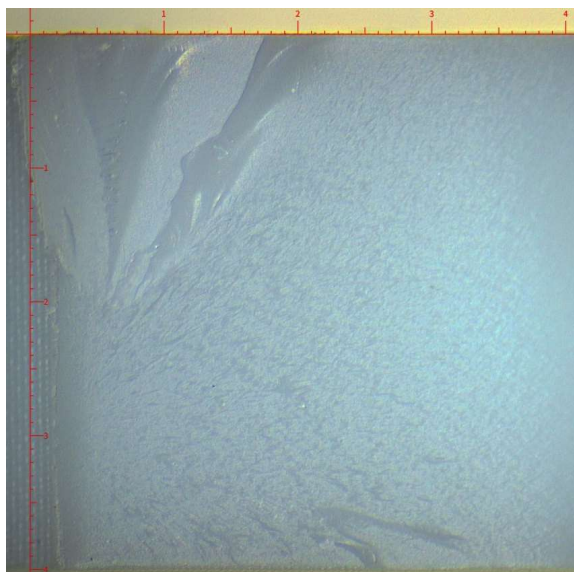
Pro zjištění důvodu rozdílných hodnot vrubové houževnatosti materiálu ABS-like byly opět pořízeny snímky lomů, snímky lomových ploch ale mezi opláchnutými a neopláchnutými vzorky výrazně nelišily. Snímky lomových ploch vzorků bez oplachu, po oplachu SG a IPA jsou uvedeny na obr. 69 až 71. Jediným znatelným rozdílem je tendence růstu trhliny u vrubu se snižující se vrubovou houževnatostí.



Obr. 69 Lom materiálu ABS-like bez oplachu.



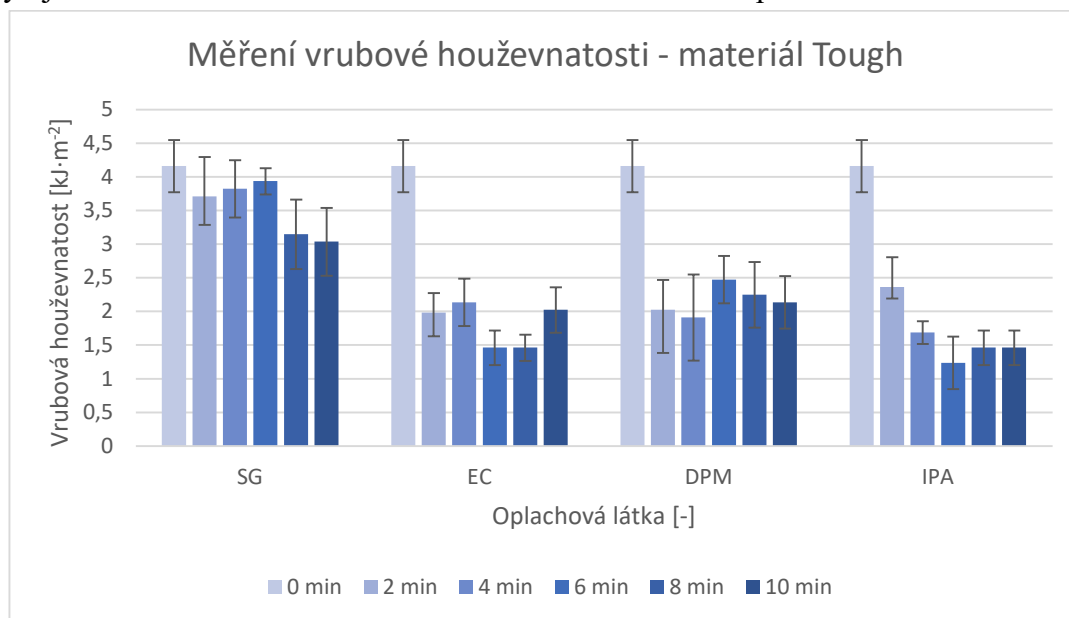
Obr. 70 Lom materiálu ABS-like po 10 min oplachu SG.



Obr. 71 Lom materiálu ABS-like po 10 min oplachu IPA.

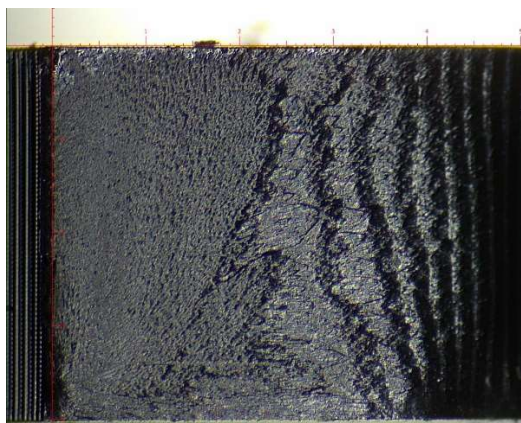
Při testování vlivu oplachu na vrubovou houževnatost materiálu Tough byly zaznamenány podobné tendence jako u materiálu ABS-like. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti tohoto materiálu jsou uvedeny na obr. 72.

Nejlepších výsledků bylo opět dosaženo po oplachu látkou SG, kde bylo po 6 min oplachu dosaženo hodnoty $3,936 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, oproti původním $4,161 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ se jedná o rozdíl jen 5,41 %. Celkově nejnižších výsledků bylo znovu dosaženo po oplachu IPA, zde se po 6 min oplachu jednalo o propad o 70,27 % na $1,237 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Oplach EC měl na vrubovou houževnatost materiálu Tough podobný vliv jako IPA, ovšem v menší míře. U DPM se po 6 min oplachu vyskytuje tendence snižování houževnatosti s rostoucí délkou oplachu.

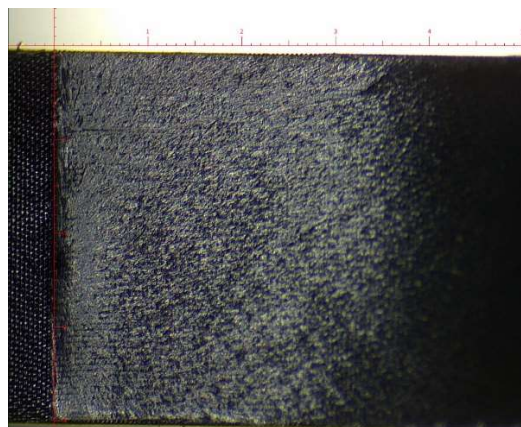


Obr. 72 Výsledky vrubové houževnatosti materiálu Standard.

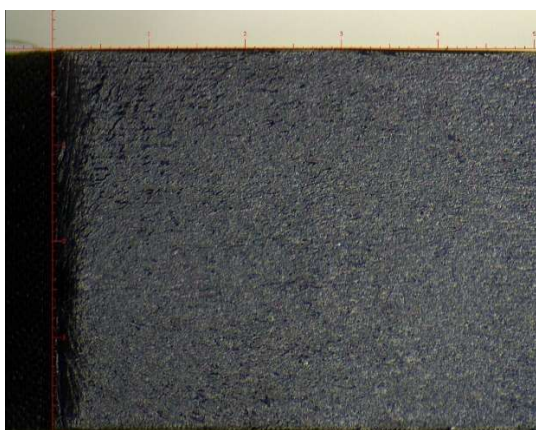
I zde byly pořízeny snímky lomových ploch, odlišná byla ale pouze lomová plocha vzorku bez oplachu, kdy lze vidět, jak lom prochází jednotlivými vrstvami materiálu. Snímky pro vzorky bez oplachu a po oplachu látkami SG, DPM a IPA jsou uvedeny na obr. 73–76.



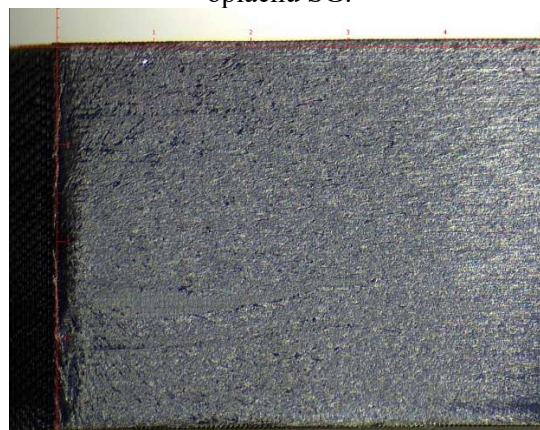
Obr. 73 Lom materiálu Tough bez oplachu



Obr. 74 Lom materiálu Tough po 10 min oplachu SG.



Obr. 75 Lom materiálu Tough po 10 min oplachu DPM.



Obr. 76 Lom materiálu Tough po 10 min oplachu IPA.

Při zkoušce vrubové houževnatosti se projevil velmi podobný vliv jednotlivých roztoků na dané materiály jako u tahové zkoušky. Celkově nejlepších výsledků bylo pro všechny materiály dosaženo po oplachu SG, zatímco EC, DPM a IPA dosahovaly nižších hodnot vrubové houževnatosti.

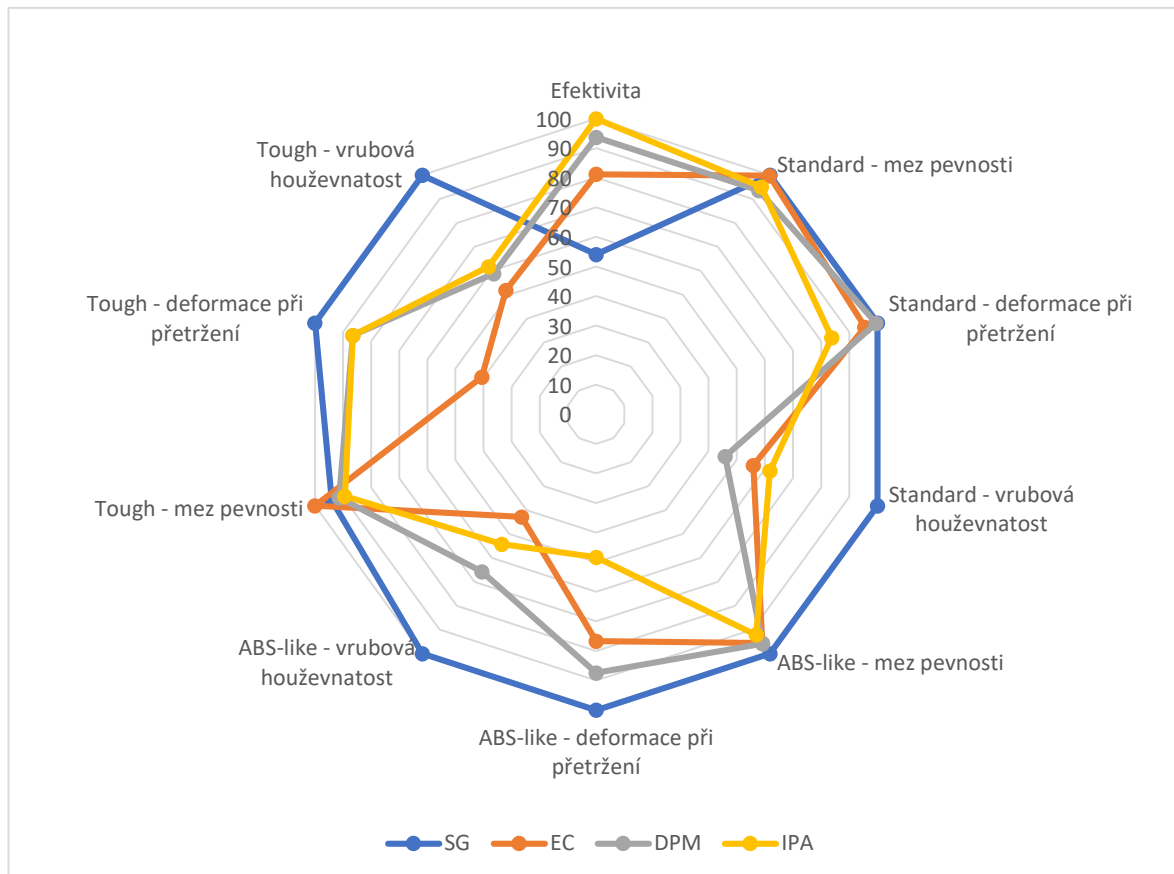
4.4 Doporučení využití jednotlivých oplachových látek

Pro přehlednost budou dosažené výsledky shrnuty a oplachové látky budou přehledně srovnány napříč všemi provedenými experimenty. Taktéž budou doporučeny optimální délky oplachu pro každý z použitých roztoků v kombinaci s konkrétním materiálem. Ty byly stanoveny tak, aby kombinace všech měřených charakteristik dosahovala co nejvyšších hodnot. Optimální délky oplachu jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Optimální délka oplachu.

Oplachová látka	Materiál		
	Standard	ABS-like	Tough
/			
SG	6 min	8 min	4 min
EC	8 min	6 min	2 min
DPM	4 min	10 min	8 min
IPA	6 min	2 min	2 min

Pro přehledné srovnání všech oplachů a jejich vlivu na jednotlivé parametry daných materiálů byl sestrojen paprskový diagram, uvedený na obr. 77. K jeho sestrojení byly použity hodnoty získané při doporučených dobách oplachu. Nejvyššímu naměřenému výsledku byla vždy udělena hodnota 100 a výsledky nižší byly vyjádřeny jako procentuální závislosti. Lze vidět, že látka SG dosahuje v oblasti mechanických vlastností zdaleka nejlepších výsledků, a to zejména ve vrubové houževnatosti. Obecně je tedy vhodné tuto oplachovou látku používat pro mechanicky namáhané díly, kde jejich vzhledové charakteristiky nehrají podstatnou roli. Naopak pro okrasné díly, jako jsou šperky či hračky je nejvhodnější variantou oplachu IPA, následovaná DPM a EC.



Obr. 77 Shrnutí dosažených výsledků.

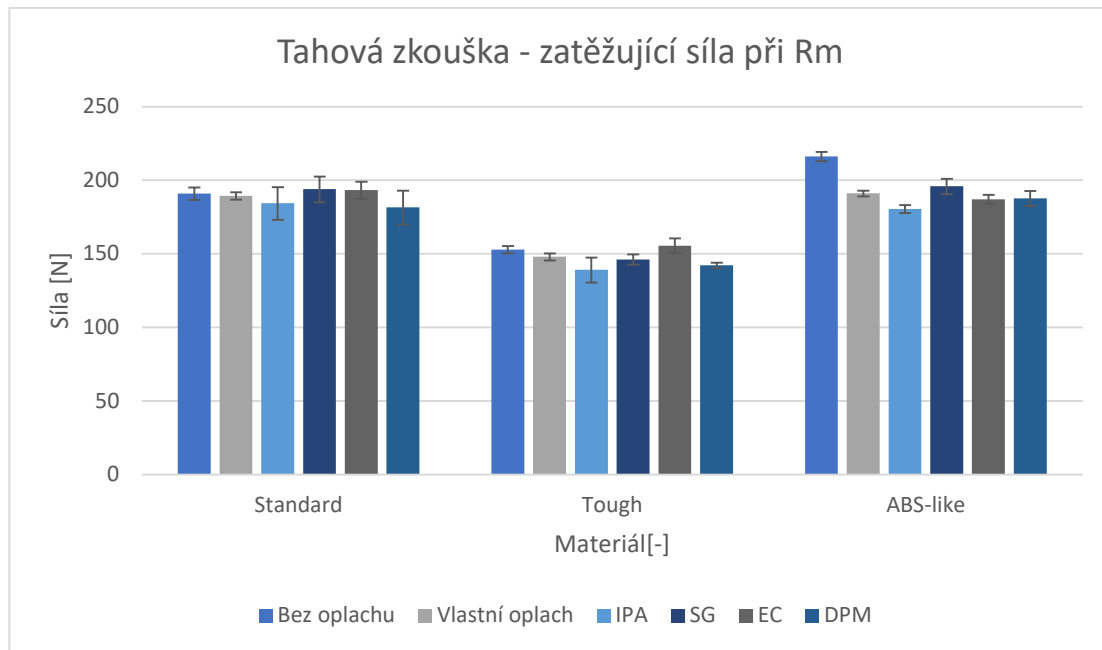
4.5 Návrh vlastního oplachu

Výsledky experimentů v předchozích kapitolách ukázaly, že nejméně efektivní oplach SG má nejmenší dopad na mechanické vlastnosti tištěných dílů, zatímco nejefektivnější IPA má na mechanické vlastnosti dopad nejvyšší. Na základě těchto zjištění byl navržen oplach kombinující tyto dvě látky. DPM a EC nebyly při návrhu vlastního oplachu použity, jelikož rozdíl mezi nimi a IPA v efektivitě a dopadu na mechanické vlastnosti není dostatečný na to, aby byla opodstatněna jejich vysoká cena, která činí téměř 700 Kč/l.

Při hledání ideálního řešení byly testovány 2 varianty oplachu. První variantou byl 10 min oplach v SG, po kterém následoval 1 min oplach v IPA. Řešení bylo navrženo za předpokladu, že velmi krátká expozice tištěného dílu k IPA nepovede k tak zásadnímu poklesu mechanických vlastností. Tento předpoklad byl však vyvrácen a výsledky měření mechanických vlastností byly nižší než při samotném oplachu IPA po dobu 2 min.

V druhé variantě byl vytvořen roztok IPA a SG v poměru 1:1. Zvolená délka oplachu pro tento roztok činila 4 min, při kterých dochází k nejvyššímu úběru nevytvrzené pryskyřice a dopad na mechanické vlastnosti je menší než při delším oplachu. Po 4 min oplachu byl roztok schopen odstranit 11,07 % hmotnosti neopláchnutého vzorku, což je hodnota vyšší než při použití EC, DPM i SG. Jediným efektivnějším oplachem je IPA.

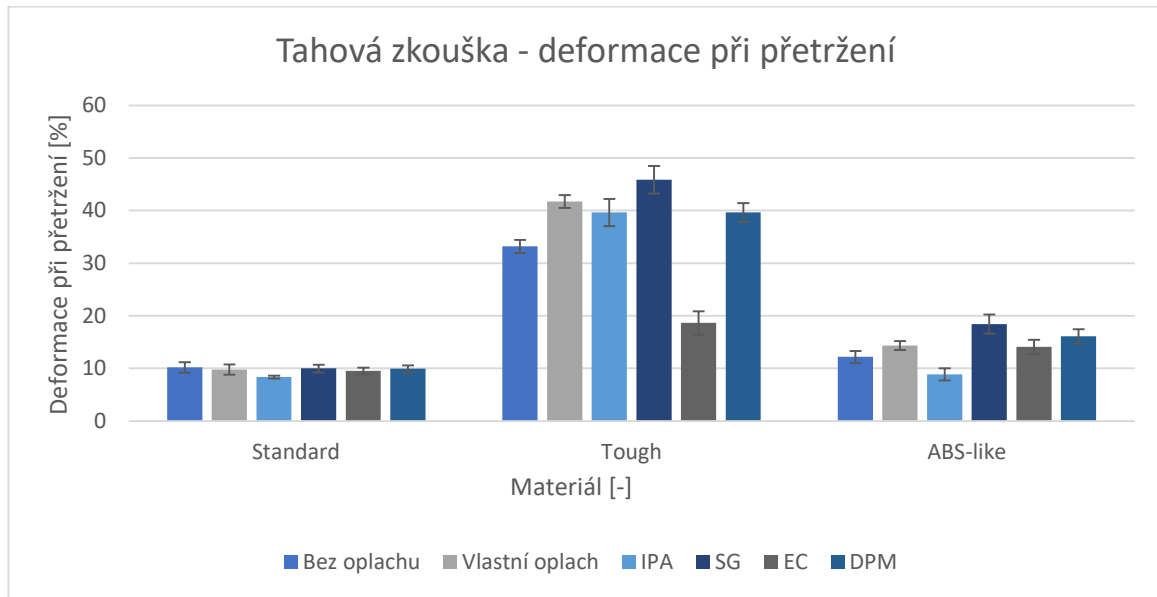
Následovalo testování mechanických vlastností tahovou zkouškou. Průměrné výsledky zatěžující síly při mezi pevnosti v průběhu tahové zkoušky po oplachu v tomto roztoku ve srovnání se stavem bez oplachu a průměrnými hodnotami po optimální délce oplachu látkami SG, EC, DPM a IPA jsou uvedeny na obr. 78.



Obr. 78 Výsledky zatěžujících sil při Rm v průběhu tahové zkoušky testovaných materiálů.

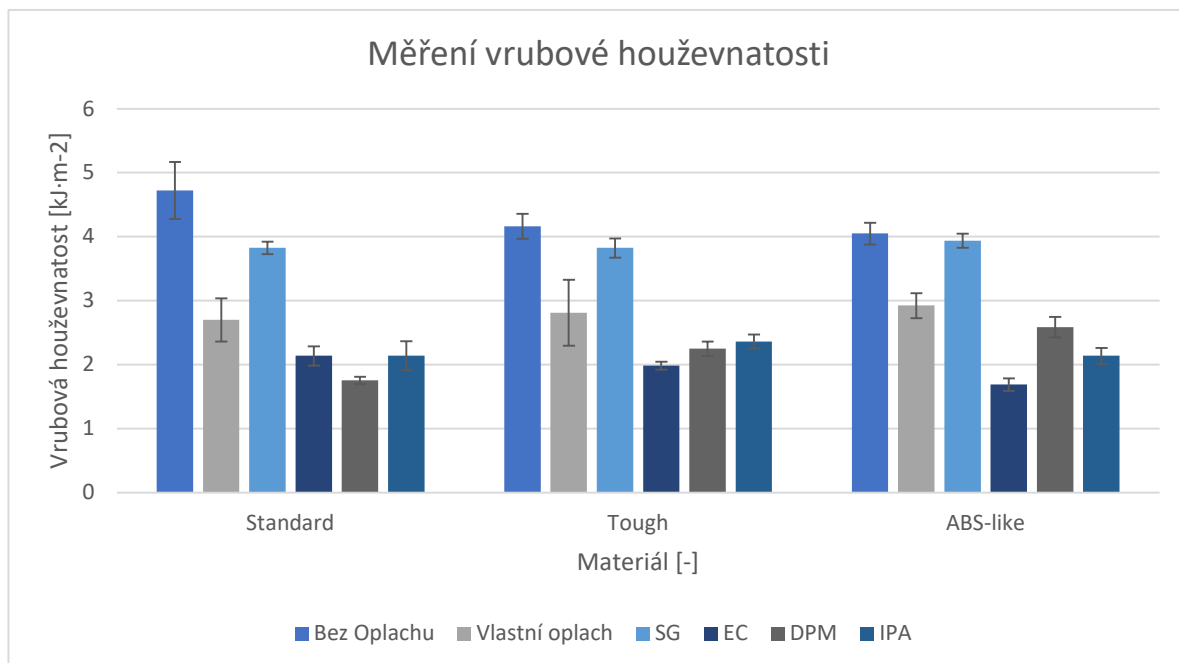
Z grafu lze vidět, že pro materiály Standard, Tough i ABS-like došlo k úspěšnému zvýšení meze pevnosti ve srovnání s oplachem samotným IPA, kdy pro Standard bylo dosaženo zvýšení o 2,70 %, pro Tough o 6,04 % a pro ABS-like o 5,53 %. Celkově se potvrzuje minimální vliv oplachové látky na mez pevnosti v tahu, jelikož jde jasně vidět, že rozdíly mezi použitými oplachy jsou minimální.

Deformace při přetržení, uvedena na obr. 79, byla oproti IPA opět zvýšena pro každý z testovaných materiálů, pro Standard o 14,61 %, pro Tough o 4,99 % a pro ABS-like o 38,09 %. Vyšších hodnot než vlastní oplach dosahuje pro všechny materiály látka SG, přičemž pro materiály Standard a ABS-like dodatečně také DPM.



Obr. 79 Výsledky deformací při přetržení v průběhu tahové zkoušky testovaných materiálů.

Zdaleka nejvýraznějšího zlepšení oproti IPA bylo dosaženo při zkoušce vrubové houževnatosti. Pro materiál Standard došlo ke zvýšení o 20,83 %, pro Tough o 16,00 % a pro ABS-like o 26,92 %. Při této zkoušce dosáhla lepších výsledků ve srovnání s vlastním oplachem pouze látka SG. Grafické srovnání je uvedeno na obr. 80.



Obr. 80 Výsledky vrubové houževnatosti testovaných materiálů.

Vytvořením roztoku SG a IPA bylo dosaženo zlepšení v efektivitě odstraňování nevytvrzené pryskyřice oproti samotnému SG, přičemž byl zmírněn negativní dopad na mechanické vlastnosti, který způsoboval oplach pomocí IPA. Ve srovnání s EC a DPM bylo pro téměř všechny experimenty taktéž dosaženo lepších výsledků. Vlastní roztok je tudíž efektivnější a má menší dopad na mechanické vlastnosti než testované látky. V rámci minimalizace poklesu mechanických vlastností byl dodatečně vytvořen další roztok, kde byla koncentrace IPA snížena z 99,5 % na 70 %, ovšem tento roztok nebyl schopen odstranit všechnu nevytvrzenou pryskyřici, pro cíle stanovené v této práci byl tudíž nevhodný.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Testované oplachové látky se výrazně liší jak v dosažených výsledcích, tak v jejich ceně, která je pro každou látku uvedena v tab. 5. Zdaleka nejdražšími jsou EC a DPM, které jsou téměř sedminásobně dražší než nejlevnější IPA. Odůvodnění takto vysoké ceny ovšem v průběhu provedených experimentů nebylo nalezeno, jelikož proti ostatním oplachům nepřináší žádné výrazné výhody. IPA je efektivnější při oplachu nevytvrzené pryskyřice než každá z těchto látek a SG má menší dopad na mechanické vlastnosti. Argumentem pro vyšší cenu může být vyšší recyklovatelnost těchto látek. Ovšem na internetu se nachází nespočet návodů, jak z IPA jednoduše přefiltrovat rozpuštěnou pryskyřici, což umožňuje opakované použití s minimálním dopadem na efektivitu.

Vlastní oplachové řešení, při jehož použití bylo dosaženo velmi dobrých výsledků efektivity i dopadu na mechanické vlastnosti bylo získáno vytvořením 1:1 roztoku IPA a SG. 1 l tohoto oplachu tedy vychází na 158 Kč. Jedná se tedy o druhou nejlevnější variantu ze všech testovaných.

Tab. 5 Cena jednotlivých oplachových látek.

Oplachová látka	Zkratka	Cena / litr [Kč]
Isopropylalkohol	IPA	95
SIMPLE GREEN Crystal	SG	217
Formfutura EasyClean	EC	681
3D-basics DPM Wash Solvent	DPM	681
Vlastní oplach (SG + IPA)	-	158

Dalším zkoumaným parametrem byla doba oplachu. Ze vztahu (1) lze vypočítat náklady na oplach. Průměrný příkon nyní prodávaných oplachových stanic je 45 W a současná zastropovaná cena za 1 kWh elektrické energie činí 6,050 Kč. Bude uvažován oplach 50 vyištěných výrobků.

$$N = P \cdot t \cdot C \cdot n \text{ [Kč]}, \quad (1)$$

kde: P	- Příkon oplachové stanice	[kW],
t	- Doba oplachu	[h],
C	- Cena za 1 kWh elektrické energie	[Kč],
n	- Počet dílů	[-].

Po dosažení vstupních hodnot do vztahu vyjde celkový náklad na oplach 50 kusů po dobu 2 min ve výši 0,45 Kč. Oplach 50 kusů po dobu 10 min vyjde na 2,25 Kč. I přes to, že oplach po dobu 10 min je 5krát dražší než po dobu 2 min je tato částka při oplachu uvažovaných 50 kusů tak nízká, že ji lze v rámci celého výrobního procesu zanedbat. Délku oplachu je tedy vhodné volit čistě na základě výsledků dosažených v experimentální části. Nízké náklady na provoz oplachových stanic také zdůrazňují nerentabilitu ručního oplachu. Prvotní investice do oplachového zařízení se velmi rychle navrátí na ušetřeném čase a práci.

ZÁVĚR

Na základě rešeršní části byly vybrány materiály, oplachové látky, zařízení a výrobní parametry použité v části experimentální. Pro tisk vzorků byla zvolena 3D DLP tiskárna Anycubic Photon D2. Pro oplach byla zvolena oplachová stanice Anycubic Wash and Cure 2.0. Vybrané oplachové látky byly 99,5% IPA, DPM firmy 3D-basics, prostředek na odstraňování pryskyřice EasyClean firmy Formfutura a univerzální čisticí prostředek SIMPLE GREEN Crystal. Vliv látek byl testován na materiálech Standard a Tough od společnosti Anycubic a ABS-like od společnosti Creality.

Úvodním experimentem bylo stanovení efektivity oplachu. Nejvíce nevytvrzené pryskyřice odstraní IPA, a to 16,61 % po 10 min oplachu. Následuje DPM a EC, které po stejné době odstraní 15,49 % a 13,50 %. Nedostatečný oplach poskytuje látka SG. Po oplachu touto látkou zůstávají na povrchu materiálu skvrny nevytvrzené pryskyřice, které způsobují lepivost a mají negativní dopad na vzhledovou stránku výrobků. V rámci sledování vlivu oplachu na vzhledovou stránku výrobků byl dále proveden experiment na míru zamlžení průhledné pryskyřice po oplachu. Výsledky tohoto experimentu byly srovnatelné s výsledky efektivity, tudíž IPA, DPM a EC jsou srovnatelné, zatímco SG dosahuje horších výsledků.

První provedenou zkouškou mechanických vlastností byla tahová zkouška. Na mez pevnosti materiálu Standard neměl druh ani délka oplachu významnou roli. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo po 6 min oplachu látkou SG, kdy mez pevnosti dosáhla 34,01 MPa. Značný vliv měl oplach na deformaci při přetržení, kdy s výjimkou látky SG došlo vždy ke zhoršení, které bylo nejvýraznější po 10 min oplachu látkou DPM, kdy oproti stavu bez oplachu došlo ke zhoršení o 21,27 %. Materiál ABS-like reagoval na všechny oplachy poklesem meze pevnosti, jejíž hodnota bez oplachu činila 37,91 MPa. Mezi látkami EC, DPM a IPA nebyly pozorovány napříč všemi délkami oplachu výrazné rozdíly, zatímco SG mezi jednotlivými délkami vykazovala značný rozptyl. Po oplachu touto látkou byla naměřena nejvyšší i nejnižší mez pevnosti, a to 34,35 MPa po 8 min oplachu a 29,91 MPa po 6 min oplachu. Deformace při přetržení materiálu ABS-like byla negativně ovlivněna pouze látkou IPA, kdy byl nejvyšší pokles oproti původnímu stavu 34,02 %. K nejvyššímu nárůstu došlo po oplachu látkou SG, kdy navýšení oproti původnímu stavu činilo 36,33 %. Mez pevnosti materiálu Tough byla nejvyšší po 2 min oplachu EC, a to 27,28 MPa. Po 10 min oplachu tohoto materiálu látkou IPA dochází k drastickému poklesu meze pevnosti na 18,14 MPa. Deformace při přetržení byla zvýšena všemi oplachy s výjimkou EC, kdy byla oproti původnímu stavu snížena o 47,78 %. Z výsledků je viditelné, že každý z materiálů reaguje na oplachové látky zcela odlišně a je nutné dbát na jejich vhodnou kombinaci.

Dalším experimentem byla zkouška vrubové houževnatosti. Oplachem látkami EC, DPM a IPA dochází napříč všemi materiály k výraznému zhoršení této charakteristiky. Nejméně je vrubová houževnatost ovlivněna látkou SG. K nejvyššímu poklesu došlo u materiálu Tough po 10 min oplachu látkou IPA, kde byla vrubová houževnatost oproti původnímu stavu snížena o 70,27 %. Nejmenší pokles byl zaznamenán u materiálu ABS-like po 10 min oplachu látkou SG, a to 2,77 %.

Na základě informací zjištěných v předešlých experimentech byly doporučeny konkrétní optimální doby oplachu pro každý roztok a materiál. Dále byl navržen vlastní oplach splňující požadavky na efektivitu a ovlivnění mechanických vlastností. Oplach je tvořen roztokem látek SG a IPA v poměru 1:1. Dosahuje efektivnějšího oplachu než SG a dopad na mechanické vlastnosti je znatelně nižší než samotný IPA.

V technologicko-ekonomickém zhodnocení byla srovnána cena jednotlivých oplachů v závislosti na jejich účinnosti a bylo stanoveno, že látky DPM a EC nepřinášejí dostatečné výhody na to, aby byla jejich vysoká pořizovací cena opodstatněna. Dále byla stanovena cena provozu oplachové stanice, která se ukázala jako zanedbatelná.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. 3D-printed Crown and Bridge structure after printing and after polishing. In: *Liqcreate* [online]. Utrecht: Liqcreate, 2023 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.liqcreate.com/supportarticles/digital-dentistry-and-dental-resin-3d-printing/>
 2. GODEC, Damir, Joamin GONZALEZ-GUTIERREZ, Axel NORDIN, Eujin PEI a Julie Ureña ALCÁZAR. *A Guide to Additive Manufacturing* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Cham, 2022 [cit. 2023-02-13]. ISBN 978-3-031-05863-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9>
 3. CAREW, Rachael M., Ruth M. MORGAN a Carolyn RANDO. A Preliminary Investigation into the Accuracy of 3D Modeling and 3D Printing in Forensic Anthropology Evidence Reconstruction., *Journal of Forensic Sciences*. John Wiley, 2019/03/01, **64**(2), 342-352. ISSN 0022-1198. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1111/1556-4029](https://doi.org/10.1111/1556-4029). GEBHARDT, Andreas HÖTTER, Jan-Steffen. *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing* [online] - P. Hanser Publishers. 2016 [cit. 2023-02-13]. ISBN 978-1-5231-0442-0 Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010ZIBV3/additive-manufacturing/p>
 4. GEBHARDT, Andeas, Julia KESSLER a Laura THURN. *3D Printing - Understanding Additive Manufacturing (2nd Edition)* [online]. 2. Amsterdam: Hanser Publishers, 2019 [cit. 2023-02-13]. ISBN 978-1-5231-2482-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDPUAME04/printing-understanding/printing-understanding>
 5. Alternate Wash Solutions for SLA parts. *Formlabs* [online]. Mnichov: Formlabs, 2020 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/alternate-wash-solutions/>
 6. UNKOVSKIY, Alexey, Phan Hai-Binh BUI, Christine SCHILLE, Juergen GEISGERSTORFER, Fabian HUETTIG a Sebastian SPINTZYK. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dental Materials*. 2018, **34**(12), e324-e333. ISSN 0109-5641. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.09.011](https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.09.011)
 7. ELEGOO Mercury Plus Washing and Curing Station V1.0. *Www.elegoo.com* [online]. 13917
 8. Šen-čen: Elegoo, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.elegoo.com/products/elegoo-mercury-plus-washing-and-curing-machine#>
 9. STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
 10. KELEŞ, Özgür, Caleb Wayne BLEVINS a Keith J. BOWMAN. Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. *Rapid Prototyping Journal*. Emerald Publishing Limited, 2017, **23**(2), 320-328. ISSN 1355-2546. Dostupné z: [doi:10.1108/RPJ-09-2015-0122](https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0122)
 11. RAJAN, V, B SNIDERMAN a P BAUM. 3D opportunity for life: additive manufacturing takes humanitarian action: additive manufacturing takes humanitarian action. *Delight Insight*. 2016, **1**(19), 1-8
 12. PÎRJAN, Alexandru a Dana-Mihaela PETROȘANU. The impact of 3D printing technology on the society and economy. *J. Inf. Syst. Oper. Manag.* 2013, **7**(2), 360-370.
-

-
13. PAGAC, Marek, Jiri HAJNYS, Quoc-Phu MA, Lukas JANCAR, Jan JANSKA, Petr STEFEK a Jakub MESICEK. A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers* [online]. 2021, **13**(4) [cit. 2023-03-27]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13040598
 14. KLAHN, Christoph, Bastian LEUTENECKER a Mirko MEBOLDT. Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*. 2015, **36**, 230-235. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.082
 15. KAMARA, Sheku a Kathy S. FAGGIANI. 3. *What Design and Inputs Does Additive Manufacturing Require?*. In: . John Wiley, s. 43-63. ISBN 978-1-119-75038-3. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012XDYZB/fundamentals-additive/what-design-inputs-does
 16. Fiedor, P.; Pilch, M.; Szymaszek, P.; Chachaj-Brekiesz, A.; Galek, M.; Ortyl, J. Photochemical Study of a New Bimolecular Photoinitiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light. *Catalysts* [online]. 2020, **10**, 284. [cit. 2023-02-22] dostupné z: https://doi.org/10.3390/catal10030284
 17. AL RASHID, Ans, Waqas AHMED, Muhammad Yasir KHALID a Muammer KOÇ. Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications: Processes and applications. *Additive Manufacturing*. 2021, **47**, 102279. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279
 18. BÁRTOLO, Paulo Jorge. *Stereolithographic Processes*. In: . Boston, MA: Springer US, 2011, s. 1-36. ISBN 978-0-387-92904-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-92904-0_1
 19. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARETT. *The 3D Printing Handbook*. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017. ISBN 9789082748505.
 20. CHO, Y., I. LEE a DW. CHO. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography. *Microsystem Technologies* [online]. 2005, **17**. 2. 2004, **2005**(11), 158-167 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s00542-004-0468-2
 21. HWANG, Sheng-Jye a Sen-Yung LEE. 36.1.1 *Development of Rapid Prototyping System*. In: . Trans Tech Publications, s. 261-264. ISBN 978-0-87849-360-9. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009ET8V5/advanced-manufacture/development-rapid-prototyping
 22. QUAN, Haoyuan, Ting ZHANG, Hang XU, Shen LUO, Jun NIE a Xiaoqun ZHU. Photocuring 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*. 2020, **5**(1), 110-115. ISSN 2452-199X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003
 23. KALASKAR, Deepak M. 2.2.1 *Resin-Based Systems*. In: . Elsevier, s. 25-28. ISBN 978-0-08-100717-4. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011FW5Y5/printing-in-medicine/resin-based-systems
 24. JANUSZIEWICZ, Rima, John R. TUMBLESTON, Adam L. QUINTANILLA, Sue J. MECHAM a Joseph M. DESIMONE. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016/10/18, **113**(42), 11703-11708. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1605271113
 25. SCHADT, Martin. LIQUID CRYSTAL MATERIALS AND LIQUID CRYSTAL DISPLAYS. *Annual Review of Materials Science*. Annual Reviews, 1997/08/01, **27**(1), 305-379. ISSN 0084-6600. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.matsci.27.1.305
-

-
26. SLA 3D Printing Materials Compared. *Dassault Systèmes* [online]. Aachen: Dassault Systèmes, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/make/solutions/blog/sla-3d-printing-materials-compared>
 27. Black Widow. In: *ArtStation* [online]. Toronto: ArtStation, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://cdn.artstation.com/p/assets/images/images/001/980/076/large/ardred-carver-bw-1-1.jpg?1455494006>
 28. Tough v5. In: *Filament2print* [online]. Madrid: Filament2print, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://filament2print.com/img/cms/products/formlabs/Tough2000/tough-v5-tough-2000.jpg>
 29. Tough and durable. In: *Formlabs* [online]. Mnichov: Formlabs, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/filer_public_thumbnails/filer_public/5d/71/5d71eb0d-e4fb-430b-ae8d-7cf2518bdd90/tough_family_durable_tab_04.jpg__1184x0_q85_subsampling-2.jpg
 30. CARTRIDGE FORMLABS HIGH TEMP RESIN HEAT-RESISTANT. In: *C3D* [online]. Krakow: C3D, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://center3dprint.com/image/cache/catalog/MaterialsSLA/Engineering/HIGHTEMPRESIN/Formlabs-High-Temp-heat-resistant-550x550.jpg>
 31. Flexible Resin. In: *Additive X* [online]. Ripon: Additive X, 2016 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://additive-x.com/wp-content/uploads/2022/10/Flexible-Resin-1.jpg>
 32. RAHMAN, Md Atikur, Md Zahirul ISLAM, Luke GIBBON, Chad A. ULVEN a John J. LA SCALA. 3D printing of continuous carbon fiber reinforced thermoset composites using UV curable resin. *Polymer Composites*. John Wiley, 2021/11/01, **42**(11), 5859-5868. ISSN 0272-8397. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/pc.26266>
 33. How ROE Dental Lab Pivoted to Manufacturing Medical Supplies to Fight COVID-19. *Formlabs* [online]. Aachen: Formlabs, 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://dental.formlabs.com/eu/blog/roe-dental-manufacturing-medical-supplies-swabs-covid-19/>
 34. Formlabs Permanent Crown Resin. In: *All3DP* [online]. Mnichov: All3DP, 2022 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://i.all3dp.com/workers/images/fit=cover,w=1000,gravity=0.5x0.5,format=auto/wp-content/uploads/2022/09/08122642/Formlabs-Permanent-Crown-Resin.jpg>
 35. ZHAO, Y., G. ZHANG, D. HAN, K. LI, Z. QIU a F. YANG. Experimental study on insulation properties of epoxy casting resins using high-frequency square waveforms. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021, **7**(6), 1227-1237. ISSN 2096-0042. Dostupné z: doi:[10.17775/CSEEJPES.2019.02110](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.02110)
 36. PIANGSUK, Tarin, Pantip HENPRASERT, Piriya BOONSIRIPHANT a Terry J. LINDQUIST. The accuracy comparison of 3D-printed post and core using castable resin and castable wax resin. *Journal of Prosthodontics*. John Wiley, 2022/08/25, **n/a**(n/a). ISSN 1059-941X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/jopr.13594>
 37. Bluecast X5. In: *All3DP* [online]. Mnichov: All3DP, 2022 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: https://i.all3dp.com/workers/images/fit=cover,w=1000,gravity=0.5x0.5,format=auto/wp-content/uploads/2022/10/18181104/bluecast-x5-like-all-castable-resins-still-needs-3djake-220909_download.jpg
 38. MONZÓN, Mario, Zaida ORTEGA, Alba HERNÁNDEZ, Rubén PAZ a Fernando ORTEGA. Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing. *Materials* [online]. 2017, **10**(1) [cit. 2023-04-07]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:[10.3390/ma10010064](https://doi.org/10.3390/ma10010064)
-

-
39. NAIK, Dayakar L. a Ravi KIRAN. On anisotropy, strain rate and size effects in vat photopolymerization based specimens. *Additive Manufacturing*. 2018, **23**, 181-196. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.021>
 40. FARKAS, Andrei Z., Sergiu-Valentin GALATANU a Riham NAGIB. The Influence of Printing Layer Thickness and Orientation on the Mechanical Properties of DLP 3D-Printed Dental Resin. *Polymers* [online]. 2023, **15**(5) [cit. 2023-04-21]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15051113
 41. BRIGHENTI, Roberto, Liviu MARSAVINA, Mihai P. MARGHITAS, Matteo MONTANARI, Andrea SPAGNOLI a Farzad TATAR. The effect of process parameters on mechanical characteristics of specimens obtained via DLP additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*. 2023. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.092>
 42. MILLER-CHOU, Beth A. a Jack L. KOENIG. A review of polymer dissolution. *Progress in Polymer Science*. 2003, **28**(8), 1223-1270. ISSN 0079-6700. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(03\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00045-5)
 43. OUANO, A. C. a J. A. CAROTHERS. Dissolution dynamics of some polymers: Solvent-polymer boundaries: Solvent-polymer boundaries. *Polymer Engineering & Science*. John Wiley, 1980/01/01, **20**(2), 160-166. ISSN 0032-3888. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/pen.760200208>
 44. MCMURRY, John. *Organická chemie*. 8. Brno: Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2015. ISBN 9788021447691.
 45. Bezpečnostní list isopropylalkohol. *Penta Chemicals Unlimited* [online]. Praha: Penta Chemicals, 2016 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.pentachemicals.eu/soubory/bezpecnostni-listy/isopropylalkohol.pdf>
 46. DPM Wash Solvent. *3D Jake* [online]. Quedlinburg: 3D Jake, 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/3d-basics/dpm-wash-solvent>
 47. Tripropylene glycol monomethyl ether (TPM). *Formlabs* [online]. Aachen: Formlabs, 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: https://support.formlabs.com/s/article/Tripropylene-glycol-monomethyl-ether-TPM?language=en_US
 48. *DIPROPYLENE GLYCOL METHYL ETHER* [online]. In: . Paříž: UNEP PUBLICATIONS, 2001, s. 1-18 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://planet4-hungary-stateless.storage.googleapis.com/2018/10/6ee94766-6ee94766-34590-94-8.pdf>
 49. STEVENSON, Kerry. <https://www.fabbaloo.com/news/how-to-properly-clean-3d-prints-with-simple-green>. *Fabbaloo* [online]. Winnipeg: Fabbaloo, 2021 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/news/how-to-properly-clean-3d-prints-with-simple-green>
 50. SCHERER, Michael. Isopropyl vs Ethyl Alcohol – Which Should I Use For 3D Printing?. *LearnDentistry* [online]. Soulsbyville: LearnDentistry, 2022 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://learndentistry.com/isopropyl-vs-ethyl-alcohol/>
 51. Poly-Flush® Stereolithography (SLA) 3D Printing Cleaning Solvent. *Merck Group* [online]. Darmstadt: Merck Group, 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/expertise/semiconductors/offering/poly-flush-stereolithography.html>
 52. How to Wash and Clean 3D Resin Prints?. *Anycubic* [online]. šen-čen: Anycubic 3D Printing, 2023 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/how-to-wash-and-clean-3d-resin-prints>
-

-
53. BERTACCHI, Denise. Hand Wash. In: *Tom's Hardware* [online]. New York: Tom's Hardware, 2022 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/NVzbHxJvooKpQpjxxSX5E5.jpg>
 54. Wash & Cure Machine 2.0. *Anycubic* [online]. Šen-čen: Anycubic 3D Printing, 2023 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/products/wash-cure-machine-2-0>
 55. UW-01 Washing/Curing Machine. In: *Creality* [online]. Šen-čen: Anycubic, 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.creality.com/products/creality-uw-01-washing-curing-machine>
 56. MASON, Timothy J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016, **29**, 519-523. ISSN 1350-4177. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004)
 57. Phrozen Ultra-Sonic Cleaner. In: *Phrozen3D* [online]. Hsinchu: Phrozen3D, 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/fhttps://phrozen3d.com/products/ultra-sonic-cleaner-phrozen?variant=35303988035746iles/7da53e5761a4c927a96a50adeb9d6630.jpg?v=1604979764>
 58. ZGURIS, Zachary. How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing. *Dynamism.com* [online]. Somerville: Formlabs, 2016 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.dynamism.com/download/2016/UV%20Postcure%20white%20paper.pdf>
 59. MIEDZIŃSKA, Danuta, Roman GIELETA a Arkadiusz POPLAWSKI. Experimental Study on Influence of Curing Time on Strength Behavior of SLA-Printed Samples Loaded with Different Strain Rates. *Materials* [online]. 2020, **13**(24) [cit. 2023-03-19]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma13245825](https://doi.org/10.3390/ma13245825)
 60. WU, Dong, Zeang ZHAO, Qiang ZHANG, H. Jerry QI a Daining FANG. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing. *Soft Matter* [online]. 2019, 28. 6. 2019, **2019**(15, 6151), 1-9 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: [doi:10.1039/c9sm00725c](https://doi.org/10.1039/c9sm00725c)
 61. Anycubic Photon D2. In: *Anycubic* [online]. Šen-čen: Anycubic, 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/products/photon-d2-dlp-3d-printer>
 62. SIRAYA TECH TEST MODEL. In: *Siraya Tech* [online]. Ottawa: Siraya Tech, 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://siraya.tech/pages/siraya-tech-test-model>
 63. Wash & Cure 2.0. In: *Anycubic* [online]. Šen-čen: Anycubic, 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/7da53e5761a4c927a96a50adeb9d6630.jpg?v=1604979764>
 64. Print, Clean, Cure, Varnish. Whas a difference that last step makes. In: *Reddit* [online]. San Francisco: reddit, 2020 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/ElegooMars/comments/grtnlo/print_clean_cure_varnish_what_a_difference_that/
 65. TIRPAK, Alan a Richard YOUNG. Accurate Transmission Measurement of Translucent Materials. *Photonics Spectra* [online]. Pittsfield: Laurin Publishing Co., 2008, **2008**(2), 1 [cit. 2023-04-03]. ISSN 7311230. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Accurate_Transmission_Measurements_of_Translucent/a32297
-

-
66. SMERD, R., S. WINKLER, C. SALISBURY, M. WORSWICK, D. LLOYD a M. FINN. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, **32**(1), 541-560. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.04.013>
 67. BARDELČIK, Alexander, Christopher P. SALISBURY, Sooky WINKLER, Mary A. WELLS a Michael J. WORSWICK. Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel. *International Journal of Impact Engineering*. 2010, **37**(6), 694-702. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.009>
 68. SABA, N., M. JAWAID a M.T.H. SULTAN. 1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. Woodhead Publishing, 2019, s. 1-12. ISBN 978-0-08-102292-4. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
 69. PLASTIC IMPACT TEST SPECIMEN NOTCH MACHINE. In: *Www.unitedtest.com* [online]. Peking: United Test Co. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.unitedtest.com/products/impact_testing_machine/sample_preparation_machine/impact-specimen-notching.html
 70. Impact Charpy. In: *Www.instron.com* [online]. Norwood: instron [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: [instron.com/-/media/images/instron/landing-page-images/glossary/charpy.jpg?sc_lang=en&hash=D171B2FEBA2D009519C07A40C0762B9B](https://www.instron.com/-/media/images/instron/landing-page-images/glossary/charpy.jpg?sc_lang=en&hash=D171B2FEBA2D009519C07A40C0762B9B)
 71. GHEBREMESKEL, Alazar N., Chandra VEMAVARAPU a Mayur LODAYA. Use of surfactants as plasticizers in preparing solid dispersions of poorly soluble API: Selection of polymer–surfactant combinations using solubility parameters and testing the processability: Selection of polymer–surfactant combinations using solubility parameters and testing the processability. *International Journal of Pharmaceutics*. 2007, **328**(2), 119-129. ISSN 0378-5173. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.08.010>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_{cA}	vrubová houževnatost	[kJ·m ⁻²]
b	šířka vzorku	[mm]
b_1	šířka zúžené části vzorku	[mm]
b_2	šířka konců vzorku	[mm]
b_n	šířka vzorku pod vrubem	[mm]
C	cena za 1 kWh	[Kč]
E	intenzita osvětlení	[klx]
E_c	kinetická energie spotřebovaná k přeražení tělesa	[J]
h	tloušťka vzorku	[mm]
l	délka vzorku	[mm]
L_0	původní měřená délka	[mm]
L_1	celková délka vzorku	[mm]
L_2	délka zúžené části vzorku	[mm]
L_3	délka konců vzorku	[mm]
n	počet kusů	[-]
P	příkon oplachové stanice	[kW]
r	poloměr zúžené části vzorku	[mm]
t	doba oplachu	[min]

Zkratky

Označení	Legenda
3D	Trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AMF	Additive Manufacturing File Format
CAD	Computer-Aided Design
CDLP	Continuous Digital Light Processing
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
DLP	Digital Light Processing
EC	EasyClean
FDM	Fused Deposition Modeling
FEP	Fluorovaný Ethylen-Propylen
IPA	Isopropylalkohol
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Elektroluminiscenční dioda
PPSF	Polyfenylsulfon
PEI	Polyetherimid
PEKK	Polyetherketonketon
PMMA	Polymethylmethakrylát
SG	Simple Green
SLA	Stereolitografie
STL	Standard Triangulation Language
TPM	Tripropylenglykol Methyl Ether
UV	Ultrafialový

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Experimentální hodnoty změřené při testování efektivity
- Příloha 2 Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty při tahové zkoušce
- Příloha 3 Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty při zkoušce vrubové houževnatosti
- Příloha 4 Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty vlastního oplachu
-

Experimentální hodnoty změřené při testování efektivity

Tab. Efektivita oplachu EC, 1. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	4,074	3,805	-6,60285
4	4,011	3,631	-9,47395
6	4,078	3,629	-11,0103
8	3,99	3,501	-12,2556
10	3,814	3,307	-13,2931

Tab. Efektivita oplachu EC, 2. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	4,092	3,795	-7,25806
4	4,025	3,607	-10,3851
6	4,117	3,634	-11,7318
8	3,96	3,463	-12,5505
10	3,803	3,282	-13,6997

Tab. Efektivita oplachu DPM, 1. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,608	3,306	-8,37029
4	3,791	3,398	-10,3667
6	3,965	3,461	-12,7112
8	3,217	2,753	-14,4234
10	3,879	3,284	-15,339

Tab. Efektivita oplachu DPM, 2. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,634	3,296	-9,30105
4	3,815	3,384	-11,2975
6	3,928	3,446	-12,2709
8	3,244	2,783	-14,2109
10	3,882	3,275	-15,6363

Tab. Efektivita oplachu IPA, 1. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,533	3,273	-7,35918
4	3,841	3,399	-11,5074
6	3,873	3,336	-13,8652
8	3,581	3,002	-16,1687
10	3,842	3,213	-16,3717

Tab. Efektivita oplachu IPA, 2. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,543	3,26	-7,98758
4	3,843	3,387	-11,8657
6	3,847	3,35	-12,9192
8	3,597	3,088	-14,1507
10	3,877	3,224	-16,8429

Tab. Efektivita oplachu SG, 1. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,692	3,58	-3,03359
4	3,945	3,618	-8,28897
6	4,337	3,968	-8,50819
8	4,124	3,766	-8,68089
10	3,944	3,595	-8,84888

Tab. Efektivita oplachu SG, 2. iterace.

Délka oplachu [min]	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
2	3,696	3,567	-3,49026
4	3,961	3,629	-8,38172
6	4,357	3,988	-8,46913
8	4,144	3,791	-8,51834
10	3,971	3,622	-8,78872

Tab. Intenzita osvětlení po oplachu.

Oplachová látka	Intenzita osvětlení
Kontrolní	15,65
EC	13,39
DPM	13,27
SG	13,06
IPA	14,19

Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty při tahové zkoušce

Tab. Zatěžující síly při Rm materiálu Standard.

Délka oplachu	SG [N]	EC [N]	DPM [N]	IPA [N]
2 min	186,391	180,221	174,456	185,062
	180,337	183,849	168,358	183,543
	182,543	185,044	170,942	181,149
4 min	186,82	189,266	194,76	179,029
	183,864	181,657	175,201	172,134
	198,14	185,446	174,31	176,131
6 min	180,14	179,125	181,375	179,683
	196,552	180,459	190,425	176,134
	183,782	179,066	185,858	196,976
8 min	188,201	193,756	188,192	180,334
	192,348	197,334	189,351	173,899
	191,824	189,166	172,382	177,428
10 min	192,263	176,876	159,975	188,202
	188,395	171,903	155,153	174,931
	187,023	175,07	166,493	180,965

0 min [N]	189,444	195,595	187,505
-----------	---------	---------	---------

Tab. Zatěžující síly při Rm materiálu ABS-like.

Délka oplachu	SG [N]	EC [N]	DPM [N]	IPA [N]
2 min	190,335	175,835	204,992	178,621
	199,086	183,652	174,072	183,543
	194,692	187,724	175,128	179,149
4 min	183,931	182,646	192,518	187,029
	197,506	173,256	188,767	189,46
	183,011	165,08	198,356	185,859
6 min	172,66	187,238	184,088	179,683
	169,13	190,076	193,817	180,675
	169,607	183,862	172,327	196,976
8 min	200,996	179,598	191,67	160,334
	190,549	153,338	181,876	176,512
	195,844	183,163	189,377	175,481
10 min	162,923	176,732	182,946	186,212
	173,313	169,817	193,21	177,823
	179,747	177,877	186,684	178,512

0 min [N]	218,838	216,738	212,73
-----------	---------	---------	--------

Tab. Zatěžující síly při Rm materiálu Tough.

Délka oplachu	SG [N]	EC [N]	DPM [N]	IPA [N]
2 min	139,948	161,326	151,14	139,294
	159,882	152,397	158,673	130,34
	150,192	152,808	151,067	147,437
4 min	148,09	143,901	137,187	140,439
	142,076	134,002	156,178	143,816
	148,09	142,871	127,905	142,547
6 min	146,86	133,507	126,06	130,515
	151,152	138,778	140,644	129,887
	155,02	149,256	140,016	130,955
8 min	152,335	129,941	140,139	134,144
	125,763	140,734	142,441	132,506
	138,469	135,207	143,711	136,78
10 min	149,567	132,788	150,997	103,205
	146,284	129,912	121,325	104,752
	147,467	143,757	153,622	102,185

0 min [N]	150,406	155,406	152,406
-----------	---------	---------	---------

Tab. Mez pevnosti materiálu Standard.

Délka oplachu	SG [MPa]	EC [MPa]	DPM [MPa]	IPA [MPa]
2 min	32,70018	31,61772	30,60632	32,46702
	31,63807	32,25421	29,53649	32,20053
	32,02509	32,46386	29,98982	31,78053
4 min	32,77544	33,20456	34,16842	31,4086
	32,25684	31,86965	30,73702	30,19895
	34,7614	32,53439	30,5807	30,90018
6 min	31,60351	31,42544	31,82018	31,52333
	34,48281	31,65947	33,40789	30,9007
	32,24246	31,41509	32,60667	34,55719
8 min	33,01772	33,99228	33,01614	31,63754
	33,74526	34,62	33,21947	30,5086
	33,65333	33,18702	30,24246	31,12772
10 min	33,73035	31,03088	28,06579	33,01789
	33,05175	30,15842	27,21982	30,68965
	32,81105	30,71404	29,2093	31,74825

0 min [MPa]	33,23579	34,31491	32,89561
-------------	----------	----------	----------

Tab. Mez pevnosti materiálu ABS-like.

Délka oplachu	SG [MPa]	EC [MPa]	DPM [MPa]	IPA [MPa]
2 min	33,39211	30,84825	35,96351	31,33702
	34,92737	32,21965	30,53895	32,20053
	34,15614	32,93404	30,72421	31,42965
4 min	32,2686	32,04316	33,77509	32,81211
	34,65018	30,39579	33,11702	33,2386
	32,10719	28,9614	34,7993	32,60684
6 min	30,29123	32,84877	32,29614	31,52333
	29,67193	33,34667	34,00298	31,69737
	29,75561	32,25649	30,23281	34,55719
8 min	35,26246	31,50842	33,62632	28,12877
	33,42965	26,9014	31,90807	30,96702
	34,3586	32,13386	33,22404	30,78614
10 min	28,58298	31,00561	32,09579	32,66877
	30,40579	29,79246	33,89649	31,19702
	31,53456	31,20649	32,75158	31,31789

0 min [MPa]	38,39263	38,02421	37,32105
-------------	----------	----------	----------

Tab. Mez pevnosti materiálu Tough.

Délka oplachu	SG [MPa]	EC [MPa]	DPM [MPa]	IPA [MPa]
2 min	24,55228	28,30281	26,51579	24,43754
	28,04947	26,73632	27,83737	22,86667
	26,34947	26,80842	26,50298	25,86614
4 min	25,9807	25,24579	24,06789	24,63842
	24,92561	23,50912	27,39965	25,23088
	25,9807	25,06509	22,43947	25,00825
6 min	25,76491	23,42228	22,11579	22,89737
	26,51789	24,34702	24,67439	22,78719
	27,19649	26,18526	24,56421	22,97456
8 min	26,72544	22,79667	24,58579	23,53404
	22,06368	24,69018	24,98965	23,24667
	24,29281	23,72053	25,21246	23,99649
10 min	26,23982	23,29614	26,4907	18,10614
	25,66386	22,79158	21,28509	18,37754
	25,8714	25,22053	26,95123	17,92719

0 min [MPa]	26,38702	27,26421	26,73789
-------------	----------	----------	----------

Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty při zkoušce vrubové houževnatosti

Tab. Kinetické energie k přeražení materiálu Standard.

Délka oplachu	IPA [J]	DPM [J]	SG [J]	EC [J]
2 min	0,09	0,09	0,13	0,12
	0,09	0,10	0,14	0,1
	0,1	0,09	0,1	0,09
4 min	0,09	0,09	0,18	0,09
	0,1	0,09	0,12	0,1
	0,11	0,09	0,13	0,09
6 min	0,11	0,08	0,13	0,09
	0,15	0,09	0,16	0,09
	0,07	0,1	0,17	0,14
8 min	0,11	0,08	0,16	0,13
	0,13	0,09	0,14	0,1
	0,09	0,09	0,12	0,08
10 min	0,08	0,09	0,11	0,13
	0,13	0,08	0,17	0,1
	0,1	0,07	0,14	0,1

0 min [J]	0,15	0,2	0,19
-----------	------	-----	------

Tab. Kinetické energie k přeražení materiálu ABS-like.

Délka oplachu	IPA [J]	DPM [J]	SG [J]	EC [J]
2 min	0,08	0,07	0,15	0,09
	0,13	0,08	0,1	0,09
	0,1	0,09	0,11	0,08
4 min	0,08	0,09	0,15	0,08
	0,09	0,08	0,14	0,09
	0,09	0,14	0,16	0,1
6 min	0,08	0,09	0,13	0,07
	0,08	0,08	0,17	0,09
	0,1	0,12	0,16	0,11
8 min	0,08	0,08	0,09	0,1
	0,09	0,08	0,22	0,1
	0,07	0,1	0,16	0,07
10 min	0,1	0,11	0,17	0,11
	0,08	0,11	0,13	0,08
	0,08	0,13	0,17	0,1

0 min [J]	0,16	0,15	0,17
-----------	------	------	------

Tab. Kinetické energie k přeražení materiálu Tough.

Délka oplachu	IPA [J]	DPM [J]	SG [J]	EC [J]
2 min	0,13	0,09	0,13	0,09
	0,08	0,08	0,19	0,12
	0,12	0,13	0,13	0,09
4 min	0,08	0,14	0,18	0,11
	0,09	0,08	0,13	0,08
	0,1	0,07	0,15	0,12
6 min	0,05	0,09	0,16	0,08
	0,09	0,12	0,14	0,1
	0,09	0,13	0,16	0,07
8 min	0,08	0,09	0,14	0,09
	0,07	0,09	0,1	0,07
	0,1	0,14	0,16	0,09
10 min	0,1	0,09	0,16	0,08
	0,08	0,09	0,09	0,12
	0,07	0,013	0,11	0,1

0 min [J]	0,15	0,17	0,17
-----------	------	------	------

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti materiálu Standard.

Délka oplachu	IPA [kJ·m ⁻²]	DPM [kJ·m ⁻²]	SG [kJ·m ⁻²]	EC [kJ·m ⁻²]
2 min	1,68691	1,788124	3,036437	2,699055
	1,68691	2,125506	3,373819	2,024291
	2,024291	1,788124	2,024291	1,68691
4 min	1,68691	1,788124	4,723347	1,68691
	2,024291	1,68691	2,699055	2,024291
	2,361673	1,788124	3,036437	1,68691
6 min	2,361673	1,349528	3,036437	1,68691
	3,711201	1,68691	4,048583	1,68691
	1,012146	2,024291	4,385965	3,373819
8 min	2,361673	1,349528	4,048583	3,036437
	3,036437	1,68691	3,373819	2,024291
	1,68691	1,68691	2,699055	1,349528
10 min	1,349528	1,788124	2,361673	3,036437
	3,036437	1,450742	4,385965	2,024291
	2,024291	1,11336	3,373819	2,024291

0 min [kJ·m ⁻²]	3,711201	5,398111	5,060729
-----------------------------	----------	----------	----------

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti materiálu ABS-like.

Délka oplachu	IPA [kJ·m ⁻²]	DPM [kJ·m ⁻²]	SG [kJ·m ⁻²]	EC [kJ·m ⁻²]
2 min	1,349528	1,349528	3,711201	1,68691
	3,036437	1,349528	3,036437	1,68691
	2,024291	1,68691	3,036437	1,349528
4 min	1,349528	1,68691	3,711201	1,349528
	1,68691	1,349528	3,373819	1,68691
	1,68691	3,373819	4,048583	2,024291
6 min	1,349528	1,68691	3,036437	1,012146
	1,349528	1,349528	4,385965	1,68691
	2,024291	2,699055	4,048583	2,361673
8 min	1,349528	1,349528	3,036437	2,024291
	1,68691	1,349528	4,723347	2,024291
	1,012146	2,024291	4,048583	1,012146
10 min	2,024291	2,361673	4,385965	2,361673
	1,349528	2,361673	3,036437	1,349528
	1,349528	3,036437	4,385965	2,024291

0 min [kJ·m ⁻²]	3,711201	4,048583	4,385965
-----------------------------	----------	----------	----------

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti materiálu Tough.

Délka oplachu	IPA [kJ·m ⁻²]	DPM [kJ·m ⁻²]	SG [kJ·m ⁻²]	EC [kJ·m ⁻²]
2 min	3,036437	1,68691	3,036437	1,68691
	1,349528	1,349528	5,060729	2,699055
	2,699055	3,036437	3,036437	1,68691
4 min	1,349528	3,373819	4,723347	2,361673
	1,68691	1,349528	3,036437	1,349528
	2,024291	1,012146	3,711201	2,699055
6 min	0,337382	1,68691	4,048583	1,349528
	1,68691	2,699055	3,711201	2,024291
	1,68691	3,036437	4,048583	1,012146
8 min	1,349528	1,68691	3,373819	1,68691
	1,012146	1,68691	2,024291	1,012146
	2,024291	3,373819	4,048583	1,68691
10 min	2,024291	1,68691	4,048583	1,349528
	1,349528	1,68691	2,699055	2,699055
	1,012146	3,036437	2,361673	2,024291

0 min [kJ·m ⁻²]	3,711201	4,385965	4,385965
-----------------------------	----------	----------	----------

Experimentálně změřené a vypočtené hodnoty vlastního oplachu

Tab. Efektivita vlastního oplachu.

Iterace	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po oplachu [g]	Úbytek hmotnosti [%]
1.	3,739	3,331	-10,912
2.	3,766	3,343	-11,2321

Tab. Zatěžující síly při Rm po oplachu ve vlastním roztoku.

Iterace	Materiál		
	Standard [N]	Tough [N]	ABS-like [N]
1.	191,857	146,042	188,922
2.	187,024	147,174	192,899
3.	189,227	150,698	191,202

Tab. Meze pevnosti po oplachu ve vlastním roztoku.

Iterace	Materiál		
	Standard [MPa]	Tough [MPa]	ABS-like [MPa]
1.	33,65912	25,6214	33,14421
2.	32,81123	25,82	33,84193
3.	33,19772	26,43825	33,54421

Tab. Kinetické energie k přeražení materiálů po oplachu ve vlastním roztoku.

Iterace	Materiál		
	Standard [J]	Tough [J]	ABS-like [J]
1.	0,12	0,11	0,13
2.	0,13	0,12	0,12
3.	0,11	0,14	0,13

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti po oplachu ve vlastním roztoku.

Iterace	Materiál		
	Standard [kJ·m ⁻²]	Tough [kJ·m ⁻²]	ABS-like [kJ·m ⁻²]
1.	2,699055	2,361673	3,036437
2.	3,036437	2,699055	2,699055
3.	2,361673	3,373819	3,036437