

# **Vliv povrchových úprav na mechanické vlastnosti materiálů**

Bc. Barbora Ptošková

---

Diplomová práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav fyziky a mater. inženýrství  
akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Barbora Ptošková**  
Osobní číslo: **T15269**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv povrchových úprav na mechanické vlastnosti materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
2. Seznamte se s obsluhou optického goniometru, univerzálního testovacího stroje, instrumentovaného Charpyho kladiva a drsnoměru.
3. Proveďte charakterizaci povrchových vlastností výchozích materiálů a jejich povrchových úprav, s ohledem na drsnost a povrchovou energii.
4. Pokuste se o stanovení vztahu mezi vlastnostmi povrchu a výslednými mechanickými vlastnostmi materiálů.
5. Získané výsledky přehledně diskutujte a srovnajte v závěrečných kapitolách diplomové práce.



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tisková**

Seznam odborné literatury:

1. HIEMENZ P.C., Principles of colloid and surface chemistry. Marcel Dekker, NY 1997. ISBN 0-8247-7476-0.
2. PASHLEY R.M., KARAMAN M.E., Applied colloid and surface chemistry. John Wiley and Sons, 2004. ISBN 0-470-86882-1.
3. ISRAELACHVILI J.N., Intermolecular and surface forces, Third Edition. Academic Press, 2011.
4. TILLEY R.: Understanding solids The science of materials. Wiley, Chichester 2008.
5. FREUND L.B., SURESH S., Thin Film Materials. Cambridge University Press, Cambridge 2003.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Smolka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**3. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**19. května 2017**

Ve Zlíně dne 10. února 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Podstatou práce je ověření vlivu povrchových úprav plastů na jejich mechanické vlastnosti. Bylo hodnoceno chování materiálu při rázovém a únavovém namáhání po úpravě plazmatem ve srovnání s chováním původního, neupraveného materiálu. Původní myšlenkou bylo, že vznik trhliny na povrchu a její šíření lze ovlivnit úpravou povrchu materiálu. Výsledky experimentů tuto hypotézu podporují.

Klíčová slova: kontaktní úhel smáčení, povrchová energie, povrchové úpravy, mechanické vlastnosti, šíření trhliny

## **ABSTRACT**

The principle of the thesis was verification of the surface treatment and its influence on mechanical properties of the plastics. The material behavior under impact load and fatigue conditions was evaluated after plasma surface treatment. Original thought was, that the crack initiation and propagation on the surface may be influenced by the treatment. Experimental results are supportive on the hypothesis.

Keywords: contact angle, surface energy, surface finishes, mechanical tests, crack propagation

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce, Ing. P. Smolkovi, PhD., za podporu mé myšlenky, veškeré úsilí a pomoc při měření a psaní práce a v neposlední řadě za velkou trpělivost.

Dále bych chtěla poděkovat Ústavu fyziky a materiálového inženýrství za možnost tuto práci vypracovat, Ústavu inženýrství polymerů za pomoc při přípravě vzorků a Ústavu výrobního inženýrství za možnost využití Charpyho kladiva.

Poslední díky patří rodině, která mě po celou dobu studia finančně i psychicky podporovala.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a odevzdaná verze diplomové práce a elektronická verze nahraná do IS/STAG jsou totožné.

„Dějiny přírodních věd jsou plné příkladů, že z nejláznivějších nápadů klíčí geniální myšlenky.“

*J. Žáček*

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1 STRUKTURA POLYMERŮ .....  | 12        |
| 1.2 VLIV STRUKTURY NA MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ .....                             | 12        |
| 1.2.1 Mechanické .....  | 12        |
| 1.2.2 Optické .....   | 13        |
| 1.2.3 Elektrické .....  | 14        |
| 1.2.4 Dielektrické .....  | 14        |
| 1.2.5 Tepelné .....   | 15        |
| 1.3 VAZBY .....   | 15        |
| 1.3.1 Chemické.....   | 16        |
| 1.3.2 Mezimolekulární .....   | 16        |
| <b>2 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ A POVRCHOVÁ ENERGIE</b> .....                                     | <b>19</b> |
| 2.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....  | 19        |
| 2.1.1 Povrchové napětí .....  | 19        |
| 2.1.2 Povrchová energie .....   | 19        |
| 2.1.3 Kontaktní úhel smáčení .....  | 19        |
| 2.1.4 Youngova rovnice .....  | 20        |
| 2.1.5 Smáčení .....   | 20        |
| 2.2 STANOVENÍ POVRCHOVÉ ENERGIE TUHÝCH LÁTEK.....                                       | 20        |
| 2.2.1 Optická goniometrie.....  | 20        |
| 2.2.2 Fixy a inkousty .....   | 21        |
| 2.3 METODY PŘEPOČTU KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ NA POVRCHOVOU<br>ENERGII TUHÉ LÁTKY .....  | 21        |
| 2.3.1 Wu .....  | 21        |
| 2.3.2 Fowkes .....  | 22        |
| 2.3.3 Zisman.....   | 22        |
| 2.3.4 van Oss .....   | 22        |
| 2.3.5 Owens-Wendt-Rabel-Kaelble .....   | 23        |
| 2.3.6 Stavová rovnice .....   | 24        |
| <b>3 POVRCHOVÉ ÚPRAVY MATERIÁLŮ</b> .....   | <b>25</b> |
| 3.1 TYPY POVRCHOVÝCH ÚPRAV .....  | 25        |
| 3.2 VLIV POVRCHOVÝCH ÚPRAV NA VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....                                | 25        |
| <b>4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY A S NIMI SPOJENÉ DEFORMACE<br/>A PORUŠOVÁNÍ MATERIÁLŮ</b> ..... | <b>27</b> |
| 4.1 DEFORMACE ZATĚŽOVÁNÍM .....   | 27        |
| 4.2 TRHLINY .....   | 27        |
| 4.3 GRIFFITHOVO KRITÉRIUM.....  | 28        |
| 4.4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....  | 29        |
| 4.4.1 Charpy .....  | 30        |
| 4.4.2 Cyklické namáhání ohybem .....  | 30        |
| 4.4.3 Izod.....   | 31        |



|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.4.4     | Rázová zkouška pádem .....                                   | 31        |
| <b>II</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                                  | <b>33</b> |
| <b>5</b>  | <b>MATERIÁLY A METODY .....</b>                              | <b>34</b> |
| 5.1       | ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ A CHEMIKÁLIÍ .....        | 34        |
| 5.2       | PŘÍPRAVA VZORKŮ .....  | 35        |
| 5.2.1     | Vstřikování .....  | 35        |
| 5.2.2     | Vrubování a měření rozměrů .....                             | 36        |
| 5.2.3     | Povrchová úprava plazmatem .....                             | 37        |
| 5.3       | METODY MĚŘENÍ .....  | 37        |
| 5.3.1     | Měření kontaktního úhlu smáčení .....                        | 37        |
| 5.3.2     | Měření drsnosti povrchu .....                                | 38        |
| 5.3.3     | Měření síly nutné k přeražení .....                          | 39        |
| 5.3.4     | Měření síly nutné k průhybu .....                            | 39        |
| <b>6</b>  | <b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>                              | <b>41</b> |
| 6.1       | HODNOTY KONTAKTNÍCH ÚHLŮ SMÁČENÍ A POVRCHOVÝCH ENERGÍÍ ..... | 41        |
| 6.2       | ZKOUŠKA DRSNOSTI .....                                       | 48        |
| 6.3       | INSTRUMENTOVANÁ RÁZOVÁ ZKOUŠKA .....                         | 49        |
| 6.4       | VÝSLEDKY VYSOKOCYKLOVÉHO TŘÍBODOVÉHO OHYBU .....             | 50        |
|           | <b>ZÁVĚR .....</b>   | <b>56</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                       | <b>58</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>              | <b>64</b> |
|           | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                                  | <b>67</b> |
|           | <b>SEZNAM TABULEK .....</b>                                  | <b>69</b> |

## ÚVOD

Polymerní materiály se v dnešní době využívají čím dál častěji. V některých případech je ale třeba je vylepšovat. Samotný plast může mít jinak vyhovující vlastnosti, nemusí ale vyhovovat například pevnostně. V takových situacích se nabízí vyztužení vláknou. Změnou struktury celého objemu je možné materiál upravit dle požadavků. Takovéto kompozitní materiály však mohou znamenat jistou komplikaci přípravy či výroby nebo zdražení výsledného materiálu/výrobku.

Hlavní myšlenkou této diplomové práce je zjednodušit úpravu materiálu a omezit ji na úpravu povrchu. Uvažujme šíření trhliny materiálem. Trhliny jako takové jsou vadou často znemožňující další užívání výrobku. Trhlina vzniká v drtivé většině případů na povrchu materiálu, je tedy nasnadě, že omezí-li se možnost jejího vzniku nebo zamezí-li se šíření již existující trhliny, nebude mít příležitost šířit se dále do celého objemu.

Práce se nesnaží o zlepšení odolnosti povrchů vybraných materiálů, nýbrž o potvrzení hypotézy, že se úpravou povrchových vlastností materiálů dají ovlivnit i jeho mechanické vlastnosti. Slouží k tomu řada experimentů z oblasti mechanických zkoušek popsána v praktické části. V teoretické části jsou popsána témata úzce související se strukturou a vazbami materiálů a je zde uveden teoretický základ všech použitých experimentálních metod.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery, jeden z mnoha druhů materiálů, se dělí podle původu na syntetické a přírodní, syntetické pak podle chemické přípravy na polymerizáty, polykondenzáty a polyadukty. Podle složení se polymery dále dělí na plněné a neplněné, dle teplotního chování na termoplasty, reaktoplasty, elastomery a termoplastické elastomery, podle tvaru molekul na lineární, rozvětvené a sesíťované, podle uspořádání molekul na amorfni a (semi)krystalické a dle polarit y na polární a nepolární. Polymerní materiály je možné dělit i na základě chemické příbuznosti na polyolefiny, polystyreny, polykarbonáty a další nebo z hlediska využití na komoditní, inženýrské a high-tech polymery. <sup>[1]</sup>

### 1.1 Struktura polymerů

Konstituce neboli molekulová struktura se vyjadřuje pomocí základních chemických vzorců a je v čase prakticky neměnná. Konfigurace čili prostorové uspořádání atomů v meru je také časově stálá a lze ji měnit pouze chemickými reakcemi. Konformace, prostorové uspořádání celého řetězce, je za určitých podmínek v čase proměnná. Může se měnit tepelným pohybem v důsledku rotace částí řetězce okolo jednoduchých primárních vazeb.

Tyto pojmy osvětlují molekulární strukturu. Při systematickém ukládání řetězců vedle sebe lze hovořit o struktuře nadmolekulární, při vysokém stupni pravidelnosti o struktuře krystalické. <sup>[2]</sup>

### 1.2 Vliv struktury na materiálové vlastnosti polymerů

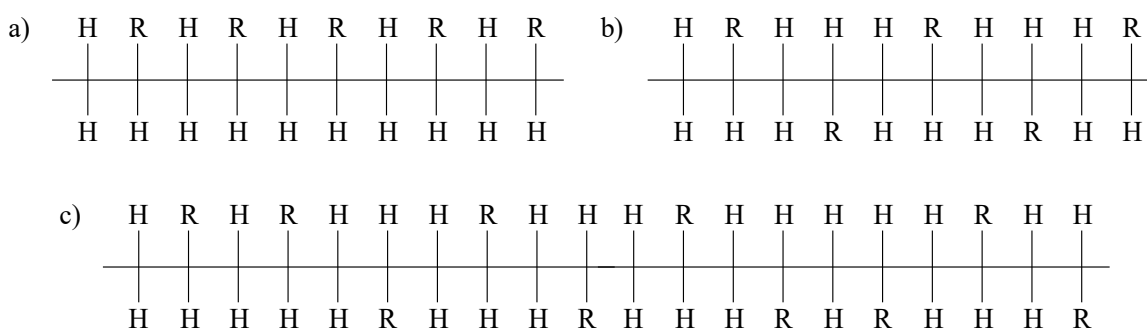
Chemická struktura předurčuje možnosti uspořádání molekul, resp. makromolekul, tj. fyzikální strukturu polymerů. Společně pak ovlivňují množství rozličných vlastností – od mechanických vlastností přes vlastnosti optické až po odolnost jiným chemickým látkám. <sup>[3]</sup>

#### 1.2.1 Mechanické

Mechanické vlastnosti materiálů jsou dány dvěma vzájemně působícími faktory – silou chemických vazeb a přítomnými deformacemi. Za pozorované mechanické vlastnosti jsou však chemické vazby přímo zodpovědné jen zřídka. Ve skutečnosti je většina pevných látek slabší, než je síla předpovídaná právě na základě přítomných chemických vazeb. V takových případech se řídíme defekty, zvláště pak dislokacemi, hranicemi zrn a neuspořádaností krystalografických rovin. Mechanické vlastnosti se projevují po vystavení materiálu vnější síle, která způsobí deformaci, jejíž množství závisí na velikosti síly a jejím směru.

Vliv struktury na mechanické vlastnosti je patrný právě na deformacích. Jednou ze základních materiálových charakteristik je Poissonovo číslo (poměr příčného zkrácení k podélnému prodloužení). Materiály jako pevné látky snadno podléhají plastické deformaci. Anorganické pevné látky s lamelární krystalickou strukturou nebo polymery, jejichž řetězce po sobě mohou klouzat neomezeným způsobem, nabývají hodnot Poissonova čísla od 0,0 do 0,5. Oproti tomu auxetické materiály, např. polymerní pěny připravované všestranným stlačováním a zahříváním neauxetických pěn a kovové pěny vyráběné postupným stlačováním neauxetických pěn ve třech kolmých směrech (materiály s mikroporézními strukturami) nebo voštiny s nekonvexními buňkami, mají Poissonovo číslo záporné – při protahování ve směru podélném se zvětšují i ve směru příčném. [4; 5; 6]

Mechanické vlastnosti polymerů jsou také ovlivněny tvarem a velikostí makromolekul. Polymery s izotaktickým uspořádáním substituentů mají vyšší pevnost a tuhost než polymery syndiotaktické a ataktické (Obr. 1).

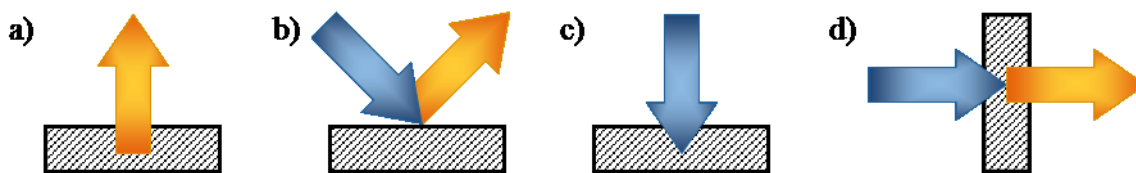


Obr. 1 – Uspořádání substituentů (R) vzhledem k uhlíkatému řetězci: a) izotaktické (pravidelné na jedné straně řetězce), b) syndiotaktické (pravidelně střídavé na obou stranách řetězce), c) ataktické (nahodilé)

S rostoucí velikostí molekul, jež je vyjádřena molární hmotností, roste i pevnost a modul pružnosti polymeru, zároveň se ale snižuje jeho tažnost. [1]

### 1.2.2 Optické

Struktura materiálu je jedním z činitelů ovlivňujících i optické vlastnosti, které zahrnují vyzařování nebo odezvu materiálu na dopad elektromagnetického záření. Řadíme mezi ně emisivitu, odrazivost, pohltivost a propustnost (Obr. 2).



Obr. 2 – Optické vlastnosti materiálů: a) emisivita, b) odrazivost, c) pohltivost, d) propustnost

Emisivita popisuje množství světla vyzářené z materiálu vzhledem k množství, které při stejné teplotě vyzařuje absolutně černé těleso.

Jako odrazivost se označuje množství světla odraženého materiálem vzhledem k množství dopadajícího záření. K odrazu dochází na povrchu, v průsvitných materiálech i v objemu. Na hladkém/leštěném povrchu se jedná o odraz přímý, na drsném/strukturovaném povrchu o odraz rozptýlený.

Pohltivostí se označuje poměr dopadajícího a pohlceného záření. K pohlcování dochází u opticky nepropustných materiálů na povrchu, u (částečně) propustných i v objemu.

Propustnost stanovuje množství světla prošlého materiálem v poměru k množství dopadajícího světla. Je třeba rozlišovat průhledné a průsvitné materiály. Průhledné propouští světlo přímo, průsvitné ho rozptylují různými směry. Díky další optické vlastnosti, indexu lomu, může docházet ke ztrátě průhlednosti a to vlivem narůstajícího podílu krystalinity např. kvůli změně teploty materiálu. Index lomu charakterizuje rychlost šíření světla daným materiálem a pro amorfni a krystalické polymery je tedy ze strukturálních důvodů odlišný. <sup>[1; 7]</sup>

### 1.2.3 Elektrické

Míra schopnosti působit elektrickou silou (elektrický náboj), schopnost přenášet elektrický proud (elektrická vodivost) nebo schopnost ve vnějším elektrickém poli deformovat elektronový obal molekuly (polarizovatelnost) jsou také vlastnosti odvislé od struktury. Například kovy jsou se svými kovovými vazbami a elektronovými oblaky mezi uzly pravidelné mřížky perfektními vodiči. Kupříkladu sklo nebo guma ve své struktuře oproti kovům volné elektrony postrádají a elektrinu tak nevedou. <sup>[8]</sup>

### 1.2.4 Dielektrické

Dielektrické vlastnosti jako permitivita (vyjadřující vliv prostředí na elektrické pole) nebo elektrická susceptibilita (charakterizující vliv polarizace dielektrika působením elektrického pole) jsou mimo jiné ovlivněny chemickou strukturou. Polymerní materiály se obecně řadí

mezi dielektrika a elektrické izolanty, existují ovšem i polymery, jež ve své skladbě obsahují elektricky polarizovatelné dipóly nebo mají izolační vlastnosti zhoršené vodivými přísadami (sazemi, kovovými prášky...).<sup>[9; 1]</sup>

### 1.2.5 Tepelné

Jak se zdá, struktura materiálu ovlivňuje vše. Závisí na ní i (měrná) tepelná kapacita nebo teplotní roztažnost charakterizována součinitelem délkové a objemové roztažnosti.

Tepelná vodivost, jež je dána součinitelem tepelné vodivosti, se odvíjí od střední volné dráhy fononů, což je vzdálenost mezi jejich srážkami ve struktuře. Díky struktuře může být tato dráha krátká a tepelná vodivost pak nízká, nebo může být dlouhá a tepelná vodivost vysoká. Střední volnou dráhu, resp. tepelnou vodivost, výrazně zkracují defekty materiálu. Ty mohou být příčinou problémů sintrovaných keramik. Tento proces vede ke vzniku mnoha vad (hranice zrn, póry, dutiny...). Následkem je nižší tepelná vodivost těchto těles. Vypálené keramiky mají běžně nízkou tepelnou vodivost kvůli své porozitě. Tepelná vodivost polymerů závisí na stupni krystalinity. Krystalické části struktury mají vyšší vodivost než neuspořádané oblasti. Plastové pěny mají opět díky porozitě obzvláště nízké tepelné vodivosti a dají se tak využívat jako tepelné izolanty. Kovy jsou naopak dobrými tepelnými vodiči. Sčítá se u nich příspěvek fononů a volných elektronů, kterých mají kovy dostatek, mají tudíž i vysokou tepelnou vodivost.

Dále je pro materiály důležitý teplotní rozsah použitelnosti vymezený zpracovatelskými teplotami. Strukturou se řídí například teplota skelného přechodu amorfních polymerů i teplota tání charakterizující semikrystalické polymery; polymery se sesítovanou strukturou už při vyšších teplotách fyzikálním změnám zpravidla nepodléhají. Obecně lze tedy říci, že struktura ovlivňuje odolnost nízkým a vysokým teplotám a z nich vycházející tepelnou degradaci nebo hořlavost.<sup>[4; 1]</sup>

## 1.3 Vazby

Atomy prvků nejsou až na výjimky schopny existovat samostatně a sdružují se do vyšších celků. Vazebné síly, které mezi atomy působí, se nazývají chemické vazby. Všechny vazby jsou založeny na sdílení nebo předávání vazebných elektronů.<sup>[10]</sup>

### 1.3.1 Chemické

Chemické vazby dělíme na kovalentní vazby (které lze dále dělit na jednoduché/násobné a nepolární/polární), koordinačně kovalentní vazby, iontové vazby a kovové vazby.

Kovalentní vazba vzniká při splnění základních podmínek:

- a) atomy se musí přiblížit na vzdálenost, při které dojde k překryvu valenčních orbitalů,
- b) počet, energie a prostorové uspořádání valenčních elektronů musí umožňovat vznik vazebných elektronových párů.

Koordinačně kovalentní vazba je vazba mezi donorem (dárce) volného elektronového páru a jeho akceptorem (příjemcem), donor tedy musí mít alespoň jeden volný elektronový pár a akceptor alespoň jeden volný orbital.

Iontová vazba vzniká mezi prvky o rozdílu elektronegativit větším než 1,7. Ke vzniku dojde, když jeden nebo více elektronů přejde z valenční oblasti atomu do valenční oblasti jiného atomu tak, že oba dosáhnou konfigurace vzácného plynu.

Kovová vazba vzniká díky soudružnosti krystalu, která je následkem přitažlivosti mezi kationty a elektronovým oblakem v mřížce kovu.

V polymerech jsou přítomny převážně vazby kovalentní, mimořádně iontové (v ionomelech) a koordinačně kovalentní (v polyelektrolytech). Druh vazby, resp. její vazebná energie, ovlivňuje pevnost a ohebnost polymerního řetězce. <sup>[10; 2; 11]</sup>

### 1.3.2 Mezimolekulární

Mezimolekulární vazebné interakce jsou slabší než síly udržující chemické vazby, přesto jsou významné a důležité. Patří mezi ně van der Waalsovy síly zahrnující coulombické síly (elektrostatický jev mezi permanentními dipóly, kdy se k sobě molekuly natáčejí opačně nabitými konci), indukční síly (působení mezi permanentním dipólem a jím indukovaným dipólem) a disperzní (Londonovy) síly (indukování dipólu rychle proměnným dipólem vzniklým neuspořádaným pohybem elektronů okolo jádra).

Van der Waalsovy síly hrají důležitou roli v adhezních jevech a kohezních (soudružných) energiích materiálů. Síly mezi makroskopickými objekty jsou výsledkem komplexnosti interakcí mezi molekulami ve dvou objektech a oddělujícím médiem. Výchozím bodem pro pochopení těchto mezimolekulárních sil je Coulombova síla ( $F$ ), což je elektrostatická síla mezi dvěma náboji ( $Q_1, Q_2$ ) dána rovnicí



$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 D^2} \quad (1)$$

kde  $\epsilon$  je permitivita prostředí,  $\epsilon_0$  permitivita vakua a  $D$  vzdálenost mezi náboji. Potenciální energie ( $E_p$ ) mezi takovými náboji je pak

$$E_p = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 D} \quad (2)$$

U nábojů s opačným znaménkem je potenciální energie záporná – při přiblížení náboje svou energii snižují. Pokud jsou oba náboje v médiu, je jeho permitivita vyšší než 1 a elektrostatická síla se odpovídajícím způsobem snižuje.

Interakce mezi molekulami ovlivňují i dipóly. V případě jednoho volně se otáčejícího dipólu s tepelným pohybem zanikají vazby mnohem rychleji se vzrůstající vzdáleností. Navíc se interakce zhoršuje s rostoucí teplotou. Pokud se volně otáčejí dva dipóly, existuje jistá rovnováha mezi přednostní orientací dipólů a tepelným pohybem. Dva volně rotující dipóly se vzájemně přitahují, protože se přednostně orientují opačnými náboji směrem k sobě. Tato tepelně průměrná volná dipól-dipólová energie se často označuje jako Keesomova energie.

Když se náboj blíží k molekule bez statického dipólového momentu, je všechna dosud uvažovaná energie nulová. Existuje ale přitažlivá síla vznikající posunem náboje v nepolární molekule indukovaná nábojem. Tento indukovaný dipólový moment následně interaguje s nábojem. Získáváme pak Helmholtzovu volnou energii ( $A$ ) vyjádřenou rovnicí

$$A = \frac{Q^2 \alpha}{2(4\pi\epsilon_0)^2 D^4} \quad (3)$$

kde  $\alpha$  je polarizovatelnost molekuly. Analogicky bude molekula se statickým dipólovým momentem interagovat s polarizovatelnou molekulou vybuzením dipólového momentu v polarizovatelné molekule. Pokud se mohou dipóly volně otáčet, je Helmholtzova volná energie pro interakci mezi trvalým a indukovaným dipólem

$$A = \frac{\mu^2 \alpha}{(4\pi\epsilon_0)^2 D^6} \quad (4)$$

kde  $\mu$  je chemický potenciál molekuly. Tato interakce se nazývá Debyeovou interakcí. Bude vznikat také mezi dvěma identickými polarizovatelnými molekulami s trvalým dipólovým momentem.

Veškeré doposud uvažované energie jsou vypočitatelné pomocí klasické fyziky. Nedokáží však vysvětlit přitažlivost mezi dvěma nepolárními molekulami. Existence takové přitažlivosti je zřejmá, jelikož všechny plyny kondenzují v určité teplotě. Za tuto přitažlivost jsou odpovědné Londonovy/disperzní síly. Pro výpočet disperzní síly je zapotřebí teorie poruch kvantové mechaniky. Představa o původu disperzních sil může být získána s ohledem na atom s kladně nabitým jádrem, kolem kterého elektrony obíhají s vysokou frekvencí ( $10^{15} - 10^{16}$  Hz) – v každém okamžiku je atom polární, jen směr polarity se s vysokou frekvencí mění. Při přiblížení dvou oscilátorů dochází k jejich vzájemnému ovlivnění. Přitažlivé orientace jsou pravděpodobnější než odpudivé, což vede k přitažlivé síle. Disperzní interakce rostou s polarizovatelností dvou molekul.

Souhrnem tedy Keesom, Debye i London velmi přispěli k chápání sil mezi molekulami. Van der Waalsovy síly jsou součtem Keesomových, Debyeových a Londonových sil, tudíž všech faktorů, které se považují za interakce mezi dipóly, i když Londonovy síly přece jen dominují.

Dalším případem mezimolekulární síly je vodíkový můstek vznikající mezi vodíkem a vysoce elektronegativním prvkem s alespoň jedním volným elektronovým párem. Tato speciální vodíková vazba zvyšuje soudružnost molekul.

V polymerech působí mezimolekulární síly mezi řetězci. Jejich úroveň závisí na vzájemné vzdálenosti řetězců, a to různě podle jejich druhu. Po délce řetězce se sčítají a jejich vlivem se při zatížení polymerního tělesa přenáší mechanické napětí z řetězce na řetězec. Také lze říci, že mezi řetězci polymerů funguje soudružnost daná kohezní energií a ta představuje energii potřebnou k překonání mezimolekulárních sil. <sup>[12; 2; 13]</sup>

## 2 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ A POVRCHOVÁ ENERGIE

Vznik povrchu kapaliny je důsledkem zvláštního rozložení přitažlivých sil u povrchových molekul. V nitru kapaliny je každá molekula ze všech stran obklopena dalšími molekulami, a proto na molekuly uvnitř kapaliny působí stejné síly. U molekul v povrchové vrstvě převládá silová výslednice namířená do vnitřku kapaliny. Důsledkem působení těchto sil je snaha kapaliny zmenšit svůj povrch na minimum. Ze všech těles stejného objemu má nejmenší povrch koule, proto mají malá množství kapalin kulovitý tvar (např. kapky rosy). U větších objemů dochází vlivem gravitační síly k deformaci. Povrchové napětí vytváří z povrchové vrstvy kapaliny domnělou blanku (molekulový film), která je schopná unést i nevelké zatížení. <sup>[14]</sup>

### 2.1 Základní pojmy

#### 2.1.1 Povrchové napětí

Povrchové napětí ( $\gamma_l$ ) je definováno rovnicí

$$\gamma_l = \frac{F}{l} \quad (5)$$

jako síla ( $F$ ) ležící v rovině tečné k povrchu kapalně fáze působící v místě jejího vlivu kolmo na délku myšleného řezu povrchem a dělená touto délkou ( $l$ ). Jednotkou je ze zjevných důvodů  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ , v praxi se však obvykle používá jednotka  $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ . <sup>[15]</sup>

#### 2.1.2 Povrchová energie

Povrchová energie ( $\gamma_s$ ) je dána rovnicí

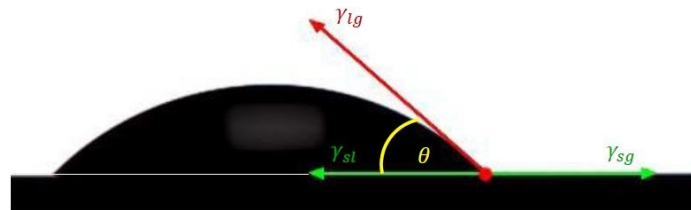
$$\gamma_s = \frac{W}{S} \quad (6)$$

vratné práce ( $W$ ) nutné ke zvětšení mezifázového rozhraní o jednotku plochy ( $S$ ). Jednotkou je  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ , v praxi častěji  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . <sup>[16]</sup>

#### 2.1.3 Kontaktní úhel smáčení

Kontaktní úhel smáčení  $\theta$  mezi kapkou kapalně fáze a pevnou smáčenou fází je definován mechanickou rovnováhou způsobenou třemi druhy mezifázového napětí (Obr. 3):

$\gamma_{lg}$  (kapalina-plyn),  $\gamma_{sg}$  (pevná látka-plyn),  $\gamma_{sl}$  (pevná látka-kapalina).



Obr. 3 – Systém mezifázových napětí

### 2.1.4 Youngova rovnice

Vyjadřuje rovnováhu mezifázových napětí a vymezuje  $\theta$  <sup>[17]</sup>

$$\gamma_{lg} \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (7)$$

### 2.1.5 Smáčení

Smáčení tuhé látky kapalinou, tj. převládání adheze (přilnavosti) nad kohezí (soudružností), nastává, pokud  $\gamma_{sl} < \gamma_{sg}$ , tedy pokud  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ . Nesmáčivost povrchu kapalinou, převládání koheze nad adhezí, nastává v opačném případě, když  $\gamma_{sl} > \gamma_{sg}$ , tj. pokud  $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ . <sup>[14]</sup>

## 2.2 Stanovení povrchové energie tuhých látek

Existují dva způsoby, jak zjistit povrchovou energii pevného materiálu – měřením koheze pevné látky nebo smáčením materiálu řadou kapalin s různým povrchovým napětím. <sup>[18]</sup>

Většinou se povrchová energie tuhé látky stanovuje nepřímou – měřením kontaktního úhlu smáčení za použití vhodných kapalin. Typickými kapalinami jsou například voda, ethylen-glykol a glycerol nebo ethanol, diiodomethan a jiné. Pro tuto práci je důležitou metodou stanovení povrchové energie tuhé látky optická goniometrie.

### 2.2.1 Optická goniometrie

Pracuje s odečítáním smáčecího úhlu z fotografie kapky pořízené vysokorychlostní kamerou. Pracuje s různými metodikami – se sedící kapkou, visící kapkou či kapkou v jiné kapalině. Kontaktní úhel se pak stanovuje pomocí softwaru s využitím různých vyhodnocovacích algoritmů.

### 2.2.2 Fixy a inkousty

V průmyslové praxi se často využívají fixy a inkousty poskytující jednoduché orientační stanovení povrchové energie. Aplikují se na povrchy z důvodu rychlého ověření čistoty/stupně mastnoty ovlivňující adhezi lepidla, laku, tiskařské barvy atd. Standardně začíná měření nanesením testovací kapaliny o střední hodnotě povrchového napětí. Všeobecně je za tento limit pokládána hodnota  $38 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , nad touto hodnotou by měla být přilnavost uspokojivá až dobrá. Pokud se nanosená linka testovací kapaliny nezmění v malé kapičky, nanese se inkoust s vyšší hodnotou povrchového napětí; pokud se po nanesení inkoustu kapičky utvoří, je nutné použít inkoust s nižší hodnotou povrchového napětí. Hledá se interval povrchových napětí vymezený dvěma typy inkoustu – jedním tvořícím a jedním už netvořícím kapičky. <sup>[19]</sup>

## 2.3 Metody přepočtu kontaktního úhlu smáčení na povrchovou energii tuhé látky

Soudružnost mezi atomy a molekulami způsobující povrchovou energii lze vysvětlit různými typy interakcí, zejména se rozlišují dva – disperzní a polární interakce. Disperzní interakce jsou způsobeny dočasnými fluktuacemi distribuce náboje v atomech/molekulách. Polární interakce zahrnují interakce mezi permanentními dipóly a mezi permanentními a indukovanými dipóly. Povrchová energie je tvořena součtem těchto interakcí.

Mezi všemi atomy a molekulami dochází k van der Waalsovým interakcím (viz 1.3.2), neexistuje tedy žádná látka s povrchovým napětím nebo energií, která by se skládala pouze z polární části. Existují ovšem látky bez polárních skupin, proto je jejich povrchové napětí/energie čistě disperzní. Srovnání poměru disperzní a polární složky povrchového napětí/energie pro dvě fáze umožňuje předvídat adhezi mezi těmito fázemi. Čím bližší poměry jsou, tím více interakcí mezi fázemi vzniká a tím vyšší je jejich očekávaná adheze. Pro výpočet mezifázové energie existují různé modely založené právě na disperzních a polárních částech povrchových napětí či energií příslušných fází. <sup>[20]</sup>

### 2.3.1 Wu

Wu ve své metodě počítá s povrchovým napětím kapaliny a povrchovou energií materiálu, resp. s jejich polárními a disperzními složkami. Interakce mezi fázemi interpretuje jako harmonický průměr těchto polárních a disperzních částí látek

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 4 \left( \frac{\gamma_s^D \gamma_l^D}{\gamma_s^D + \gamma_l^D} + \frac{\gamma_s^P \gamma_l^P}{\gamma_s^P + \gamma_l^P} \right) \quad (8)$$

Pro určení povrchové energie pevné látky je zapotřebí minimálně dvou kapalin, z nichž alespoň jedna musí mít  $\gamma_l^P > 0$ . Rovnice (8) je nastavena pro každou možnou kombinaci dvou kapalin – použití  $N$  kapalin má za následek  $(N^2 - N)/2$  rovnic s odpovídajícím počtem dílčích výsledků. Výsledná povrchová energie tuhého materiálu je pak aritmetickým průměrem těchto dílčích výsledků. [21]

### 2.3.2 Fowkes

Fowkesova teorie opět popisuje povrchovou energii pevné látky s disperzní a polární složkou. Fowkes operuje se dvěma kapalinami, u kterých postupně měří kontaktní úhly se smáčenou látkou, což mu umožňuje ke zjištění povrchové energie využít dvou jednoduchých rovnic:

$$(1 + \cos\theta)\gamma_l = 2 \left( \sqrt{\gamma_s^D \gamma_l^D} + \sqrt{\gamma_s^P \gamma_l^P} \right) \quad (9)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^P \quad (10)$$

Fowkes pokládá za nejdůležitější z interakcí ty Londonovy, protože se vyskytují ve všech typech hmoty a jejich vlivem se sousední atomy a molekuly vždy přitahují. Také říká, že se mohou mezipovrchové interakce vyskytovat pouze mezi silami stejného typu (např. disperzní-disperzní). [22]

### 2.3.3 Zisman

Zismanova teorie je možná historicky nejčastěji používaná definice povrchové energie pevné látky. Definuje ji jako rovnou povrchovému napětí kapaliny, která dokonale (s kontaktním úhlem  $0^\circ$ ) danou látku smáčí. Zismanova teorie je model s jedním parametrem, což znamená, že se pokouší charakterizovat povrchovou energii tuhé látky a odpovídající povrchové napětí kapaliny pouze jednou celkovou hodnotou. Tímto způsobem ignoruje specifické interakce mezi kapalinou a povrchem pevné látky. [23]

### 2.3.4 van Oss

Tato teorie pracuje s měřením kontaktních úhlů pomocí tří kapalin a k výpočtu povrchové energie tuhé látky využívá systém tří rovnic:

$$(1 + \cos\theta)\gamma_l = 2 \left( \sqrt{\gamma_s^D \gamma_l^D} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_l^+} \right) \quad (11)$$

$$\gamma_s^{AB} = \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} \quad (12)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^{AB} \quad (13)$$

kde index + označuje elektronakceptorní složku, index - elektrondonorní složku a index  $AB$  celkovou acidobazickou složku povrchové energie.

Rovnice jsou výsledkem van Ossovy teorie, která se zaměřuje na rozdělení povrchové energie na tři složky – disperzní, kyselou a zásaditou. Stejně jako u výše popsaných dvousložkových teorií je disperzní složka určena k charakterizaci všech van der Waalsových interakcí, které je schopen povrch navázat se smáčecí kapalinou. Polární složka je pak rozdělena na kyselou a zásaditou část. Kyselá část určuje sklon povrchu interagovat specifickými interakcemi (dipól-dipól, indukovaný dipól-dipól, vodíková vazba) vedoucími ke smáčení povrchu kapalinami, které mohou být donorem elektronů. Zásaditá část naopak udává sklon povrchu tvořit interakce se smáčecími kapalinami schopnými elektrony akceptovat. [24]

### 2.3.5 Owens-Wendt-Rabel-Kaelble

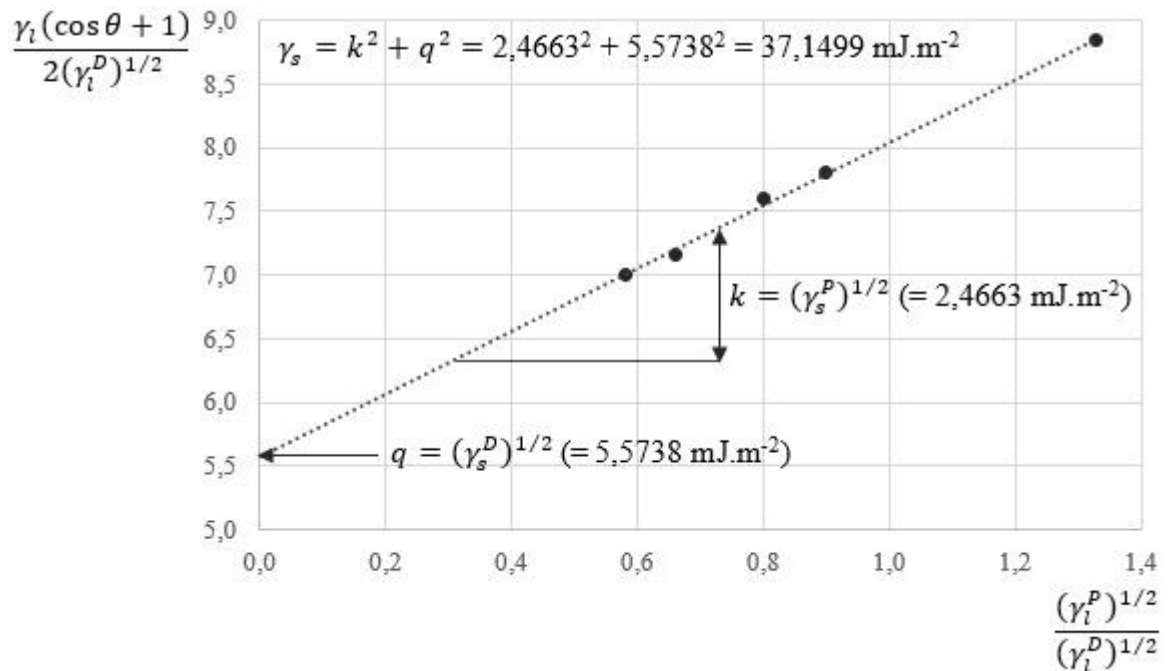
K určení povrchové energie OWRK metodou je potřeba min. dvou kapalin se známými polárními ( $\gamma_l^P$ ) a disperzními ( $\gamma_l^D$ ) komponentami, přesněji min. jedna polární a jedna nepolární kapalina. S pomocí Youngovy rovnice (7) a Goodsovy rovnice (14)

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2(\gamma_s^D \gamma_l^D)^{1/2} - 2(\gamma_s^P \gamma_l^P)^{1/2} \quad (14)$$

dospěli OWRK k výsledné rovnici přímky

$$\frac{\gamma_l(\cos\theta + 1)}{2(\gamma_l^D)^{1/2}} = 2(\gamma_s^P)^{1/2} \frac{(\gamma_l^P)^{1/2}}{(\gamma_l^D)^{1/2}} + (\gamma_s^D)^{1/2} \quad (15)$$

$\downarrow \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow$   
 $y \qquad = \qquad k \qquad \qquad x \qquad + \qquad q$



Obr. 4 – Modelový příklad určení disperzní a polární složky povrchové energie a její celkové hodnoty fiktivní pevné látky

Znamé a naměřené hodnoty se vynesou do grafu (Obr. 4), dále se sečtou hodnoty druhých mocnin  $k$  a  $q$ , z čehož vzejde celková povrchová energie zkoumaného tuhého materiálu. [25]

### 2.3.6 Stavová rovnice

V literatuře se vyskytuje i rovnice

$$\cos\theta = -1 + 2 \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_l}} \quad (16)$$

ze které vyplývá, že pokud je znám příslušný kontaktní úhel a povrchové napětí kapaliny, je po vyjádření možné vypočítat i povrchovou energii pevné látky. Existuje jedno bezprostřední kritérium, které říká, že výsledky získané touto rovnicí musí splňovat předpoklad, že při měření kontaktních úhlů s množstvím kapalin bude vypočtená povrchová energie zkoumaného materiálu konstantní bez ohledu na povrchové napětí použitých kapalin. Jinými slovy různé dvojice kapalin a kontaktních úhlů by měly pro jednu a tutéž pevnou látku poskytovat rozumně konstantní hodnoty. [26]



### 3 POVRCHOVÉ ÚPRAVY MATERIÁLŮ

Povrchová úprava je proces, při kterém dochází k modifikaci povrchu materiálu změnou fyzikální, chemické nebo biologické vlastnosti. Provádí se například za účelem zlepšení vzhledu, smáčitelnosti, přilnavosti, elektrické vodivosti, odolnosti proti oděru nebo korozi, odstranění povrchových vad nebo k regeneraci. Obvykle se povrchově upravují pevné materiály, je ale možné provádět úpravy na povrchu i u určitých specifických kapalin. [27; 28]

#### 3.1 Typy povrchových úprav

Metody upravování povrchů mohou být rozděleny do tří kategorií:

- a) nanášení a pozměňování: plazmování, povlakování, naprašování, pasivování, galvanizování, smaltování, moření, eloxování, cementování, nitridování, natírání, glazování;
- b) opracovávání a přetváření: abrazivní otryskávání, laserová ablace, pískování, leptání;
- c) mechanické dokončovací práce: lapování, broušení, vyhlazování, leštění, bubnové a vibrační dokončovací práce.

Příkladů jednotlivých povrchových úprav samozřejmě existuje mnohem více. Povrchy se upravují různými metodami s ohledem na širokou škálu povrchových vlastností: od drsnosti a hydrofility přes povrchový náboj a povrchovou energii až po biokompatibilitu a reaktivitu. [27; 28]

#### 3.2 Vliv povrchových úprav na vlastnosti materiálů

Přední místo v důvodech použití povrchové úpravy zaujímá ochrana materiálu. Ten se volí například s ohledem na pevnostní vlastnosti, samotná jeho odolnost ale nemusí být při pravidelném používání dostatečná. Povrchové úpravy se však nepoužívají jen kvůli ochraně proti vnějším vlivům, resp. zvýšení technické životnosti, ale také například za účelem dekorace příslušného materiálu. [29]

Polymerní materiály se často upravují pokovováním, následkem je pak kromě dosažení kovového vzhledu i změna řady vlastností jako zmenšení propustnosti pro kapaliny a plyny, zabránění přirozenému stárnutí a tvorbě statické elektřiny nebo zlepšení odolnosti proti opotřebení. [30]

Dalšími žádanými povrchovými vlastnostmi jsou elektrická izolace a vysoká tepelná odolnost při tření povrchu. Zefektivnění těchto vlastností lze dosáhnout povlakováním, konkrétně například fosfátováním. [31]

Jednou z mnoha možností povrchových úprav je i úprava drsnosti. Za drsnost se pokládají jemné strukturální nerovnosti povrchu včetně nesrovnalostí způsobených výrobním procesem. Zdrsněním nebo vyhlazením povrchu můžeme ovlivnit například hydrofobitu, koeficient tření nebo optické vlastnosti materiálu. [32]

Pro tuto práci stěžejní plazmatické úpravy ovlivňují v závislosti na použitých plynech či nánášeném materiálu vlastnosti jako hydrofilitu/hydrofobitu, povrchovou energii, povrchový náboj apod. To má za následek změnu schopnosti barvitelnosti, potiskovatelnosti, adhezních a elektromagnetických vlastností atd.

Plazma je z chemického hlediska velmi reaktivní prostředí. Vysoká hustota ionizovaných a excitovaných částic je schopná změnit vlastnosti i jinak inertního materiálu. V radiofrekvenčním plazmatu se upravované povrchy nejčastěji leptají a čistí. Nejběžnějším plazmovacím plynem bývá vzduch nebo kyslík, užívají se ale i další plyny. Využití nachází radiofrekvenční plazma v oblasti depozice vrstev – od přípravy tvrdých vrstev až po funkční povrchy. V radiofrekvenčním plazmatu mohou být povrchy i chemicky redukovány, v takových případech se aplikuje vodíkové plazma. Dalším druhem plazmatu je mikrovlnné plazma. Je hojně využíváno pro studium chemických reakcí v důsledku vysoké energie částic, uplatňuje se ale i při leptání syntetických polymerních materiálů nebo při úpravě povrchů kovů a jejich slitin. [33; 34]

## 4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY A S NIMI SPOJENÉ DEFORMACE A PORUŠOVÁNÍ MATERIÁLŮ

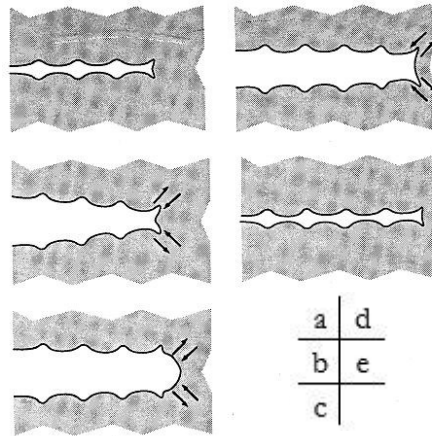
### 4.1 Deformace zatěžováním

Všechny pozorovatelné makroskopické deformační vlastnosti plastů jsou výsledkem změn (nad)molekulární struktury v průběhu zatěžování. Například deformace změnou vazebných úhlů je možná u polymerních řetězců s nižší tuhostí, tj. u řetězců s vazebným úhlem menším než  $180^\circ$ . Uvnitř hlavního řetězce může docházet k rotaci a spolu s vazebnými úhly jinými než  $180^\circ$  k ohýbání řetězců. Ohebnost je omezena dvojnými vazbami, velkými bočními skupinami a vazbami mezi řetězci. Naopak zvýšení ohebnosti může být způsobeno rostoucí teplotou, přičemž teplo vzniká při disipaci energie při šíření trhliny. [35]

### 4.2 Trhliny

Je známo, že trhlina vzniká na povrchu. K šíření trhliny dochází, pokud je energie napjatosti v trhlíně dostatečně velká pro další růst trhliny. V opačném případě musí narůstat napětí. Růst trhliny je podmíněn hnací silou trhliny, která má význam rychlosti změny elastické energie napjatosti v závislosti na růstu lomové plochy. Odporem proti růstu trhliny je pak nutné množství energie spotřebované na její šíření. [36]

Na únavovou trhlinu lze pohlížet jako na mechanismus „hromadění“ menších poškození, podle kterého je nutný určitý počet cyklů ke vzniku kritické velikosti poškození a tedy určitý čas pro přírůstek trhliny. Při šíření únavové trhliny dochází ke vzniku striací a posouvání čela trhliny (Obr. 5). Striace jsou malé rýhy kolmé na směr šíření trhliny. Při otevírání trhliny (b) má její čelo konvexní (promáčklý) tvar. Při zavírání trhliny (c) dochází na čele trhliny ke změně tvaru v konkávní (vyboulený). Při opětovném otevření (d) dojde nutně k obnovení konvexního tvaru špice trhliny. Proces se v jednotlivých cyklech periodicky opakuje a v každém cyklu se tak vytvoří striace na horním i spodním povrchu trhliny. Vzdálenost mezi striacemi je podle tohoto mechanismu rovna přírůstku trhliny za jeden cyklus. [37]

Obr. 5 – Vznik striací během šíření únavové trhliny<sup>[37]</sup>

### 4.3 Griffithovo kritérium

Problematikou chování těles s trhlinou se mezi prvními zabýval A. A. Griffith. Vycházel z vyjádření celkové potenciální energie ( $\Pi$ ) tělesa s trhlinou

$$\Pi = W + L = \Pi_0 + W - W_0 = \Pi_0 - (W_0 - W) = \Pi_0 - W_T \quad (17)$$

kde  $W$  je energie napjatosti tělesa,  $L$  je potenciální energie vnějších sil a  $W_T$  je změna energie napjatosti tělesa v důsledku vzniku trhliny vyjádřena rovnicí

$$W_T = W_0 - W \quad (18)$$

Neznámé indexované nulou zastupují hodnoty pro těleso bez trhliny.

Griffith počítal s ideálně křehkým materiálem, pro nějž je disipační energie ( $\Gamma$ ) spotřebována pouze na vznik nových ploch

$$\Gamma = \gamma S_p = 2\gamma S = \gamma 4aB \quad (19)$$

kde  $\gamma$  je opět povrchová energie materiálu,  $S_p$  je plocha povrchů trhliny a  $S$  je plocha centrální trhliny s rozměry  $a$  (kritický rozměr trhliny) a  $B$  (délka trhliny). Vyjádřil podmínku nestability trhliny (20) a s uvažováním rovnic (21)-(23) upravil podmínku nestability trhliny do tvaru (24):

$$-\frac{d\Pi}{dS} = \frac{dW_T}{dS} = \frac{d\Gamma}{dS} \quad (20)$$

$$dW_T = \frac{\pi\sigma^2 B}{E} 2a(da) \quad (21)$$

$$dS = 2B(da) \quad (22)$$

$$d\Gamma = 4B\gamma(da) \quad (23)$$

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma \quad (24)$$

kde  $\sigma$  je normálové napětí a  $E$  celková energie. Z výše uvedeného pak plyne rovnice pro lomové napětí ( $\sigma_f$ )

$$\sigma = \sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (25)$$

Kritická velikost trhliny ( $a_c$ ) je pak dána rovnicí

$$a = a_c = \frac{2\gamma E}{\pi\sigma^2} \quad (26)$$

Pokud je  $a$  menší než  $a_c$ , je energie uvolněná při růstu trhliny menší než energie potřebná k vytváření nových ploch, bez vnějších vlivů tedy nedochází k šíření trhliny.

Orowan a Irwin v rozmezí tří let nezávisle na sobě zavedli efektivní povrchovou energii ( $\gamma_e$ )

$$\gamma_e = \gamma + \gamma_p \quad (27)$$

kde  $\gamma_p$  je plastická práce nutná k vytvoření lomové plochy a je mnohonásobně větší než energie  $\gamma$ , Griffithovo kritérium tedy získalo tvar<sup>[38]</sup>

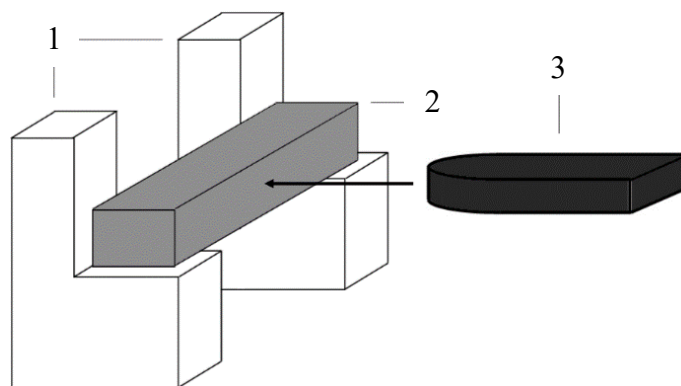
$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_e}{\pi a}} \quad (28)$$

#### 4.4 Mechanické zkoušky

V základu existují čtyři mechanické vlastnosti – pružnost, plasticita, pevnost a houževnatost; mechanických charakteristik popisujících mechanické vlastnosti je přirozeně více. Pro experimentální určení kterékoliv mechanické charakteristiky je nutné vyrobit z materiálu zkušební těleso a zatěžovat ho vnějšími silami. Proto nejsou mechanické charakteristiky absolutními konstantami – záleží na podmínkách zkoušky. Mechanických zkoušek je celá řada: zkoušky tahem, tlakem, ohybem, zkoušky tvrdosti, zkoušky mezních stavů materiálů, zkoušení únavové odolnosti... V následující části kapitoly jsou zmíněny některé mechanické zkoušky pracující s šířením trhliny.<sup>[39]</sup>

#### 4.4.1 Charpy

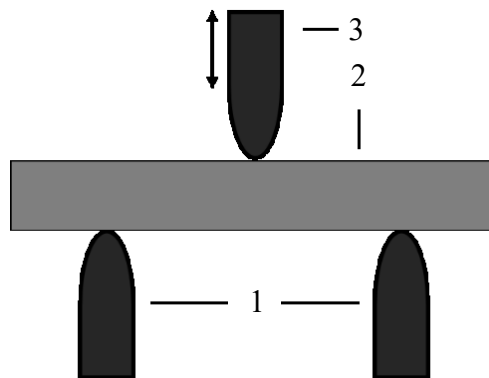
Metoda stanovení rázové houževnatosti Charpy slouží primárně k popisu chování zkušebního tělesa během rázového ohybového namáhání. Je však možné ji využít k čistě srovnávacím účelům, resp. k porovnání síly nutné k přerážení zkušebních těles z různých materiálů. Zkušební těleso má tvar čtyřbokého hranolu, je umístěno na podpěrách a je namáháno/ohýbáno/přeráženo vysokou, nominálně konstantní rychlostí ve směru kolmém k přímce rázu procházející středem mezi podpěrami (Obr. 6). V případě zkušebních těles s vrubem se pak v základu jedná o zkoušku vrubové houževnatosti Charpy a ráz kladiva je veden na opačnou stranu, než na které je umístěn vrub. [40; 41]



Obr. 6 – Schéma rázové zkoušky Charpy: 1 – podpěry,  
2 – zkušební těleso, 3 - kladivo

#### 4.4.2 Cyklické namáhání ohybem

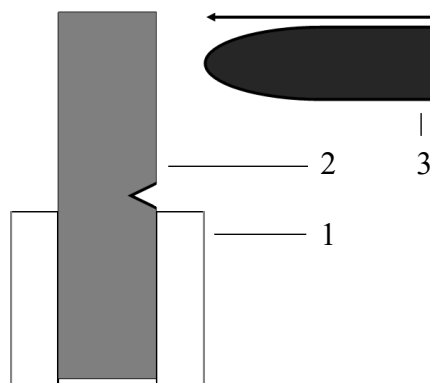
Chování při mechanickém namáhání můžeme sledovat i při tříbodovém ohybu. Pokud je zkušební těleso – čtyřboký hranol, jinak též trámec – položeno na dvou podpěrách v předepsané vzdálenosti, působí na něj síla shora uprostřed (Obr. 7). Při zatížení je spodní strana trámce namáhána na tah, horní strana je namáhána tlakem. Při dlouhodobém cyklickém namáhání lze sledovat rozdíly v chování tělísek z různých materiálů nebo tělísek jednoho materiálu, avšak před měřením různě upraveným. V případě vrubovaných zkušebních těles či těles opatřených trhlinami je možné sledovat i aspekty šíření trhliny.



Obr. 7 – Schéma cyklického třibodového ohybu: 1 – podpěry,  
2 – zkušební těleso, 3 – zatěžující síla

#### 4.4.3 Izod

Metoda Izod se od Charpyho metody liší ve způsobu přeražení zkušebního tělesa. Na rozdíl od Charpyho není trámec položen na podpěrách, ale je na jednom konci vetknut a na druhém přerážen. Vrubovaná zkušební tělíska se upevňují tak, aby byla přerážena ze strany opatřené vrubem (Obr. 8). Nevýhodou metody je, že zbytek přeráženého tělesa brzdí pohyb kladiva, což vede ke snižování naměřených hodnot. [42]



Obr. 8 – Schéma zkoušky metodou Izod: 1 – vetknutí,  
2 – zkušební těleso, 3 - kladivo

#### 4.4.4 Rázová zkouška pádem

Provádí se na padostroji (viz ilustrační Obr. 9) a představují alternativní způsob měření rázové houževnatosti. Eliminuje nedostatky kyvadlových přístrojů – volbu energie a rychlost provedené deformace. Padostroj pracuje na principu padajícího tělesa (kuličky nebo padacího čidla) na zkušební těleso s libovolně volitelnou kinetickou energií závislou na hmotnosti padajícího tělesa a rychlosti závislé na délce pádu. Při zkoušce padostrojem se hledá taková zátěž, při které dojde ke zlomu 50 % zkušebních těles. [42]



Obr. 9 – Instrumentovaný padostroj Magnus<sup>[43]</sup>



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 MATERIÁLY A METODY

K experimentům byly použity polymerní materiály akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polykarbonát (PC) a jejich směs (ABS+PC). Jednotlivé materiály byly před i po zřejmé úpravě povrchové energie plazmatem podrobovány různým mechanickým zkouškám a byl tak zjišťován vliv změny povrchu na mechanické vlastnosti.

### 5.1 Základní charakteristika materiálů a chemikálií

**Akrylonitrilbutadienstyren** je terpolymer složený z elastomeru butadienu naroubovaného v termoplastické matici kopolymeru styrenu a akrylonitrilu. Nejčastěji je připravován emulzní polymerací. ABS vyniká skvělou zpracovatelností i vlastnostmi, což ho řadí na první příčku mezi inženýrskými termoplasty. Lze jej zpracovat prakticky všemi klasickými technologickými postupy užívanými pro termoplasty – vstřikováním, vytlačováním, kalandrováním, vyfukováním nebo třeba tvářením za studena. Vlastnosti zahrnují vysokou tepelnou odolnost, pevnost a houževnatost, dobrou rozměrovou stabilitu a chemickou odolnost. ABS je strukturálně složitý, což umožňuje značnou všestrannost při přizpůsobování vlastností. Využití nachází ve výrobě koextrudovaných desek, v chladicím obložení, zahradním náčiní, hračkách, bezpečnostních zařízeních na dálnicích... [44; 45; 46; 47]

**Akrylonitrilbutadienstyren + polykarbonát** je směs ABS s PC poskytující unikátní kombinaci výborné zpracovatelnosti ABS s velice dobrými mechanickými vlastnostmi a odolností PC. Vyváženost vlastností, především tepelné odolnosti, je dána poměrem obou složek ve směsi, molární hmotností polykarbonátu a příslušnými aditivy. Zpracovává se například extruzí, vstřikováním nebo lisováním. Mezi hlavní vlastnosti patří nízké celkové smrštění, barvitelnost a potiskovatelnost, vysoká tuhost aj. Typickými aplikacemi jsou sloupky, konstrukční díly a přístrojové desky v automobilovém průmyslu nebo klávesnice, rámy TV a adaptéry v elektronice. Směs ABS+PC se díky svým vlastnostem využívá při výrobě výrobků vystavovaných širokému rozsahu teplot. [48; 49; 50]

**Polykarbonát** je obecně polyester kyseliny uhličité a dihydroxysloučeniny. Běžně přístupné a výhodné jsou polykarbonáty na bázi Bisfenolu A. Vyrábí se z něj přeesterifikací nebo přímou fosgenací. Zpracovávají se dle střední molární hmotnosti nejčastěji vstřikováním či vytlačováním, typy s viskóznější taveninou pak odléváním. Součtu jeho vlastností nebylo prozatím souhrnně dosaženo u žádného jiného termoplastu. Jedná se hlavně o vynikající mechanické vlastnosti stále v širokém intervalu teplot, dobré elektroizolační vlastnosti, nízkou nasákavost, odolnost povětrnostním podmínkám, ultrafialovému záření a chemikáliím.

Používá se pro aplikace v lékařství (např. při výrobě inhalátorů), při výrobě bezpečnostních helem nebo jako základ pro fotografický film. [45; 51; 47]

**Ultra čistá voda** má typické vlastnosti vody – molární hmotnost  $M = 18,02 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ , body tání a varu se pohybují v závislosti na tlaku okolo  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , je dobrým rozpouštědlem polárních sloučenin, je netoxická apod. Navíc má však díky kvalitnímu přečištění měrný elektrický odpor  $\rho = 18,2 \cdot 10^4 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ .

**Dijodomethan** má molární hmotnost  $M = 267,84 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ , taje při  $T_t = 5 - 8 \text{ }^\circ\text{C}$  a začíná vřít při  $T_v = 67 - 69 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na rozdíl od vody je nepolární. Je zdraví škodlivý při požití, dráždí kůži, dýchací cesty a poškozují oči. [52]

## 5.2 Příprava vzorků

### 5.2.1 Vstřikování

Granulát ABS MAGNUM<sup>TM</sup> 3404 [46] byl sušen při  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu  $t = 2$  hod 32 min. Vstřikován byl po dobu  $t = 1,01$  s při tlaku  $p = 751$  bar vstřikovací rychlostí  $v = 70 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Čas plastifikace byl  $t = 5,96$  s, dotlak byl  $p = 503$  bar a čas chlazení byl  $t = 70$  s.

Granulát ABS+PC Bayblend<sup>®</sup> T85 XF [50] byl sušen při  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu  $t = 4$  hod 40 min. Vstřikován byl po dobu  $t = 0,90$  s při tlaku  $p = 803$  bar vstřikovací rychlostí  $v = 70 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Čas plastifikace byl  $t = 7,96$  s, dotlak byl  $p = 607$  bar a čas chlazení byl  $t = 85$  s.

Granulát PC Makrolon<sup>®</sup> 2458 [51] byl sušen při  $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu  $t = 16$  hod 30 min. Vstřikován byl po dobu  $t = 0,87$  s při tlaku  $p = 760$  bar vstřikovací rychlostí  $v = 70 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Čas plastifikace byl  $t = 8,94$  s, dotlak byl  $p = 454$  bar a čas chlazení byl  $t = 95$  s.

Všechny materiály byly vstřikovány na vstřikovacím stroji Demag Ergotech 50-200 system (Obr. 10) s rozměry zkušebního tělíska  $4,05 \times 10,15 \times 81,70 \text{ mm}$ .



Obr. 10 – Demag Ergotech 50-200 system [53]

### 5.2.2 Vrubování a měření rozměrů

Některé ze získaných zkušebních tělísek byly navrubovány pomocí vrubovacího stroje CEAST Notchvis (Obr. 11), který díky zakomponovanému digitálnímu mikrometru umožnil vytvořit vrub s přesností  $\pm 0,001$  mm. Vrub typu A tvaru V s úhlem  $45^\circ$  a rádiem na špičce 0,25 mm byl umístěn doprostřed zkušebního tělíska. [40]



Obr. 11 – CEAST Notchvis

Tloušťka, šířka a šířka ve vrubu byly měřeny pomocí digitálního úchylkoměru Mitutoyo. Tloušťka a šířka navrubovaných tělísek byly měřeny digitálním posuvným měřítkem PROTECO. Znalost délky zkušebních tělísek byla vzhledem k prováděným experimentům irelevantní.

### 5.2.3 Povrchová úprava plazmatem

Část tělísek byla upravována v kapacitně buzeném radiofrekvenčním plazmatickém reaktoru diener FEMTO 13,56 MHz (Obr. 12). Proces plazmování byl spuštěn vždy při tlaku v komoře  $p = 0,61$  mbar, přičemž tlak se v průběhu procesu pohyboval v intervalu  $p = 0,7 - 0,5$  mbar. Plazmareaktor byl nastaven na 20% dopředný výkon a 2% zpětný výkon, jelikož bylo v průběhu měření zjištěno, že jsou tyto podmínky k provedení požadované úpravy dostačující. Průtok plynu, jímž byl vzduch, byl  $\dot{V} = 5,5$  sccm. Vzorky jednotlivých materiálů byly plazmovány v časech 10 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 210 s, 240 s, 270 s, 300 s a 600 s.



Obr. 12 – diener FEMTO 13,56 MHz

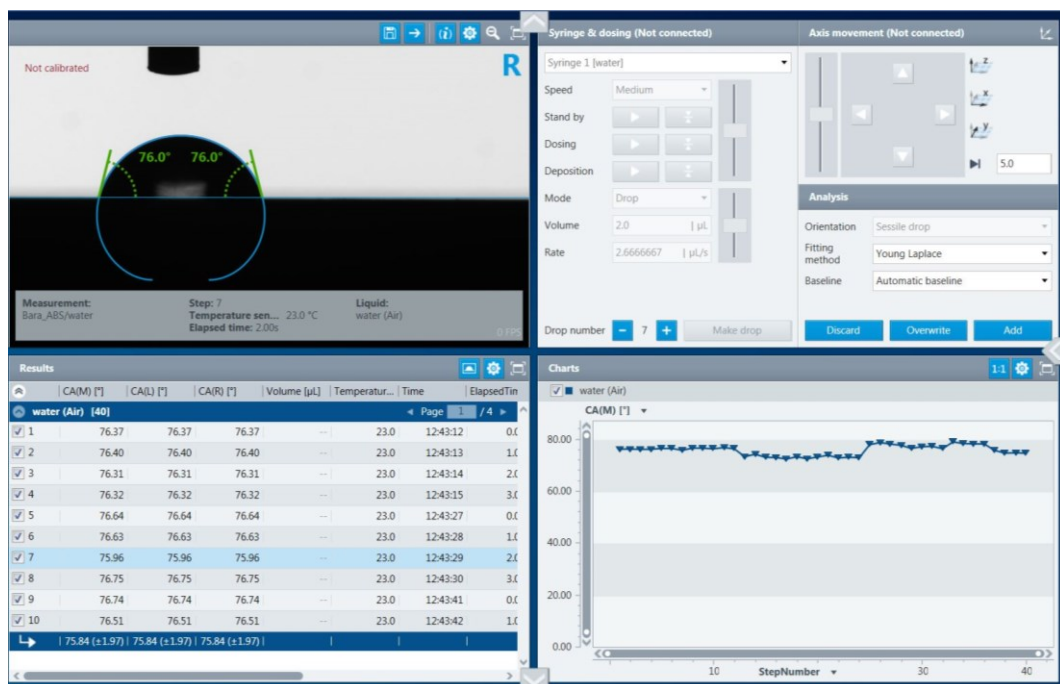
## 5.3 Metody měření

### 5.3.1 Měření kontaktního úhlu smáčení

Na čisté i čerstvě oplazmované vzorky bylo nanášeno 10 kapek ultra čisté vody a 10 kapek diiodomethanu o objemu  $V = 2$   $\mu$ l. Všechny kapky byly vyfoceny čtyřikrát, ke každému dílčímu statistickému vyhodnocení ve smyslu materiál-kapalina bylo tedy získáno 40 výsledků. Kontaktní úhly byly měřeny pomocí přístroje Drop Shape Analyzer – DSA30 (Obr. 13) firmy Krüss a vyhodnocovány pomocí softwaru Advance (Obr. 14) dodaným toutéž firmou. Nadále byly testovány už jen vzorky čistých materiálů a vzorky, které byly plazmovány stejně dlouho jako vzorky vykazující největší změnu kontaktního úhlu s vodou; plazmovací časy se pro jednotlivé materiály lišily (viz 6.1).



Obr. 13 – Drop Shape Analyzer – DSA30

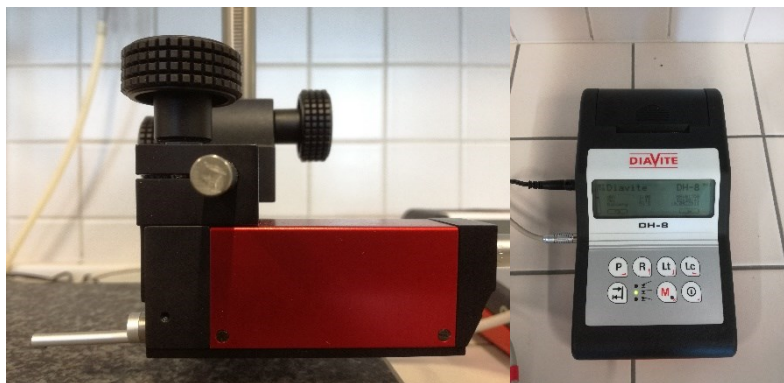


Obr. 14 – Prostředí programu Advance

### 5.3.2 Měření drsnosti povrchu

Další charakterizace zkoumaných materiálů byla provedena měřením na laboratorním přístroji na měření povrchové drsnosti DIAVITE DH-8 (Obr. 15). Byla zjišťována drsnost  $R_a$ , což je průměrná vzdálenost všech bodů od střední linie v absolutní hodnotě, a drsnost  $R_z$ , kterou udává průměrná výška pěti po sobě jdoucích dvojic maxim a minim. [32]





Obr. 15 – DIAVITE DH-8

### 5.3.3 Měření síly nutné k přeražení

Při měření síly nutné k přeražení vzorku bylo postupováno dle normy ČSN EN ISO 179-2. Měření sady čistých vzorků s vrubem i bez a oplazmovaných vzorků s vrubem i bez probíhalo na rázovém kladivu CEAST Resil Impactor Junior (Obr. 16) o pracovním rozsahu 1,22 kN a rázové energii 14,95 J.



Obr. 16 – CEAST Resil Impactor Junior

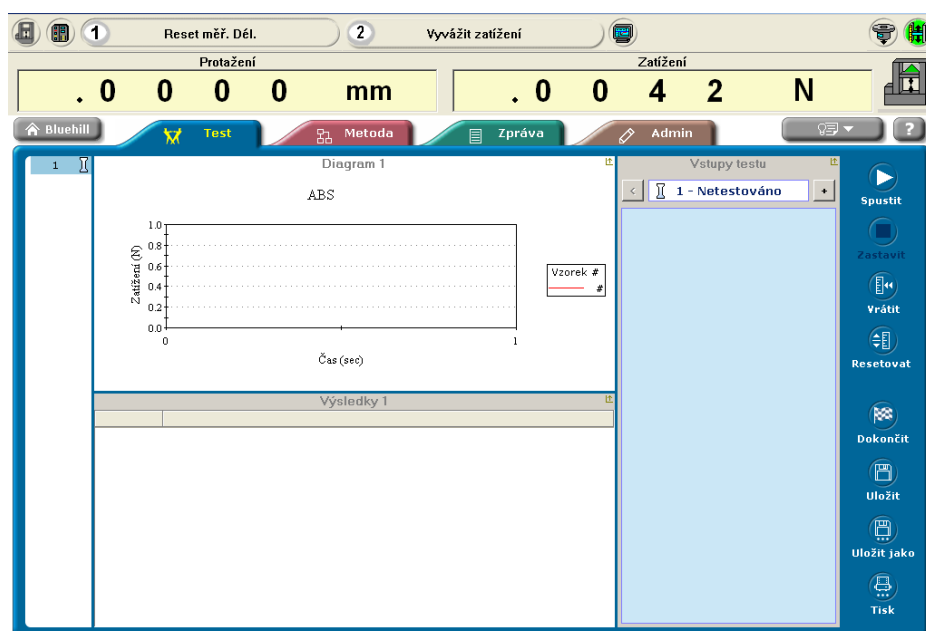
### 5.3.4 Měření síly nutné k průhybu

Na univerzálním testovacím stroji Instron 3345 (Obr. 17 a)) byl v testovacím softwaru Bluehill (Obr. 18) sledován průběh síly nutné k průhybu vzorku o 0,5 mm při nastavení na 15000 cyklů, jednalo se tedy o vysokocyklovou únavovou zkoušku materiálu. Vzorky byly pokládány na podpěry vzdálené od sebe 5 cm, přičemž na 100N hlavě bylo uprostřed vzdálenosti podpěr připevněno zátěžové těleso stejných rozměrů (Obr. 17 b)), probíhala tak

zkouška tříbodovým ohybem. Vzorky byly na podpěry ukládány užší stranou, v případě vrubovaných zkušebních těles byl vrub na opačné straně, než na které působilo zatížení. Se zvyšujícím se počtem vykonaných cyklů měly zkušební vzorky tendenci posouvat se mimo původní polohu; bylo nutné použít zábrany, které by neovlivňovaly měření, ale které by zajistily stabilní pozici vzorku.



Obr. 17 – Cyklický tříbodový ohyb: a) Instron 3345, b) detail podpěr, zábran, vzorku a zátěžového tělesa



Obr. 18 – Prostředí programu Bluehill



## 6 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 6.1 Hodnoty kontaktních úhlů smáčení a povrchových energií

Pro měření smáčecích úhlů byla využita dvojice kapalin voda-dijodomethan a to z důvodu rozdílné polárnosti kapalin. Výsledky měření kontaktních úhlů byly podrobeny základní statistické analýze – v programu MS Office Excel byly vypočteny odchylky aritmetických průměrů, které po vynásobení příslušným Studentovým koeficientem poskytly údaje o celkových chybách měření vnesených spolu se zaokrouhlenými aritmetickými průměry do sumarizačních tabulek. Tyto výpočty probíhaly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Tabulky v této kapitole dále obsahují hodnoty povrchových energií vyhodnocených metodou Wu (Obr. 19) a metodou Fowkes (Obr. 20), pro něž jsou měření se dvěma kapalinami dostačující. Vyhodnocení probíhalo v programu SECC (System for Surface Energy calculation).

**SURFACE ENERGY CALCULATION**  
 WU EQUATIONS

$$(1 + \cos\theta)\gamma_l = 4 \left[ \frac{\gamma_l^D \gamma_s^D}{\gamma_l^D + \gamma_s^D} + \frac{\gamma_l^P \gamma_s^P}{\gamma_l^P + \gamma_s^P} \right]$$

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^P$$

**Data**

**Liquids**

|             | liquid 1 | liquid 2 |
|-------------|----------|----------|
| gamma l     | 72,80    | 50,80    |
| gamma l (D) | 21,80    | 50,80    |
| gamma l (P) | 51,00    | 0,00     |

**Contact Angles**

|             | liquid 1  | liquid 2  |
|-------------|-----------|-----------|
| theta [°]   | 75,800000 | 24,100000 |
| theta [rad] | 1,322960  | 0,420624  |

**Results**

**Calculations**

|            | gamma s (D) | gamma s (P) | gamma s |
|------------|-------------|-------------|---------|
| 1.solution | 46,56       | 9,23        | 55,79   |
| 2.solution | 0,00        | 0,00        | 0,00    |

**Liquid 1**

Water(20C) ▼

**UPDATE DATA**

**Liquid 2**

Diiodo-methane(20C) ▼

**CALCULATE**

Obr. 19 – Prostředí programu SECC pro metodu Wu

**SURFACE ENERGY CALCULATION**  
 FOWKES EQUATIONS

$$(1 + \cos \theta) \gamma_l = 2 \left[ \sqrt{\gamma_l^D \gamma_s^D} + \sqrt{\gamma_l^P \gamma_s^P} \right]$$

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^P$$

**Data**

**Liquids**

|             | liquid 1 | liquid 2 |
|-------------|----------|----------|
| gamma l     | 72,80    | 50,80    |
| gamma l (D) | 21,80    | 50,80    |
| gamma l (P) | 51,00    | 0,00     |

**Contact Angles**

|             | liquid 1  | liquid 2  |
|-------------|-----------|-----------|
| theta [°]   | 75,800000 | 24,100000 |
| theta [rad] | 1,322960  | 0,420624  |

**Results**

**Calculations**

|            | gamma s (D) | gamma s (P) | gamma s |
|------------|-------------|-------------|---------|
| 1.solution | 46,47       | 3,57        | 50,04   |
| 2.solution | 0,00        | 0,00        | 0,00    |

**Liquid 1**  
 Water(20C) ▼

**Liquid 2**  
 Diiodo-methane(20C) ▼

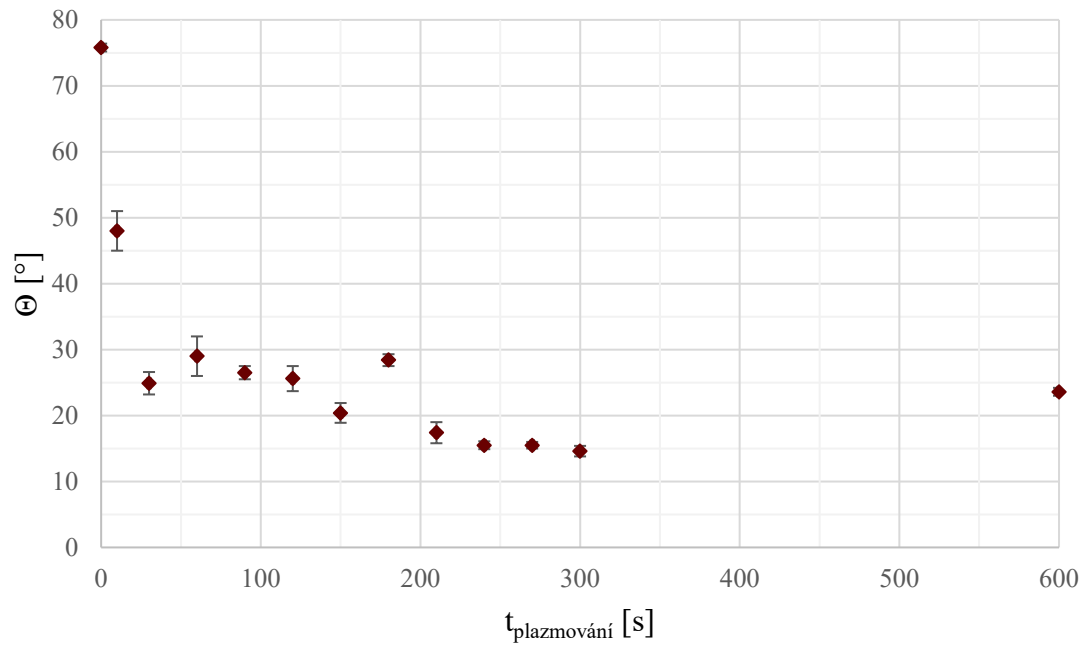
Obr. 20 – Prostředí programu SECC pro metodu Fowkes

Z Tab. 1 vyplývá, že byl největší pokles kontaktního úhlu ABS s vodou naměřen po plazmování materiálu po dobu 600 s. Obr. 21 a Obr. 22 znázorňují grafickou závislost kontaktních úhlů na časech plazmování. Obr. 23 pak porovnává obě použité metody přepočtu kontaktních úhlů. Na první pohled je tak jasné, že ač jsou hodnoty získané Fowkesovou metodou nižší, kopírují hodnoty metody Wu.

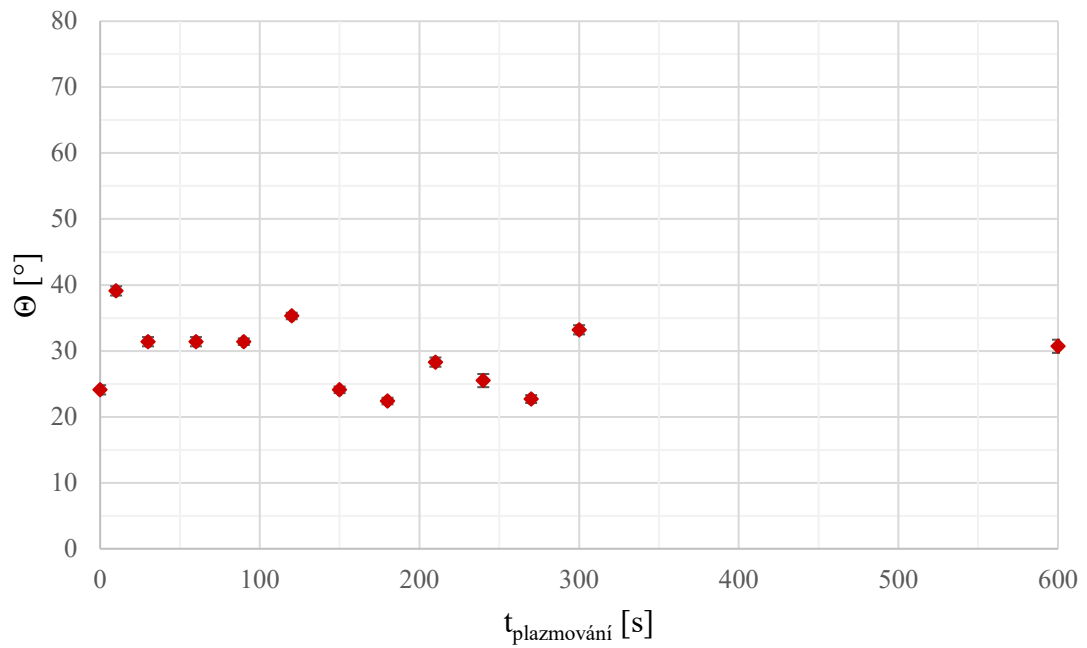
 Tab. 1 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů  
 a příslušných povrchových energií pro ABS

| ABS                                | kapalina          |                   | metoda                                     |  |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|                                    | voda              | dijodomethan      | Wu   | Fowkes                                     |
| $t_{\text{plazmování}} [\text{s}]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\gamma_s [\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}]$ | $\gamma_s [\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}]$ |
| 0                                  | $(75,8 \pm 0,6)$  | $(24,1 \pm 0,7)$  | 55,79                                      | 50,04                                      |
| 10                                 | $(48 \pm 3)$      | $(39,1 \pm 0,7)$  | 64,31                                      | 58,98                                      |
| 30                                 | $(24,9 \pm 1,7)$  | $(31,4 \pm 0,7)$  | 77,17                                      | 72,81                                      |
| 60                                 | $(29 \pm 3)$      | $(31,4 \pm 0,7)$  | 75,58                                      | 71,05                                      |
| 90                                 | $(26,5 \pm 1,0)$  | $(31,4 \pm 0,5)$  | 76,57                                      | 72,15                                      |
| 120                                | $(25,6 \pm 1,9)$  | $(35,3 \pm 0,5)$  | 75,79                                      | 71,72                                      |
| 150                                | $(20,4 \pm 1,5)$  | $(24,1 \pm 0,5)$  | 80,59                                      | 75,82                                      |
| 180                                | $(28,4 \pm 0,9)$  | $(22,4 \pm 0,5)$  | 78,17                                      | 73,01                                      |
| 210                                | $(17,4 \pm 1,6)$  | $(28,3 \pm 0,7)$  | 80,41                                      | 76,04                                      |
| 240                                | $(15,5 \pm 0,6)$  | $(25,5 \pm 1,0)$  | 81,61                                      | 77,06                                      |

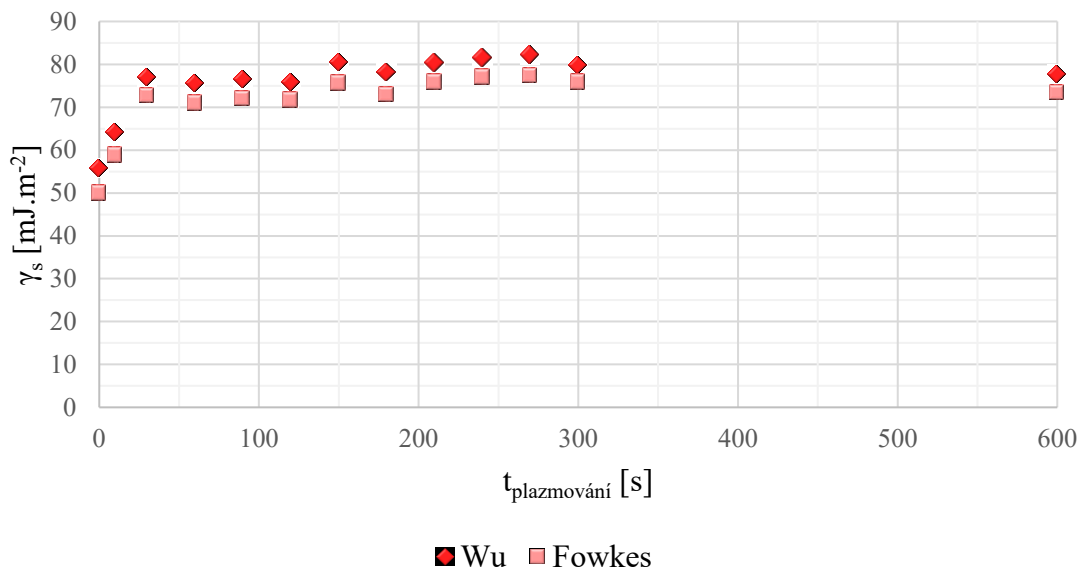
| ABS                                | kapalina          |                   | metoda                                   |  |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|                                    | voda              | dijodomethan      | Wu                                       | Fowkes                                   |
| $t_{\text{plazmování}} [\text{s}]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
| 270                                | $(15,5 \pm 0,5)$  | $(22,7 \pm 0,6)$  | 82,26                                    | 77,51                                    |
| 300                                | $(14,6 \pm 0,8)$  | $(33,2 \pm 0,7)$  | 79,80                                    | 75,91                                    |
| 600                                | $(23,6 \pm 0,6)$  | $(30,7 \pm 1,0)$  | 77,83                                    | 73,46                                    |



Obr. 21 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS s vodou na čase plazmování



Obr. 22 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS s diiodomethanem na čase plazmování



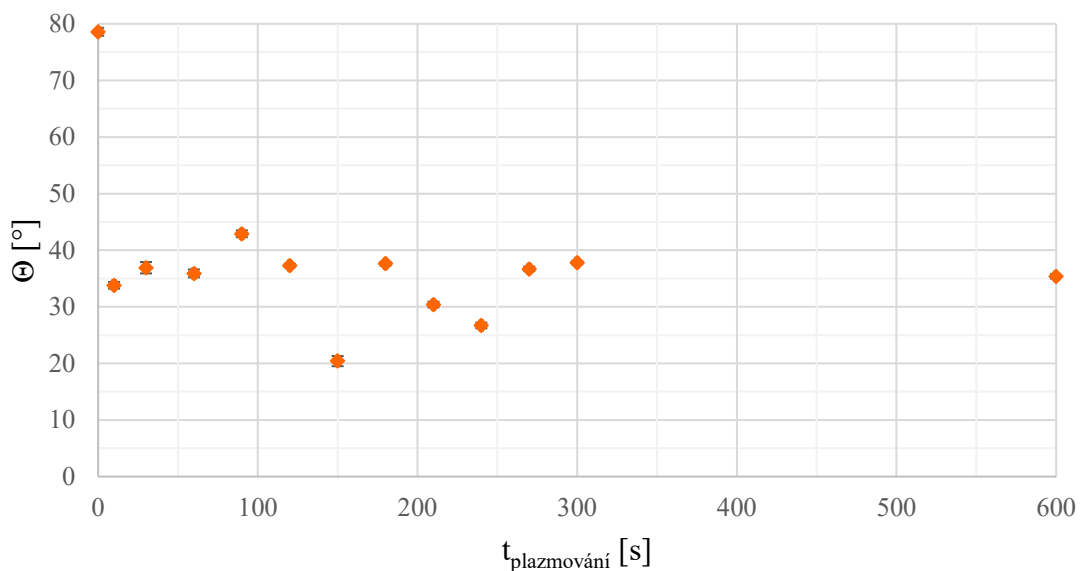
Obr. 23 – Graf závislosti povrchové energie ABS na čase plazmování

Z Tab. 2 vyplývá, že byl největší pokles kontaktního úhlu ABS+PC s vodou naměřen po plazmování materiálu po dobu 150 s. Zároveň potvrzuje, že je při tomto plazmovacím čase povrchová energie materiálu nejvyšší. Obr. 24 a Obr. 25 znázorňují grafickou závislost kontaktních úhlů na časech plazmování. Obr. 26 pak porovnává obě použité metody přepočtu

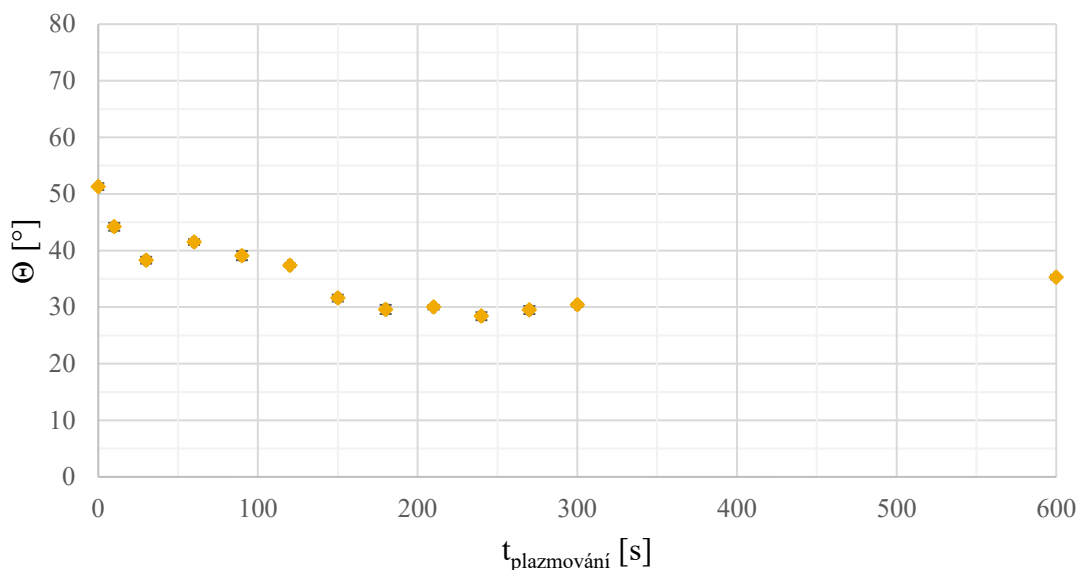
kontaktních úhlů. Opět je zjevné, že ač jsou hodnoty získané Fowkesovou metodou nižší, více méně kopírují hodnoty metody Wu.

Tab. 2 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů  
a příslušných povrchových energií pro ABS+PC

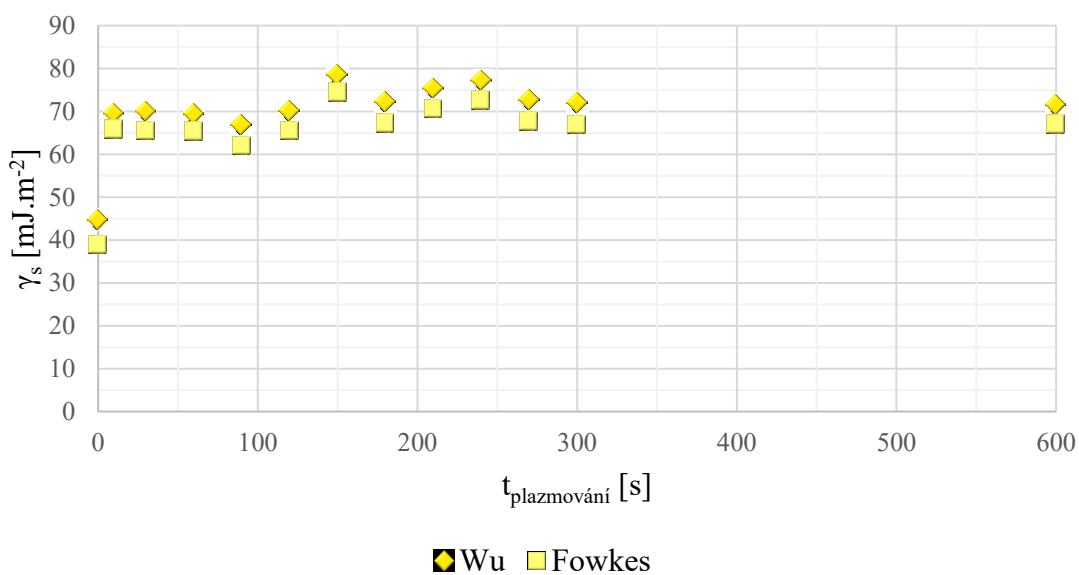
| ABS+PC                             | kapalina          |                   | metoda                                   |  |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|                                    | voda              | dijodomethan      | Wu                                       | Fowkes                                   |
| $t_{\text{plazmování}} [\text{s}]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
| 0                                  | (78,6 ± 0,7)      | (51,3 ± 0,6)      | 44,82                                    | 38,92                                    |
| 10                                 | (33,8 ± 0,6)      | (44,2 ± 0,7)      | 69,63                                    | 65,87                                    |
| 30                                 | (36,9 ± 1,0)      | (38,3 ± 0,6)      | 70,03                                    | 65,6                                     |
| 60                                 | (35,9 ± 0,7)      | (41,5 ± 0,5)      | 69,5                                     | 65,38                                    |
| 90                                 | (42,9 ± 0,6)      | (39,1 ± 0,8)      | 66,87                                    | 62,08                                    |
| 120                                | (37,3 ± 0,3)      | (37,4 ± 0,3)      | 70,13                                    | 65,6                                     |
| 150                                | (20,4 ± 0,9)      | (31,6 ± 0,6)      | 78,64                                    | 74,46                                    |
| 180                                | (37,6 ± 0,3)      | (29,6 ± 0,8)      | 72,35                                    | 67,23                                    |
| 210                                | (30,4 ± 0,5)      | (30,0 ± 0,4)      | 75,41                                    | 70,7                                     |
| 240                                | (26,7 ± 0,5)      | (28,4 ± 0,7)      | 77,32                                    | 72,65                                    |
| 270                                | (36,7 ± 0,4)      | (29,5 ± 0,7)      | 72,79                                    | 67,72                                    |
| 300                                | (37,8 ± 0,3)      | (30,4 ± 0,3)      | 72,02                                    | 66,95                                    |
| 600                                | (35,4 ± 0,4)      | (35,3 ± 0,4)      | 71,66                                    | 67,09                                    |



Obr. 24 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS+PC s vodou  
na čase plazmování



Obr. 25 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS+PC s diiodomethanem na čase plazmování

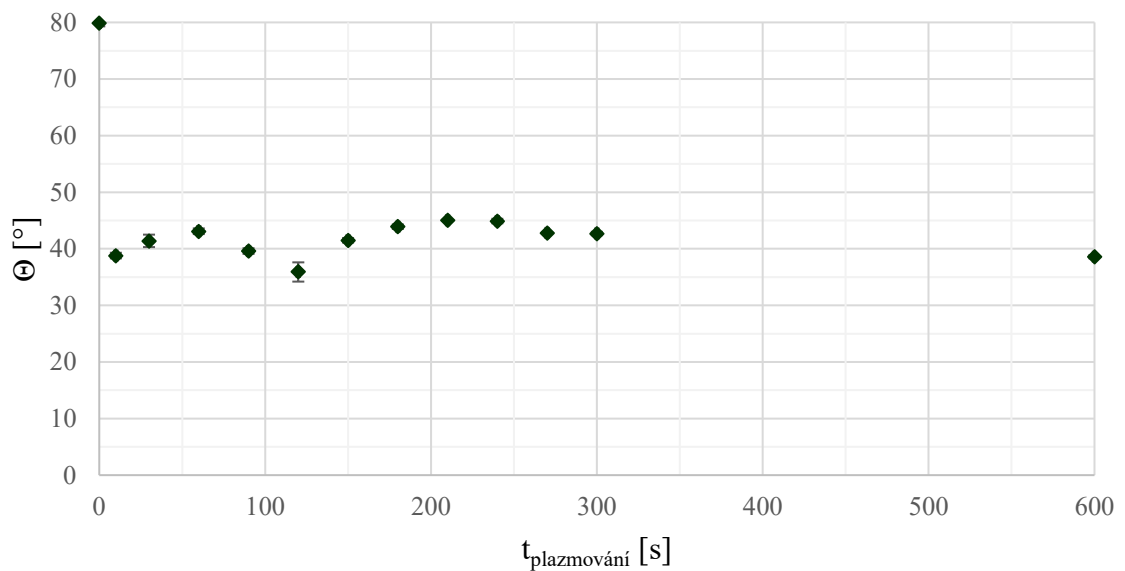


Obr. 26 – Graf závislosti povrchové energie ABS+PC na čase plazmování

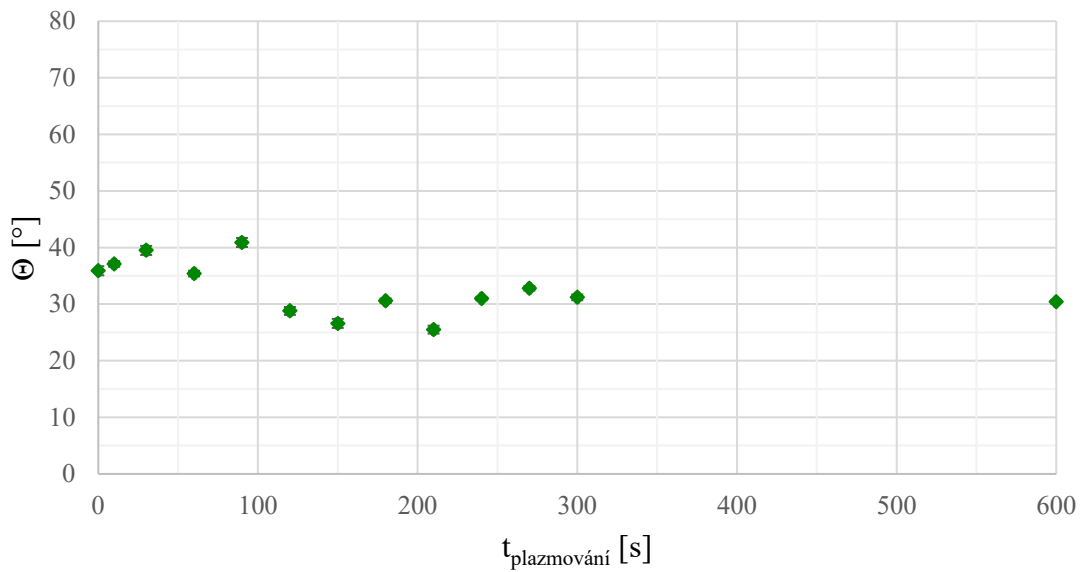
Z Tab. 3 vyplývá, že byl největší pokles kontaktního úhlu PC s vodou naměřen po 120 s plazmování materiálu. Zároveň také potvrzuje, že je po takto dlouhém plazmování povrchová energie materiálu vypočtená metodou Wu nejvyšší. Obr. 27 a Obr. 28 znázorňují grafickou závislost kontaktních úhlů na časech plazmování. Obr. 29 pak porovnává obě použité metody přepočtu kontaktních úhlů. V případě polykarbonátu výsledky povrchové energie podle metody Wu a podle Fowkesovy metody nesledují příliš podobný trend.

Tab. 3 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů  
a příslušných povrchových energií pro PC

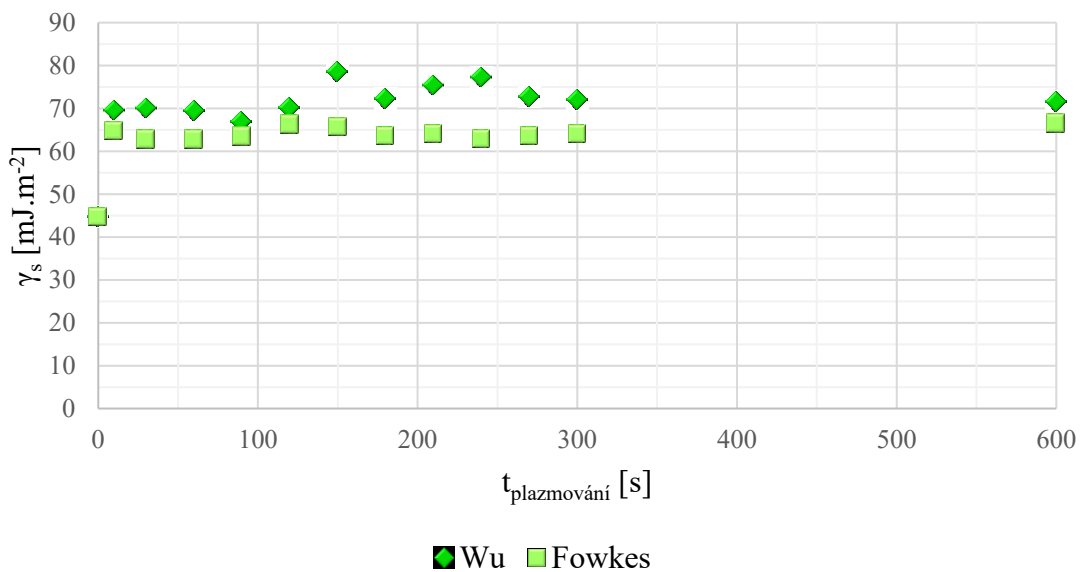
| PC                                 | kapalina          |                   | metoda                                   |  |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|                                    | voda              | dijodomethan      | Wu                                       | OWRK                                     |
| $t_{\text{plazmování}} [\text{s}]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\Theta [^\circ]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ | $\gamma_s [\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
| 0                                  | (79,9 ± 0,6)      | (35,9 ± 0,8)      | 50,16                                    | 44,75                                    |
| 10                                 | (38,8 ± 0,5)      | (37,1 ± 0,5)      | 69,51                                    | 64,86                                    |
| 30                                 | (41,4 ± 1,1)      | (39,5 ± 0,8)      | 67,48                                    | 62,83                                    |
| 60                                 | (43,1 ± 0,5)      | (35,4 ± 0,5)      | 67,96                                    | 62,91                                    |
| 90                                 | (39,6 ± 0,5)      | (40,9 ± 0,8)      | 67,91                                    | 63,49                                    |
| 120                                | (35,9 ± 1,7)      | (28,8 ± 0,7)      | 73,35                                    | 66,41                                    |
| 150                                | (41,5 ± 0,4)      | (26,6 ± 0,8)      | 71,36                                    | 65,83                                    |
| 180                                | (43,9 ± 0,4)      | (30,6 ± 0,4)      | 69,05                                    | 63,63                                    |
| 210                                | (45,04 ± 0,09)    | (25,5 ± 0,7)      | 69,95                                    | 64,17                                    |
| 240                                | (44,9 ± 0,4)      | (31,0 ± 0,3)      | 68,44                                    | 62,99                                    |
| 270                                | (42,80 ± 0,17)    | (32,8 ± 0,4)      | 68,92                                    | 63,71                                    |
| 300                                | (42,7 ± 0,3)      | (31,2 ± 0,5)      | 69,46                                    | 64,15                                    |
| 600                                | (38,6 ± 0,3)      | (30,4 ± 0,3)      | 71,65                                    | 66,53                                    |



Obr. 27 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení PC s vodou  
na čase plazmování



Obr. 28 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení PC s diiodomethanem na čase plazmování



Obr. 29 – Graf závislosti povrchové energie ABS+PC na čase plazmování

## 6.2 Zkouška drsnosti

Čisté materiály a materiály oplazmované v příslušných výše vypsanych časech byly charakterizovány dvěma parametry drsnosti. Oba druhy drsnosti byly na jednom vzorku měřeny zároveň. Pro každý materiál byla na jednom takovém vzorku provedena tři měření, což umožnilo vypočítat aritmetický průměr a chybu měření. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 4.



Ze získaných dat nelze jednoznačně usoudit, zda oplazmování povrchovou drsnost měřených materiálů snižuje či zvyšuje.

Tab. 4 – Naměřené hodnoty drsností  $Ra$  a  $Rz$

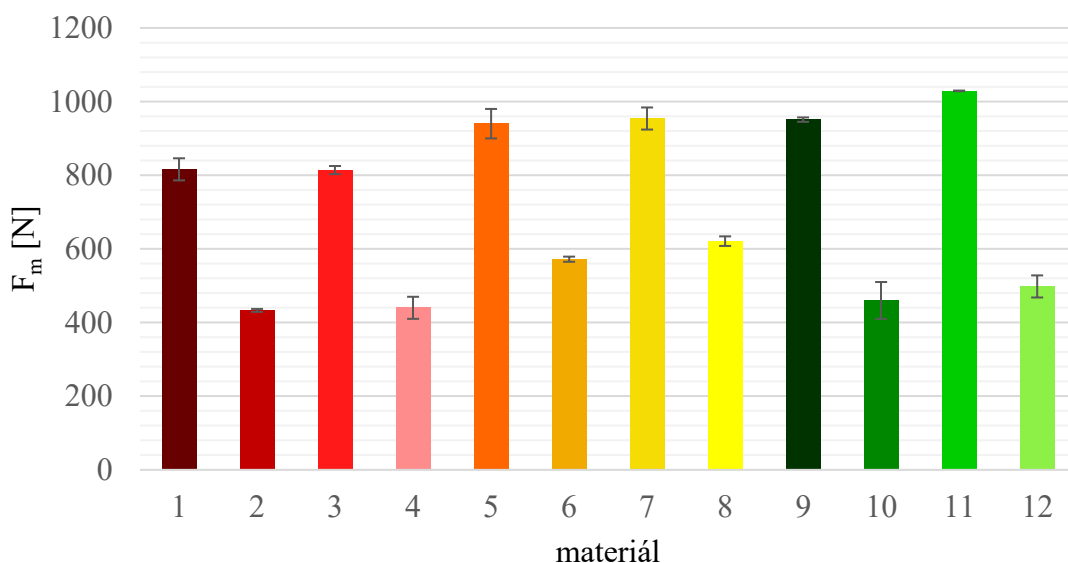
| materiál   | $Ra$ [ $\mu\text{m}$ ] | $Rz$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|------------|------------------------|------------------------|
| ABS        | $(0,281 \pm 0,013)$    | $(2,0 \pm 0,3)$        |
| ABS pl.    | $(0,26 \pm 0,08)$      | $(1,9 \pm 0,6)$        |
| ABS+PC     | $(0,12 \pm 0,03)$      | $(1,10 \pm 0,17)$      |
| ABS+PC pl. | $(0,21 \pm 0,13)$      | $(1,4 \pm 0,5)$        |
| PC         | $(0,068 \pm 0,016)$    | $(0,35 \pm 0,09)$      |
| PC pl.     | $(0,06 \pm 0,03)$      | $(0,4 \pm 0,3)$        |

### 6.3 Instrumentovaná rázová zkouška

Z Tab. 5 a Obr. 30 plyne, že po oplazmování potřebovaly materiály větší sílu k přeražení, tj. maximální sílu. Vzorky ABS byly s menší či větší mírou tvorby plastické oblasti při šíření trhliny přelomeny všechny. Co se týče ABS+PC, byly přelomeny jen vzorky s vrubem. Neplazmované nevrubované vzorky vykazovaly jisté známky trhlín. U plazmovaných vrubovaných vzorků byla zaznamenána plastické deformace, nárazem kladiva se však jen prohnutí. PC vykazoval lom taktéž jen u navrubovaných vzorků, přičemž s oplazmováním ztratil lom lineární tvar. U všech PC vzorků bez vrubu bylo zaznamenáno jen prohnutí s patrnou plastickou deformací v místě ohybu.

Tab. 5 – Naměřené hodnoty maximálních sil

| materiál        | $F_m$ [N]          |
|-----------------|--------------------|
| ABS             | $(816 \pm 30)$     |
| ABS vrub        | $(433 \pm 4)$      |
| ABS pl.         | $(814 \pm 11)$     |
| ABS vrub pl.    | $(440 \pm 30)$     |
| ABS+PC          | $(940 \pm 40)$     |
| ABS+PC vrub     | $(572 \pm 7)$      |
| ABS+PC pl.      | $(954 \pm 30)$     |
| ABS+PC vrub pl. | $(621 \pm 13)$     |
| PC              | $(951 \pm 6)$      |
| PC vrub         | $(460 \pm 40)$     |
| PC pl.          | $(1029,0 \pm 0,9)$ |
| PC vrub pl.     | $(498 \pm 30)$     |



Obr. 30 – Přehled maximálních sil jednotlivých materiálů

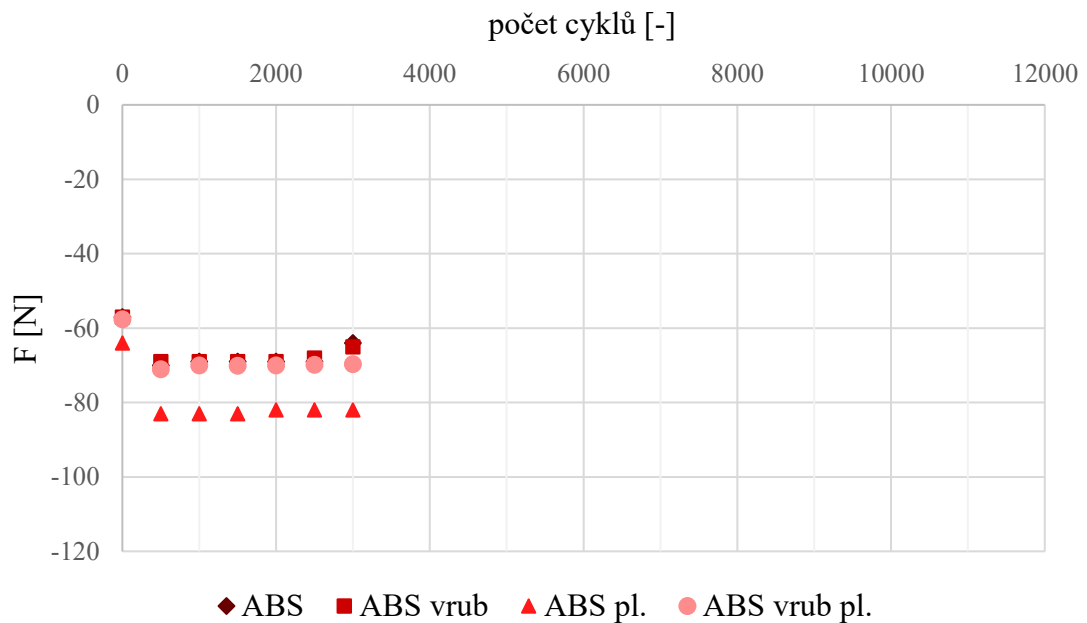
#### 6.4 Výsledky vysokocyklového třibodového ohybu

Tři zkušební tělesa každého typu vzorku, celkem tedy 36 tělísek, byla připravena na 15000 zátěžových cyklů. V případech, kdy se začala zjevně tvořit a šířit trhlinka, bylo měření zastaveno a vykonanému počtu cyklů byla podřízena i ostatní měření příslušného materiálu, tj. měření byla provedena v největším možném společném počtu cyklů. Hodnota 15000 cyklů byla stanovena orientačním měřením. ABS při něm vykazovalo znatelný pokles měřené síly, oproti tomu PC nijak razantních změn nedosáhl. Úplného porušení (přelomení) tělesa nebylo v žádném případě dosaženo ani po 70000 cyklech. Z důvodu objemu získaných dat jsou v následující části kapitoly v tabulkách a příslušných grafech uvedena minima, tj. největší absolutní hodnoty, zatěžujících sil každého pětistého cyklu. V grafech navíc nejsou uvedeny chybové úsečky, jelikož se grafy jevíly nepřehlednými, chyby měření jsou tak vyneseny pouze v tabulkách. Grafy jsou také pro možnost okamžitého přehledu a srovnání zasazeny do stejného systému měřítek os.

U ABS byla po čase znát únava materiálu – síla nutná k průhybu vzorku o 0,5 mm počala klesat. Jak je vidět v Tab. 6 a Obr. 31, chovají se neplazmované vzorky s vrubem i bez během cyklování podobně. Oba druhy plazmovaných vzorků potřebovaly ke stejnému průhybu větší zatížení, tedy větší zatěžující sílu.

Tab. 6 – Síla nutná k průhybu ABS a jeho upravených forem o 0,5 mm

| ABS     |               | ABS vrub     |                   |
|---------|---------------|--------------|-------------------|
| cyklus  | F [N]         | cyklus       | F [N]             |
| 0       | $(-57 \pm 8)$ | 0            | $(-57 \pm 8)$     |
| 500     | $(-70 \pm 8)$ | 500          | $(-69 \pm 8)$     |
| 1000    | $(-69 \pm 8)$ | 1000         | $(-69 \pm 8)$     |
| 1500    | $(-69 \pm 9)$ | 1500         | $(-69 \pm 9)$     |
| 2000    | $(-69 \pm 9)$ | 2000         | $(-69 \pm 8)$     |
| 2500    | $(-69 \pm 9)$ | 2500         | $(-68 \pm 8)$     |
| 3000    | $(-64 \pm 3)$ | 3000         | $(-65 \pm 5)$     |
| ABS pl. |               | ABS vrub pl. |                   |
| cyklus  | F [N]         | cyklus       | F [N]             |
| 0       | $(-64 \pm 7)$ | 0            | $(-57,6 \pm 2,0)$ |
| 500     | $(-83 \pm 6)$ | 500          | $(-71 \pm 3)$     |
| 1000    | $(-83 \pm 6)$ | 1000         | $(-70 \pm 3)$     |
| 1500    | $(-83 \pm 6)$ | 1500         | $(-70,1 \pm 2,0)$ |
| 2000    | $(-82 \pm 6)$ | 2000         | $(-70,0 \pm 2,0)$ |
| 2500    | $(-82 \pm 6)$ | 2500         | $(-69,8 \pm 2,0)$ |
| 3000    | $(-82 \pm 6)$ | 3000         | $(-69,7 \pm 2,0)$ |



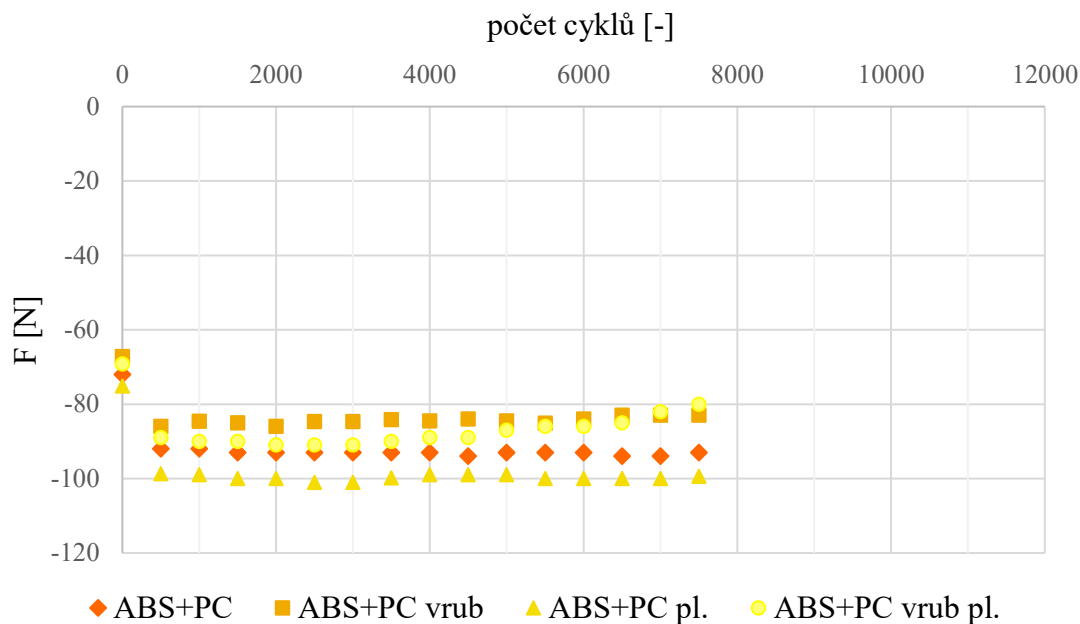
Obr. 31 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro ABS

U materiálu ABS+PC se trhлина začala viditelně šířit až okolo 7500 cyklů, jak plyne z Tab. 7 a Obr. 32. V grafu je zřetelně vidět rozdíl mezi vrubovanými zkušebními tělesy.

Nejmenší zatížení potřebovaly k průhybu čisté vrubované vzorky, za nimi následovaly plazmované vrubované vzorky, poté čisté vzorky a nejvíce síly potřebné k průhybu vyžadovaly oplazmované nevrubované vzorky.

Tab. 7 – Síla nutná k průhybu ABS+PC a jeho upravených forem o 0,5 mm

| ABS+PC     |               | ABS+PC vrub     |               |
|------------|---------------|-----------------|---------------|
| cyklus     | F [N]         | cyklus          | F [N]         |
| 0          | (-72 ± 10)    | 0               | (-67,2 ± 1,6) |
| 500        | (-92 ± 15)    | 500             | (-86 ± 4)     |
| 1000       | (-92 ± 15)    | 1000            | (-84,6 ± 2,0) |
| 1500       | (-93 ± 15)    | 1500            | (-85 ± 3)     |
| 2000       | (-93 ± 15)    | 2000            | (-86 ± 5)     |
| 2500       | (-93 ± 15)    | 2500            | (-84,7 ± 1,3) |
| 3000       | (-93 ± 15)    | 3000            | (-84,7 ± 1,9) |
| 3500       | (-93 ± 15)    | 3500            | (-84,2 ± 0,9) |
| 4000       | (-93 ± 16)    | 4000            | (-84,5 ± 0,9) |
| 4500       | (-94 ± 16)    | 4500            | (-84,0 ± 0,3) |
| 5000       | (-93 ± 17)    | 5000            | (-84,5 ± 1,6) |
| 5500       | (-93 ± 17)    | 5500            | (-85,1 ± 1,1) |
| 6000       | (-93 ± 17)    | 6000            | (-84 ± 4)     |
| 6500       | (-94 ± 16)    | 6500            | (-83 ± 4)     |
| 7000       | (-94 ± 16)    | 7000            | (-83 ± 6)     |
| 7500       | (-93 ± 15)    | 7500            | (-83 ± 5)     |
| ABS+PC pl. |               | ABS+PC vrub pl. |               |
| cyklus     | F [N]         | cyklus          | F [N]         |
| 0          | (-75,1 ± 2,0) | 0               | (-69,2 ± 1,5) |
| 500        | (-98,7 ± 1,8) | 500             | (-89 ± 4)     |
| 1000       | (-99 ± 3)     | 1000            | (-90 ± 5)     |
| 1500       | (-100 ± 3)    | 1500            | (-90 ± 4)     |
| 2000       | (-100 ± 4)    | 2000            | (-91 ± 3)     |
| 2500       | (-101 ± 4)    | 2500            | (-91 ± 3)     |
| 3000       | (-101 ± 4)    | 3000            | (-91 ± 3)     |
| 3500       | (-99,8 ± 1,0) | 3500            | (-90 ± 4)     |
| 4000       | (-99 ± 3)     | 4000            | (-89 ± 5)     |
| 4500       | (-99 ± 3)     | 4500            | (-89 ± 4)     |
| 5000       | (-99 ± 3)     | 5000            | (-87 ± 5)     |
| 5500       | (-100 ± 3)    | 5500            | (-86 ± 8)     |
| 6000       | (-100 ± 3)    | 6000            | (-86 ± 6)     |
| 6500       | (-100 ± 3)    | 6500            | (-85 ± 7)     |
| 7000       | (-100 ± 3)    | 7000            | (-82 ± 7)     |
| 7500       | (-99,4 ± 2,0) | 7500            | (-80 ± 7)     |



Obr. 32 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro ABS+PC

PC byl pro měření se 100N hlavou problematickým materiálem. K průhybu o 0,5 mm potřeboval i vyšších sil, rám testovacího stroje tudíž měření z bezpečnostních důvodů samovolně ukončoval. Proto jsou zde v jeho případě uvedeny dvě tabulky. V Tab. 8 jsou uvedena měření pro PC, který bylo možné naměřit při maximálně 5000 cyklech tak, aby se dala data statisticky zpracovat. U plazmovaného PC to bylo možné dokonce jen při 1500 cyklech. V Tab. 9 jsou uvedeny hodnoty pro vrubované typy vzorků PC a to do 12000 cyklů, výrazné změny se totiž neprojevovaly ani při několikanásobně vyšším počtu cyklů. Z Obr. 33 lze vyčíst v tuto chvíli již předpokládaný trend – vrubovaná zkušební tělíska potřebovala k průhybu o 0,5 mm menší síly než jejich nevrubované verze.

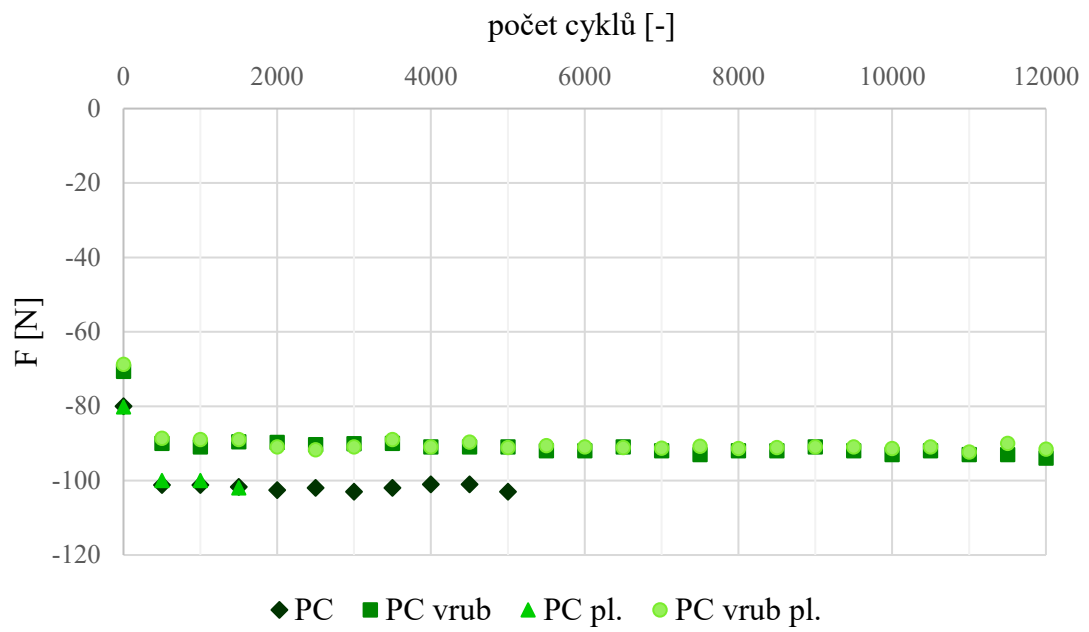
Tab. 8 – Síla nutná k průhybu PC a plazmovaného PC o 0,5 mm

| PC     |                    | PC pl. |                    |
|--------|--------------------|--------|--------------------|
| cyklus | F [N]              | cyklus | F [N]              |
| 0      | $(-80 \pm 3)$      | 0      | $(-80,2 \pm 1,7)$  |
| 500    | $(-101,2 \pm 2,0)$ | 500    | $(-100 \pm 4)$     |
| 1000   | $(-101,2 \pm 1,3)$ | 1000   | $(-100 \pm 3)$     |
| 1500   | $(-101,7 \pm 1,1)$ | 1500   | $(-102,0 \pm 1,2)$ |
| 2000   | $(-102,6 \pm 1,6)$ |        |                    |
| 2500   | $(-102 \pm 3)$     |        |                    |
| 3000   | $(-103 \pm 3)$     |        |                    |
| 3500   | $(-102 \pm 4)$     |        |                    |
| 4000   | $(-101 \pm 3)$     |        |                    |

| PC     |                |
|--------|----------------|
| cyklus | F [N]          |
| 4500   | $(-101 \pm 3)$ |
| 5000   | $(-103 \pm 4)$ |

Tab. 9 – Síla nutná k průhybu PC s vrubem a plazmovaného  
PC s vrubem o 0,5 mm

| PC vrub |                   | PC vrub pl. |                   |
|---------|-------------------|-------------|-------------------|
| cyklus  | F [N]             | cyklus      | F [N]             |
| 0       | $(-70,7 \pm 0,7)$ | 0           | $(-68,8 \pm 1,2)$ |
| 500     | $(-90 \pm 3)$     | 500         | $(-88,6 \pm 0,5)$ |
| 1000    | $(-91,0 \pm 0,5)$ | 1000        | $(-89 \pm 3)$     |
| 1500    | $(-89,6 \pm 2,0)$ | 1500        | $(-89 \pm 3)$     |
| 2000    | $(-89,8 \pm 2,0)$ | 2000        | $(-91 \pm 3)$     |
| 2500    | $(-90,4 \pm 0,5)$ | 2500        | $(-91,7 \pm 2,0)$ |
| 3000    | $(-90,1 \pm 1,9)$ | 3000        | $(-91 \pm 3)$     |
| 3500    | $(-90 \pm 3)$     | 3500        | $(-89 \pm 4)$     |
| 4000    | $(-91 \pm 4)$     | 4000        | $(-91 \pm 3)$     |
| 4500    | $(-91 \pm 4)$     | 4500        | $(-89,7 \pm 1,0)$ |
| 5000    | $(-91 \pm 5)$     | 5000        | $(-91,1 \pm 1,6)$ |
| 5500    | $(-92 \pm 4)$     | 5500        | $(-90,6 \pm 0,8)$ |
| 6000    | $(-92 \pm 4)$     | 6000        | $(-91 \pm 3)$     |
| 6500    | $(-91 \pm 5)$     | 6500        | $(-91,1 \pm 1,3)$ |
| 7000    | $(-92 \pm 5)$     | 7000        | $(-91,3 \pm 1,0)$ |
| 7500    | $(-93 \pm 5)$     | 7500        | $(-90,8 \pm 2,0)$ |
| 8000    | $(-92 \pm 5)$     | 8000        | $(-91,4 \pm 1,5)$ |
| 8500    | $(-92 \pm 5)$     | 8500        | $(-91,1 \pm 2,0)$ |
| 9000    | $(-91 \pm 7)$     | 9000        | $(-91 \pm 4)$     |
| 9500    | $(-92 \pm 5)$     | 9500        | $(-91 \pm 3)$     |
| 10000   | $(-93 \pm 5)$     | 10000       | $(-91,4 \pm 1,8)$ |
| 10500   | $(-92 \pm 6)$     | 10500       | $(-91 \pm 3)$     |
| 11000   | $(-93 \pm 6)$     | 11000       | $(-92,3 \pm 1,8)$ |
| 11500   | $(-93 \pm 5)$     | 11500       | $(-90 \pm 5)$     |
| 12000   | $(-94 \pm 5)$     | 12000       | $(-91,6 \pm 1,4)$ |



Obr. 33 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro PC

## ZÁVĚR

V teoretické části práce je popsána struktura a její vliv na rozličné vlastnosti polymerů. Na konci první kapitoly je také objasněna důležitost chemických a mezimolekulárních vazeb. Dále jsou vypsány základní pojmy nutné k pochopení problematiky povrchového napětí a povrchové energie. Stanovení povrchové energie tuhých látek je popsáno dvěma způsoby – nepřímou optickou goniometrií použitou v praktické části práce a přímým stanovením přibližné povrchové energie s využitím fixů nebo inkoustů, což je v (zejména průmyslové) praxi často užívaná metoda. Následně je vysvětleno několik metod přepočtu kontaktního úhlu smáčení na povrchovou energii materiálu – především důležité metody Wu a Fowkes, které jsou dále použity v praktické části ke stanovení povrchové energie testovaných vzorků. Další kapitola se věnuje povrchovým úpravám – nabízí jejich stručný přehled a některé vlivy na povrchové vlastnosti materiálů. Čtvrtá kapitola zmiňuje deformace a trhliny v materiálech, spojitost mezi šířením trhliny a povrchovou energií a na závěr mechanické zkoušky, při nichž hraje šíření trhliny roli.

V praktické části práce byly vybrané materiály charakterizovány z pohledu kontaktních úhlů smáčení a povrchové drsnosti. Pro práci stěžejní ověření vlivu povrchové úpravy na mechanické vlastnosti materiálu bylo provedeno změřením síly nutné k přeražení materiálu (dynamická zkouška rázem v ohybu) a průběhu síly nutné k definované deformaci materiálu v průběhu cyklického namáhání. Experimenty prokázaly, že se po oplazmování u všech zkoumaných materiálů hodnoty těchto sil změní. Plazma má na povrch nejen polymerních materiálů velký vliv, v závislosti na charakteru plazmatu (způsob buzení, použitá frekvence, geometrie reaktoru, použitý plyn, atd.). V naprosté většině případů (kromě plazmatické polymerace za použití specifických prekurzorů) dochází u plazmaticky modifikovaných plastů ke zvýšení povrchové energie díky včlenění různých polárních skupin do povrchové vrstvy materiálu. I v případě plazmatu vzácných plynů dochází k povrchové modifikaci, konkrétně ke vzniku volných radikálů a následnému síťování, případně inkorporaci polárních skupin poté, co je upravený povrch vystaven okolní atmosféře (kyslík, oxid uhličitý, vodní páry). Důležitou složkou plazmatu je také ultrafialové záření, pronikající do větších hloubek materiálu než výše zmíněné procesy. I působením tohoto záření bude docházet k disociaci vazeb a jejich následnému spojení v jiných místech, tj. k síťování. Působením plazmatu lze tedy v poměrně tenké povrchové vrstvě vytvořit strukturu značně odlišnou od původního materiálu. Základní materiál tedy může dále plnit svoji zamýšlenou funkci (danou tzv. „bulk“ vlastnostmi), zatímco povrchová vrstva bude lépe odolávat vzniku a šíření trhlín. Je známo, že



primární příčinou únavových lomů materiálů je postupný rozvoj trhlin. Modifikací tenké povrchové vrstvy lze tento negativní proces zpomalit (pokud ne zcela zastavit) a umožnit dimenzovat výrobky na zamýšlenou únosnost při využití menšího množství materiálu. Ekonomické a zejména ekologické dopady tohoto přístupu jsou v dnešní době, kdy je na prvním místě snaha o energeticky a materiálově zodpovědný přístup k produkci výrobků, zjevné.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BĚHÁLEK, L. *Polymery* [online]. 17. Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 2017-12-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [2] STOKLASA, K. *Makromolekulární chemie I*. Zlín, 2005.
- [3] PROKOPOVÁ, I. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 9788070806623.
- [4] TILLEY, R. *Understanding solids: the science of materials*. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, 2004. ISBN 0470852763.
- [5] PRALL, D. a R.S. LAKES. Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of — 1. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1997, **39**(3), 305-314 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1016/S0020-7403(96)00025-2. ISSN 00207403. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740396000252>
- [6] FRIIS, E., R. LAKES a J. PARK. Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams. *Journal of Materials Science* [online]. 1988, **23**(12), 4406-4414 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1007/BF00551939. ISSN 00222461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00551939>
- [7] Optické vlastnosti materiálů a výrobků. *Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni* [online]. Plzeň, c2000-2015 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti>
- [8] SEDLÁK, B. a I. ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN 8020010041.
- [9] GAJDOŠÍK, L. *Vybrané veličiny a jednotky soustavy SI* [online]. In: . Ostrava, 2007, 59 s. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~gaj10/velic.pdf>
- [10] KOVALČÍKOVÁ, T. *Obecná a anorganická chemie: studijní text pro SPŠCH*. 3., upr. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2004. ISBN 8086369102.
- [11] VÁVRA, V. a Z. LOSOS. 3.5 Chemické vazby a vazebné síly. *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. Brno: Masarykova univerzita,

- 2006 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z:  
[http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_3\\_5\\_vazby/kap\\_3\\_5\\_vazby.htm](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_3_5_vazby/kap_3_5_vazby.htm)
- [12] Chemická vazba. BŘÍŽĎALA, J. *E-ChemBook: Multimediální učebnice chemie* [online]. 2017 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/chemicka-vazba>
- [13] BUTT, H.–J. a M. KAPPL. *Surface and interfacial forces*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. Physics textbook. ISBN 978-3-527-40849-8.
- [14] KLOUDA, P. *Fyzikální chemie. 2., upr.a dopl. vyd.* Ostrava: Pavel Klouda, 2002. ISBN 8086369064.
- [15] HIEMENZ, P. a R. RAJAGOPALAN. *Principles of colloid and surface chemistry*. 3rd ed., rev. and expanded /. New York: Marcel Dekker, 1997. ISBN 0824793978.
- [16] Surface free energy. *KRÜSS: Advancing your Surface Science* [online]. Hamburg, c1998-2016 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <https://www.kruss.de/services/education-theory/glossary/surface-free-energy/>
- [17] KWOK, D.Y. a A.W. NEUMANN. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 1999, **81**(3), 167-249 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1016/S0001-8686(98)00087-6. ISSN 00018686. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868698000876>
- [18] PASHLEY, R. a M. KARAMAN. *Applied colloid and surface chemistry*. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2004. ISBN 0470868821.
- [19] Arcotest - Fixy a inkousty. *Proinex Instruments* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.proinex.cz/cs/61-arcotest-fixy-a-inkousty.html>
- [20] Dispersive and polar parts of the surface energy/tension. *Dataphysics: Understanding Interfaces* [online]. Filderstadt: DataPhysics Instruments GmbH, b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.dataphysics.de/2/start/understanding-interfaces/basics/dispersive-and-polar-parts-of-the-surface-energytension/>
- [21] Method according to Wu. *KRÜSS: Advancing your Surface Science* [online]. Hamburg, c1998-2016 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.kruss.de/services/education-theory/glossary/method-according-to-wu/>

- [22] FOWKES, F. M. ATTRACTIVE FORCES AT INTERFACES. *Industrial & Engineering Chemistry* [online]. 1964, **56**(12), 40-52 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1021/ie50660a008. ISSN 00197866. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50660a008>
- [23] ZISMAN, W. A. *Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution*. b.r., , 1. DOI: 10.1021/ba-1964-0043.ch001. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ba-1964-0043.ch001>
- [24] VAN OSS, C.J., R.J. GOOD a M.K. CHAUDHURY. The role of van der Waals forces and hydrogen bonds in “hydrophobic interactions” between biopolymers and low energy surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 1986, **111**(2), 378-390 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/0021-9797(86)90041-X. ISSN 00219797. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002197978690041X>
- [25] OWENS, D. K. a R. C. WENDT. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. b.r., **13**(8), 1741-1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815. ISSN 00218995. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.1969.070130815>
- [26] KWOK, D.Y. a A.W. NEUMANN. Contact angle interpretation in terms of solid surface tension. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2000, **161**(1), 31-48. DOI: 10.1016/S0927-7757(99)00323-4. ISSN 09277757. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775799003234>
- [27] Surface modification. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_modification](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_modification)
- [28] Surface finishing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_finishing](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_finishing)
- [29] VALEŠ, M. Zkoušení povrchových úprav a ochran. *MM Průmyslové spektrum: Strojírenský měsíčník přinášející aktuální technické informace z tuzemska i ze zahraničí* [online]. 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/zkouseni-povrchovych-uprav-a-ochran>

- [30] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2668-1.
- [31] Fosfátování. *GALVA: Galvanické zinkování* [online]. Prostějov, b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.galva.cz/fosfatovani/>
- [32] RAGHAVENDRA, N.V. a L. KRISHNAMURTHY. *Engineering metrology and measurements*. 1. New Delhi: Oxford University Press, 2013. ISBN 9780198085492.
- [33] LEHOCKÝ, M. FAKULTA TECHNOLOGICKÁ, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. 9. *Reakce mezi plazmatem a povrchem*. Zlín, 2011.
- [34] LEHOCKÝ, M. FAKULTA TECHNOLOGICKÁ, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. 7. *Radiofrekvenční a mikrovlnné plazma*. Zlín, 2011.
- [35] POKLUDA, J., F. KROUPA a L. OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: (kovy, keramika, plasty)*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [36] POLÁŠEK, A. *01-fracture-přednáška*. Otrokovice, 2009.
- [37] ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor, 2005. ISBN 978-084-9316-562.
- [38] VLK, M. a Z. FLORIAN. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno, 2007.
- [39] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [40] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [41] ČSN EN ISO 179-2. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti Charpy - Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

- [42] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI, FAKULTA TECHNOLOGICKÁ, ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Dynamické zkoušky*. Zlín, b.r. Dostupné také z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf)
- [43] PADOSTROJ MAGNUS (DO 785J). In: *PRL: Polymer Research Lab* [online]. b.r. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [http://www.prl-z.com/images/content/42-\\_FW-Magnus\\_1.png](http://www.prl-z.com/images/content/42-_FW-Magnus_1.png)
- [44] KULICH, D. M., S. K. GAGGAR, V. LOWRY a R. STEPIEN. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Polymers. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2002. DOI: 10.1002/0471440264.pst011. ISBN 0471440264. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/0471440264.pst011>
- [45] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [46] *MAGNUM<sup>TM</sup> 3404*. Resinex, 2017. Dostupné také z: <http://catalog.ides.com/datasheet.aspx?I=26793&E=31907>
- [47] CALLISTER, W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. New York: John Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-73696-7.
- [48] PC/ABS - polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén. *RESINEX: Distribution of Plastics & Elastomers* [online]. RESINEX Group, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html>
- [49] Polykarbonát+ABS-blend (PC+ABS). *LPM* [online]. Jičín: LPM, Technické díly z plastů, 2008 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2271&lng=1>
- [50] Bayblend<sup>®</sup> (PC+ABS blend; PC+ASA blend) product description. *Plastics* [online]. Covestro AG, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.plastics.covestro.com/en/Products/Bayblend>
- [51] *Makrolon<sup>®</sup> 2458*. Leverkusen: Bayer MaterialScience AG, 2008. Dostupné také z: [http://www.lidorr.com/\\_Uploads/dbsAttachedFiles/Makrolon2458DS.pdf](http://www.lidorr.com/_Uploads/dbsAttachedFiles/Makrolon2458DS.pdf)
- [52] SIGMA-ALDRICH. *Bezpečnostní list: Diiodomethane*. Ver. 5.8. 2015.

- [53] Vstříkovací stroj DEMAG Ergotech 50-200 system. In: *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Fakulta technologická* [online]. Zlín, b.r. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.utb.cz/uploads/gallery/full/8875.jpg>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                 |   |
|-----------------|---|
| $F$             | síla  |
| $Q$             | náboj                                       |
| $\varepsilon$   | permitivita                                 |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua                           |
| $D$             | vzdálenost nábojů                           |
| $E_p$           | potenciální energie                         |
| $A$             | Helmholtzova volná energie                  |
| $\alpha$        | polarizovatelnost; hladina významnosti      |
| $\mu$           | chemický potenciál                          |
| $\gamma_l$      | povrchové napětí                            |
| $\gamma_s$      | povrchová energie                           |
| $l$             | délka                                       |
| $W$             | práce                                       |
| $S$             | plocha; plocha centrální trhliny            |
| $\Theta$        | kontaktní úhel smáčení                      |
| $\gamma_{lg}$   | mezifázové napětí kapalina-plyn             |
| $\gamma_{sg}$   | mezifázové napětí pevná látka-plyn          |
| $\gamma_{sl}$   | mezifázové napětí pevná látka-kapalina      |
| $\gamma_s^D$    | disperzní složka povrchové energie          |
| $\gamma_l^D$    | disperzní složka povrchového napětí         |
| $\gamma_s^P$    | polární složka povrchové energie            |
| $\gamma_l^P$    | polární složka povrchového napětí           |
| $\gamma_s^+$    | elektronakceptorní složka povrchové energie |
| $\gamma_l^-$    | elektrondonorní složka povrchového napětí   |



|                 |  |
|-----------------|--|
| $\gamma_s^-$    | elektronodonorní složka povrchové energie      |
| $\gamma_l^+$    | elektronakceptorní složka povrchového napětí   |
| $\gamma_s^{AB}$ | acidobazická složka povrchové energie          |
| $k$             | směrnice přímky                                |
| $q$             | hodnota na ose y, kterou protíná přímka        |
| $\Pi$           | celková potenciální energie tělesa             |
| $W$             | energie napjatosti tělesa                      |
| $L$             | potenciální energie vnějších sil               |
| $\Pi_0$         | celková potenciální energie tělesa bez trhliny |
| $W_0$           | energie napjatosti tělesa bez trhliny          |
| $W_T$           | změna energie napjatosti tělesa                |
| $\Gamma$        | disipační energie                              |
| $S_p$           | plocha povrchů trhliny                         |
| $a$             | kritický rozměr trhliny                        |
| $B$             | délka trhliny                                  |
| $\sigma$        | normálové napětí                               |
| $E$             | celková energie                                |
| $\sigma_f$      | lomové napětí                                  |
| $a_c$           | kritická velikost trhliny                      |
| $\gamma_e$      | efektivní povrchová energie                    |
| $\gamma_p$      | plastická práce                                |
| ABS             | krylonitrilbutadienstyren                      |
| PC              | polykarbonát                                   |
| $M$             | molární hmotnost                               |
| $\rho$          | měrný elektrický odpor                         |
| $T_t$           | teplota tání                                   |

---

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| $T_v$     | teplota varu         |
| $T$       | teplota              |
| $t$       | čas                  |
| $p$       | tlak                 |
| $v$       | vstřikovací rychlost |
| $\dot{V}$ | průtok plynu         |
| $V$       | objem                |
| $Ra$      | drsnost              |
| $Rz$      | drsnost              |
| pl.       | plazmovaný           |
| $F_m$     | maximální síla       |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 – Uspořádání substituentů (R) vzhledem k uhlíkatému řetězci: a) izotaktické (pravidelné na jedné straně řetězce), b) syndiotaktické (pravidelně střídavé na obou stranách řetězce), c) ataktické (nahodilé) ..... | 13 |
| Obr. 2 – Optické vlastnosti materiálů: a) emisivita, b) odrazivost, c) pohltivost, d) propustnost .....  | 14 |
| Obr. 3 – Systém mezifázových napětí .....  | 20 |
| Obr. 4 – Modelový příklad určení disperzní a polární složky povrchové energie.....   | 24 |
| Obr. 5 – Vznik striací během šíření únavové trhliny <sup>[37]</sup> .....  | 28 |
| Obr. 6 – Schéma rázové zkoušky Charpy: 1 – podpěry, 2 – zkušební těleso, 3 - kladivo .....   | 30 |
| Obr. 7 – Schéma cyklického třibodového ohybu: 1 – podpěry, 2 – zkušební těleso, 3 – zatěžující síla .....  | 31 |
| Obr. 8 – Schéma zkoušky metodou Izod: 1 – vetknutí, 2 – zkušební těleso, 3 - kladivo .....   | 31 |
| Obr. 9 – Instrumentovaný padostroj Magnus <sup>[43]</sup> .....  | 32 |
| Obr. 10 – Demag Ergotech 50-200 system <sup>[53]</sup> .....   | 36 |
| Obr. 11 – CEAST Notchvis .....   | 36 |
| Obr. 12 – diener FEMTO 13,56 MHz .....   | 37 |
| Obr. 13 – Drop Shape Analyzer – DSA30.....   | 38 |
| Obr. 14 – Prostředí programu Advance .....   | 38 |
| Obr. 15 – DIAVITE DH–8 .....   | 39 |
| Obr. 16 – CEAST Resil Impactor Junior .....  | 39 |
| Obr. 17 – Cyklický třibodový ohyb: a) Instron 3345, b) detail podpěr, zábran, vzorku a zátěžového tělesa .....   | 40 |
| Obr. 18 – Prostředí programu Bluehill .....  | 40 |
| Obr. 19 – Prostředí programu SECC pro metodu Wu .....  | 41 |
| Obr. 20 – Prostředí programu SECC pro metodu Fowkes .....  | 42 |
| Obr. 21 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS s vodou na čase plazmování .....  | 43 |
| Obr. 22 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS s diiodomethanem na čase plazmování .....   | 44 |
| Obr. 23 – Graf závislosti povrchové energie ABS na čase plazmování .....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 24 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS+PC s vodou na čase plazmování .....         | 45 |
| Obr. 25 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení ABS+PC s diiodomethanem na čase plazmování..... | 46 |
| Obr. 26 – Graf závislosti povrchové energie ABS+PC na čase plazmování.....                         | 46 |
| Obr. 27 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení PC s vodou na čase plazmování .....             | 47 |
| Obr. 28 – Graf závislosti kontaktního úhlu smáčení PC s diiodomethanem na čase plazmování .....    | 48 |
| Obr. 29 – Graf závislosti povrchové energie ABS+PC na čase plazmování.....                         | 48 |
| Obr. 30 – Přehled maximálních sil jednotlivých materiálů .....                                     | 50 |
| Obr. 31 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro ABS .....                       | 51 |
| Obr. 32 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro ABS+PC .....                    | 53 |
| Obr. 33 – Graf závislosti nutné zatěžující síly na počtu cyklů pro PC .....                        | 55 |

**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů.....                                      | 42 |
| Tab. 2 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů.....                                      | 45 |
| Tab. 3 – Hodnoty změřených kontaktních úhlů.....                                      | 47 |
| Tab. 4 – Naměřené hodnoty drsností Ra a Rz .....                                      | 49 |
| Tab. 5 – Naměřené hodnoty maximálních sil .....                                       | 49 |
| Tab. 6 – Síla nutná k průhybu ABS a jeho upravených forem o 0,5 mm.....               | 51 |
| Tab. 7 – Síla nutná k průhybu ABS+PC a jeho upravených forem o 0,5 mm.....            | 52 |
| Tab. 8 – Síla nutná k průhybu PC a plazmovaného PC o 0,5 mm.....                      | 53 |
| Tab. 9 – Síla nutná k průhybu PC s vrubem a plazmovaného PC s vrubem<br>o 0,5 mm..... | 54 |