

Charakterizace povrchových úprav polymerních filmů

Bc. Pavla Ryšková

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavla Ryšková**
Osobní číslo: **T11780**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Charakterizace povrchových úprav polymerních filmů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
2. Seznamte se s obsluhou optického mikroskopu, optického goniometru a tenziometru.
3. Provedte charakterizaci povrchových vlastností polymerních filmů a roztoků používaných pro tvorbu tenkých nánosů.
4. Pokuste se navrhnout a ověřit metodiku testování jakosti nánosů vytvořených na polymerním substrátu.
5. Získané výsledky přehledně diskutujte a srovnajte v závěrečných kapitolách diplomové práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Murphy D.B.: Fundamentals of light microscopy and electronic imaging. Wiley-LISS, 2001**
2. **Hiemenz P.C.: Principles of colloid and surface chemistry. Marcel Dekker, New York 1997**
3. **Pashley R.M., Karaman M.E.: Applied colloid and surface chemistry. John Wiley and Sons, 2004**
4. **Bartovská L., Šišková M.: Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. Vydavatelství VŠCHT, Praha 2005**
5. **Butt H.J., Kappl M.: Surface and interfacial forces. Wiley-VCH. Weinheim 2010**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Smolka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

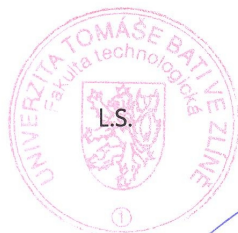
7. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

30. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



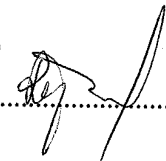

doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské 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 ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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/bakalářské 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/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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 30.5.2014

PAVLA RYŠKOVÁ 

¹⁾ 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 nevydělečně 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.

²⁾ 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).

³⁾ 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o polymerních fóliích, hlavně o zkoumaných biaxiálně orientovaných polyethylentereftalátových fóliích a jejich povrchových úpravách. Jsou zde popsány vlastnosti těchto fólií, jejich použití a také možnosti úpravy. V praktické části této práce jsou využívány metody měření kontaktních úhlů smáčení, povrchové energie a adheze.

Klíčová slova:

Kontaktní úhel, smáčivost, optická mikroskopie, BOPET fólie, povrchová energie, metoda sedící kapky, adheze, mřížková zkouška

ABSTRACT

This thesis deals with polymer films, mainly examined biaxially oriented polyethylene terephthalate film and their surface treatment. There are described the properties of these films, their use, and customization options. Methods of measuring the wetting contact angle, surface energy and adhesion are utilised in the practical part of this thesis.

Keywords:

Contact angle, wetting, optical microscopy, BOPET films, surface energy, sessile drop technique, adhesion, cross-cut test

Ráda bych poděkovala panu Ing. Petru Smolkovi, Ph. D. za trpělivost a odborné vedení při zpracovávání mé diplomové práce. Dále mé díky patří firmě Fatra a.s. za poskytnutí zkoumaných materiálů a za jejich vstřícné jednání. Tímto děkuji projektu Centrum polymerních systémů (reg. číslo: CZ.1.05/2.1.00/03.0111) za příležitost spolupráce s Fatra a.s. V neposlední řadě děkuji mé rodině, příteli a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	12
1 POLYMERNÍ FÓLIE.....	14
1.1 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY VÝROBY POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	14
1.1.1 Dloužení fólií.....	16
1.2 MECHANICKÉ, OPTICKÉ A POVRCHOVÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	17
1.2.1 Mechanické vlastnosti fólií.....	17
1.2.2 Optické vlastnosti fólií.....	18
1.3 KONKRÉTNÍ PŘÍKLADY POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	20
1.3.1 BOPET.....	20
1.3.2 BOPP.....	22
1.3.3 HDPE.....	22
1.3.4 LDPE fólie.....	23
2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	25
2.1 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	25
2.1.1 Koloidní systémy.....	25
2.1.2 Spojení mezi koloidy a povrchy.....	26
2.1.3 Polarita povrchu pevné látky.....	26
2.2 PŘÍKLADY POVRCHOVÝCH ÚPRAV POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	27
2.3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ KAPALIN. POVRCHOVÁ ENERGIE.....	28
3 ANALÝZA POVRCHOVÝCH ÚPRAV POLYMERNÍCH FILMŮ.....	31
3.1 OPTICKÁ MIKROSKOPIE.....	31
3.1.1 Optický mikroskop.....	31
3.2 SEM.....	34
3.3 SPM, AFM.....	35
3.4 KONTAKTNÍ ÚHLY SMÁČENÍ, TENZIOMETRIE, INKOUSTY A FIXY.....	39
3.4.1 Faktory ovlivňující kontaktní úhel smáčení.....	40
3.4.2 Inkousty a fixy.....	40
3.5 ADHEZNÍ VLASTNOSTI	42
4 POVRCHOVÉ SÍLY MEZI KAPALINOU A NA TENKÉ VRSTVĚ.....	44
4.1 MODIFIKACE POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ POMOCÍ APLIKACE TENKÝCH VRSTEV.....	44
4.1.1 Tenké vrstvy.....	44
1.1 LAKY.....	44
4.1.2 Metalizace polymerních fólií.....	46
4.1.3 Kaširování.....	47
4.1.4 Povlakování.....	48
4.1.5 Desénování.....	48

4.1.6	Sametování.....	48
4.1.7	Potiskování.....	48
4.1.8	Laminace.....	49
4.1.9	Koextruze.....	49
4.2	ZPŮSOBY APLIKACE TENKÝCH VRSTEV	50
4.3	PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ TENKÝCH VRSTEV NA POLYMERNÍCH FÓLIÍCH.....	52
5	ZNAČENÍ BOPET FÓLIÍ.....	54
6	ZKOUMANÉ FÓLIE A JEJICH VLASTNOSTI	56
7	MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ.....	57
7.1	MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU POMOCÍ METODY SEDÍCÍ KAPKY.....	57
7.2	MĚŘENÍ DYNAMICKÉHO KONTAKTNÍHO ÚHLU POMOCÍ TENSIOMETRU (WILHELMYHO METODOU).....	58
8	ANALÝZA POVRCHU POLYMERNÍCH FÓLIÍ.....	64
8.1	AFM.....	64
8.2	SEM.....	65
9	HODNOCENÍ KVALITY CHEMICKÉHO NÁNOSU NA BOPET.....	67
9.1	MĚŘENÍ ADHEZE CHEMICKÉHO NÁNOSU.....	69
9.1.1	Vyhodnocení mřížkové a křížové zkoušky.....	72
9.2	MĚŘENÍ POVRCHOVÉ ENERGIE INKOUSTY.....	73
9.2.1	Vyhodnocení povrchové energie pomocí inkoustů.....	73
10	VÝPOČTY POVRCHOVÉ ENERGIE.....	75
10.1	ZISMANOVA TEORIE.....	75
10.2	OWENS-WENDT-RABEL-KAELBLE (OWRK) METODA.....	76
10.3	WU TEORIE.....	78
10.4	ACIDO-BAZICKÁ (VAN OSS) TEORIE.....	80
10.5	METODA PODLE NEUMANNA, KWOKA, STAVOVÁ ROVNICE.....	83
10.6	EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÉ HODNOTY POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ FÓLIÍ A JEJICH VYHODNOCENÍ.....	85
10.6.1	Vyhodnocení podle metody OWRK.....	85
10.6.2	Vyhodnocení podle metody van Oss	89
10.6.3	Vyhodnocení podle metody Wu.....	90
10.6.4	Vyhodnocení podle stavové rovnice.....	92
	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	93
	ZÁVĚR.....	94
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	102
	SEZNAM TABULEK.....	105

SEZNAM PŘÍLOH.....	107
---------------------------	------------

ÚVOD

Polymerní materiály, tedy plasty a kaučuky, nyní představují nejvýznamnější segment výroby a spotřeby podle objemu mezi všemi technickými materiály. V konkurenci s materiály klasickými, především kovy, se polymery prosadily snadnou zpracovatelností, nízkou hustotou a výhodným poměrem mezi užitnými vlastnostmi a cenou. Další vývoj polymerních materiálů stále pokračuje a je neobyčejně zajímavý a poučný. Objevují se jak netušené možnosti modifikace polymerních materiálů, tak jejich nečekané aplikace.

Oblastí zájmu se pro tuto práci staly BOPET fólie, které patří mezi speciality společnosti Fatra a.s. Jsou to biaxiálně orientované PET fólie, které mají mnoho možností použití, od obalových fólií přes výrobu platebních karet po aplikaci ve zdravotnictví (termická fólie). Často jsou upravovány, ať už koronováním, nanášením vodních disperzí polymerů nebo metalizováním (vakuové nanášení Al). Všechny tyto úpravy zajistí zlepšení vlastností fólie.

U fólií s nánosem je jednou z nejzákladnějších adheze nánosu k povrchu fólie, ať už chtěná nebo nechtěná. Ta se dá měřit několika způsoby popsanými v této práci. S využitím kontaktních úhlů smáčení můžeme stanovit volnou povrchovou energii polymerů, avšak doposud neexistuje žádná univerzální metoda pro její stanovení. Proto se využívá různých numerických modelů pro stanovení povrchové energie tuhé látky z naměřených kontaktních úhlů kapalin se známým povrchovým napětím.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ FÓLIE

Fólie představují důležitý obalový materiál, ale používají se i jako podložky pro filmy, magnetofonové pásky. Uplatňují se jako izolační a kondenzátorové fólie v elektrotechnice. Silně monoaxiálně dloužené fólie jsou polotovarem pro výrobu pásků, vláken pro výrobu koberců, pytlů aj. Vyrábějí se vytlačováním z PETP, PP, HDPE, LDPE, PC, PA a PVC nebo méně často vyfukováním.

- **Jednovrstvé fólie** - skládající se z jedné vrstvy - z jednoho materiálu (polymeru).
- **Vícevrstvé fólie** - jsou složeny z více vrstev (2 až 5ti) pevně spojených k sobě.

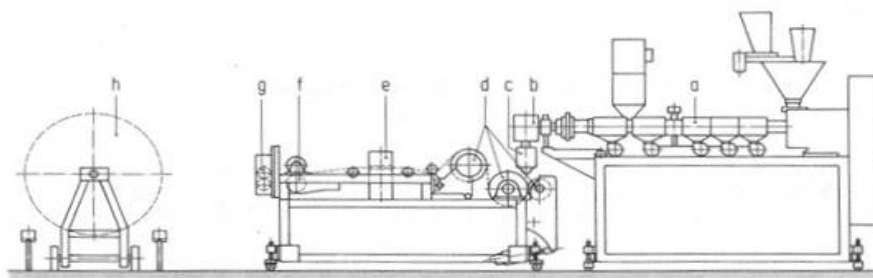
[1]

1.1 Technologické postupy výroby polymerních fólií

Polymer je plastikován vytlačovacím strojem, prochází soustavou filtrů a dále je vytlačován širokoštěrbinovou hlavou. V některých případech vzniklé tlakové ztráty průchodem filtry vyrovnává zařazené zubové čerpadlo. Fólie vytlačené širokoštěrbinovou hlavou dále postupují na chladicí válec (válce), lešticí stolicí, do kalandru a do vodní lázně.

Výroba fólie za použití chladicího válce (obr. 1) je velmi rozšířená zvláště při přípravě orientovaných fólií o tloušťce 0,05 až 0,5 mm. Silnější fólie (0,2 až 2 mm) vyžadují delší dobu chlazení. Rychlým ochlazením na povrchu chladicího válce si vytlačovaná fólie zachovává amorfnní strukturu.

Rychlost ochlazování má vliv na kvalitu vznikající fólie jako je její orientovatelnost, tvarovatelnost, mechanické vlastnosti, optické vlastnosti, lesk, rozměrová stabilita, apod. Pro rychlé ochlazení taveniny je nutný její dobrý kontakt s chladným válcem.



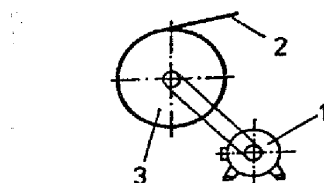
Obr. 1 Princip vytlačování na chladicí válec

a – extruder, b – směšovací a dávkovací zařízení, c – filtr, d – adaptér, e – širokoštěrbinová hlava, f – chladicí válec s odtahem, g – měření tloušťky, h- úprava povrchu, i – vedení a napínání fólie, k – odtah, l - navíjení [2]

K tomu slouží např. odsávání vzduchu z prostoru dosedání taveniny na válec, přitlačení taveniny na válec vzdušným nožem nebo přitlačným válcem, elektrostatický náboj. [3]

V další části linky se měří tloušťka a pak se fólie navíjí. Odříznuté okraje se vracejí zpět ke zpracování. Měření tloušťky většinou probíhá bezkontaktní metodou založenou na absorpci záření (obvykle elektronů).

Navíjecí zařízení musí být upraveno tak, aby se při konstantní výrobní rychlosti fólie mohly plynule zmenšovat otáčky navíjecího se balíku, přičemž je nutno zachovávat konstantní navíjecí sílu. Nejjednodušším a nejrozšířenějším způsobem je odvalovací navíjecí zařízení (obr. 2). To se používá se většinou pro tlustší fólie a průměr balíku může být až 1500 mm. Nevýhodou jsou obtíže při navíjení krátkých rolí o velkém průměru a nelze získat měkké role (malé napnutí fólie).

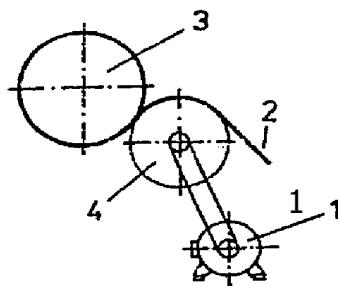


Obr. 2 Odvalovací navíjecí zařízení

1 – pohon, 2 – navíjená fólie, 3 – balík fólie

[4]

Centrální navíjení (obr. 3) je používáno při navíjení tenkých fólií velkými rychlostmi (80 až 100 m/min). Regulace pohonu (kroutícího momentu) je řízena buď snímaným průměrem nebo otáčkami role, případně přímo tahem fóle. Toto zařízení umožňuje navíjení i malým tahem, ale je nákladnější.



Obr. 3 Centrální navíjecí zařízení

1 - pohon, 2 - navíjená fólie, 3 - balík fólie, 4

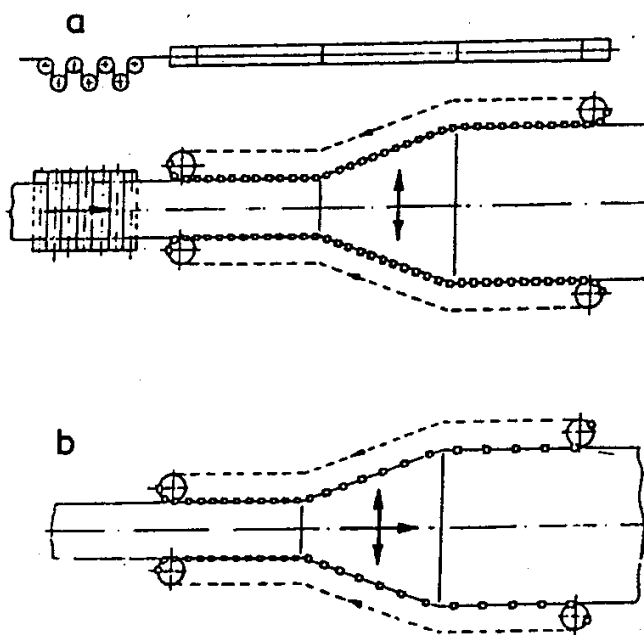
– odvalovací válec [4]

1.1.1 Dloužení fólií

Vyrobené fólie se někdy podrobují dložení a to buď jen v podélném směru (monoaxiálně) nebo podélně i příčně (biaxiálně). Fóle je předeřtá na vhodnou teplotu, protažena a ochlazena. Orientace může být zařazena hned za chladicí válce nebo probíhá jako samostatná technologická operace.

Při monoaxiálním dložení je dložení dosahováno různou obvodovou rychlostí válců. Zvýšené pevnosti těchto fólií ve směru dložení je využito zejména pro výrobu balících a lepicích pásek, vláken pro základy kobereců a provazy či velmi tenkých elektroizolačních fólií (PC).

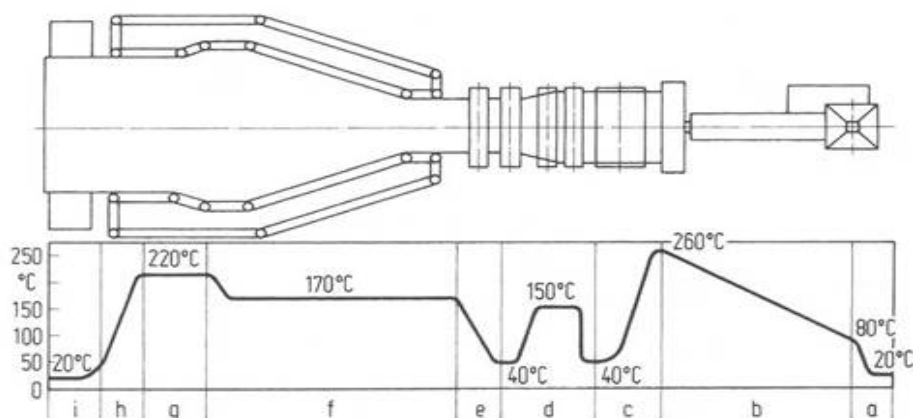
Při výrobě biaxiálně dložených fólií jsou při dvoustupňovém procesu monoaxiálně podélně dložené fólie dále prodlouženy na Obr. 4.



Obr. 4: Biaxiální způsob dložení fólií

a) dvoustupňový proces, b) jednostupňový proces [4]

Na dvou symetricky uspořádaných nekonečných pásech nebo řetězech jsou umístěny svěrky, které zachycují okraje předeřtávané fólie a přejímají její dopravu. Zvětšením vzdálenosti mezi řetězy se dloží v příčném směru. Na obr. 5 je uveden příklad teplot pro dložení PP tímto procesem. Mezi jeho výhody patří nastavitelný rozdílný dložicí poměr (vlastnosti) v příčném a podélném směru, jednoduché mechanické provedení linky, vysoká maximální rychlost dložení a jasně oddělené jednotlivé stupně procesu. [4]



Obr. 5: Teplotní profil při výrobě biaxiálně orientovaných fólií z PP dvoustupňovým postupem

a - předehřev, b - vytlačování, c - chlazení, d - podélné dlužení, e - ohřev, f - příčné dlužení, g - tepelná ustalování, h - chlazení, i – navíjení [2]

Při jednostupňovém procesu se zvětšuje nejen vzdálenost mezi řetězy, ale i vzdálenost mezi jednotlivými svěrkami a tak se dosahuje biaxiálního dlužení. Výhody – vzniká izotropní struktura fólie, předchází okamžité krystalizaci, není kontakt protahované oblasti se zařízením a je relativně nižší spotřeba energie.

Moderní linky vyrábějí např. biaxiálně dlužené PE-fólie o tloušťce 12 až 60 μm a šířce 6000 mm. Fólie může být dlužena v podélném směru 1 : 1 až 1 : 12 a v příčném směru 1 : 3 až 1 : 12. Rychlost navíjení je až 250 m/min. Biaxiálně orientované fólie se pro dobrou průhlednost a svařovatelnost používají v obalové technice, jako fotografické filmy, tenké fólie PET díky pevnosti slouží jako nosná fólie audio a video pásků a díky elektrickým vlastnostem jako elektroizolační a kondenzátorové fólie (též PP, PS, PC). [4] Pod pojmem orientované fólie rozumíme tenkostěnné plošné materiály, které byly po orientaci podrobeny ještě tzv. ustalování (termofixování), tedy vystavení v napnutém stavu účinku zvýšené teploty. Při ustavování orientovaných materiálů se do značné míry uvolní napětí vzniklé dlužením a výrobky tím získávají velmi dobrou rozměrovou stálost. [3]

1.2 Mechanické, optické a povrchové vlastnosti polymerních fólií

1.2.1 Mechanické vlastnosti fólií

- ⤴ **Pevnost a tažnost** - jsou jednou ze základních mechanických vlastností obalových materiálů často podmiňující jejich použití. Schopnost materiálů odolávat vnější mechanické síle namáhání (tažnému napětí) až do okamžiku přetržení. Současně s vnějším zatížením jsou důležité i některé další vlastnosti daného materiálu (tržné zatížení, pevnost v tahu, odolnost proti průrazu). Při nevhodném stahování, neopatrnosti při manipulaci dochází k přetržení, když pevnost materiálů není dostatečná a je-li překonána jeho pružnost. U fóliových materiálů je základním kvalitativním kritériem. Výroba fólií se zvýšenou pevností je inovační trend ve výrobě vícevrstvých koextrudovaných fólií a přináší úspory pro zákaníka.
- ⤴ **Odolnost proti průrazu** při nárazu nebo dopadu je fólie namáhána v průrazu. Zjišťuje se u fóliových obalů a slouží k lepšímu určení ochrany baleného zboží.
- ⤴ **Tuhost** - charakterizuje se odolnost proti deformacím obalových materiálů, souvisí s modulem pružnosti obalového materiálu - poměr napětí a deformace. Nedostatečná tuhost se projevuje deformacemi tvaru a je způsobena tlakem baleného zboží. Využívá se koextruze více vrstev nebo kombinace vhodných materiálů určených právě pro zvýšení tuhosti.
- ⤴ **Kluznost** - je vlastnost fólií klouzat jedna po druhé nebo po zpracovatelském zařízení. Souvisí s tzv. koeficientem tření. Je to bezrozměrná veličina, jejíž převrácená hodnota je klouzavost (v obalové technice se uplatňuje při manipulaci a skladování). Důležité je najít kompromisní řešení použitím vhodného poměru kluzných činidel v polymerní směsi pro konkrétní účel.
- ⤴ **Svařitelnost** - je schopnost fólie vytvořit působením zvýšené teploty svár.
- ⤴ **Peel efekt** - se svařitelností fólie úzce souvisí další užitná vlastnost – peel efekt fólie. Obal svařený z fólie s peel efektem lze otevřít snadným odloupenutím (peel) obou svařených fólií od sebe bez trhání obalu.[21]

1.2.2 Optické vlastnosti fólií

1. **Transparentní fólie** - jedná se o průhlednou, čirou fólii propouštějící světelné paprsky bez velkých ztrát a zkreslení. Přes fólii je vidět jako přes sklo. Průhlednost

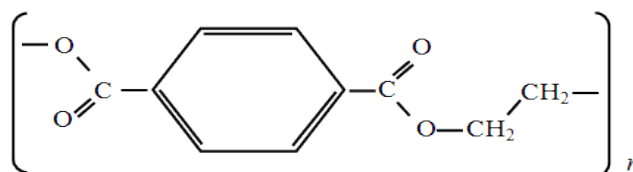
fólií umožňuje vizuální kontrolu stavu baleného zboží (využívá se hlavně při balení potravin).

2. **Průsvitná fólie** - jedná se o matnou fólii s ledovým (mléčným) efektem, přes kterou je vidět obrys baleného zboží.
3. **Probarvená fólie** - jedná se o fólii probarvenou v hmotě. Pro tento účel se používají barevné koncentráty (masterbatche) s vysokým obsahem pigmentů. Barevné koncentráty se musí dobře snášet s polymerem, musí mít dobrou krycí schopnost, světelnou a tepelnou stabilitu, aby odstín neslábl, nesvětlal či úplně nevymizel. Tyto barevné koncentráty polymerní směs dobře vybarvují i v malém množství a umožňují docílit libovolné probarvení fólie na základě kontrétních požadavků zákazníka.
4. **Aditivovaná fólie** - jedná se o úpravu směsi přidávkem přísad - aditiv do polymerní směsi. Aditiva zlepšují zpracovatelské vlastnosti a ovlivňují vlastnosti konečného výrobku. Jedná se především o antidegradanty - UV stabilizátory a plniva podle účelu použití fólie a podle požadavku zákazníka.
5. **Potíštěná fólie** – nanášení tiskové barvy na fólii formou flexotisku. [21]

1.3 Konkrétní příklady polymerních fólií

Strukturní jednotky v polymerech jsou nahodile uspořádány. Toto uspořádání lze jednoduše měnit pomocí síly nad teplotami T_g jednotlivých polymerů. V kaučukovité oblasti se jednotlivé segmenty v makromolekulách orientují ve směru působící síly. Tato orientace je ovšem nad T_g vratná. To znamená, že pokud se odstraní působící síla, mizí i orientace makromolekul. Pokud ale orientovaný polymer ochladíme pod T_g , zůstane tvar nezměněn a orientace fixována po celou dobu pod T_g . Hlavním cílem orientace makromolekul je zlepšení mechanických vlastností. U jednosměrně orientovaných fólií se v podélném směru vlastnosti výrazně zlepší, ale ve směru příčném se vlastnosti mohou zhoršit. Proto se dnes více využívají biaxiálně orientované folie, protože jejich vlastnosti jsou v obou směrech téměř stejné a přitom lepší než ve foliích neorientovaných. [22]

1.3.1 BOPET



Obr. 6: Chemický vzorec polyethyltereftalátu [46]

Biaxiálně orientovaná polyethyltereftalátová fólie (BOPET). Toto označení znamená, že je fólie při extruzi natahována do dvou směrů. Tento proces má vliv na orientaci molekul a mění použitému polymeru vlastnosti. Zvyšuje se tuhost, pevnost v tahu a také čírost, naopak se snižuje možnost prodloužení fólie a taky propustnost pro plyny a vlhkost. [14]

Polykondenzát kyseliny tereftalové a etylenglykolu je nejvýznamnějším lineárním polyesterem.

PETP se používá pro výrobu vláken, na výrobu fólií a lahví. Fólie z PETP se vyrábějí vytlačováním s následnou dvojsměrnou orientací. Vynikají velkou pevností a rozměrovou stálostí. Fólie jsou číré, používají se jako elektroizolační v elektrotechnickém průmyslu, obalové, polygrafické, pro etikety, hot-stamping, víčkovací a metalizované fólie. [15]

Výroba BOPET fólií

Základní surovinou pro výrobu biaxiálně orientovaných polyesterových fólií je polyetylentereftalát ve formě granulátu. Polymery často obsahují podle typu vyráběné fólie speciální typy aditiv (např. SiO_2 , pigmenty,). [15]

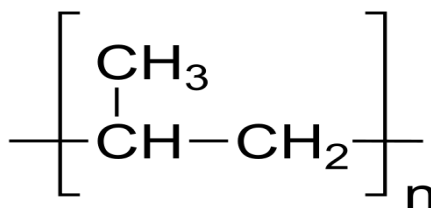
BOPET fólie, se spotřebou přibližně 2 milionů tun ročně, jsou po BOPP druhými nejběžnějšími orientovanými fóliemi. V minulosti BOPP fólie kralovaly v balícím odvětví a BOPET filmy dominovaly v technických aplikacích. Biaxiálně orientovaný polyesterový film se svou velkou tuhostí byl ideální jako nosná fólie pro magnetické pásky, ohebné disky a kondenzátory. Co byly magnetofonové pásky nahrazeny optickými datovými médii, tato aplikace v krátkém čase brzy zase zmizela. A tak vzrostlo používání BOPET fólií v obalovém průmyslu.

Mezi základní vlastnosti BOPET fólií patří:

- vysoká mechanická pevnost,
- dobrá tepelná i chemická odolnost,
- rozměrová stabilita v širokém teplotním rozsahu,
- nastavitelný koeficient tření,
- vynikající optická čírost,
- dobrá potiskovatelnost.

Tyto vlastnosti odráží specificky prospěšné rysy pro různé aplikace. Variace vycházejí z různých natahovacích procesů, receptů, koextruze či nátěrových procesů. V řadě tahových procesů je hlavní podélně-příčný proces. Avšak používá se i příčně-podélný a podélně-příčně-podélný proces, u kterého lze dosáhnout vyšší tuhosti.[11]

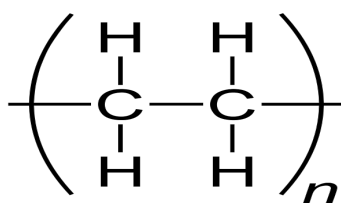
1.3.2 BOPP



Obr. 7: Chemický vzorec polypropylenu
[47]

BOPP fólie je biaxiálně orientovaný polypropylen (BOPP). Jako materiál se jeví čirý s hladkým povrchem, s velkým leskem, odolný vůči UV záření, odolává jak chemickému působení, tak i oděru. Čistý materiál má přiměřenou odolnost vůči oděru a je výborně odolný kyselinám. BOPP jsou jemnější a více ohebné než BOPET fólie. Na světě se vyskytuje přes tisíc variant BOPP fólií. Mohou mít mnoho povrchů např. silikonový, s korunou, s potiskem, čirý, matný apod. Má široké využití v produktech pro metalizaci, balení, papírnictví, pásy a nálepky, stejně tak i v dekorativním oddvětví. Skvělá pevnost při nízkých kalibracích (umožňuje vysokorychlostní zpracování), plochost, jasnost a potiskovatelnost, to je jen pár důvodů, proč se BOPP fólie stávají nejrychleji zavedenými fóliemi na celém světě. [13]

1.3.3 HDPE



Obr. 8: Chemický vzorec
polyethylenu [45]

Fólie z vysokohustotního polyethylenu (HDPE) – lineárního polyethylenu jsou oproti LDPE fóliím pevnější, nejsou smrštitelné a mají vyšší tepelnou odolnost – až 110°C.[29]

Použití HDPE fólií

- Polotovar pro další zpracování na pytle, sáčky, přířezy a odpadové pytle
- Separální vrstva při výrobě asfaltových lepenek
- Vhodné jako překrývací fólie
- Balení potravin – vložky do papírových pytlů, krabic apod.

1.3.4 LDPE fólie

Fólie z nízkohustotního polyethylenu (LDPE) – rozvětvený polyethylen - jsou tepelně odolné od -50°C do 85°C, při teplotách nad 130°C dochází k jejich smršťování, čehož se využívá u smrštitelných fólií pro skupinové balení.

Jsou to fólie vyráběné z primárního materiálu jsou vhodné pro přímý styk s potravinou a velmi dobře svařitelné, odolné vůči většině chemikálií, nepropustné pro vodu a minimálně propustné pro vodní páru, kyslík, tuky a aromatické látky. [29]

POUŽITÍ LDPE FÓLIÍ

- Skupinové balení do smrštitelné fólie
- Polotovar pro potisk, laminaci a následně další zpracování na balících automatech
- balení časopisů, reklamních tiskovin a dalších výrobků
- Polotovar pro výrobu dalších obalů (pytlů, sáčků, přířezů, plachet apod.)
- fólie používané ve stavebnictví
- Polotovar pro výrobu výstražných pásek
- Fólie používané v zemědělství
- Fólie zabraňující korozi

V následujících řádcích zkusím vysvětlit nesprávné označení **LDPE fólií** názvem " igelit" a **HDPE fólií** názvem " mikroten".

IGELIT (LDPE FÓLIE)

U nás se v běžném hovorovém jazyce fóliím z nízkohustotního polyethylenu (LDPE) i polypropylenu obvykle říká igelit. Z odborného hlediska je to název chybný, ba podle názvoslovné normy dokonce zakázaný.

Samo slovo igelit má už poměrně dlouhou historii a je zajímavé sledovat, jak se časem proměňoval jeho význam. Ve čtyřicátých a padesátých letech ještě neznamenovalo

polyethylen, ale fólii vyrobenou z měkčeného polyvinylchloridu (PVC). První dvě slabiky slova igelit pak byly odvozeny od názvu německého koncernu IG Farben. Ten byl založen v roce 1916. V třicátých letech to bylo vůbec největší průmyslové sdružení v celém Německu a spolu s koncernem Krupp hlavní opora Hitlerovy útočné války. Až do konce války produkovala firma IG Farben plných 90% plastů v celém Německu. Za války se značně zdiskreditovala, nejen vývojem a výrobou kyanovodíku, ale také využíváním otrocké práce vězňů koncentračního tábora v Osvětimi.

Po válce se slovo igelit v Německu přestalo používat a brzo upadlo v zapomnění, asi právě proto, že připomínalo neblahý koncern IG Farben. Výrobu "igelitu" však po válce převzalo tehdejší Československo. Baťova továrna v Napajedlich, původně postavená na výrobu plynových masek, pracovala s měkčeným PVC už za války. Dnes se z měkčeného PVC vyrábějí především podlahoviny a izolační fólie.

Je docela příznačné, že běžní spotřebitelé u nás si vůbec neuvědomili dost podstatnou materiálovou inovaci a pojmenování igelit jednoduše přenesli z měkčeného PVC na zcela jiný materiál, totiž nízkohustotní polyethylen. Naproti tomu ve všech sousedních státech zřejmě zapůsobila materiálová osvěta.

Lidové pojmenování polyethylenové fólie se nyní používá pouze v České republice a snad také na Slovensku.

MIKROTEN (HDPE FÓLIE)

MIKROTEN® je ochranný název Granitolu Moravský Beroun pro HDPE fólie. Vysokohustotní polyethylen byl objeven v padesátých letech, masové používání nastalo pak v letech sedmdesátých, kdy prakticky jediný podnik v rámci Československa, který HDPE fólie vyráběl pod značkou mikroten, byl Granitol Moravský Beroun. To zřejmě napomohlo k tomu, že si spotřebitelé zvykli říkat fóliím z vysokohustotního polyethylenu mikroten. [28]

2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY POLYMERNÍCH FÓLIÍ

Pro zlepšení či úpravu vlastností fólií se polymerní fólie mohou upravovat několika způsoby.

2.1 Povrchové vlastnosti polymerů

2.1.1 Koloidní systémy

Termín koloid obvykle značí částice velikosti od 50 Å do 50 µm. Například krev může být považována za koloidní roztok, v kterém jsou krevní buňky rozptýleny ve vodě. Často se zajímáme o pevné disperze ve vodných roztocích, ale je mnoho jiných situací je v našem zájmu a má průmyslový význam. Příklady jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1. Příklady disperzí [16]

Dispergovaná fáze	Disperzní médium	Název	Příklady
Kapalina	Plyn	Kapalný aerosol	Mlhy, spreje
Pevná látka	Plyn	Pevný aerosol	Kouř, prach
Plyn	Kapalina	Pěna	Pěny
Kapalina	Kapalina	Emulze	Mléko, majonéza
Pevná látka	Kapalina	Sol nebo koloidní roztok, pasta o vysoké koncentraci	Roztok stříbra nebo zlata zubní pasta
Plyn	Pevná látka	Pevná pěna	Expandující PS
Kapalina	Pevná látka	Pevná emulze	Perla, opál
Pevná látka	Pevná látka	Pevná suspenze	Pigmentované plasty

Vlastnosti koloidních disperzí jsou spjaty s velkým povrchem dispergované fáze a chemií těchto mezivrstev. Přirozená kombinace koloidní a povrchové chemie představuje hlavní oblast výzkumu a průmyslového vývoje. Odhadem se jedná o oblast s 20% ze všech chemiků v průmyslu v tomto odvětví.[16]

2.1.2 Spojení mezi koloidy a povrchy

Spojení mezi koloidy a povrchy vychází přirozeně z faktu, že částicová hmota má vysokou plochu povrchu k hmotnostnímu poměru. Koule o průměru 1 cm je plochy povrchu ($4\pi r^2$) $3,14 \text{ cm}^2$, kdežto plocha povrchu toho samého množství materiálu, ale ve formě koule o průměru $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ (např. velikost částice v latexové barvě) je $314\,000 \text{ cm}^2$. Obrovský rozdíl v ploše povrchu je jedním z důvodů, proč se stávají vlastnosti povrchu velmi důležitými pro koloidní roztoky. Každodenním příkladem je, že molekuly organických barviv nebo nečistoty mohou být účinně odtrženy z vody adsorpcí na pevné částice aktivního uhlí díky vysoké ploše povrchu. Tento proces je široce využíván pro čištění vody a v perorální léčbě otrávených obětí.

Avšak je jednoduché si všimnout, že povrchové vlastnosti určují stabilitu koloidních disperzí, není tak obvyklé, že toto také může být případ pro některé vlastnosti makroskopických objektů. [16]

2.1.3 Polarita povrchu pevné látky

Polární povrchy jsou například dřevo, papír, a jiné deriváty celulózy, mírně povrchově oxidované kovy, přírodní textilie, ale i sklo a další. Naopak nepolární povrchy jsou mnohé plasty, vosk a syntetické textilie. Polarita povrchu látek je příčinou vzniku povrchové energie, kterou vyjadřujeme pomocí povrchového napětí. Čím vyšší hodnota povrchového napětí, tím je pevný povrch nebo kapalina polárnější. V tab. 2 jsou uvedeny některé příklady polárních a nepolárních pevných látek.

Tab. 2: Polární a nepolární materiály, příklady [17]

POLÁRNÍ		NEPOLÁRNÍ	
Materiál	Povrchové napětí [mN/m]	Materiál	Povrchové napětí [mN/m]
Celulóza	>70	PE	24-29
Železo	60	PP	28-34
PVC	40-45	Teflon	<20

Problematika polárnosti látek se řeší například u lepení některých plastů. Špatně se lepí nepolární materiály jako jsou polymery (PE, PP, PTFE). Aby je bylo možné lepit, je nutné před lepením jejich povrch upravit tak, aby se stal polárnějším a aby se na něm vyskytovaly

reakce schopné chemické skupiny. Proto se například PE a PP před lepením povrchově oxidují.[17]

2.2 Příklady povrchových úprav polymerních fólií

Povrchové úpravy BOPET fólií

Povrch BOPET fólií se upravují různými způsoby, přičemž tyto úpravy mají za cíl změnit nebo upravit vlastnosti hotové fólie. Nejčastěji se používá metalizace hliníkem – za účelem zlepšení bariarových vlastností. Dále korona – za účelem zlepšení přilnavosti tiskařských barev a jiných nánosů, nánosování chemickým nánosem (chemická korona)– za účelem zlepšení přilnavosti vodou ředitelných a hlubotiskových barev, nebo nánosování svařitelnými laky – pro zajištění svařitelnosti nebo pro pasterizaci hotové fólie. [9]

Možnosti úprav HDPE fólií

- Ionizace (úprava pro potisk nebo laminaci)
- Příčná perforace (odtrhávací přířezy)
- Probarvení
- Potisk – max. 6 barev (off-line) nebo 2 barvy (in-line)
- UV stabilizace
- Oxodegradabilní provedení (pro rychlý rozklad HDPE fólie působením vzdušného kyslíku)

Možnosti úprav LDPE fólií

- Celoplošná mikroperforace
- Ionizace pro potisk nebo laminaci
- Potisk fólií, barevné úpravy, černobílá fólie
- Antistatická, antiblokovací, antioxidační, protiskluzová (zdrsňující) úprava
- UV stabilizace až na 24 měsíců
- Samozhášivá (protipožární) fólie
- Oxodegradabilní fólie (urychlení rozpadu fólie působením vzdušného kyslíku) [8]

2.3 Povrchové napětí kapalin. Povrchová energie

Vzájemné působení molekul tekutiny se projevuje odporem tekutiny proti změně tvaru; nazýváme je viskozitou. Tato vlastnost tekutin se uplatňuje, nejsou-li tekutiny v rovnováze, např. při jejich proudění. Viskózní síly mají snahu zmenšit relativní rychlost sousedních částic proudící tekutiny, čímž připomínají síly, vznikající při tření. Proto se někdy viskozita nazývá vnitřní tření. Tekutina bez vnitřního tření, tj. neviskózní a nestlačitelná tekutina, se nazývá dokonalá tekutina či ideální tekutina; neexistuje v ní smykové napětí. V dokonalé tekutině nelze realizovat tah.

Za normálních podmínek lze plyny zpravidla značně stlačit tak, že zaujmají malý objem, zatímco stlačitelnost kapalin za stejných podmínek je relativně velmi malá. To spolu s relativně velkou hustotou kapalin vzhledem k plynům dokazuje, že vzdálenosti mezi molekulami plynu jsou relativně malé vzhledem k vzdálenostem mezi molekulami kapalin, a proto přitažlivé síly mezi molekulami kapalin jsou relativně velké. Tyto přitažlivé síly zvané kohezní síly způsobují, že malé množství kapaliny nabývá přibližně kulového tvaru (kapky deště, rtuť na skle, apod.).

Na povrchu kapaliny, který odděluje kapalinu od jiné kapaliny, plynu, páry nebo pevné látky, není výsledkem interakce mezi molekulami stejný jako uvnitř kapaliny. Meziatomové síly na obou stranách rozhraní jsou různě velké, síly působící na molekulu v povrchové vrstvě kapaliny nebudou v rovnováze (na rozdíl od vnitřku kapaliny), ale na molekulu v povrchové vrstvě bude působit výsledná přitažlivá síla směřující do kapaliny. V případě rozhraní kapaliny a plynu budou molekuly kapaliny vtahovány kohezními silami dovnitř kapaliny. Vlivem těchto sil má povrchová vrstva kapaliny jiné fyzikální a chemické vlastnosti než zbytek kapaliny.

Povrch kapaliny se chová jako pružná blána, která má snahu povrch kapaliny stáhnout na co nejmenší plochu. U stěn nádoby se jedná o rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou; na molekuly působí kromě kohezních sil také adhezní síly a výslednice těchto sil buď směřuje do kapaliny (kohezní síly jsou větší než adhezní síly), nebo směřuje do stěny nádoby (kohezní síly jsou menší než adhezní síly).

Adheze neboli přilnavost, vzniká působením přitažlivých sil mezi částicemi povrchových vrstev dvou stýkajících se různých látek.

Povrchová vrstva se snaží se snaží stáhnout se na co nejmenší plochu, takže v ní vzniká napětí, nazvané povrchové napětí σ . Je definováno jako síla působící v tečné rovině k povrchu kapaliny kolmo na jednotkový délkový element myšleného řezu povrchem

$$\sigma = \frac{dF}{dL} \quad (1)$$

$$[\sigma] = \text{N.m}^{-1} = \text{J.m}^{-2},$$

kde dF je síla působící na délku dL myšleného řezu povrchu kapaliny, v rovině tečné k povrchu ve vyšetřovaném místě. Povrchové napětí v daném místě povrchu má stejnou velikost ve všech směrech. Povrchové napětí kapalin s rostoucí teplotou klesá, při kritické teplotě dané látky je nulové. Pro experimentální stanovení velikosti povrchového napětí byla vypracována řada experimentálních metod.

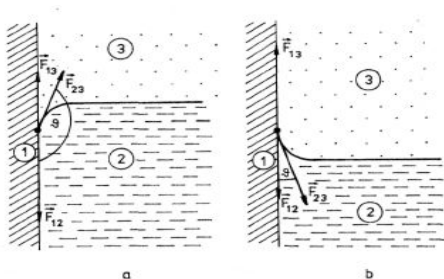
Povrchová energie je část potenciální energie, kterou mají molekuly v povrchové vrstvě kapaliny navíc ve srovnání s potenciální energií molekul uvnitř kapaliny. Je to energie, kterou je třeba dodat k zvětšení mezifází o jednotkovou plochu.[19]

Na přenesení molekuly z vnitřku kapaliny do povrchové vrstvy je nutno vykonat práci potřebnou na překonání síly, viz. předchozí odstavec. O tuto práci je potenciální energie molekuly v poli kohezních sil v povrchové vrstvě větší než potenciální energie molekuly uvnitř kapaliny, takže i energie v povrchové vrstvě je větší než energie ve vrstvě stejného objemu uvnitř kapaliny. Na vytvoření, popř. zvětšení povrchové vrstvy se tedy spotřebuje určitá energie, která je nahromaděna v povrchové vrstvě jako tzv. povrchová energie.

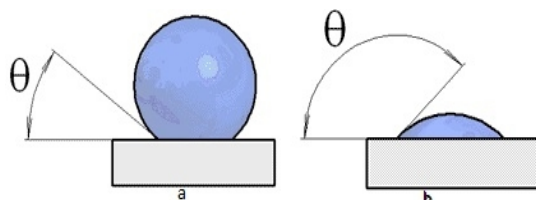
Plošná hustota povrchové energie (p. h. p. e.) (kapilární konstanta) je práce, nutná pro izotermické zvětšení plošného obsahu povrchu kapaliny o 1 m^2 . P. h. p. e. se shoduje s povrchovým napětím σ jak svou velikostí, tak i rozměrem $[\sigma] = \text{N.m}^{-1} = \text{J.m}^{-2}$.

Termín **povrchové napětí** se používá častěji pro kapalinová mezifází. Povrchová energie se používá zejména při popisu mezifází tvořícího povrch pevné látky. Z fyzikálního hlediska jsou oba termíny zaměnitelné.[19], [20]

Jevy na rozhraní prostředí



Obr. 9 Chování smáčivé a nesmáčivé kapaliny u stěny nádoby [20]



Obr. 10: Nesmáčivá a smáčivá kapalina na pevném povrchu [21]

Povrchové napětí ovlivňuje tvar kapaliny u stěny nádoby (pevný povrch). V místě styku povrchu kapaliny se svislou pevnou stěnou nádoby, kde se stýkají tři prostředí – kapalina 1, vzduch nebo jiný plyn 2 a stěna pevného tělesa 3, viz obr. 9. Na obr. 9 b je okraj povrchu kapaliny zvýšen, na obr. 9 a povrch kapaliny je zakřiven. Tečná rovina k povrchu kapaliny a tečná rovina ke stěně nádoby v místě myšlené průsečnice povrchu kapaliny se stěnou svírají úhel ϑ , který se nazývá krajní úhel (úhel smáčení). Tento úhel je za stejných podmínek pro daná tři prostředí vždy stejný (nezávisí na poloze a tvaru stěny). Jelikož v kapalině za klidu neexistuje tečné napětí, musí stěna působit na kapalinu kolmo k povrchu stěny. Proto hranice mezi třemi látkami se vytvoří takovým způsobem, aby byl roven nule součet průmětů všech tří sil, kterými působí povrchová napětí na element délky myšlené průsečnice.

Podmínka rovnováhy pro element jednotkové délky je dle obr. 9 dána vztahem

$$\sigma_{23} = \sigma_{13} + \sigma_{12} \cos \vartheta, \text{ odkud } \cos \vartheta = \frac{\sigma_{23} - \sigma_{13}}{\sigma_{12}}. \quad (2)$$

Podle vztahu (2) závisí velikost krajního úhlu ϑ na rozdílu $\sigma_{23} - \sigma_{13}$ povrchové napětí stěny vzhledem ke vzduchu σ_{23} a vzhledem ke kapalině σ_{13} , kterému se říká adhezní konstanta. Je-li konstanta kladná, je krajní úhel ostrý, okraj kapaliny u stěny se zvedne a říkáme, že kapalinu smáčí (viz obr. 9 b). Je-li adhezní konstanta záporná, je krajní úhel tupý ($\pi/2 < \vartheta < \pi$), okraj kapaliny u stěny se sníží a říkáme, že kapalina stěnu nesmáčí, obr. 9 a. Někdy je adhezní konstanta nulová, takže $\vartheta = 90^\circ$ (vzduch a ocel). Kapalina při stěně nádoby má rovinný volný povrch (nenastává kapilární elevace ani deprese). Podobné závěry platí i v místě styku nesmáčivé, popř. smáčivé kapaliny s vodorovnou pevnou plochou, viz obr. 10 a) popř. Obr. 10 b).[20]

3 ANALÝZA POVRCHOVÝCH ÚPRAV POLYMERNÍCH FILMŮ

3.1 Optická mikroskopie

Optickou mikroskopií lze použít pro studium hrubě disperzních systémů, makro- i mikrodisperzních. Aby částice byly viditelné, musí být jejich index lomu dostatečně odlišný od indexu lomu prostředí. Pro využití mikroskopu je důležité nejen zvětšení, ale i jeho rozlišovací schopnost. Zvětšení určuje velikost obrazu, kdežto rozlišovací schopnost určuje množství rozlišitelných detailů. [22]

Rozlišovací schopnost mikroskopu je posuzována podle meze rozlišení, rovné nejmenší vzdálenosti mezi dvěma body, při které ještě dostaneme jejich zřetelné obrazy. Podle vztahu, který odvodil Abbe, je při kolmém osvětlení preparátu tato vzdálenost

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha} \quad (3)$$

Rozlišovací schopnost je tedy tím větší (d tím menší), čím je vlnová délka použitého světla λ , čím větší je index lomu optického prostředí n a čím větší je úhel α , tj. odklon krajních paprsků, které ještě vstupují do objektivu, od optické osy. Světlo kratších vlnových délek než je světlo ve viditelné oblasti, se většinou nedá použít, protože kratší vlnové délky jsou absorbovány sklem; pouze v mikroskopech s křemennou optikou a fotografickým přístrojem lze použít ultrafialových paprsků. Úhel α může být zvětšen zmenšením vzdáleností mezi objektem a čočkou a zvětšením průměru čočky (konstrukce použitého přístroje omezuje rozsah těchto parametrů). Podstatně většího rozlišení je možno dosáhnout zvýšením indexu lomu prostředí (např. vyplněním prostoru mezi objektem a čočkou tzv. imerzním olejem, jehož index lomu je až o 50% větší než index lomu vzduchu). Při vhodné imerzi je minimální mez rozlišení pro bílé světlo asi 250 nm, pro ultrafialové světlo asi 100 nm, což odpovídá horní mezi velikosti disperzních částic koloidních systémů. [23]

3.1.1 Optický mikroskop

Optická neboli paprsková mikroskopie umožňuje pozorovat objekty a struktury pomocí dopadajícího nebo procházejícího světelného paprsku. Lze pozorovat objekty až do tisícínásobného zvětšení s rozlišením 0,2 μm .

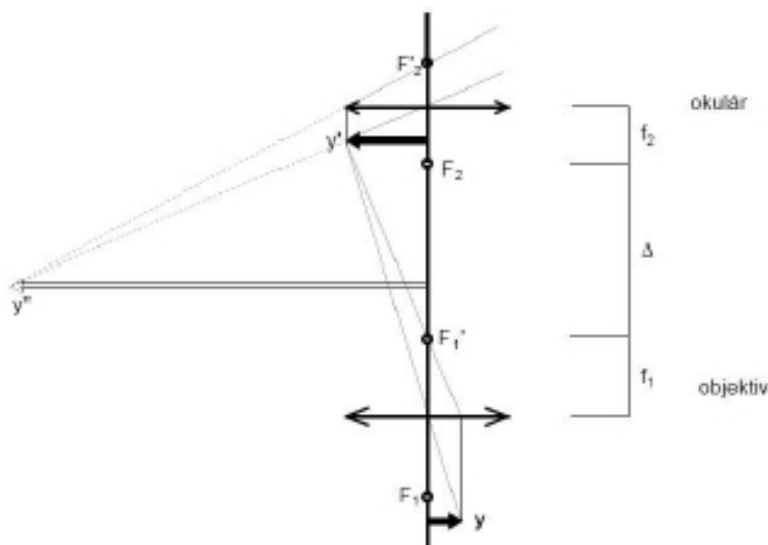
Optické mikroskopy využívají k zobrazení soustav dvou čoček – objektivu a okuláru, přičemž obě tyto čočky mají kladnou optickou mohutnost a proto je v prvním přiblížení lze nahradit spojkami. Součástí mikroskopu je také zdroj světla s kondenzorem.



Obr. 11: Optický mikroskop s popisem [24]

Princip zobrazení

Princip zobrazení optických mikroskopů je založen na tom, že pozorovaný předmět je umístěn mezi jednoduchou a dvojitou ohniskovou vzdáleností objektivu a vytvořený obraz objektivem je poté skutečný, zvětšený a převrácený a je pozorován okulárem. Na stejném principu je založené pozorování objektu lupou, kdy je ale obraz neskutečný, převrácený a zvětšený.



Obr. 12: Schéma optické soustavy mikroskopu [25]

Na obr. 12 můžeme vidět zobrazovací schéma optického mikroskopu. Kde:

F, F' – ohniska, f – ohniskové vzdálenosti

y, y', y'' – předmět, skutečný obraz předmětu vytvořený objektivem, neskutečný obraz pozorovaný v okuláru

Δ – optický interval mikroskopu

U optických mikroskopů se odvozuje tzv. zvětšení Z : $Z = Z_{ob} \cdot Z_{ok} = \frac{\Delta \cdot d}{f_{ok} \cdot f_{ob}}$,

kde: d – konvenční zraková vzdálenost (0,25 m)

f_{ok} – ohnisková vzdálenost okuláru

f_{ob} – ohnisková vzdálenost objektivu

Rozdělení optických mikroskopů

Optické mikroskopy dělíme na monokulární, binokulární, binokulární stereomikroskopy, invertované a přímé, přičemž výsledným zobrazením může být fluorescenční, polarizační, interferenční, fázově konstantní, UV, rentgenový nebo infračervený.

Monokulární mikroskopy jsou konstruovány na pozorování objektů pouze jedním okem, bin okulární již slouží pro pozorování oběma očima, kdy maximální zvětšení těmito mikroskopy se pohybuje až do 1000násobku.

Binokulární stereoskopy neboli stereolupy se využívají především pro pozorování větších objektů, kdy je vyžadováno prostorového vidění. Zvětšení dosahuje asi 300násobku, přičemž je daný objekt osvětlován lampičkou zespodu, z boku a shora.

Na zvětšení průhledných vzorků, které neabsorbují světlo, se využívá tzv. invertovaný mikroskop, kdy je pozorovaný vzorek osvětlován pouze shora.

Přímé mikroskopy se využívají především k pozorování neprůhledných vzorků. Vzorky lze pozorovat pomocí dopadajícího světla a bývají osvětlovány shora. Objekt je pozorován přes tzv. imerzní objektiv – mezi vzorkem a okulárem není vzduch, ale čirá kapalina. Světlo prochází přes prostředí o téměř stejném indexu lomu, a proto nevzniká odraz a lom.

Použití

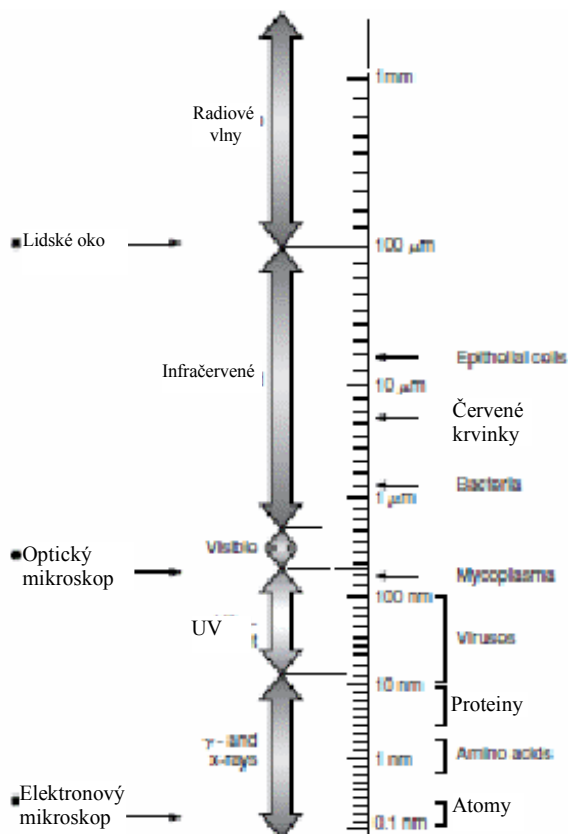
Využití optických mikroskopů je velmi široké. Užití nachází především k pozorování velmi malých předmětů tam, kde k pozorování nestačí lidské oko. Optický mikroskop tak nachází využití například v laboratorních molekulární biologii, v materiálovém inženýrství. Výhodou optické mikroskopie je především její jednoduchost, možnost použití vzorků bez téměř jakékoli předchozí přípravy a také to, že získané informace touto metodou lze snadno uchovávat. [24], [25]

3.2 SEM

Scanning electron microscopy (rastrovací elektronový mikroskopie)

Při energiích elektronů užívaných při mikroanalýze (5 až 50 keV) dosahují elektrony rychlostí, které se blíží rychlosti světla. Při průchodu hmotou se elektrony nejen rozptylují, ale také ztrácejí při srážkách s atomy část své energie. Dopad svazku elektronů na povrch se v blízkosti objeví kromě odražených elektronů ještě další skupina elektronů – sekundární, mající energii jednotek až desítek eV.

Na obr. 13 můžeme vidět logaritmickou vzdálenostní škálu (rozsah 1 mm až 0,1nm) elektromagnetického spektra. Jedna strana ukazuje rozsah vlnové délky běžných tříd elektromagnetického záření; druhá strana ukazuje velikost různých buněk a makromolekul. Tedy červené krvinky (7,5 μm) je patnáctkrát větší než vlnová délka viditelného zeleného světla (500 nm). Řešením omezení lidského oka jsou optický mikroskop a elektronový mikroskop. [26]



Obr. 13: Škála elektromagnetického spektra [26]

3.3 SPM, AFM

Scanning probe microscopy (SPM)

Mikroskopie využívající skenující sondu (SPM) představuje odvětví mikroskopických technik, které umožňují zobrazit struktury s atomárním rozlišením za pomoci mechanického pohybu sondy, která skenuje povrch vzorku v tzv. „line by line“ režimu. Jde o vžitý název, vévodící velkému počtu mikroskopických technik, které se hlavně v posledních 20 letech rozrostly do nebývalých rozměrů. Jednotlivé metody se pak až na výjimky liší pouze typem interakce, ke které dochází mezi sondou a povrchem vzorku např.:

- Mikroskopie atomárních sil (AFM - Atomic Force Microscopy) – k měření se využívá meziatomárních sil.
- Skenovací tunelovací mikroskopie (STM - Scanning Tunneling Microscopy) – založena na tunelování elektronů mezi sondou a vzorkem.
- Mikroskopie magnetické síly (MFM - Magnetic Force Microscopy) – k měření magnetických interakcí, probíhajících mezi sondou a vzorkem.

- Mikroskopie elektrostatických sil (Electric Force Microscopy) – mapování distribuce elektrostatických nábojů na povrchu vzorku.[27]

Mikroskopie atomárních sil (AFM - z anglického atomic force microscopy) je mikroskopická technika, která se používá k trojrozměrnému zobrazování povrchů. Metoda dosahuje velmi vysokého rozlišení – může zobrazovat i atomy. Techniku AFM lze použít nejen k zobrazování, ale také k tvorbě struktur či zpracování povrchů v nanometrové oblasti.

V principu je AFM podobná metoda jako tunelová mikroskopie. K detekci však neslouží elektrický proud, ale vzájemná meziatomová přitažlivost. Detekuje se pohyb zkoumacího hrotu při průchodu nad vzorkem. Umí zobrazovat i nevodivé vzorky. Nazývá se někdy také SFM (scanning force microscopy). [28]

Základem AFM je velmi ostrý hrot, který je upevněn na ohebném nosníku (cantilever).

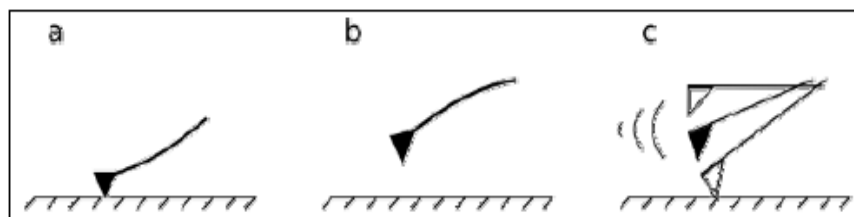
Režimy snímání povrchu

Kontaktní režim – hrot je mírně vtlačován do vzorku (Obr. 14 a) a následkem působících sil je nosník ohnutý. Hrot pravidelně skenuje povrch vzorku tak, že výška druhého konce nosníku je konstantní. Je-li povrch vzorku nerovný, má nosník v různých místech vzorku různou velikost ohnutí a sledováním závislosti ohnutí na poloze na vzorku můžeme sestavit zvětšený obraz vzorku.

Nekontaktní režim – hrot se pohybuje ve vzdálenosti nad vzorkem (Obr. 14 b), kde působí přitažlivé síly, sledují se změny amplitudy oscilací při interakci hrot – povrch. Jedná se o tzv. režim s konstantním ohnutím, ve kterém se v každém bodě rastru porovná současná hodnota ohnutí s přednastavenou hodnotou, a pokud se liší, nosník s hrotem se přiblíží nebo oddálí od vzorku o takovou vzdálenost z , aby se hodnota ohnutí opět shodovala s přednastavenou hodnotou. Místo velikosti ohnutí se pak k sestavení obrazu použijí hodnoty vzdálenosti z . Tento režim může zobrazovat i drsnější vzorky, ale je pomalejší (sběr obrázku trvá delší dobu).

Pokleповý režim – je to hybrid mezi kontaktním a nekontaktním režimem (Obr. 14 c)

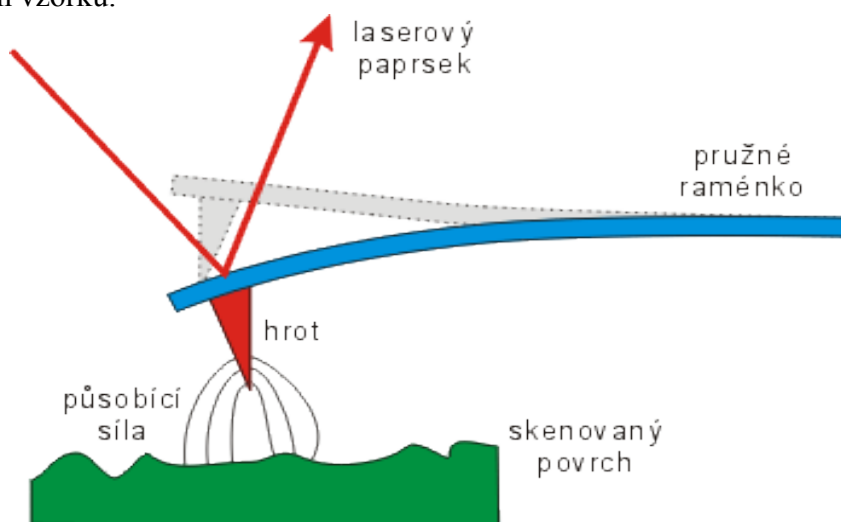
Dynamický režim (nekontaktní) – raménko osciluje působením harmonické síly. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami. Hrot je při maximální výchylce oscilačního cyklu raménka vzdálen od vzorku asi 5 \AA , tj. deset miliontin milimetru. Tento režim je také zvaný Dynamic Force Microscopy (DFM).



Obr. 14: Režimy AFM snímání povrchu [29]

Z těchto druhů režimů se nejvíce používají bezkontaktní režimy, v nichž není mezi hrotem a vzorkem přímý mechanický kontakt. Hrot a vzorek na sebe působí především skrze Van der Waalsovu a elektrostatickou sílu.

AFM může zobrazovat pouze povrch vzorků, nikoliv jejich objemovou strukturu (vyžaduje fixaci). Ve srovnání s optickou mikroskopií však dosahuje značně většího rozlišení, které je srovnatelné s rozlišením elektronové mikroskopie. AFM však poskytuje trojrozměrný obraz, kdežto elektronová mikroskopie dvojrozměrnou projekci. Metoda zobrazení AFM zpravidla nevyžaduje, aby byl vzorek speciálně připravován ani nevyžaduje vysoké vakuum. Může dokonce pracovat v kapalném prostředí, což je výhodné hlavně pro studium biologických vzorků.



Obr. 15: Princip AFM [29]

Nevýhodou AFM je velmi omezený rozsah velikosti obrázku a pomalý režim snímání. Maximální velikost obrazu bývá v řádech stovky mekrometrů a sestavení jednoho obrazu trvá řádově minuty. Dále je v AFM omezen i vertikální rozsah (maximální výška vzorku), který bývá typicky desítky mikrometrů. Problémy může způsobovat také blízkost hrotu a vzorku (silná interakce, možnost zachycení hrotu, znečištění hrotu, poškození vzorku) a nenulová šířka hrotu, která vede k deformaci obrazu.

Využití AFM

AFM mikroskop se využívá ke studiu katalytických procesů, povrchů pevných látek, dále v oblasti nanotechnologií, záznamové techniky či biologických systémů.

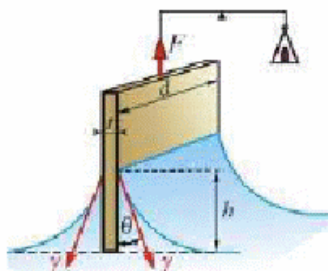
Možnost kombinace chemické identifikace a schopnosti manipulace jednotlivých atomů pomocí AFM na površích umožňující konstrukci nanostruktur požadovaných vlastností a funkčnosti. Přesné umístění dopantů specifických vlastností na polovodičovém povrchu může výrazně zvýšit výkonnost nanometrických tranzistorů. [29]

3.4 Kontaktní úhly smáčení, tenziometrie, inkousty a fixy



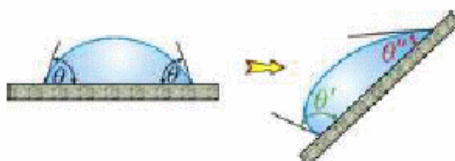
Obr. 16 Měření úhlu smáčení θ na nakloněné destičce [23]

Úhel smáčení je jednou z mála přímo měřitelných vlastností rozhraní pevná látka-kapalina-plyn. Pro jeho měření byla vypracována řada metod, např. měření úhlu mezi nakloněnou deskou z měřeného materiálu a vodorovným povrchem kapaliny. Destička se ponoří do kapaliny a naklání se tak dlouho, až je povrch kapaliny rovný až k čáře styku mezi deskou a kapalinou (Obr. 16). Dále pak se používá metoda vyvažování destičky – měří se síla potřebná k vyvážení destičky nebo výška, do níž vzlíná kapalina na vertikální destičce vnořené do kapaliny (Obr. 17).



Obr. 17 Metoda vyvažování destičky [23]

Jako další možnost lze využít přímé měření úhlu smáčení na kapce kapaliny umístěné na rovinném povrchu pevné látky, osvětlené svazkem paprsků rovnoběžných s povrchem. Úhel je pak měřen buď přímo mikroskopem opatřeným goniometrickou stupnicí na fotografii kapky, nebo lze snímat kapky kamerou a úhel smáčení vyhodnotit počítačem.



Obr. 18: Hystereze úhlu smáčení [23]

Naměřené hodnoty úhlu smáčení mohou být ovlivňovány nečistotami, přítomností naadsorbovaných plynů a páry nebo nerovnostmi na pevném povrchu. Úhel smáčení bude také ovlivňován případnou interakcí pevné látky s kapalinou (chemickou reakcí, rozpouštěním nebo botnáním). Rovněž je nutno pamatovat na hysterezi (Obr. 18) - úhel smáčení kapalin, která postupuje po pevném povrchu (např. při vnořování pevného předmětu do kapaliny nebo při naklánění pevného povrchu) je větší než úhel na ustupujícím rozhraní – při vynořování. [23]

3.4.1 Faktory ovlivňující kontaktní úhel smáčení

Řada technologických procesů (např. čištění, barvení, lepení) je závislá na tom, jak dobře kapalina smáčí povrch tuhé látky. Tato schopnost je kvantifikována hodnotou kontaktního úhlu, tato hodnota může být ovlivněna řadou faktorů např. kvalitou povrchu - drsností, výskytu mikrotrhlin a vad materiálu, schopností rozestírání kapaliny na povrchu, adsorpci látek přítomných v plynné fázi na povrchu tuhé látky, hysterezí úhlu smáčení, a taky různými ději, k nimž může docházet mezi tuhou látkou a kapalinou (chemická reakce, rozpouštění tuhé látky kapalinou, popř. botnání tuhé látky) atd. [30]

Tenziometrie

Statické povrchové resp. mezifázové napětí je v laboratoři měřeno standardní metodou platinového kroužku nebo desky. Kromě toho je možné stanovit i smáčecí úhel, hustotu vzorku (na základě jeho vzplývání), nasákavost práškových materiálů a v kombinaci s automatickým titrátorem také kritickou micelární koncentraci tenzidů. [31]

3.4.2 Inkousty a fixy

Inkousty

Hodnota povrchového napětí může být určena změřením kontaktního úhlu, využitím testovacích inkoustů např. DyneTEC.

Tento způsob měření povrchového napětí (energie) je založen na metodě ASTM/ISO, pro měření povrchového napětí polypropylenových filmů. Jakmile je na měřený povrch aplikován náš speciální inkoust, vytvoří buď souvislý film, nebo drobné kapičky. Pokud inkoust setrvá na testovaném materiálu jako film déle než 3 sekundy, má materiál povrchové napětí daného inkoustu nebo vyšší. Pokud inkoust tvoří kapičky, je povrchová energie materiálu menší než u daného inkoustu.

Přesnou povrchovou energii (napětí) lze určit použitím řady hodnot zvyšujících se nebo snižujících inkoustů. Jsou dostupné v rozmezí 30-72 mN/m v odstupňování po 2 mN/m. Inkousty jsou dodávány v 20ml lahvičkách s integrovanými štětcovými aplikátory.

Typy testovacích inkoustů

První – vyrobené ve shodě s ISO8296, klasifikované jako toxické.

Druhý typ je na bázi ethanolu a deionizované vody a je zařazen jako základní – výchozí roztok. Tyto roztoky však nelze využít při měření povrchů z PP. [32]

Fixy

Testovací fixy obsahují inkoust, který definuje povrchové napětí. Povrchové napětí materiálu, který je testován, je určeno velice jednoduše pomocí aplikace fixu a to tahem plstěnou špičkou po podkladu. Přesnost měření je stejně jako u testovacích inkoustů 1 mN/m. Testovací fixy jsou k dostání v sadě 8 fixů v hodnotě od 30 do 44 mN/m, na požádání rovněž s vyšší či nižší hodnotou. Výhoda je hlavně v možnosti rychlého a snadného testování s vysokou přesností, nelze rozlít, minimální spotřeba testovacího roztoku a taky dlouhodobé skladovací podmínky, při správném uzavření víčka fixy.

Začíná se většinou testovacím fixem střední hodnoty, např. 38 mN/m. Jestliže linka inkoustu zůstane na povrchu materiálu nezměněna po dobu dvou sekund (neslize) se v kapky, povrchové napětí je stejné nebo vyšší než povrchové napětí roztoku (fixu). [33]



Obr. 19: Fixy a inkousty pro měření povrchového napětí [33]



Obr. 20: Princip nanášení fixy, vlevo neošetřený povrch, vpravo ošetřený [33]

3.5 Adhezní vlastnosti

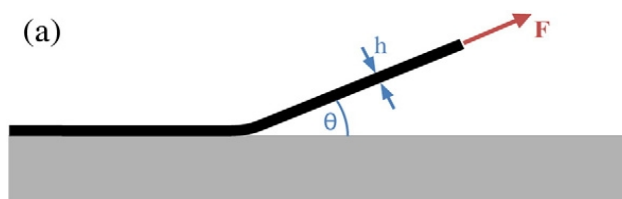
Základní adheze je daná vazbami mezi fólií a filmem. Závisí na stavu povrchu před nanášením vrstvy, vazbě na rozhraní (kovaletní, iontová, kovová, van der Waalsová atd.) a následných použitých technologií (žihání, difúze apod.).

Praktická adheze závisí i na metodě měření. Zahrnuje deformaci vrstvy nánosu a podložky, tření a jiné faktory.

Pro zjišťování adheze se používají tzv. destruktivní metody, jako jsou např. odtrhávací metody – peel test, scratch test, tahové zkoušky.

Peel test

Testování adheze odtržením pásky od povrchu s nánosem silou F , pod úhlem θ (Obr. 21) určeným v normě EN 1939 Self adhesive tapes - Determination of peel adhesion properties. Dalšími normami pro testování adheze: ČSN EN ISO 4624 – Nátěrové hmoty – Odtrhová zkouška a ČSN EN ISO 2409 – Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška. Blíže popsáno v praktické části.

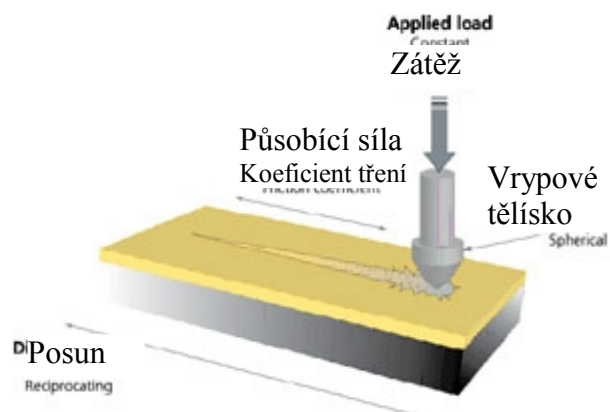


Obr. 21: Technika Peel test [34]

Scratch test

Scratch test, neboli vrypovací test zjišťuje adhezi mezi tenkou vrstvou a fólií (či jiným pevným podkladem). Přístroje (scratch testery) kvantifikují parametry, jako je např. třecí síla a síla přilnavosti. Je to neocenitelný pomocník pro výzkum, vývoj a kontrolu kvality výrobků.

Diamantová špička je tlačena silou s vzrůstající zátěží po povrchu. Nastává určitý stupeň poškození.[34]



Obr. 22: Princip Scratch testu [34]

4 POVRCHOVÉ SÍLY MEZI KAPALINOU A NA TENKÉ VRSTVĚ

Kapalinové povrchy jsou zahrnuty v mnoha přírodních a technických procesech a k jejich zkoumání bylo vyvinuto několik metod. Jedním příkladem jsou kapky kapaliny (voda) reagující s další fází nemísitelné kapaliny, např. olejem. Tohle je základní proces k porozumění struktuře a dynamice emulzí. Při velké vzdálenosti, dvě kapky budou reagovat přes hydrodynamické síly. Pro malé kapky při velkém rozpětí, tato síla není tak rozdílná od síly mezi dvěma pevnými částicemi, pouze musíme zvážit správnou vazebnou condition. Avšak z bližší vzdálenosti se budou kapky deformovat. Kapalina navazující fáze se odvádí z děr. Záleží na dalekonosných povrchových silách, viskozitě dvou kapalin, a podmínky tečení, filmu kapaliny A, trhlinách a shlukování kapek nebo stabilitě, filmu kapaliny B, která je formována mezi A a B. Nazýváme film jedné kapaliny mezi dvěma jinými kapalinami emulzním filmem. Interakce mezi kapkami je měřena pomocí různých technik. [35]

4.1 Modifikace povrchových vlastností polymerů pomocí aplikace tenkých vrstev

Aplikace tenkých vrstev probíhá jako finální proces na hotovém již tepelně zpracovaném substrátu. Pro dobré adhezni vlastnosti musí být povrch před nanesením kovově čistý, je nutné ho očistit od organických a anorganických nečistot.

4.1.1 Tenké vrstvy

1.1 Laky

Lakují se jak hliníkové, tak plastové fólie. Převážně jsou využívány laky rozpouštědlové, což není nejoptimálnější vzhledem k životnímu prostředí. Avšak složitost chemické sestavy, zejména termosvařitelných laků, je ve vodném systému komplikovaně realizovatelná. Nicméně i vodní systémy mají své místo. Podle jejich použití rozlišujeme laky základní (primery), ochranné a bariérové laky a laky termosvařitelné.

- **Základní laky** (primery)

Primery jsou laky určeny k zakotvení grafického potisku na povrch fólie, jelikož hliníkovou fólii je obtížné potiskovat napřímo. Ve většině případů jde o laky na bázi nitrocelulózy, které mají i nejčastější využití. Laky se nanášejí v množství od 0,8 do 1,5 g/m². Převážně tvoří vnější stranu obalu.

- **Bariérové laky** (ochranné laky)

Tyto laky jsou určeny pro vytvoření rezistentní vrstvy mezi fólií a baleným produktem, se kterým jsou v přímém kontaktu. Al je velice nestabilní jak v kyselém, tak v zásaditém prostředí. Může dojít k jeho korozi až rozpuštění vlivem látek obsažených v produktu, a tím k znehodnocení obalu a ke kontaminaci baleného produktu hliníkem. Proto není jak z technického, tak hygienického hlediska, možné, aby byl Al ve styku s baleným produktem. Příkladem takové aplikace jsou laky na vnitřní straně obalu taveného sýru. Bariérové laky lze rovněž aplikovat i jako podkladní laky, na které se následně vrství především termosvařitelné laky. Tím se zajišťuje naprosto bezdefektní vrstva (tzv. cihlovým efektem – viz. dále), odolná tak agresivním produktům, jako je např. majonéza nebo třeba hořčice. Nánosy těchto laků jsou obvykle mezi 2 až 4 g/m². Bariérové laky mohou být např. na bázi vinylchloridových a vinylacetátových kopolymerů.

- **Termosvařitelné laky** - laky umožňující tepelné svařování

Mezi termosvařitelné laky patří:

- *Laky pro PS a PVC* - tyto laky jsou levnou variantou k získání termosvařitelného nánosu, avšak mohou se svařovat pouze na PS a PVC. Jsou široce využívány.
- *Laky univerzální* - jedná se o laky, které mají schopnost (podle typu) obsáhnout celou škálu svařitelnosti. Zejména jsou používány k PP, PS, PE a PVC.
- *Laky pro farmaceutický průmysl* - Al fólie používané pro uzavírání blistrů s tabletami v farmaceutickém průmyslu využívají speciální laky se zvýšenou adhezí.
- *Laky na obaly tavených sýrů* - tyto laky jsou speciálně upraveny pro nízkou teplotu svařování. Fólie se v obalu taveného sýru svařují vůči sobě. Lak zde tedy svařuje sám se sebou.

Nejvýznamnějšími jak z hlediska užití, tak i zpracovávaného objemu, jsou termosvařitelné laky. V praxi se využívá ke svařování víček z Al či plastové fólie s plastovým kelímkem. Tyto laky jsou poměrně složité chemické systémy, které musejí splňovat celou řadu požadavků. Musí mít schopnost svařovat s různými typy plastů, pevnost sváru nesmí být ani moc vysoká ani nízká, lak musí být schopný vyschnout (vzhledem k větším nánosům) jedním průchodem stroje, svařovací teplota musí být optimálně nastavena atd. Termosvařitelné laky lze rozdělit do několika kategorií, podle toho s jakým typem plastu

jsou schopny tvořit kvalitní sváry. Požaduje se schopnost svařování s PP, PS, PVC, PE, PVDC, PET, okrajově s papírem a sklem. Termosvařitelné laky jsou konstruovány na bázi celé řady polymerů od akrylátů, vinylchloridů až po složité systémy elastomerních kopolymerů v kombinaci s disperzemi polyolefinů a dalších pomocných látek.[54]

4.1.2 Metalizace polymerních fólií

Pro elektroniku jsou zajímavé zejména metalizované polymerní filmy. Metalizace polymerních filmů je v literatuře poměrně často studovanou problematikou. Důvodem je široké využití struktur kov-polymer-kov. Toto základní uspořádání umožňuje měřit elektrické a dielektrické vlastnosti polymerů. Např. v elektronice je oboustranně metalizovaný polymerní film základem diod se záporným diferenciálním odporem, v optoelektronice se tyto struktury uplatňují při konstrukci světlo emitujících diod (LED) na bázi polymerů. Metalizované polymerní folie (susceptory) tvoří základní prvek aktivních obalů potravin pro mikrovlnný ohřev.

Vrstva kovu na polymer se nanáší několika základními způsoby, např. napařováním, naprašováním nebo elektrochemicky. Pro výše uvedené příklady se polymery metalizují vrstvou od ultratenkých tlouštěk do několika set nm. Základní vliv na struktury deponované vrstvy mají nukleační procesy. Pro napařování a naprašování vrstev publikoval Walton mikroskopickou nukleační teorii, která popisuje vznik zárodků vrstvy obsahující malý počet atomů. Při nanášení kovu na polymer existují 2 základní problémy: adheze kovu k substrátu a u tenkých kovových vrstev (do ca 20 nm) měření jejich tloušťky, s čímž souvisí sledování její spojitosti. Adhezi kovové vrstvy lze zvýšit modifikací polymeru, např. chemicky, plazmou, ozřováním plazmou nebo ionty, korunou nebo ozonem. Pro některé aplikace metalizovaných filmů je nezbytné, aby vrstva kovu byla spojitá (elektrická měření, konstrukce diod). Naopak pro některé aplikace je nezbytné připravit nespojitě kovové vrstvy (difuze kovů pro přípravu vodivých filamentů, obaly pro mikrovlnný ohřev. U metalizovaných filmů se předpokládá penetrace kovu do polymerního filmu.

Po penetraci kovu do polymerního filmu po přiložení vnějšího elektrického pole se vytvoří díky elektroformování vodivé filamenty. Jejich množství závisí na tloušťce polymeru.

Voltampérová charakteristika vykazuje od určité hodnoty přiloženého napětí oblast tzv. záporného diferenciálního odporu, tj. oblast, kde neplatí Ohmův zákon. U anorganických izolačních struktur je tento jev základem tunelovacích diod.

Většina polymerů se chová jako polarizovatelné dielektrikum. Změnou vlastností polymeru (struktury, složení, molekulové hmotnosti atd.) je možno dosáhnout výrazných změn dielektrických vlastností od izolantů až po feroelektrika nebo organické polovodiče.

Důležitým strukturním parametrem z hlediska dielektrických vlastností je polarita vazeb v hlavním řetězci nebo bočních skupinách. Přítomnost dipólových momentů v polymeru zvyšuje celkovou polarizovatelnost o orientační člen, který je teplotně závislý.

Teplotní závislost dielektrických vlastností byla studována např. na polárním kaučuku, fluorovaných polymerech, polytetrafluorethylenu nebo kompozitu feroelektrické keramiky a fluorovaného polymeru nebo na polymerech dotovaných sloučeninami obsahujícími dipóly.

Bylo prokázáno, že např. u polárního kaučuku, PET nebo jiných pokovených polymerních filmů dochází s rostoucí koncentrací dipolů k nárůstu permitivity. Permitivita kompozitu roste s teplotou. Vlivem vnějšího napětí lze orientovat dipóly v polymerní matici. [36]

4.1.3 Kaširování

Kaširování je technologie, kterou se nanáší horní vrstva z jiného materiálu na podkladový materiál, a to buď *suchým* kaširováním, kdy se na plastový díl nanese vrstva lepidla ve formě roztoku nebo disperze. Po vysušení se plastový díl tlakem spojuje s povrchovým materiálem, nejčastěji s textilií. Možný je i opačný postup. Jako kaširovací lepidla se používají roztoky latexu, PUR, apod. Kaširování *za pomoci vosků* se používá pro spojování dvou fólií z plastů, kdy se roztavené adhezivo nanáší ne jednu fólii a ještě před ztuhnutím je na nanesenou vrstvu přitlačována druhá fólie. Následuje chlazení a tento způsob nepotřebuje oproti předchozí technologii sušící tunel. Nebo je třetí způsob a to kaširování *za tepla*, kde se neuplatňují adheziva, ale využívá se termoplastičnosti alespoň jednoho materiálu. Povrch jednoho materiálu se nahřeje buď teplým vzduchem nebo sálavým teplem. Následuje spojení tlakem a ochlazení. Nejčastěji se používá pro kaširování textilií na povrch plastových dílů, na které se po předehřevu povrchu nalisuje textilie. Výhodou oproti suchému kaširování je vyšší rychlost a velmi dobrá pevnost při dlouhodobém používání.

4.1.4 Povlakování

Povlaky se vytvářejí na různých materiálech, a to jak kovových, tak i nekovových. Jejich funkce je dvojitá, ochranná a dekorační. Jednou z možných technologických postupů je *laminace*, která slouží k výrobě vícevrstevných výrobků, obdobně jako kaširování, kdy se na podkladový materiál (papír, textilie, apod.) laminují nejčastěji plastové fólie. Další možností je *plátování*, kdy se fólie z plastů lepením spojují s kovovými plechy. Povlaky se mohou vytvářet také ponořením povlakovaného tělesa do *taveniny* plastu, nebo se práškové plasty *žárově stříkají* nebo se ohřátý kovový díl (teplota je v oblasti zpracovatelských teplot daného plastu) zasype vrstvou *prášku*, který se na povrchu roztaví a vytvoří ochrannou vrstvu (tloušťka vrstvy závisí na době styku tělesa s práškem plastu). Modifikací vytváření povlaků z prášků je *vířivé* (fluidní) nanášení.

4.1.5 Desénování

Desénování slouží k výrobě prostorového vzoru na plošných materiálech. Při použití potisku lze vytvářet i barevné dezény. Principem je buď vlačování ohřátého kovového desénovacího válce s prostorovým reliéfem do studeného termoplastického materiálu nebo je studený desénovací válec vlačován do ohřátého povrchu plastu. Druhý postup je v praxi používanější, neboť materiál se méně lepí a desénovací válec se může intenzivně chladit pro zachování vytvořeného desénu. Plastický reliéf lze vytvořit i chemickým způsobem.

4.1.6 Sametování

Sametování je technologický proces, který vede k vytvoření textilního povrchu na nosném podkladovém materiálu. Princip spočívá v nanesení lepidla (kaučuky, PUR) na podkladový materiál (papír, textilie, fólie, plast, atd.) a na takto upravený povrch je sypána stříž krátkých vláken (bavlněná, polyamidová, apod.), které jsou orientované v elektrickém poli a tedy dopadají kolmo na podkladový materiál. Přebytečná stříž se potom odsává z povrchu.

4.1.7 Potiskování

Poskování je úprava povrchu jednou nebo více barvami, které se mohou jednak nanášet obdobnými technikami, jako u nátěrových hmot a nebo se používají technologické postupy, odvozené z potiskování papíru, textilu, apod. Technologie potiskování plastů se dají rozdělit na *přímé* (tisk z výšky nebo hloubky, sítotisk) a *nepřímé* (ofsetový tisk, tisk

razníkem, termotisk).

Při **přímém potiskování z hloubky** se barva nanáší z prohlubní tiskového válce, jejíž hloubka určuje množství nanesené barvy. Je to nejrozšířenější způsob potiskování fólií.

U **sítotisku** je barva protlačována otvory síta pomocí natíracího nože na potiskovaný povrch. Viskozita barvy, velikost ok síta a tlak natírání určují množství nanesené barvy. Lze potiskovat rovinné, ale i válcové a kuželové plochy, které mají nerovnosti povrchu. Pohybovat se může buď natírací nůž nebo potiskovaný díl.

Při **přímém tisku z výšky** je barva přenášena přes nanášecí válce na potiskovací válec a odtud na daný výrobek. [37]

4.1.8 Laminace

Laminovat lze více materiálů, jako jsou kovy, dřevo nebo plasty a slouží k poskytnutí vysoce odolných a ekologických dekorací v interiéru i exteriéru. Tepelně nosné povrchy fólie/laminát nevyžadují žádnou mokrou chemii pro vazby k podkladu – teplo a tlak mění ekonomicky výhodné materiály na vysoce funkční dekorativní produkty.

Při laminaci je k nosnému materiálu připevněna tenká fólie, která může plnit funkci ochrannou, dekorační, popř. obojí. Často se musí na nosný materiál aplikovat kompozit skládající se z nosné, dekorační a ochranné vrstvy. V průmyslu nábytkářských a podlahových lišt a okenních a dveřních profilů je využíváno tzv. Obalování profilů, kdy se základní materiál pokrývá vrstvou impregnovaného papíru, dýhou nebo PVC dekoračních fólií. K fixaci se používá tavných lepidel na bázi etylenvinylacetátu (EVA), polyolefinů (APAO) nebo PUR reaktivních tavných lepidel. Laminací lze dosáhnout velmi realistické ho dekoru, v závislosti na použité dekorační fólii. Při napodobování kovových povrchů je do nanášeného kompozitu zalaminována přímo tenká kovová fólie s patřičným vzhledem (Lesklá nerezová ocel, eloxovaný hliník, apod.). Oproti nanášení barev a laků je laminace výrazně dražší, zejména kvůli přídatným materiálům (lepidla a fólie), strojní zařízení a nemožnosti ji zařadit jako in-line proces (rychlost laminace vyšší než rychlost vytlačování).

4.1.9 Koextruze

Extruze je zpracovatelská metoda, při níž je roztavená směs granulátu vytlačována hlavou různého tvaru do volného prostoru. Koextruze je podobný proces – v řadě oddělených

extrudérů se taví jednotlivé plasty (nejčastěji PE). V jediném procesu jsou hlavou vytlačovány a jednotlivé vrstvy jsou tak za tepla pevně spojeny. Vzniká multivrstevnatá struktura, kde každá vrstva vnáší do konečného výrobku charakteristickou vlastnost, jako např. pevnost, chemickou nebo tepelnou odolnost, odolnost vůči oděru nepropustnost k některým látkám, jejichž kombinaci není možné zajistit u žádného jednotlivého polymeru. Dalším důvodem pro koextruzi může být také cena konečného výrobku – pouze svrchní a spodní vrstva je vyrobena z materiálu s výjimečnou vlastností a mezivrstva je z lacinějšího substrátu, případně z recyklátu. [38]

4.2 Způsoby aplikace tenkých vrstev

Mezi základní metody nanášení barev patří stříkání (nízkotlaké vzduchové, vysokotlaké vzduchové, bezvzduchové, elektrostatické), kataforéza, máčení a polévání, navalování. Používané nástroje jsou stříkací automaty, kataforézní linky, máčecí automaty, polévačky, navalovačky. Pro in-line povrchovou úpravu jsou z důvodu produktivity, pořizovacích a provozních nákladů vhodné slonové nanášečky a navalovačky. Za takovou jednotkou musí následovat vytvrzovací zařízení, podle druhu použité nátěrové hmoty buď na bázi UV nebo IR lamp. Takto mohou být nanášeny jak dekorační (jednoduché), tak i ochranné vrstvy (např. na bázi polyuretanových laků PUR).

PVD (Physical Vapour Deposition) je fyzikální metoda nanášení tenkých vrstev kondenzací par pevného materiálu na různých površích. Jedná se o fyzikální proces, který není doprovázený žádnou chemickou reakcí (na rozdíl od technologie CVD).

PVD technologie se zpravidla dělí podle převedení pevné fáze do plynné:

- **Napařování** – je vysokoteplotní odpaření ve vakuu pomocí odporového ohřevu.
- **EBPVD** - Electron Beam Physical Vapor Deposition – odpařovaný materiál je zapojen jako anoda, k ohřevu a odpaření dochází v důsledku bombardování povrchu materiálu svazkem elektronů.
- **Naprašování** – deponovaný materiál je zapojen jako katoda a jeho povrch je bombardován ionty pracovního plynu. Atomy deponované látky jsou takto odprašovány z povrchu terče a vytvářejí povlak na substrátu.
- **Magnetronové naprašování** - základní princip magnetronového naprašování je stejný jako u klasických naprašovacích metod - deponovaný materiál je zapojen jako katoda a jeho povrch je bombardován ionty pracovního plynu. Atomy

deponované látky jsou takto odprašovány z povrchu pevného terče a vytvářejí povlak na substrátu. V případě magnetronového naprašování je plazma lokalizováno pomocí magnetického pole v těsné blízkosti katody. Siločáry magnetického pole prodlužují dráhu elektronů. V plazmatu a zvyšují tak počet ionizujících kolizí s neutrálními částicemi pracovního plynu. Vzniká tak velmi husté plazma, které je zdrojem většího množství bombardujících iontů.

- **PLD** – pulsed laser deposition – terč deponovaného materiálu je vystaven dopadajícím pulzům laserového svazku, atomy materiálu tak získají dostatečné množství tepelné a mechanické energie na převedení do plynného nebo plazmatického stavu.

CVD (Chemical vapour deposition) je chemická metoda pro nanášení tenkých vrstev. Využívá se pro depozici směs chemicky reaktivních plynů (methan, ethan, pod.) zahřátou na teplotu 900 – 1100°C. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí.

Mezi výhody CVD techniky patří vysoká odolnost vůči opotřebení, je ekonomicky nejvýhodnější pro silné vrstvy a je také vhodný všude tam, kde je nutné povlakovat nepřístupné dutiny a drážky. Nevýhodou je vysoká teplota při nanášení. Dalším problémem je skutečnost, že při povlakování se hrany zaoblují a k procesu je použito ekologicky problematických toxických chloridů kovů.

Tenká vrstva se na povrchu materiálu vytváří v důsledku chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem materiálu. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, za vysokých teplot probíhá jejich rozklad a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí.

- **PECVD (Plasma Enhanced CVD)** – plazmaticky aktivovaná CVD metoda je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Takhle aktivované plazma umožňuje snížit teplotu potřebnou pro vznik vrstvy na povrchu materiálu. Takže dříve vysokoteplotní reakce mohou úspěšně probíhat i na teplotně citlivých materiálech.

- **PICVD (Plasma Impulse CVD)** – metoda pro nanášení na substráty z polymerů jako jsou PE,PC,PP a HDPE a taky sklovité povrchy z SiO₂ a TiO₂. [39]

4.3 Průmyslové využití tenkých vrstev na polymerních fóliích

PVD technologie mají největší uplatnění v tvorbě vrstev z tvrdých materiálů na řezných nástrojích, dále v tvorbě ochranných vrstev proti abrazivnímu opotřebení a ve snižování tření (automobilový průmysl – vstřikovací systémy, podvozky, ložiska, čerpadla). Mohou být využity i na dekorativní účely, v optice, elektronice a polovodičovém průmyslu, záznamových médiích (ochranné vrstvy), také je velmi vhodná pro polymerní substráty či pro vědecké účely.

- **Obalové fólie** – pro výrobu flexibilních obalů pro balení potravin a technických výrobků
- **Elektroizolační fólie** – pro výrobu kabelů, transformátorů a izolace vinutí elektromotorů
- **Antistatické fólie** – ty jsou upraveny tak, že se na nich nevytváří náboj statické elektřiny. Jsou určeny pro další strojní zpracování při vysokých rychlostech nebo pro balení citlivého zboží, například elektroniky nebo balení práškových substrátů.
- **Ostatní fólie** - výroba etiket, lepicích pásek, silikonizovaných folií, identifikačních a platebních karet, kancelářských výrobků [15]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

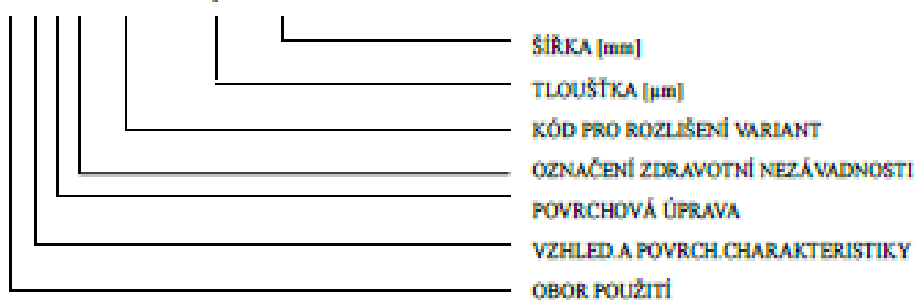
5 ZNAČENÍ BOPET FÓLIÍ

Každá fólie má své specifické označení, svou zkratku, kterou si vysvětlíme v následující kapitole.

Fólie jsou označovány obchodním názvem Tenolan®, označení se skládá z písmenného a číselného kódu doplněného o tloušťku a šířku.

Příklad označení fólie:

TENOLAN® O A S N IIII tl. 12 μ m / 800 mm



První písmeno určuje doporučenou oblast použití např.

O - fólie pro obalové účely

I - fólie pro elektroizolace

S - separační fólie

D - fólie pro dekorační účely, reklamu, etikety

T - fólie pro polygrafický průmysl

P - pečící fólie

Druhé písmeno označuje mechanické a vzhledové vlastnosti

A - základní typ, izotropické vlastnosti, transparentní nepatrně zakalené

B - izotropické vlastnosti, transparentní namodralý

C - izotropní vlastnosti, barevné provedení

D - izotropní vlastnosti, mléčně zakalené

Třetí písmeno (je-li uváděné) udává druh povrchové úpravy

K - koronovaná fólie (povrchová úprava vysokonapětovým výbojem)

M - metalizovaná fólie (pokovená hliníkem)

S - nánosovaná fólie

V - metalizovaná a nánosovaná

Poslední písmeno (třetí, popř.čtvrté)

N - označuje testování na zdravotní nezávadnost fólií určených pro přímý styk s potravinami a pokrmy

Kód pro rozlišení variant - čtyřmístný číselný kód je určen pro rozlišení variant ve skupině a rozlišuje vlastnosti jednotlivých typů fólií [15]

6 ZKOUMANÉ FÓLIE A JEJICH VLASTNOSTI

BOPET fólie se vyznačují vysokou pevností, rozměrovou stálostí v širokém rozmezí teplot, vysokou transparentností, nízkou propustností plynů a vodních par. Všechny uvedené fólie se používají hlavně jako obalové materiály pro potraviny i technické výrobky

OAN 0001 / 12 μm – jedná se o čirou průhlednou fólii bez nánosu

OAN 0001 / 50 μm – fólie čirá, průhledná a bez nánosu

OASN 2108 / 50 μm – čirá průhledná fólie s jednostranným nánosem na bázi kopolyesteru, pod optickým mikroskopem pozorované malé bublinky a lehké řezy na povrchu

OCSN 2200 / 50 μm – bílá fólie s jednostranným nánosem, pod optickým mikroskopem pozorovány občasné bublinky a stopy nánosu

OAKN 0001 / 50 μm – čirá průhledná fólie s jednostrannou koronovou úpravou

- díky zvýšenému povrchovému napětí (koronová úprava) je fólie vhodná pro další zušlechťování – pokovování, potisk atd.

7 MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ

Kontaktní úhel se může měřit různými způsoby, jak jsme si vysvětlili v teoretické části.

7.1 Měření kontaktního úhlu pomocí metody sedící kapky

Kapky měřených kapalin byly nanášeny mikropipetou na povrch polymeru o velikosti 100x150 mm kapkami o objemu 3, 4, 5 a 6 μl . K následnému vyhodnocení byl využit přenosný laboratorní goniometr s CCD kamerou a softwarem zkonstruovaný na ÚFMI – UTB ve Zlíně (Obr.23).

Vybavení:

U fólie tenké 12 μm se musela použít lepicí páska pro napnutí a stabilizaci vzorku.

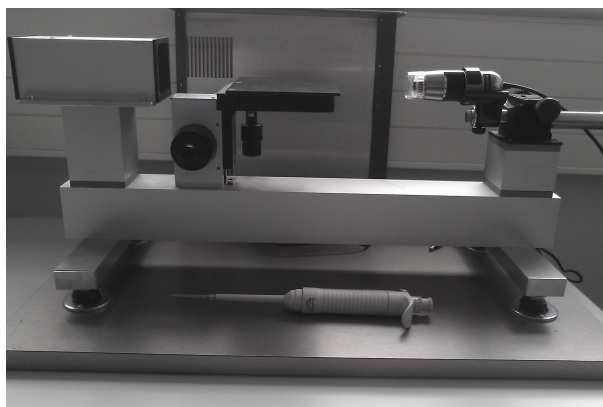
Nůžky

Mikropipeta s příslušenstvím

Laboratorní goniometr s CCD kamerou

Použité kapaliny:

Redestilovaná voda po iontové výměně



Obr. 23 Přenosný laboratorní goniometr s CCD kamerou [40]

Tab. 3: Průměrné hodnoty kontaktních úhlů fólií metodou sedící kapky pro vodu

	θ [°]					Průměr	Chyba měř.
	Objem kapky vody [μ l]						
	2	3	4	5	6		
OAN 12 μm	62,90	64,72	64,61	64,38	60,42	63,40	0,8
OAN 50 μm	61,56	60,91	61,28	58,20	58,40	60,07	0,7
OASN 21/50 μm	61,10	61,70	67,11	57,98	53,99	60,37	2,1
OCSN 22/50 μm	61,33	59,86	59,62	63,63	62,89	61,46	0,8
OAKN 50 μm		62,35				62,35	0,3

Diskuze výsledků

U čtyř BOPET fólií bylo měřeno vždy 40 hodnot kontaktního úhlu u objemů kapek 2, 3, 4, 5 a 6 μ l, u fólie OAKN 50 μ m bylo provedeno 20 hodnot měření s objemem kapky 3 μ l jako orientační. Průměrné naměřené hodnoty kontaktního úhlu smáčení u měřených fólií vycházely u OAN/12 μ m 63,40° s průměrnou chybou měření 0,3°; u OAN/50 μ m 60,07° s průměrnou chybou měření 0,2°; u OASN 21/50 μ m 60,38° s průměrnou chybou měření 0,2°, u OCSN 22/50 μ m 61,47° s průměrnou chybou měření 0,2° a u OAKN 50 μ m 61,35° s chybou měření 0,3°. Podrobné výsledky měření kontaktních úhlů metodou sedící kapky jsou v příloze P 1.

7.2 Měření dynamického kontaktního úhlu pomocí tensiometru (Wilhelmyho metodou)

Pro měření dynamického kontaktního úhlu byly použity vzorky fólií o velikosti 20x40mm, které byly přichyceny čelistmi tensiometru. Vložila se dovnitř miska s vodou a nastavila se hloubka ponoru 3 mm. Měřeno bylo za pokojové teploty 24,3°C. Měření se opakovala u každého vzorku čtyřikrát, výsledné hodnoty v tabulkách jsou zprůměrovány.

Použité kapaliny

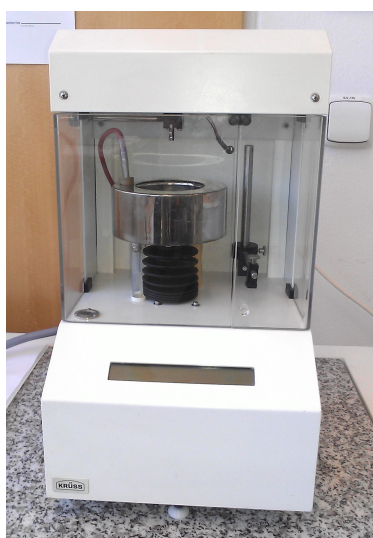
Redestilovaná voda po iontové výměně.

Vybavení:

Tab. 4: Základní charakteristika použité kapaliny

KAPALINA	HUSTOTA ρ [g/cm ³]	VISKOZITA η [mPa.s]	POVRCH NAPĚTÍ γ [mN/m]	DISPERZNÍ PODÍL γ^d [mN/m]	POLARNÍ PODÍL γ^p [mN/m]
redetil. VODA (H ₂ O)	0,998	1,002	72,8	26,0	46,8

Petriho miska



Obr. 24: Tensiometr Krüss

Tensiometr K12e se systémem LabDesk 2.0 (Obr. 24)

Petriho miska

Tensiometr Krüss umožňuje měření povrchového napětí kapalin a dynamických kontaktních úhlů smáčení θ [°] u různých materiálů v definovaných kapalinách. Metoda měření je založena na Wilhemyho destičkové metodě.

Tab. 5: Technická specifikace Tensiometru Krüss

Rozsah pro měření povrchového napětí	0 – 500 mN/m
Rozlišení snímače	0,15 mm
Vážící plocha	110 g s rozlišením 0,1 mg
Dělení stupnice	$\pm 0,01$ mN/m
Maximální zdvih	50 mm
Termostatická lázeň	-10 – 100 °C

Naměřené hodnoty

Tab. 6: Hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H , OAN 50 μm

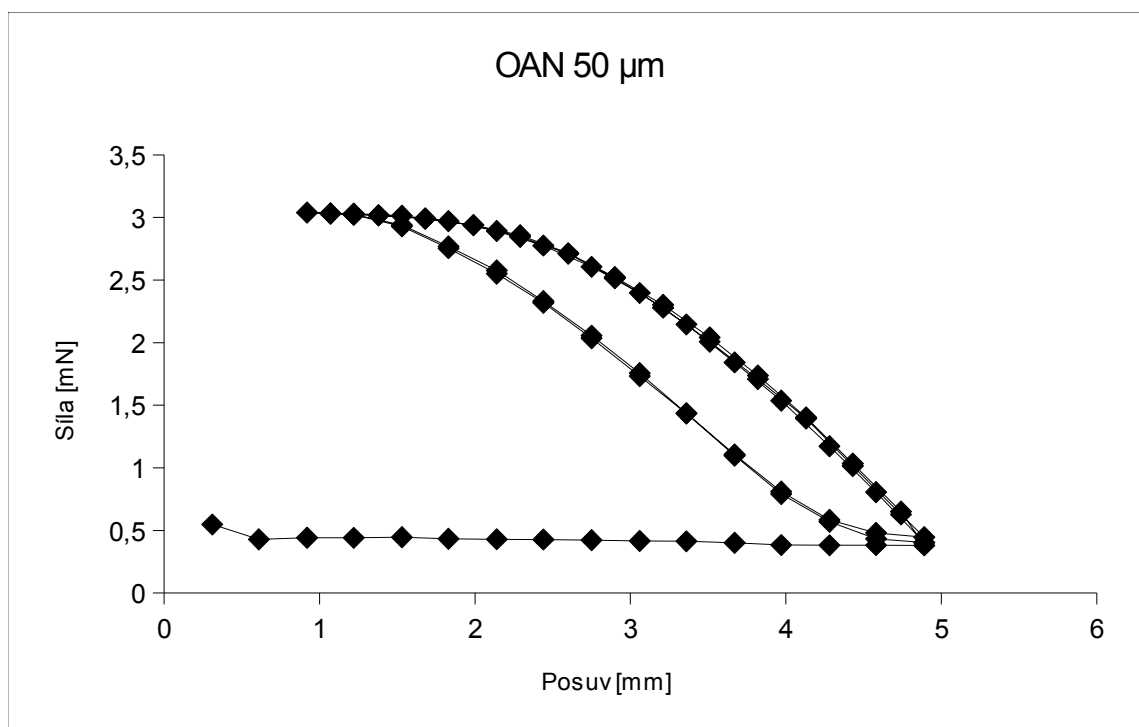
OAN 50 μm			
	θ_A [°]	θ_R [°]	H [°]
Průměr	82,70	53,47	29,23
Chyba měř.	0,7	0,8	0,8

Tab. 7: Hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H , OASN 21/50 μm

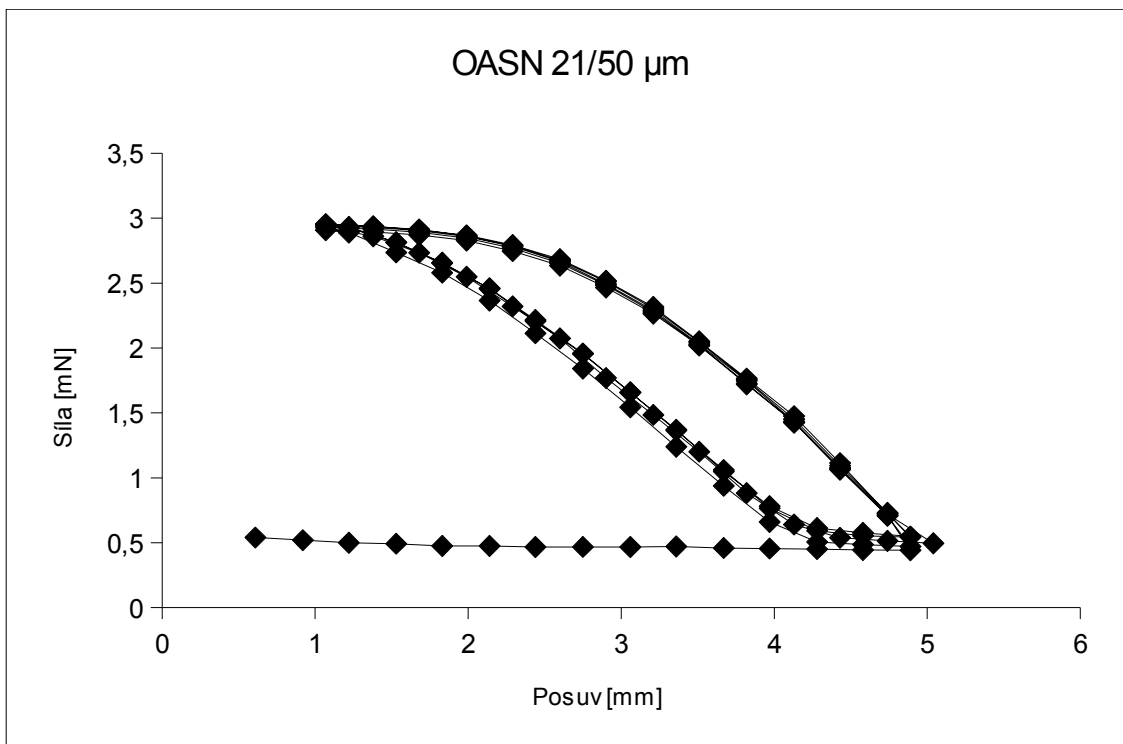
OASN 21/50 μm			
	θ_A [°]	θ_R [°]	H [°]
Průměr	75,3	0	75,3
Chyba měř.	0,9	0	0,4

Tab. 8: Průměrné hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H , OCSN 22/50 μm

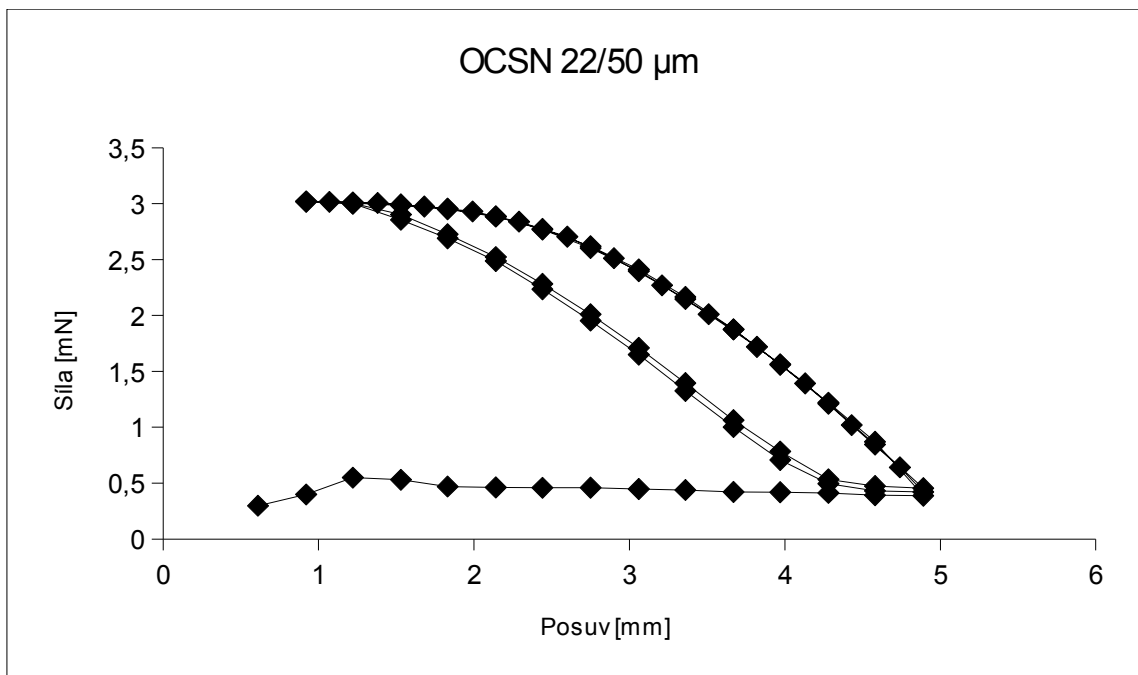
OCSN 22/50 μm			
	θ_A [°]	θ_R [°]	H [°]
Průměr	82,1	49,7	32,4
Chyba měř.	0,2	0,3	0,3



Obr. 25: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii OAN 50 μm



Obr. 26: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii OASN 21/50 μm



Obr. 27: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii OCSN 22/50 μm

Použité kapaliny

Jako měřicí kapaliny pro stanovení povrchové energie pro BOPET fólie byly použity – redestilovaná voda po iontové výměně, glycerol a ethylenglykol. Obecně platí, že smáčecí kapalina nesmí reagovat s měřeným povrchem, jinak by výsledky byly značně zkreslené a tudíž nepoužitelné.

Tab. 9: Charakteristika použitých kapalin

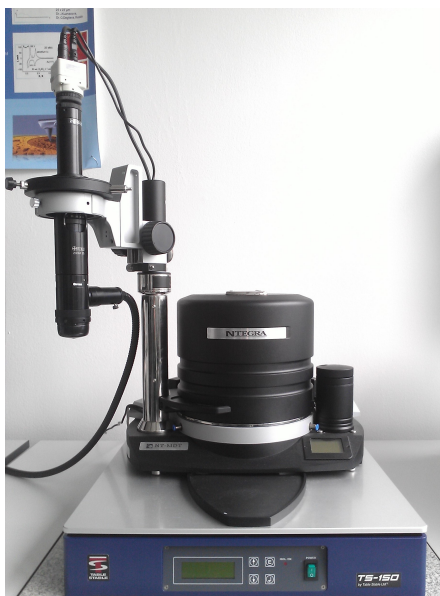
KAPALINA	HUSTOTA ρ [g/cm ³]	VISKOZITA η [mPa.s]	POVRCH NAPĚTÍ γ [mN/m]	DISPERZNI PODÍL γ^d [mN/m]	POLARNÍ PODÍL γ^p [mN/m]
redestil. VODA (H ₂ O)	0,998	1,002	72,8	26,0	46,8
GLYCEROL (C ₃ H ₈ O ₃)	1,263	924,7	65,2	28,3	36,9
ETHYLENGLYKOL (C ₂ H ₆ O ₂)	1,109	21,81	47,7	26,4	21,3

8 ANALÝZA POVRCHU POLYMERNÍCH FÓLIÍ

8.1 AFM

Pro mikroskopii AFM byl použit přístroj NTEGRA-Prima, od společnosti NT-MDT.

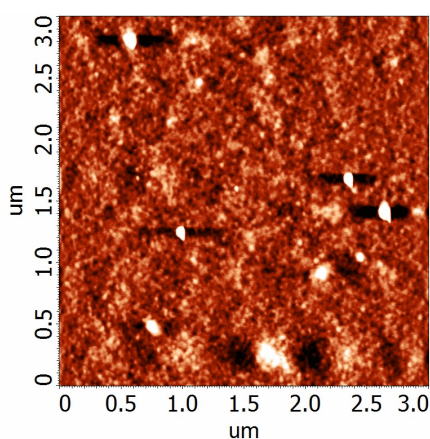
Na Obr. 29 a 30 jsou snímky PET fólie bez nánosu ve 2D provedení.



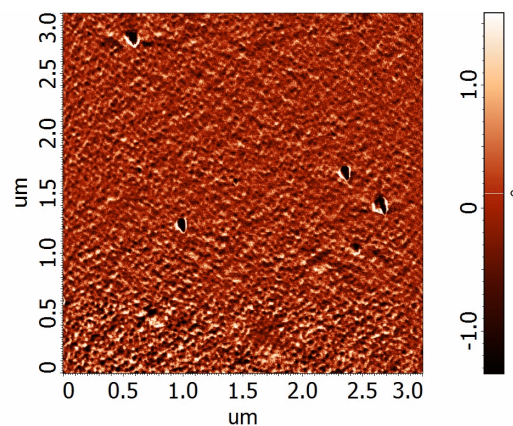
Obr. 28: Měřicí přístroj pro SPM
NTEGRA-Prima

Tab. 10: Parametry přístroje pro AFM mikroskopii
přístrojem NTEGRA-Prima

Měřicí mód:	semikontaktní
Použitý přístroj:	NTEGRA-Prima
Použitá metodika:	AFM
Prostředí pro měření vzorku:	Vzduch (okolní atmosféra)
Teplota měření:	Laboratorní (25°C)
Použitá sonda pro AFM:	NSF10 pro nekontaktní módy
Rychlost skenování:	Cca 0,5 Hz
Rozlišení obrázků:	512x512 dpi
Skenovací plocha:	3 x 3 μm



Obr. 30: BOPET fólie 50 μm 2D AFM technikou



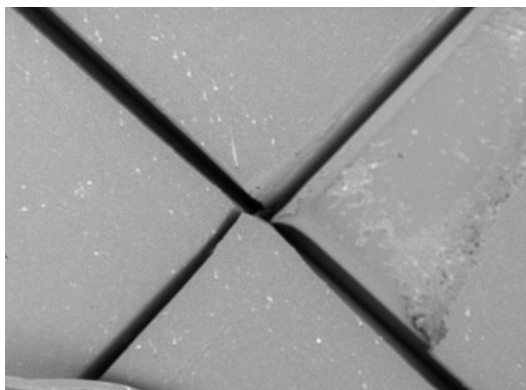
Obr. 29: BOPET fólie 50 μm 2D fáze AFM technikou

8.2 SEM

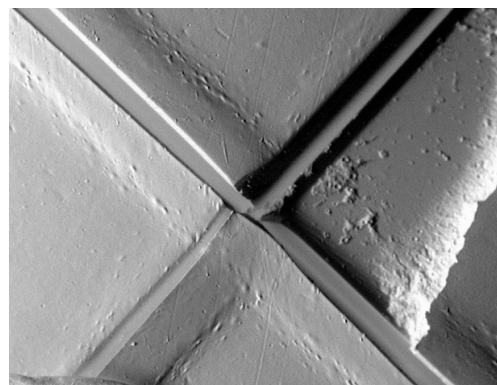
Mikroskopie metodou SEM (řádkovací elektronová mikroskopie) se využívá k zobrazení pohyblivého svazku elektronů. Na každé místo vzorku je zaměřen úzký paprsek elektronů (prochází jej po řádcích – odtud řádkovací). Interakcí dopadajících elektronů s materiálem vzorku vznikají různě detekovatelné složky. Jak paprsek putuje po vzorku, mění se podle charakteru povrchu úroveň signálu v detektoru. Z těchto signálů je pak sestavován výsledný obraz.



Obr. 31: Přístroj pro vyhodnocení SEM snímků
Phenom Pro [41]



Obr. 33: SEM - Výřez z BOPET fólie s nanesenou modrou barvou po naříznutí, BSD Full



Obr. 32: SEM - Výřez z BOPET fólie s nanesenou modrou barvou po naříznutí, BSD Topo A

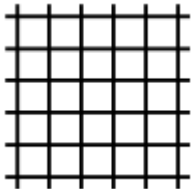
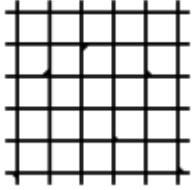
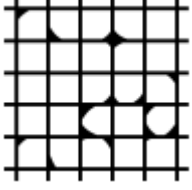
Diskuze

Po zkoušce adheze modré barvy křížovou zkouškou se vyřízl vzorek fólie o velikosti cca 5x5 mm a vložil se do elektronového mikroskopu. Na obrázcích vidíme řezy jdoucí barvou i nánosem a je patrný také odloupenutí barvy v pravé části obrázku.

Poznámka BSD Topo (A nebo B), nebo BSD (Backscattered detector) Full pod obrázkem značí typ detektoru. BSD je zkratka pro detektor zpětně odražených elektronů. Režim Topo je vhodný pro zvýraznění topografie – výškových rozdílů, režim Full se využívá pro rozlišení jemných detailů na povrchu vzorku.

9 HODNOCENÍ KVALITY CHEMICKÉHO NÁNOSU NA BOPET

Chemické nánosy na BOPET se v současnosti testují a zkouší pouze na parametr dosaženého povrchového napětí dle **ASTM D2578-09 - Standard Test Method for Wetting Tension of Polyethylene and Polypropylene Films**, tzv. křížová zkouška. Metoda zkoumá pouze hodnotu dosaženého povrchového napětí bez toho, aby se zabývala dalšími parametry nánosu. Mezi důležité a často vyžadované parametry patří odolnost nánosu proti odtržení od podložky. Normy ISO popisují hodnocení tvrdých nánosů – nátěrových hmot. Základními normami pro kontrolu nátěrových hmot jsou **ČSN EN ISO 4624 – Nátěrové hmoty – Odtrhová zkouška** a **ČSN EN ISO 2409 – Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška**. V principu se používá zkouška odtržení nánosu od podložky, a to za použití buďto mřížkové zkoušky podle ČSN EN ISO 2409 nebo křížového řezu dle ASTM D 3359-83. V obou případech je nezbytné použít speciální nástroj pro tvorbu řezu bez poškození podložky – BOPET folie. Po nařezání nánosu se přelepí testovací místo odtrhovací samolepící páskou (Tesa 4104) a provede se odtržení pásky od podkladu. Poté se zkoumaný vzorek vizuálně zhodnotí na nátěru i pásce. Podle míry poškození nátěru se provede klasifikace dle níže uvedených tabulek. [36], [42]. Podle nejnovější aktualizace normy není požadována žádná specifikovaná páska a upřednostňuje se zhotovení mřížky jednobřitým nožem.

Klasifikace	Popis	Vzhled
0	Řezy zcela hladké, žádný čtverec není poškozen	
1	Nepatrné poškození v místech, kde se řezy kříží. Poškozená plocha nesmí přesahovat 5%	
2	Nátěr nepatrně poškozen podél řezů a při jejich křížení. Povrch mřížky smí být poškozen z více než 5% a méně než 15 % celkové plochy	

Klasifikace	Popis	Vzhled
3	Nátěr je částečně poškozen v rozích řezů, podél řezných hran částečně, nebo celý, na různých místech mřížky. Poškození mřížky je větší než 15 % a menší než 35 %	
4	Na nátěru velké změny v rozích řezů a některé čtverečky jsou částečně nebo zcela poškozeny. Plocha mřížky je poškozena z více jak 35 % ale méně než 65 %	

ASTM Klasifikace - křížová zkouška

Klasifikace	Popis	Vzhled
5A	Žádný odlup	
4A	Nepatrný odlup podél řezů	
3A	Odloupení podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 1,6 mm od křížení řezů	
2A	Odloupení podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 3,2 mm od křížení řezů	
1A	Odstranění povlaku z většiny plochy mezi řezy	
0A	Odstranění povlaku i mimo plochu křížového řezu	

Základním problémem těchto testovacích metodik je to, že tloušťka vrstvy chemického nánosu je velmi malá, a není možné provést nařezání nebo vizuální hodnocení kvality nánosu po aplikaci odtrhovací samolepící pásky. Je proto nutno provádět hodnocení zprostředkovaně, pomocí nánosu vhodného typu nátěru. Nátěr musí být po chemické stránce adaptabilní jak pro nános na bázi akrylátu s nízkým povrchovým napětím do 44 mN/m, tak pro nános na bázi kopolyesterů s typickou hodnotou 54 až 64 mN/m.

Po konzultaci problematiky s dodavatelem surovin pro chemické nánosy a s dodavatelem technologie byl odzkoušen tzv. růžový lak na bázi acetobutyrátu celulózy. Pracovní postup

nánosování, sušení a hodnocení byl odzkoušen a prokázal životaschopnost pro hodnocení kvality chemických nánosů na BOPET foliích. [36], [42]

9.1 Měření adheze chemického nánosu

Použité kapaliny:

Testovací lak růžový – složení: Celulózový acetát butyrát, methylcellulose, methylketon, n-Butanol, barvivo Rhodamin B

- povrchové napětí 31,1 mN/m (měřeno na tensiometru Krüss)

Vodouředitelná modrá barva – povrchové napětí 34,2 mN/m (měřeno na tensiometru Krüss)

Vybavení:

Testovací páska Tesa 4104

Elcometer 1542 s příslušenstvím

Tloušťkoměr pro kontrolu výšky nánosu



Obr. 34: Elcometer 1542 s příslušenstvím [48]



Obr. 35: Testování adheze nánosu páskou Tesa 4104

Postup přípravy vzorku

Pro měření připravíme fólie s chemickým nánosem, nejlépe ve formátu A4. Na folii nanese pomocí spirálového pravítka nános roztoku testovacího laku (růžový, modrý) v šíři nejméně 20 mm a délce 50mm. Spirálové pravítko je vytvořeno pomocí drátu 1 mm navinutého na ocelové tyči průměru 5 mm. Nános po usušení má tloušťku cca 4 μ m.

Mřížková a křížová zkouška

Počet testovacích zón = 3, rozmístění šachovnicově pod sebe tak, aby se při nanášení spirálovým pravítkem testovací místa nepřekrývala.

Folie se uloží na papír A4 společně s papírem se umístí do laboratorní sušárny pro sušení při 150 °C po dobu 2 min. Přenesení do sušárny je nutno provést co nejdříve, aby nedošlo ke kontaminaci nánosu vzdušnou vlhkostí.

Pro nařezání se používá řezný nástroj Elcometer 1542, 6x1 mm. Nože se nastaví do správné polohy. Pomocí přiložené hodinářské lupy se vyhledá místo s rovnoměrným nánosem růžového laku a provede se řez. Elcometer se táhne s lehkým přitlakem ve směru delší strany nánosu (nejméně 20 mm) a následně se provede řez kolmý ve směru příčném, taktéž minimálně 20 mm dlouhý. Poté se celý řez pokryje testovací páskou ve směru delší strany nánosu, uhladí se a provede se rychlé odtržení pod úhlem minimálně 20°. Stejně se postupuje ve směru příčném.

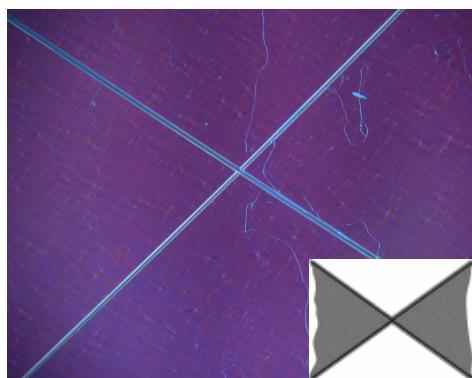
U zkoušky křížové se používá postup podobný jako u mřížkové zkoušky, ovšem s tím rozdílem, že k naříznutí nánosu se používá nůž s jedním ostřím a naříznutí probíhá ve tvaru X.



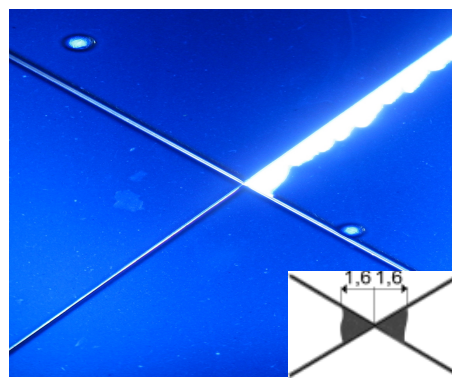
Obr. 36: Ukázka nánosu modré barvy spirálovým pravítkem na 12 µm fólii



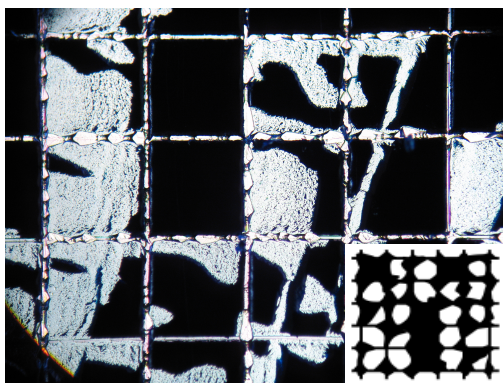
Obr. 37: Testovací páska po odtržení modré barvy z fólie



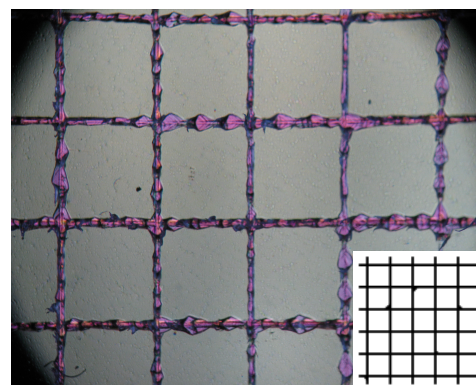
Obr. 38: Fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem, křížová zkouška, po odtržení pásky (růžový lak), srovnání s ASTM 1A



Obr. 39: Fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem, křížová zkouška, po odtržení pásky (modrá barva), srovnání s ASTM 4A – nepatrný odlup



Obr. 40: Mřížková zkouška u fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem a srovnání s ISO 4 (modrá barva)



Obr. 41: Mřížková zkouška u fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem a srovnání s ISO 3 (růžový lak)

9.1.1 Vyhodnocení mřížkové a křížové zkoušky

Po usušení se provede test adheze s využitím metodiky **ČSN EN ISO 2409** anebo

ASTM D 3359-83. V obou případech se provede naříznutí vrstvy naneseného laku a pomocí testovací odtrhovací pásky Scotch 610 nebo jejího ekvivalentu se provede ověření adheze na folii. Hodnotí se nános laku na folii dle výše uvedených kritérií.

U folií tenkých 12 μm a méně nelze použít nařezání kvůli proříznutí fólie. V tomto případě lze hodnotit soudržnost po odtržení pásky z místa naneseného laku vizuálním hodnocením podílu laku na odtrhovací pásce a posouzením kvality nánosu pomocí lupy.

Naměřené hodnoty pro růžový lak:

OASN 21/50 μm – ISO 4, ASTM 1A

OCSN 22/50 μm – ISO 2, ASTM 3A;

OAKN 50 μm – ISO 4, ASTM 1A

Naměřené hodnoty pro modrou barvu:

OASN 21/50 μm – ISO 4, ASTM 4A

OCSN 22/50 μm – ISO 3, ASTM 3A

OAKN 50 μm – ISO 3, ASTM 2A

Diskuze výsledků

Hodnocení dle **ASTM D 3359-83** dává pouze orientační výsledky, lze však použít běžný řezný nástroj (žiletka).

Pro dodržení zásad **ČSN EN ISO 2409** je nutno použít vhodný řezný nástroj (Elcometer), dodávaný např. firmou ProInex Instruments, s.r.o.

Dle hodnocených klasifikací lze vyzorovat lepší adhezivní vlastnosti u růžového laku.

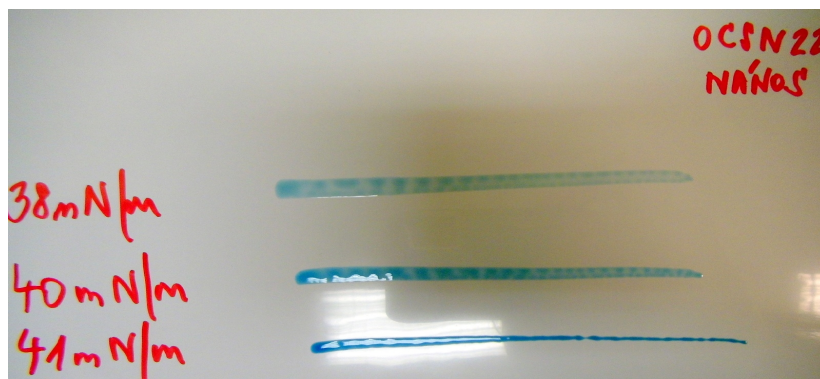
Co se týče neupraované fólie OAN, u té docházelo k snadnému odloupení laku či barvy z důvodu právě nezměněných vlastností úpravou fólie.

9.2 Měření povrchové energie inkousty

Povrchová energie je měřena v mN/m (aktuální platná měrná jednotka) nebo v dyn/cm (stará jednotka).

Vybavení:

Sada inkoustů s různými povrchovými energiemi



Obr. 42: Ukázka měření povrchového napětí pomocí inkoustu u fólie

OCSN 22/50 μm , 40 mN/m

Postup práce

Na připravenou fólii podloženou bílým papírem se nanášely inkousty v lince dlouhé 10 cm. Ihned po nanesení se sledovalo chování roztoku inkoustu na fólii. Pokud se daný inkoust rozpíjel, bylo třeba nanést inkoust s vyšším číslem povrchového napětí. Naopak, když se inkoust stahoval, vyzkoušel se inkoust s číslem nižším. Správně zvolený inkoust (povrchové napětí) se poznal tak, že do dvou vteřin od nanesení, s fólií nereagoval (nerozpíjel se ani nestahoval).

9.2.1 Vyhodnocení povrchové energie pomocí inkoustů

Vyhodnocení hodnot povrchové energie probíhalo vždy po pečlivém zvážení na nejvyšší číslo, při kterém fólie držela na podkladu a nijak nereagovala. U fólií OAN vycházelo povrchové napětí 41 mN/m, u fólie OASN 21/50 μm 62 mN/m, u OCSN 22/50 μm vyšla povrchová energie 40 mN/m a fólie OAKN 50 μm má podle „inkoustové“ metody 50 mN/m.

Fólie	γ_s [mN/m]
OAN 12 a 50 μm	41
OASN 21/50 μm	62
OCSN 22/50 μm	40
OAKN 50 μm	50

Obr. 43: Vyhodnocení povrchové energie pomocí inkoustů u všech zkoumaných fólií

Diskuze výsledků

Tabulkové hodnoty BOPET fólií se pohybují u **OAN** 12 μm a 50 μm je stanovena povrchová energie minimálně na 38 mN/m, u fólie **OASN** 21/50 μm minimálně 58 mN/m, u **OCSN** 22/50 μm se povrchová energie pohybuje od 41 do 43 mN/m a u fólie **OAKN** 50 μm je minimální hodnota povrchové energie 48 mN/m. Tudiž všechny výsledky, krom hodnoty u **OCSN** 22/50 μm odpovídají tabulkám. Hodnocení povrchové energie pomocí inkoustů u **OCSN** 22/50 μm můžeme vidět na obr. 42, ze kterého je patrné, že u inkoustu s povrchovým napětím 41 mN/m probíhá stahování inkoustového roztoku. Výsledky mohly být zkresleny např. dlouho otevřenými lahvičkami inkoustů nebo nečistotami na fólii. To ale nic nemění na tom, že se jedná o rychlou a poměrně přesnou metodu.

10 VÝPOČTY POVRCHOVÉ ENERGIE

Existuje několik přístupů, které se využívají k výpočtu povrchového napětí, resp.

volné povrchové energie pevných látek, rozvinutých řadou vědeckých pracovníků. Opět platí, že celková povrchová energie pevných látek a kapalin závisí na různých typech molekulárních interakcí, jako jsou disperzní (van der Waals), polární, a acidobazické interakce.

Metody se liší v počtu komponent, nebo parametrů, jimiž jsou vybaveny. Tyto rozdíly je třeba vzít v úvahu při rozhodování, která metoda je vhodná při řešení daného problému.

V následujících odstavcích si představíme některé ze základních běžně používaných teorií.

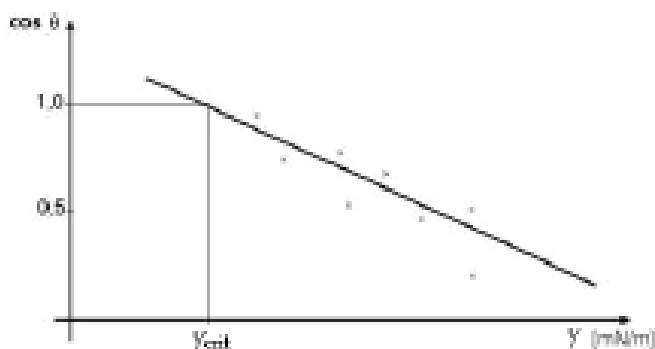
10.1 Zismanova teorie

Základem Zismanovy teorie bylo měření kontaktních úhlů pro sérii kapalin (nalkanů),

na stejném pevném vzorku (zpravidla polymeru) (viz obr. 45). Tato metoda je založena na měření závislosti $\cos\theta$ ku celkovému povrchovému napětí kapaliny γ_l . Hodnoty kontaktních úhlů Zisman vyjádřil jako funkci celkové povrchové energie kapalin γ_l , matematicky $\cos\theta=f(\gamma_l)$. Lineární extrapolací ($\cos\theta \rightarrow 1$) získal kritické povrchové napětí γ_{crit} (graf 1), což odpovídá případu, kdy kapaliny ideálně smáčí povrch pevné látky ($\theta=0^\circ$). Zismanova rovnice má pak tvar:

$$\cos\theta = 1 + b(\gamma_{crit} - \gamma_l) \quad (6)$$

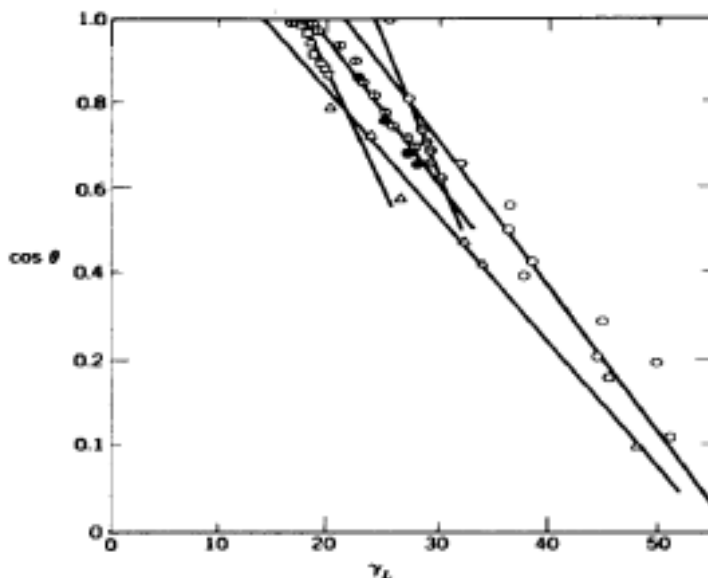
parametr b je konstanta platná pro sadu použitých kapalin.



Obr. 44: Graf stanovení kritického povrchového napětí

γ_{crit} . [44]

Hodnota kritického povrchového napětí se liší podle sady testovaných kapalin. [45]



Obr. 45: Graf měření kontaktních úhlů pro sérii kapalinna povrchu teflonu (PTFE) podle Zismana [44]

10.2 Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK) metoda

Tato metoda vychází z Fowkesovy teorie. Na rozdíl od ní, OWRK metoda počítá povrchovou energii v jednom kroku. K určení volné povrchové energie stačí dvě kapaliny se známými polárními a disperzními komponentami - pár polární a nepolární kapalina. Je předpokládáno, že nepolární kapalina má mít vyšší povrchové napětí než očekávaná hodnota γ_s . Podle této metody je povrchové napětí dáno součtem disperzních γ_d a polárních složek γ_p . Tedy pro kapalinu:

$$\gamma_l = \gamma_l^d + \gamma_l^p \quad (7)$$

Pro pevnou látku:

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (8)$$

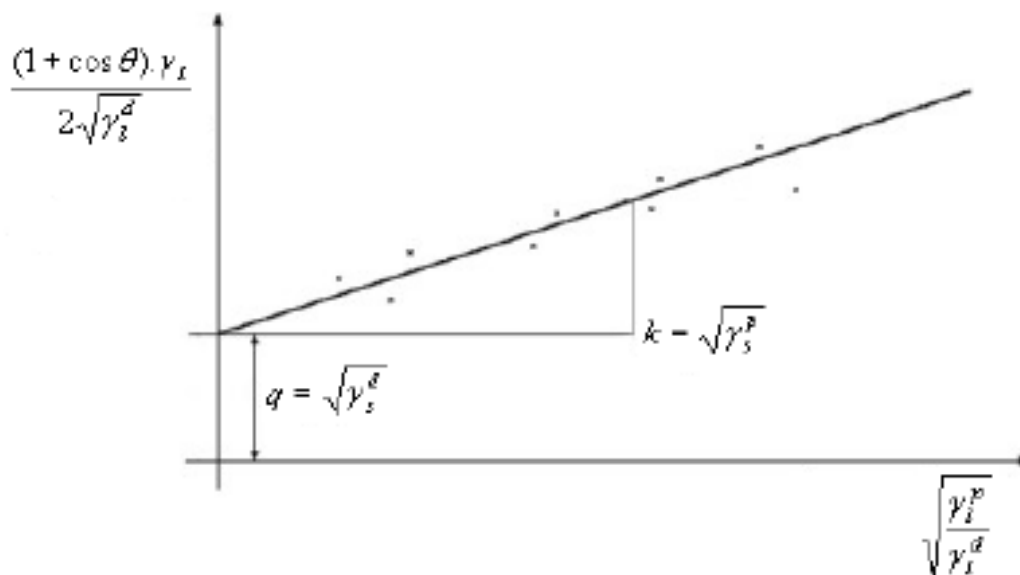
Jako základ OWRK využili rovnici (9) v kombinaci s Youngovou rovnicí:

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \gamma_s + \gamma_l - 2\left(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p}\right) \\ \frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_l}{2\sqrt{\gamma_l^d}} &= \sqrt{\gamma_s^p} \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_s^d} \end{aligned} \quad (9)$$

Dvě neznámé γ_s^d a γ_s^p vyskytující se v rovnici (9) mohou být určeny pomocí měření kontaktního úhlu na daném povrchu za užití nejméně dvou různých kapalin, u nichž známe hodnoty γ_l^d a γ_l^p . [40]

$$\underbrace{\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_l}{2 \sqrt{\gamma_l^d}}}_y = \underbrace{\sqrt{\gamma_s^p}}_k \underbrace{\sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}}}_x + \underbrace{\sqrt{\gamma_s^d}}_q$$

Z rovnice přímky vyneseme příslušnou závislost, a směrnice nám určuje podíl polární komponenty povrchové energie látky.



Obr. 46: Graf pro určení disperzní a polární složky povrchového napětí pevných látek dle OWRK [19]

Metoda OWRK se běžně využívá u studií o povrchovém napětí polymerních vrstev. [19]

Tab. 12: Povrchové napětí γ_l (mN/m) vybraných kapalin, jejich disperzní γ_l^d (mN/m) a polární γ_l^p (mN/m) podíl [46]

Liquid	γ_l	γ_l^d	γ_l^p
n-Hexane	18.4	18.4	0
Dimethyl siloxane	19.0	16.9	2.1
Cyclohexane	25.5	25.5	0
Decalin	29.9	29.9	0
Bromobenzene	36.3	36.0	≈ 0
Tricresyl phosphate	40.9	39.2 ± 4	≈ 1
Aniline	42.9	24.2	18.7
α -Bromonaphthalene	44.6	47 ± 7	≈ 0
Trichlorobiphenyl	45.3	44 ± 6	≈ 1.3
Glycol	48.0	33.8	14.2
Methylene iodide	50.8	49.5 ± 1	≈ 1.3
Formamide	58.2	39.5 ± 7	≈ 19
Glycerol	63.4	37.0 ± 4	≈ 26
Water	72.8	21.8 ± 0.7	51

10.3 Wu teorie

Pro tento přístup taky platí, že povrchová energie je součtem disperzní γ^d a polární části γ^p . Jediným rozdílem ve výpočtu je užití harmonického průměru (místo geometrického) pro polární polymery. Využitím Duprého rovnice a Young-Duprého je rovnice pro výpočet povrchové energie upravena následovně:

$$\gamma_a = \gamma_s + \gamma_l - 4 \left(\frac{\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} + \frac{\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p} \right) \quad (10)$$

$$(1 + \cos \theta) \gamma_l = 4 \left(\frac{\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} + \frac{\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p} \right) \quad (11)$$

V této rovnici jsou dvě neznámé γ_s^d , γ_s^p . Hodnoty γ_{dl} , γ_{pl} jsou tabelovány pro dané kapaliny (tab. 11). Wu naměřil kontaktní úhly pro dvě kapaliny na pevném povrchu, poté na základě řešení rovnice (11) stanovil substituční podmínky pro každou kapalinu:

$$(b_1 + c_1 - a_1) \gamma_s^d \cdot \gamma_l^d + c_1 (b_1 - a_1) \gamma_s^d + b_1 (c_1 - a_1) \gamma_l^d - a_1 b_1 c_1 = 0 \quad (12)$$

$$(b_3 + c_3 - a_3)\gamma_i^d \gamma_i^p + c_3(b_3 - a_3)\gamma_i^d + b_3(c_3 - a_3)\gamma_i^p - a_3 b_3 c_3 = 0 \quad (13)$$

Pro kapalinu 1 proměnné a_1, b_1, c_1 :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{4} \gamma_{i,1} (\cos \theta_1 + 1) \\ b_1 &= \gamma_{i,1}^d \\ c_1 &= \gamma_{i,1}^p \end{aligned} \quad (14)$$

Pro kapalinu 2 proměnné a_2, b_2, c_2 :

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{1}{4} \gamma_{i,2} (\cos \theta_2 + 1) \\ b_2 &= \gamma_{i,2}^d \\ c_2 &= \gamma_{i,2}^p \end{aligned} \quad (15)$$

Je třeba si uvědomit, že řešením rovnic jsou získány dvě řešení $\gamma_s^d, a\gamma_s^p$. Pouze jedno však popisuje skutečnou povrchovou energii. Jak vybrat to správné řešení? [47], [48]

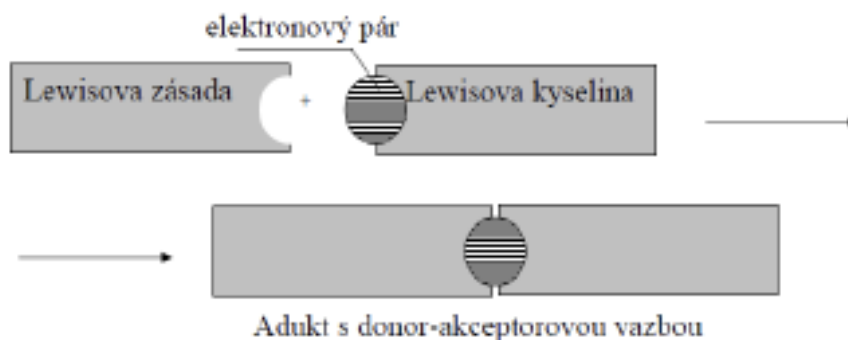
Výběr správného řešení závisí na znaménku. Jestliže je jedno řešení kvadratické rovnice záporné, nemají tyto záporné hodnoty povrchové energie z fyzikálního hlediska smysl. Proto řešení s kladným znaménkem poskytuje správný výsledek měření.

Tab. 13: Komponenty povrchové energie pro vybrané polymery (mN/m) – povrchové napětí γ_s (mN/m), kritická hodnota povrch. napětí (volné povrch. energie) γ_c (mN/m), disperzní γ^d (mN/m) a polární γ^p (mN/m) podíl [45].

Polymer	γ_c	γ_s	γ^d	γ^p	Polarity (γ^p/γ_s)	$-d\gamma_s/dT$
Polyethylene-linear	31	35.7	35.7	0	0	0.057
Polyethylene-branched	33	35.3	35.3	0	0	0.067
Polypropylene-isotactic	29	30.1	30.1	0	0	0.058
Polyisobutylene	27	33.6	33.6	0	0	0.064
Polystyrene	32.8	40.7	(34.5)	(6.1)	(0.15)	0.072
Poly(α -methyl styrene)	-	39.0	(35)	(4)	(0.1)	0.058
Poly(vinyl fluoride)	28	36.7	(31.2)	(5.5)	0.15	-
Poly(vinylidene fluoride)	-	30.3	(23.3)	(7)	0.23	-
Poly(trifluoro ethylene)	22	23.9	19.8	4.1	0.17	-
Poly(tetrafluoro ethylene)	18.3	20	18.4	1.6	0.08	0.058
Poly(vinyl chloride)	39	41.5	(39.5)	(2)	(0.05)	-
Poly(vinylidene chloride)	40	45.0	(40.5)	(4.5)	(0.1)	-
Poly(chloro trifluoro ethylene)	31	30.9	22.3	8.6	0.28	0.067
Poly(vinyl acetate)	37	36.5	24.5	1.2	0.33	0.066
Poly(methyl acrylate)	-	41.0	29.7	10.3	0.25	0.077
Poly(ethyl acrylate)	-	37.0	30.7	6.3	0.17	0.077
Poly(methyl methacrylate)	39	41.1	29.6	11.5	0.28	0.076
Poly(ethyl methacrylate)	-	35.9	26.9	9.0	0.25	0.070
Poly(butyl methacrylate)	-	31.2	26.2	5	0.16	0.059
Poly(isobutyl methacrylate)	-	30.9	26.6	4.3	0.14	0.060
Poly(tert. butyl methacrylate)	-	30.4	26.7	3.7	0.12	0.059
Poly(hexyl methacrylate)	-	30.0	(27.0)	(3)	(0.1)	0.062
Poly(ethylene oxide)	43	42.9	30.9	12	0.28	0.076
Poly(tetramethylene oxide)	-	31.9	27.4	4.5	0.14	0.061
Poly(ethyleneterephthalate)	43	44.6	(35.6)	(9)	(0.2)	0.065
Polyamide 66	42.5	46.5	(32.5)	(14)	(0.3)	0.065
Poly(dimethyl siloxane)	24	19.8	19	0.8	0.04	0.048

10.4 Acido-bazická (van Oss) teorie

Jako kyseliny Lewis chápe jako ty částice, které jsou schopny využít volný elektronový pár zásady k vytvoření vzájemné kovalentní (donor-akceptorové) vazby. Lewisovými kyselinami jsou všechny elektrofilní částice. Patří sem např. kationty (Al^{3+} , Cu^{2+} , H^+ ,...)



Obr. 47: Acidobazická interakce podle Lewisovy teorie kyselin a zásad [47]

V souladu s Lewisovou teorií kyselin a zásad van Oss, Good a Chaudhury definovali dva nové parametry:

γ^+ kyselá složka povrchové volné energie (elektron-akceptor)

γ^- zásaditá složka povrchové volné energie (elektron-donor)

Celková acidobazická složka mezipovrchové energie je γ^{AB} , která je definována následujícím vztahem:

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (16)$$

Acidobazické interakce γ^{AB} , zahrnují všechny elektronové donor-akceptorové interakce včetně vodíkových můstků. Také zahrnuje interakce párů, trojic, čtveřic atd. molekul uvnitř každé fáze ve všech skutečných konfiguracích. Podle této metody je povrchové napětí definováno jako součet dvou složek: nepolární γ^{LW} Lifshitz - van der Waalsovy složky mezipovrchového napětí a polární acidobazické složky mezipovrchového napětí γ^{AB} , vzniklého transferem (interakcí) elektronů mezi donory a akceptory. Jednou z nejběžnějších interakcí tohoto typu jsou vodíkové vazby [47], [49]:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad (17)$$

Povrchová energie je poté vypočítána z využitím Youngovy rovnice:

$$(1 + \cos \theta) \gamma_l = 2 \left(\sqrt{\gamma_l^{LW} \gamma_s^{LW}} + \sqrt{\gamma_l^+ \gamma_s^-} \sqrt{\gamma_l \gamma_s} \right) \quad (18)$$

kde: $\gamma_l^{LW}, \gamma_s^{LW}$ jsou Lifshitz - van der Waalsovy složky mezipovrchového napětí pro kapalinu a pevnou látku, γ_l^+ značí elektron-akceptorový parametr acido-bazické

komponenty volné povrchové energie (Lewisův kyselý parametr volné povrchové energie). γ_i^- značí elektron-donorový parametr acido-bazické komponenty volné povrchové energie (Lewisův zásaditý parametr volné povrchové energie). Levá strana rovnice reprezentuje koheze kapaliny a pravá strana adhezi mezi pevnou látkou a kapalinou. Zůstávají tři neznámé: γ_s^{LW} , γ_i^+ , γ_i^- , a proto je nutné měření se třemi kapalinami o známé povrchové energii (γ_i^{LW} , γ_i^+ , γ_i^-). Používané kapaliny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 13). Alespoň dvě by měly být polární (voda).

Nejdůležitějším důsledkem je, že příspěvek acido-bazických interakcí může způsobit zápornou celkovou mezipovrchovou energii. Van Oss-Goodova metoda byla úspěšně aplikována na interakce polymeru a proteinu s kapalinami, stanovení povrchové volné energie polymerů, polymerních roztoků v rozpouštědlech a odhadu kritické micelární koncentrace činidel, dále na interakce voda-aromatické látky. Tato metoda byla také aplikována v biochemii jako proteinová adsorpce, buněčná adheze. [19]

Tab. 14: Povrchové napětí vybraných kapalin a jejich komponent ($mJ.m^{-2}$) navržené van Ossem [49]

Liquids	γ	γ^{LW}	γ^+	γ^-
Water	72.8	21.8	25.5	25.5
Glycerol	64	34	3.92	57.4
Formamide	58	39	2.28	39.6
Ethylene glycol	48.0	29	1.92	47.0
Dimethyl sulfoxide	44	36	0.5	32
Diodomethane	50.80	50.8	0	0
1-Bromonaphthalene	44.4	44.4	0	0
Hexadecane	27.5	27.5	0	0
Tetradecane	26.6	26.6	0	0
Dodecane	25.4	25.4	0	0
Decane	23.8	23.8	0	0
Pentane	16.1	16.1	0	0

Tab. 15: Povrchové napětí vybraných typů polymerů, jejich komponent a parametry měřené při teplotě 20°C v mJ.m-2 podle van Osse a Gooda [50]

Polymer	γ	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
Polyethylene	33.0	33.0	0	0	0
Poypropylene	25.7	25.7	0	0	0
Polyisobutylene	25.0	25.0	0	0	0
Polystyrene	42	42	0	0	0
Poly(vinyl chloride)	43.8	43.0	0.75	0.04	3.5
Poly(vinyl alcohol)	42	42	0	0	17-57
Poly(vinyl pyrrolidone)	43.4	43.4	0	0	29.7
Poly(methyl methacrylate)	40.0	40.0	0	0	14.6
Poly(ethylene oxide)	45.9	45.9	0	0	58.5
Poly(oxy tetramethylene)	44.0	41.4	2.6	0.06	27.6
Polyamide 6,6	37.7	36.4	1.3	0.02	21.6
Cellulose	54.5	44.0	10.5	1.6	17.2
Cellulose acetate	52.6	44.9	7.7	0.8	18.5
Cellulose nitrate	45.1	44.7	0.4	0.003	13.9

10.5 Metoda podle Neumanna, Kwoka, stavová rovnice

Neumann a Kwok navrhovali užití termodynamické stavové rovnice ve tvaru:

$$\gamma_d = f(\gamma_s, \gamma_l) \quad (19)$$

kde povrchové napětí γ_{sl} (mezi pevnou látkou a kapalinou) by mělo být uvažováno jako funkce povrchové energie kapaliny a povrchové energie ideálního pevného povrchu, tedy hladkého, homogenního, bez trhlinek. Mezifázové napětí zde závisí pouze na hodnotách γ_s, γ_l . Stavová rovnice byla zapsána Berthelotem ve tvaru, známým jako Berthelotovo kombinační pravidlo:

$$\cos \theta = -1 + 2\sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_l}} \quad (20)$$

Neumann stanovil rovnici:

$$\gamma_d = \frac{(\gamma_s - \gamma_l)^2}{(1 - 0,015\sqrt{\gamma_s \gamma_l})} \quad (21)$$

S využitím Youngovy rovnice je možné stanovit hodnotu povrchové energie pevné látky:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_s + (0,015\gamma_s - 2)\sqrt{\gamma_s\gamma_l}}{\gamma_l(0,015\sqrt{\gamma_s\gamma_l} - 1)} \quad (22)$$

Zvážíme-li odchylky od geometrického průměru, zavádí se proměnná, která slouží jako korelační faktor. Tento koeficient je označován jako interakční parametr:

$$\mathbb{W}_d = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_d = 2\Theta\sqrt{\gamma_s\gamma_l} \quad (23)$$

Interakční parametr je pro ideální chování roven 1. Good se pokusil tento parametr vypočítat pomocí statistické termodynamiky, avšak pouze pro relativně jednoduché systémy, které nezahrnují vodíkové vazby a interakce zprostředkovávající přenos náboje. Protože je výpočet pro komplexnější systémy příliš složitý, navrhl Kwok empirický vztah:

$$\Theta = e^{-\beta(\gamma_l - \gamma_s)^2} \quad (24)$$

kde β značí universální konstantu, která nečíslně rovná hodnotě $0,0001247(m^2mJ^{-1})^2$.

Užitím těchto parametrů dále odvodil:

$$\gamma_d = \gamma_s + \gamma_l - 2\sqrt{\gamma_l\gamma_s e^{-\beta(\gamma_l - \gamma_s)^2}} \quad (25)$$

Jestliže je známo povrchové napětí kapaliny, můžeme s využitím Youngovy rovnice stanovit povrchovou energii pevné látky [37]:

$$\cos \theta = 2\sqrt{\frac{\gamma_s e^{-\beta(\gamma_l - \gamma_s)^2}}{\gamma_l}} - 1 \quad (26)$$

Tento přístup se stal velmi kontroverzním v mnohých ohledech. V mnoha publikacích zazněl nesouhlas s jeho užíváním. Nejprve, bylo ukázané Morrisonem, že Neumannovy teorie jsou založeny na chybné termodynamice. Jsou považovány za neúplné a rozhodně nejsou univerzální pro kalkulace povrchových napětí. Neumann a spolupracovníci

nebrali v potaz většinu chemických příspěvků jako jsou vodíkové vazby, acidobazické interakce, van der Waalsovy vzájemné interakce. Dokonce pro vodu, kde je příspěvek vodíkové vazby kohezni energie a povrchové napětí velmi velký [46], [47], [51].

10.6 Experimentálně naměřené hodnoty povrchového napětí fólií a jejich vyhodnocení

Výsledky naměřené na fóliích metodou sedící kapky o objemu 3 μl . Použitými kapalinami jsou redestilovaná voda, glycerol a ethylenglykol (dále EG).

10.6.1 Vyhodnocení podle metody OWRK

Tab. 16: Tabulkové hodnoty kapalin pro metodu OWRK

OWRK	γ_L [mN/m]	γ_{Ld} [mN/m]	γ_{Lp} [mN/m]
Glycerol	64	34,4	29,5
EG	48	31,4	16,4
voda	72,8	21,8	50

Tab. 17: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OAN 50 μm

OAN 50 μm		
	θ [°]	Chyba měř.
Voda	60,91	0,3
Glycerol	59,47	0,3
EG	48,74	0,4

Tab. 18: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OASN 21/50 μm

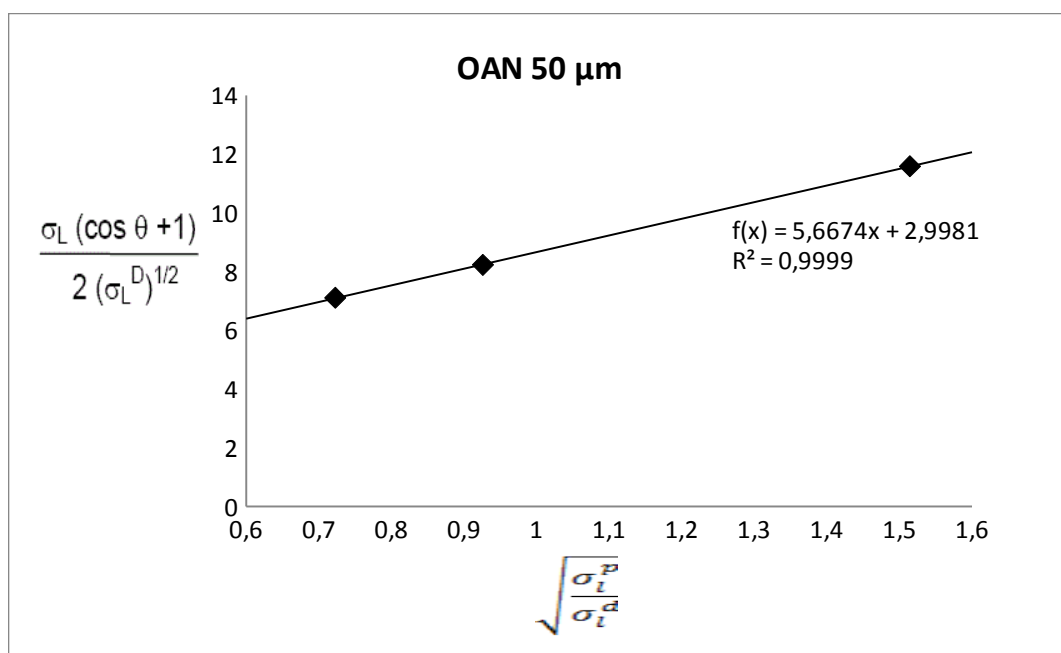
OASN 21/50 μm		
	θ [°]	Chyba měř.
Voda	61,70	0,2
Glycerol	59,61	0,3
EG	42,80	0,2

Tab. 19: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OCSN 22/50 μm

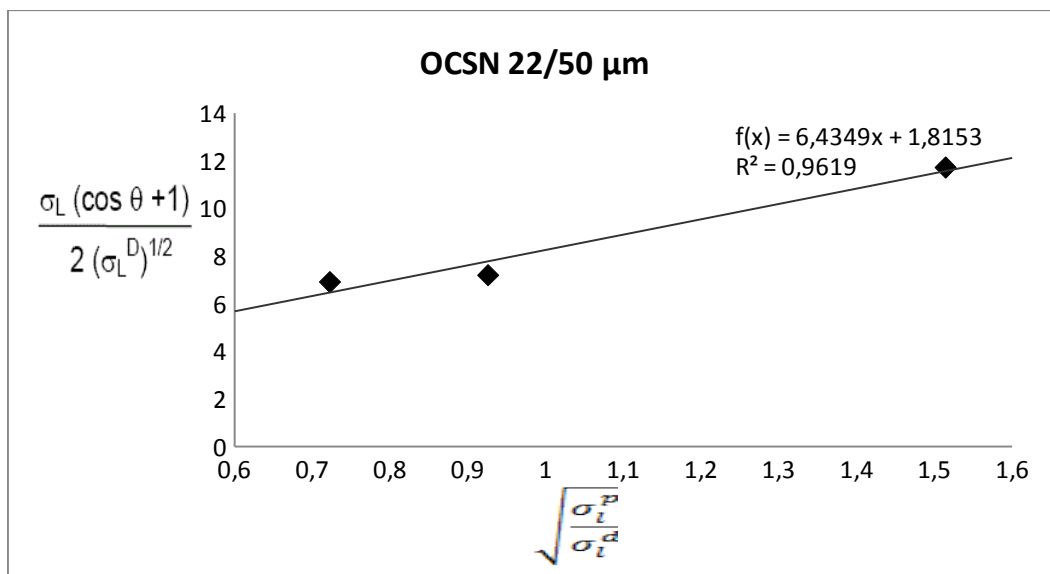
OCSN 22/50 μm		
	θ [°]	Chyba měř.
Voda	59,86	0,1
Glycerol	71,48	0,4
EG	52,32	0,3

Tab. 20: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OAKN 50 μm

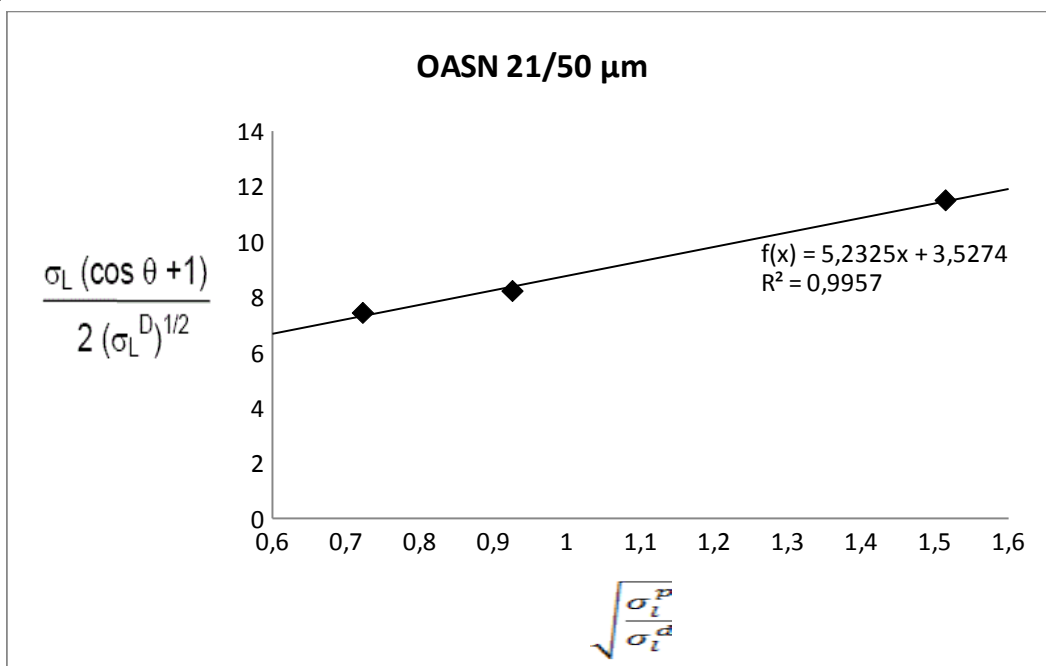
OAKN 22/50 μm		
	θ [°]	Chyba měř.
Voda	62,35	0,3
Glycerol	53,39	0,4
EG	37,86	0,3



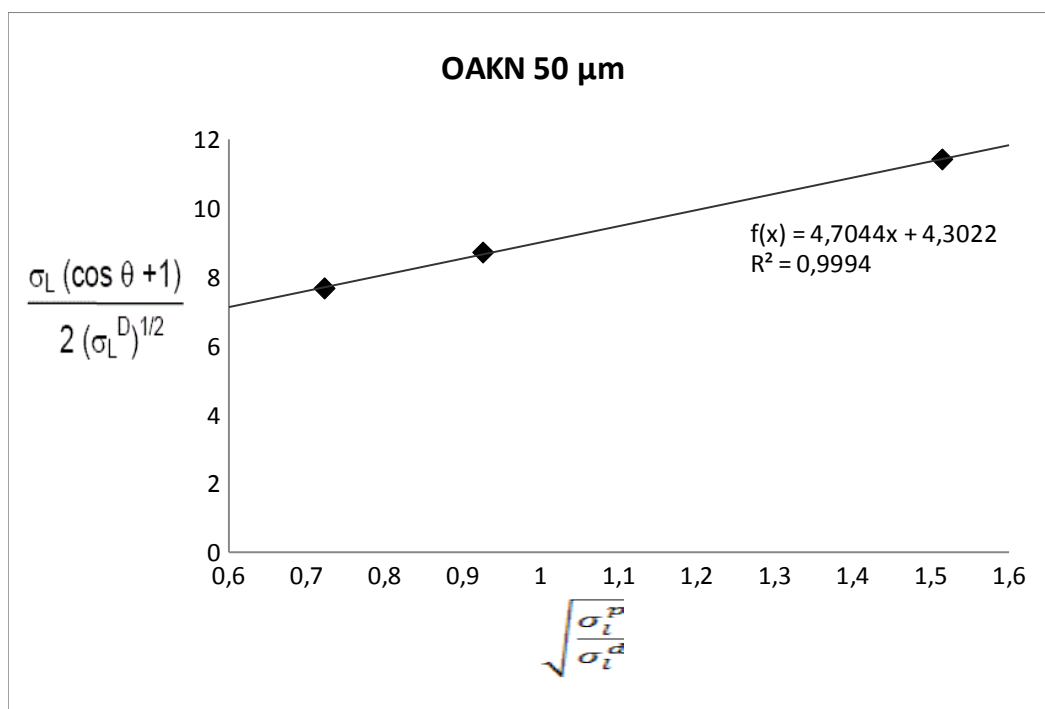
Obr. 48: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie OAN 50 μm podle OWRK



Obr. 49: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie OCSN 22/50 μm podle OWRK



Obr. 50: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie OASN 21/50 μm podle OWRK



Obr. 51: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie OAKN 50 m podle OWRK

Pro zjištění povrchové energie využijeme rovnice regrese, ze které vypočteme disperzní a polární složku.: $y^j = kx + q$; $k =$

$$q = \sqrt{\gamma_s^d}$$

10.6.2 Vyhodnocení podle metody van Oss

Tab. 21: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OAN 50 μm

OAN 50 μm					
Použitý přístroj	Kapaliny – voda, glycerol, EG				
	γ_s	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
Laboratorní goniometr	46,41	7,18	30,01	7,3584	30,59

1 y je v grafech značeno jako $f(x)$

Tab. 22: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OASN 21/50 μm

OASN 21/50 μm					
Použitý přístroj	Kapaliny – voda, glycerol, EG				
	γ_s	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
Laboratorní goniometr	45,97	6,23	34,09	10,06	28,89

Tab. 23: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OAKN 50 μm

OAKN 50 μm					
Použitý přístroj	Kapaliny – voda, glycerol, EG				
	γ_s	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
Laboratorní goniometr	43,07	16,84	19,99	4,52	22,09

Tab. 24: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OCSN 22/50 μm

OCSN 22/50 μm					
Použitý přístroj	Kapaliny – voda, glycerol, EG				
	γ_s	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
Laboratorní goniometr	40,17	6,74	33,27	8,96	30,88

10.6.3 Vyhodnocení podle metody Wu

Tab. 25: Hodnoty povrchového napětí u fólie OAN 50 μm dle metody Wu

OAN 50 μm				
Použitý přístroj	Kapaliny	Povrchové energie a jejich komponenty		
		γ_s	γ^d	γ^p
		[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
	Voda+Glycerol	43,45	12,03	31,42
Laboratorní goniometr	Voda+EG	43,40	12,96	30,44
	Glycerol+EG	52,33	10,88	42,45
	Průměr	46,41	11,96	34,77
	Chyba měření	3,2	0,6	4,2

Tab. 26: Hodnoty povrchového napětí u fólie OASN 21/50 μm dle metody Wu

OASN 21/50 μm				
Použitý přístroj	Kapaliny	Povrchové energie a jejich komponenty		
		γ_s	γ^d	γ^p
		[Nm/m]	[Nm/m]	[Nm/m]
	Voda+Glycerol	42,85	12,39	30,47
Laboratorní goniometr	Voda+EG	43,09	15,67	27,43
	Glycerol+EG	51,97	11,58	40,39
	Průměr	45,97	13,21	32,76
	Chyba měření	3,2	1,4	4,2

Tab. 27: Hodnoty povrchového napětí u fólie OCSN 22/50 μm dle metody Wu

OCSN 22/50 μm				
Použitý přístroj	Kapaliny	Povrchové energie a jejich komponenty		
		γ_s [Nm/m]	γ^d [Nm/m]	γ^p [Nm/m]
	Voda+Glycerol	43,87	17,36	26,51
Laboratorní goniometr	Voda+EG	44,36	11,26	33,10
	Glycerol+EG	32,27	10,33	21,94
	Průměr	40,17	12,98	27,18
	Chyba měření	4,3	2,4	3,5

Tab. 28: Hodnoty povrchového napětí u fólie OAKN 50 μm dle metody Wu

OAKN 50 μm				
Použitý přístroj	Kapaliny	Povrchové energie a jejich komponenty		
		γ_s [Nm/m]	γ^d [Nm/m]	γ^p [Nm/m]
	Voda+Glycerol	42,96	19,39	23,57
Laboratorní goniometr	Voda+EG	42,59	18,43	24,16
	Glycerol+EG	43,65	17,76	25,89
	Průměr	43,07	18,53	24,54
	Chyba měření	0,3	0,5	0,7

10.6.4 Vyhodnocení podle stavové rovnice

Při vyhodnocování vycházíme ze stavové rovnice: $\cos \theta = -1 + 2 \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_l}}$

Z této rovnice si vyjádříme a vypočítáme γ_s .

Tab. 29: Povrchová energie fólií vypočtena ze stavové rovnice (metoda sedící kapky)

Stavová rovnice				
Kapaliny	γ_s [mN/m]			
	OAN 50 μm	OASN 21/50 μm	OCSN 22/50 μm	OAKN 50 μm
Voda	40,19	39,30	40,95	66,27
Glycerol	36,39	36,40	27,42	41,05
EG	33,05	36,07	31,32	38,36
Průměr	36,54	37,26	33,23	48,56
Chyba měření	2,2	1,1	4,3	9,6

Diskuze výsledků

Při měření povrchové energie polymerních fólií (s nánosem nebo bez) se v provozní praxi nejčastěji používá metoda inkoustů s daným povrchovým napětím. Pomocí ní, byly u měřených vzorků stanoveny povrchové energie shodné s očekávanými hodnotami. Kalkulace energií z měřených kontaktních úhlů smáčení poskytly oproti tomu výsledky značně neshodné.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Získané výsledky ukazují, že co do správnosti hodnocení povrchové energie polymerních fólií a jejich úprav a adheze tenkého filmu k polymerní fólii jsou poměrně spolehlivé metody založené na inkoustech se známým povrchovým napětím a odlupovací zkouška za pomoci růžového laku. Obě jsou snadno použitelné v provozních podmínkách.

Wilhelmyho metodou byly stanoveny dynamické kontaktní úhly smáčení. Při přepočtu na povrchovou energii však nastává problém, jestli pro něj použít postupující nebo ustupující úhel, či jejich střední hodnotu (průměr kosinů postupujícího a ustupujícího úhlu). Dále situaci komplikuje fakt, že při měření musí být použity dva vzorky orientované tak, aby strana s povrchovou úpravou byla vystavena testovací kapalině. Také musí být známy přesné rozměry vzorku. Provozní použití znesnadňuje povaha přístroje (velmi citlivé váhy) a jeho cena.

Metoda založená na měření kontaktního úhlu smáčení sedící kapky je s výhodou použitelná v provozních podmínkách. Je nenáročná na přístrojové vybavení a je poměrně rychlá. Při měření konkrétních vzorků se ale ukázalo, že hodnoty kontaktních úhlů na různých površích jsou si značně podobné. To se odrazilo i na hodnotách výsledné povrchové energie zjištěné z různých matematických modelů. Srovnatelných výsledků s metodou testovacích inkoustů bylo dosaženo pouze pro vzorek OAN (neupravená) a model OWRK (hodnoty 41 a cca 41,2 mN/m). Metoda van Oss a Wu zase poskytla srovnatelné výsledky u vzorku OCSN22 (shodně 40 mN/m). Je možné, že jde o vliv siliky, která se používá jako antiblokovací přísada do všech BOPET fólií a při měření zejména s vodou může ovlivňovat výsledné hodnoty kontaktních úhlů. Přítomnost siliky na povrchu je potvrzena měřením pomocí AFM.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala povrchovými vlastnostmi BOPET fólií a ultratenkých vrstev na BOPET fóliích. Byly charakterizovány čisté výchozí fólie, fólie upravené pomocí korony a fólie s ultratenkým nánosem na bázi akrylátu a kopolyesteru. Cílem bylo zhodnotit vhodnost v současnosti používaných metod pro charakterizaci povrchové energie povrchu a adheze nánosu k polymerní fólii samotné. Bylo zjištěno, že metoda založená na inkoustech se známým povrchovým napětím poskytuje očekávané výsledky u všech typů povrchů (výchozích i různě modifikovaných). Stejně tak byla potvrzena vhodnost použití metody založené na odtrhování růžového laku při charakterizaci adheze nánosu.

Měření statického a dynamického kontaktního úhlu smáčení mělo být vhodnou alternativou k výše uvedené zkoušce pomocí inkoustů. Z provozního hlediska je metoda sedící kapky poměrně vhodná – cena přístroje je nízká, měření je relativně rychlé. U dynamického kontaktního úhlu smáčení (Wilhelmyho metoda) je provozní aplikace komplikována povahou přístroje (v principu jde o analytické váhy) a jeho cenou. Ukázalo se však, že metoda sedící kapky poskytovala velmi podobné hodnoty kontaktních úhlů smáčení i na površích, u kterých byl předpoklad, že se budou jejich povrchové vlastnosti výrazně lišit. Následný přepočítání kontaktního úhlu na povrchovou energii tento nesoulad potvrdil, protože srovnatelných výsledků s „inkoustovou“ metodou bylo dosaženo pouze u vzorku OAN (metoda OWRK) a OCSN 22 (metoda van Oss a Wu). Univerzální vzorec pro hodnocení všech povrchových úprav jedním matematickým modelem nebyl nalezen. Tento nesoulad by bylo možné přisoudit charakteru povrchu fólie, na které jsou přítomny agregáty siliky. Tato je používána jako antiblokační aditivum a při měření (zejména s vodou) může ovlivňovat výsledný kontaktní úhel.

Mikroskopické metody (optický mikroskop, SEM, AFM) lze pro daný účel použít, z mnoha důvodů (cena přístroje, obsluhy, spotřebního materiálu) však nejsou vhodné pro rutinní testování.

Jako ideální kombinace pro hodnocení povrchové energie/adheze nánosu se tedy jeví kalibrované inkousty a odlupovací zkouška. U odlupovací zkoušky by bylo vhodné zaměřit pozornost na nalezení pigmentu nebo barviva, který by učinil vyhodnocení zkoušky snadnější. S výhodou by bylo možné použít systém na bázi fluorescenční barvy v kombinaci se zdrojem ultrafialového světla. Takový systém by ale neměl ovlivnit vlastnosti výchozího laku (adheze k substrátu, koheze, doba schnutí).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Produkty: Fólie. *Invos spol. s r.o.* [online]. 2011 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:<http://www.invos.cz/cz/produkty/folie.html>
- [2] Vytlačování: Výroba fólií a desek vytlačováním. *Katedra strojírenské technologie TU Liberec* [online]. 2008 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z:http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.html
- [3] DUCHÁČEK V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zracování, použití*. 2. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006.
- [4] KUTA A.: *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Vydavatelství VŠCHT, Praha 1999.
- [5] Vlastnosti. *Invos spol. s r. o.* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z:<http://www.invos.cz/cz/vlastnosti.html>
- [6] MEISSNER B., ZILVAR V.: *Fyzika polymerů*. SNTL, Praha 1987.
- [7] Polyethylentereftalát. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z:<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylentereftal%C3%A1t>
- [8] *Innovia Films* [online]. 2012 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.innoviafilms.com/>
- [9] BAJGAR, Z. Fatra a. s. *Technologie výroby BOPET fólií a laminátů*. Chropyně, 2010.
- [10] EBNESAJJAD S.: *Plastic films in food packaging: materials, technology and applications*. Oxford: William Andrew, 2013.
- [11] Polypropylen. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z:<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [12] *Dunmore Corporation* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.dunmore.com/>
- [13] Polyethylene. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z:<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>

- [14] Produkty. *Dapas, spol. s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.dapas-konice.cz/Produkty/>
- [15] *Fatra a.s.* [online]. 2001-2014 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.fatra.cz/>
- [16] PASHLEY R. M., KARAMAN M. E.: *Applied colloid and surface chemistry*. John Wiley and Sons, New York 2004
- [17] *ABC lepidla: stránky firmy* [online]. [cit. 2014-04-14]. Dostupný z: http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady_teorie_lepeni.pdf
- [18] WOLF, R. A.: *Plastic surface modification: surface treatment and adhesion*. Hanser, München, 2010
- [19] VIKOVÁ M.: *Učební texty – prezentace pdf*. Katedra textilních materiálů. TU Liberec [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupný z: http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/include/osobni_stranky/vikova.martina/teaching/10smac2.pdf
- [20] ČERNÝ F., SOPKO B.: *Fyzika I*. ČVUT v Praze, Praha 2004.
- [21] Fázová rozhraní. In: *VŠCHT v Praze* [online]. 2009-2013 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.html>
- [22] KOLEKTIV ODDĚLENÍ BUNĚČNÉ NEUROFYZIOLOGIE FYZIOLOGICKÉHO ÚSTAVU AVČR. Příručka základních a nepostradatelných znalostí pro každého elektrofyziologa. *Mikroskopy* [online]. Únor 2001 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www2.biomed.cas.cz/d331/vade/mikroskopy.html>.
- [23] BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vydavatelství VŠCHT, Praha 2005
- [24] Mikroskopy [online], poslední revize 29. 11. 2002 [cit. 28. 7. 2004]. Dostupný z: <http://www2.biomed.cas.cz/d331/vade/mikroskopy.html>.
- [25] O mikroskopech. *PF, MUNI Brno* [online]. 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://svp.muni.cz/ukazat.php?docId=39>
- [26] MURPHY D.: *Microscopy and electronic imaging*. John Wiley and Sons, New York 2001.
- [27] KUBÍNEK, R.: *Mikroskopie skenující sondou*. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc 2003.

- [28] Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací [online], [cit. 2014-05-20]. Dostupný z: <http://www.muweb.cz/www/frenky/mikro.html>.
- [29] Pikoškály aneb jak uvidět atom [online], [cit. 2014-05-20]. Dostupný z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_27_pic.html.
- [30] KVÍTEK L., PIKAL P., KOVAŘÍKOVÁ L., HRBÁČ J.: *The study of the wettability of powder inorganic pigments based on dynamic contact angle measurements using Wilhelmy metod*. *Chemica* 41, 2002, [cit. 2014-4-22]. Dostupný z: <http://publib.upol.cz/~obd/fulltext/Chemica41/CHemica41-3.pdf>
- [31] Tenziometrie. *Centrum materiálového výzkumu*. [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-biokoloidu/tenziometrie/>
- [32] DyneTEC Test Ink - Testovací inkousty pro měření povrchového napětí. *Tantec.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.tantec.cz/ostatni-dynetec>
- [33] Povrchové napětí - fixy na testování povrchového napětí. *Gamin s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.gamin.cz/katalog/merici-a-laboratorni-pristroje/priprava-povrchu---cistota/povrchove_napeti_fixy_na_testovani_povrchoveho_napeti
- [34] Film adhesion tests. *Fraunhofer IST* [online]. 2012 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.ist.fraunhofer.de/en/services/analysis_and_quality_assurance/mechanical_characterization/film_adhesion_tests.html
- [35] BUTT H. J., KAPPL M.: *Surface and interfacial forces*. Wiley-VCH. Weinheim 2010
- [36] BAJGAR, Z. Patra a. s. *Metodika chemického nánosu*. Chropyně, 2013.
- [37] Technologie. *VIKTOR trade s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.viktortrade.cz/index.php?nid=11147&lid=cs&oid=2675888>
- [38] CHAN, C. M.: *Polymer surface modification and characterization*. GmbH & Co, Munich 1994
- [39] Tenké vrstvy. In: *Oddělení povrchového inženýrství, ZČU Plzeň* [online]. 2006 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- [40] SMOLKA, P., A. MINAŘÍK, M. RAFAJOVÁ a P. PONÍŽIL. *Přenosný laboratorní goniometr* [funkční vzorek]. 2011.

- [41] Products: Phenom Pro. *Phenom World* [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.phenom-world.com/electron-microscope/phenom-pro>
- [42] Hodnocení přinavosti. *ATRYX s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.atryx.cz/prakticka-prirucka/hodnoceni-prilnavosti/>
- [43] Adherencia: Elcometer. *Elcometer: Inspection equipment* [online]. 2010 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://elcometer.com.mx/adherencia/Elcometer_1542.php
- [44] *Krüss: www stránky firmy* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupný z: <http://www.kruss.de/en/theory/measurements/contact-angle/models/zisman.html>
- [45] ZENKIEWICZ M.: *Methods for the calculation of surface free energy of solids*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME) [online]. 2007 [cit. 2014-05-25]. Dostupný z: http://www.journalamme.org/papers_vol24_1/24116.pdf
- [46] KWOK D.Y., NEUMANN A.W.: *Adv. Colloid Interface Sci.* 81, 167 (1999)
- [47] GAJDOŠÍKOVÁ R., LAPČÍKOVÁ B., LAPČÍK L. Jr.: *Surface Phenomena and wetting of porous solids*, Department of Physics and Materials Engineering, UTB Zlín. Internal communication.
- [48] *Krüss: www stránky firmy* [online]. [cit. 2010-1-15]. Dostupný z: <http://www.kruss.de/en/theory/measurements/contact-angle/models/wu.html>
- [49] KWOK, D.Y.: The usefulness of the Lifshitz–van der Waals/acid base approach for surface tension components and interfacial tensions. *Colloids and surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier, Cambridge 1999.
- [50] KREVELEN D.W., NIJENHUIS K.: *Properties of Polymers - Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions*. Elsevier, Oxford 2009.
- [51] ERBIL H. Y.: *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*. Blackwell Publishing, Oxford 2006.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BOPET	Biaxiálně orientovaný polyethyltereftalát
PET	Polyethyltereftalát
PVC	Polyvinylacetát
PE	Polyethylen
PETP	Polyethyltereftalát polyester
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
PC	Polycarbon
PS	Polystyren
HDPE	High Density Polyethylene
LDPE	Low Density Polyethylene
μm	Mikrometr
m/min	Jednotka rychlosti (navíjení)
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
SiO_2	Oxid křemičitý
BOPP	Biaxiálně orientovaný polyethyltereftalát
Å	Ångström = 0,1 nm
cm^2	Centimetr čtverečný
cm	Centimetr
PTFE	Polytetrafluorethylen
%	Procento
mN/m	Jednotka povrchového napětí = dyn/cm = mJ/m ²
UV	Ultra Violet
σ	Povrchové napětí
F	Síla
L	Délka
$\cos \vartheta$	Úhel smáčení
d	Rozlišovací schopnost, konvenční zraková vzdálenost
λ	Vlnová délka
n	Index lomu
nm	Nanometr

F, F'	Ohniska
f	Ohnisková vzdálenost
y	Předmět
y'	Skutečný obraz předmětu vytvořený objektivem
y''	Neskutečný obraz pozorovaný v okuláru
f_{ok}	Ohnisková vzdálenost okuláru
f_{ob}	Ohnisková vzdálenost objektivu
keV	Kiloelektronvolt
eV	Elektronvolt
mm	Milimetr
SPM	Surface probe microscopy
AFM	Atomic force microscopy
STM	Scanning Tunneling Microscopy
MFM	Magnetic Force Microscopy
SFM	Scanning force microscopy
DFM	Dynamic force microscopy
SEM	Scanning electron microscope/y
APAO	Amorfni poly-alfa-olefiny
ml	Mililitr
Al	Hliník
PVDC	Polyvinylidenchlorid
LED	Light-emitting diode (dioda emitující světlo)
EVA	Ethylenvinylacetát
PUR	Polyuretan
IR	Infrared
PVD	Physical Vapour Deposition
EBPVD	Electron Beam Physical Vapor Deposition
PLD	Pulsed laser deposition
CVD	Chemical vapour deposition
PECVD	Plasma Enhanced CVD
PICVD	Plasma Impulse CVD
TiO ₂	Oxid titaničitý
T _g	Teplota skelného přechodu.
°	Stupeň

θ	Kontaktní úhel smáčení
H	Hystereze
BSD	Backscattered detector
CCD	Charge-coupled device
dyn/cm	Jednotka povrchové energie (stará)
γ_l	Povrchové napětí kapaliny
γ_{crit}	Kritické povrchové napětí
b	Konstanta
γ_s	Povrchové napětí pevné látky
γ_d	Disperzní složka povrchového napětí
γ_p	Polární složka povrchového napětí
OWRK	Owens-Wendt-Rabel-Kaelble
Cu ²⁺	Měďnaté ionty
H ⁺	Vodíkový ion
γ^{AB}	Acidobazická složka povrchové energie
γ^{LW}	Lifshitz - van der Waalsovy složky mezipovrchového napětí
γ^+	Elektron-donorový parametr acidobazické komponenty povrchové energie
γ^-	Elektron-akceptorový parametr acidobazické komponenty povrchové energie

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip vytlačování na chladicí válec.....	14
Obr. 2 Odvalovací navíjecí zařízení.....	15
Obr. 3 Centrální navíjecí zařízení.....	15
Obr. 4: Biaxiální způsob dloužení fólií	16
Obr. 5: Teplotní profil při výrobě biaxiálně orientovaných fólií z PP dvoustupňovým postupem.....	17
Obr. 6: Chemický vzorec polyetylentereftalátu [46].....	20
Obr. 7: Chemický vzorec polypropylenu [47].....	22
Obr. 8: Chemický vzorec polyethylenu [45].....	22
Obr. 9 Chování smáčivé a nesmáčivé kapaliny u stěny nádoby [20].....	30
Obr. 10: Nesmáčivá a smáčivá kapalina na pevném povrchu [21].....	30
Obr. 11: Optický mikroskop s popisem [24].....	32
Obr. 12: Schéma optické soustavy mikroskopu [25].....	33
Obr. 13: Škála elektromagnetického spektra [26].....	35
Obr. 14: Režimy AFM snímání povrchu [29].....	37
Obr. 15: Princip AFM [29].....	37
Obr. 16 Měření úhlu smáčení θ na nakloněné destičce [23].....	39
Obr. 17 Metoda vyvažování destičky [23].....	39
Obr. 18: Hystereze úhlu smáčení [23].....	39
Obr. 19: Fixy a inkousty pro měření povrchového napětí [33].....	41
Obr. 20: Princip nanášení fixy, vlevo neošetřený povrch, vpravo ošetřený [33].....	41
Obr. 21: Technika Peel test [34].....	42
Obr. 22: Princip Scratch testu [34].....	43
Obr. 23 Přenosný laboratorní goniometr s CCD kamerou [40].....	57
Obr. 24: Tensiometr Krüss.....	59
Obr. 25: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii OAN 50 μm	61
Obr. 26: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii OASN 21/50 μm	62
Obr. 27: Graf hysterezní křivky, závislost síly (Force) na posuvu (Position) pro fólii	62
Obr. 28: Měřicí přístroj pro SPM NTEGRA-Prima.....	64
Obr. 29: BOPET fólie 50 μm 2D faze AFM technikou.....	65
Obr. 30: BOPET fólie 50 μm 2D AFM technikou.....	65

Obr. 31: Přístroj pro vyhodnocení SEM snímků Phenom Pro [41].....	65
Obr. 32: SEM - Výřez z BOPET fólie s nanesenou modrou barvou po naříznutí, BSD Topo A.....	66
Obr. 33: SEM - Výřez z BOPET fólie s nanesenou modrou barvou po naříznutí, BSD Full. . 66	
Obr. 34: Elcometer 1542 s příslušenstvím [48].....	69
Obr. 35: Testování adheze nánosu páskou Tesa 4104.....	69
Obr. 36: Ukázka nánosu modré barvy spirálovým pravítkem na 12 μm fólii.....	70
Obr. 37: Testovací páska po odtržení modré barvy z fólie.....	70
Obr. 38: Fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem, křížová zkouška, po odtržení pásky (růžový lak), srovnání s ASTM 1A.....	71
Obr. 39: Fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem, křížová zkouška, po odtržení pásky (modrá barva), srovnání s ASTM 4A – nepatrný odlup.....	71
Obr. 40: Mřížková zkouška u fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem a srovnání s ISO 4 (modrá barva).....	71
Obr. 41: Mřížková zkouška u fólie OASN 21/50 μm pod opt. mikroskopem a srovnání s ISO 3 (růžový lak).....	71
Obr. 42: Ukázka měření povrchového napětí pomocí inkoustu u fólie OCSN 22/50 μm , 40 mN/m.....	73
Obr. 43: Vyhodnocení povrchové energie pomocí inkoustů u všech zkoumaných fólií.....	74
Obr. 44: Graf stanovení kritického povrchového napětí γ crit. [44].....	75
Obr. 45: Graf měření kontaktních úhlů pro sérii kapalinna povrchu teflonu (PTFE) podle Zismanova [44].....	76
Obr. 46: Graf pro určení disperzní a polární složky povrchového napětí pevných látek dle OWRK [19].....	77
Obr. 47: Acidobazická interakce podle Lewisovy teorie kyselin a zásad [47].....	81
Obr. 48: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie OAN 50 μm podle OWRK.....	87
Obr. 49: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie OCSN 22/50 μm podle OWRK.....	88
Obr. 50: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie	88
Obr. 51: Graf pro zjištění polární a disperzní složky povrchové energie fólie OAKN 50 m podle OWRK.....	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Příklady disperzí [16].....	25
Tab. 2: Polární a nepolární materiály, příklady [17].....	26
Tab. 3: Průměrné hodnoty kontaktních úhlů fólií metodou sedící kapky pro vodu.....	58
Tab. 4: Základní charakteristika použité kapaliny.....	59
Tab. 5: Technická specifikace Tensiometru Krüss.....	60
Tab. 6: Hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H, OAN 50 μm	60
Tab. 7: Hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H, OASN 21/50 μm	60
Tab. 8: Průměrné hodnoty postupujícího θ_A a ustupujícího θ_R kontaktního úhlu Wilhemyho metodou s vypočtenou hysterezí H, OCSN 22/50 μm	61
Tab. 9: Charakteristika použitých kapalin.....	63
Tab. 10: Parametry přístroje pro AFM mikroskopii přístrojem NTEGRA-Prima.....	64
Tab. 11: Povrchové napětí γ_l (mN/m) vybraných kapalin, jejich disperzní γ_d (mN/m) a polární γ_p (mN/m) podíl [46].....	78
Tab. 12: Komponenty povrchové energie pro vybrané polymery (mN /m) – povrchové napětí γ_s (mN /m) , kritická hodnota povrch. napětí (volné povrch. energie) γ_c (mN /m) ,disperzní γ_d (mN /m) a polární γ_p (mN /m) podíl [45].....	80
Tab. 13: Povrchové napětí vybraných kapalin a jejich komponent (mJ.m-2) navržené van Ossem [49].....	82
Tab. 14: Povrchové napětí vybraných typů polymerů, jejich komponent a parametry měřené při teplotě 20°C v mJ.m-2 podle van Osse a Gooda [50].....	83
Tab. 15: Tabulkové hodnoty kapalin pro metodu OWRK.....	85
Tab. 16: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OAN 50 μm	85
Tab. 17: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OASN 21/50 μm	86
Tab. 18: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OCSN 22/50 μm	86
Tab. 19: Zprůměrované naměřené hodnoty kontaktního úhlu θ s chybou měření, OAKN 50 μm	86
Tab. 20: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro	89

Tab. 21: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro	89
Tab. 22: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OAKN 50 μm	90
Tab. 23: Hodnoty povrchového napětí stanovené podle van Osse pro OCSN 22/50 μm	90
Tab. 24: Hodnoty povrchového napětí u fólie OAN 50 μm dle metody Wu.....	90
Tab. 25: Hodnoty povrchového napětí u fólie OASN 21/50 μm dle metody Wu.....	91
Tab. 26: Hodnoty povrchového napětí u fólie OCSN 22/50 μm dle metody Wu.....	91
Tab. 27: Hodnoty povrchového napětí u fólie OAKN 50 μm dle metody Wu.....	92
Tab. 28: Povrchová energie fólií vypočtena ze stavové rovnice (metoda sedící kapky).....	92
Tab. 29: Naměřené kontaktní úhly u fólie OAN / 12 μm	108
Tab. 30: Naměřené kontaktní úhly u fólie OASN 21 / 50 μm	109
Tab. 31: Naměřené hodnoty kontaktního úhlu fólie OCSN 22/ 50 μm	110
Tab. 32: Naměřené hodnoty kontaktního úhlu fólie OAKN 50 μm	111

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P 1: Naměřené kontaktní úhly metodou sedící kapky.

PŘÍLOHA P 1: NAMĚŘENÉ KONTAKTNÍ ÚHLY METODOU SEDÍCÍ KAPKY.

Tab. 30: Naměřené kontaktní úhly u fólie OAN / 12 μm

OAN 12 μm Č. měření	Objem kapky				
	2 μl	3 μl	4 μl	5 μl	6 μl
1	61,403	60,546	63,851	61,459	60,287
2	62,481	61,472	66,527	62,428	59,741
3	66,631	60,248	62,248	60,539	60,238
4	62,789	63,217	62,948	65,868	58,898
5	63,600	63,080	64,352	66,275	58,525
6	60,877	66,434	62,707	66,844	58,880
7	62,333	64,281	65,072	64,712	59,168
8	63,199	63,018	62,342	61,982	59,368
9	61,843	64,111	61,411	60,428	59,644
10	60,805	66,579	64,262	61,092	60,812
11	61,864	66,436	63,765	63,401	59,615
12	63,280	64,133	67,466	61,554	60,132
13	62,043	66,696	66,841	63,175	61,082
14	62,277	64,031	63,653	62,859	63,653
15	59,939	65,955	65,284	63,831	59,957
16	60,377	65,114	63,291	63,768	60,181
17	61,445	66,678	69,319	62,708	61,444
18	63,856	65,313	66,853	63,035	62,199
19	61,968	63,832	67,898	63,035	59,732
20	65,491	66,523	64,290	65,985	59,642
21	64,792	64,786	64,081	66,605	59,558
22	59,207	63,744	64,896	67,875	58,726
23	63,498	65,930	64,995	65,464	59,360
24	64,418	64,999	61,485	65,994	61,923
25	61,232	65,923	66,775	64,405	59,061
26	64,687	65,845	63,135	67,854	62,650
27	64,905	66,418	64,134	66,153	59,077
28	64,864	65,445	64,500	65,307	59,114
29	62,866	64,850	65,448	66,061	62,940
30	60,320	64,782	64,798	65,119	61,024
31	59,974	65,978	62,522	63,094	60,175
32	64,061	63,835	61,007	65,371	59,968
33	63,458	63,611	62,066	64,434	60,962
34	63,053	65,034	64,265	65,647	59,515
35	64,575	64,637	66,647	66,024	61,099
36	63,224	65,275	66,281	64,837	60,910
37	65,139	64,911	66,508	64,069	61,330
38	61,371	66,278	62,473	66,792	61,946
39	66,281	65,071	66,923	63,561	61,130
40	65,388	63,633	66,903	65,710	62,959
Průměr	62,90	64,72	64,61	64,38	60,42
Chyba	0,29	0,25	0,32	0,31	0,21

Tab. 31: Naměřené kontaktní úhly u fólie OASN 21 / 50 μm

OASN 21/50 Měření č.	Objem kapky vody				
	2 μl	3 μl	4 μl	5 μl	6 μl
1	62,306	61,258	66,188	57,283	55,335
2	59,632	60,327	67,676	53,916	55,026
3	63,953	60,045	67,365	54,780	55,165
4	59,246	60,588	67,064	56,296	54,690
5	61,019	61,722	64,687	55,881	56,212
6	60,081	60,627	65,532	57,389	54,625
7	62,993	59,869	66,741	56,622	53,908
8	58,855	59,891	68,183	57,767	53,878
9	58,100	62,004	67,534	58,573	54,032
10	62,741	62,187	67,107	59,851	53,081
11	63,017	60,103	65,622	56,668	52,417
12	58,208	61,587	67,496	57,082	52,662
13	58,579	61,801	65,943	58,101	53,107
14	60,388	61,265	67,663	58,243	52,787
15	59,314	60,086	67,679	59,543	52,714
16	58,678	60,929	67,271	60,438	51,704
17	61,163	61,168	67,184	58,472	53,757
18	63,576	59,847	65,191	58,746	51,249
19	59,236	60,708	68,538	61,695	52,856
20	61,608	59,635	63,997	59,259	52,276
21	62,899	59,851	63,079	59,274	53,057
22	63,284	60,700	66,508	59,165	52,945
23	62,459	60,660	68,179	58,827	55,527
24	65,175	60,676	67,990	58,655	53,677
25	60,708	61,120	67,934	58,286	54,950
26	60,644	61,598	68,996	57,895	54,485
27	60,753	62,195	68,943	59,495	56,350
28	62,525	62,595	68,375	58,016	52,770
29	58,225	64,757	68,748	58,893	54,656
30	59,769	61,869	66,944	57,854	56,170
31	60,813	62,090	68,870	57,634	54,721
32	59,806	63,230	67,076	57,539	54,989
33	62,782	63,820	68,514	56,330	53,678
34	63,382	62,398	66,625	58,116	54,514
35	62,565	63,861	68,697	58,092	55,613
36	62,391	63,511	69,309	57,448	53,818
37	59,849	63,984	68,490	57,994	55,102
38	60,342	63,645	70,060	56,959	53,745
39	61,128	63,477	62,380	59,485	52,868
40	61,974	66,243	63,851	56,522	54,432
Průměr	61,10	61,70	67,11	57,98	53,99
Chyba	0,29	0,24	0,27	0,23	0,20

Tab. 32: Naměřené hodnoty kontaktního úhlu fólie OCSN 22/ 50
 μm

OCSN 22/50 Č. měření	Objem kapky vody				
	2 μl	3 μl	4 μl	5 μl	6 μl
1	62,299	59,770	59,105	63,684	64,149
2	60,350	60,689	59,458	61,674	64,152
3	60,873	59,293	61,747	63,049	62,899
4	59,059	59,242	60,055	62,611	62,252
5	58,295	61,170	60,542	63,681	61,703
6	62,966	60,202	60,930	62,960	62,380
7	61,259	58,998	59,163	63,652	64,339
8	60,751	58,942	58,324	63,752	62,278
9	61,699	59,739	60,392	64,246	62,919
10	63,159	59,184	59,309	63,194	62,455
11	61,080	59,646	58,462	64,165	64,131
12	60,553	59,428	58,221	64,469	63,420
13	62,729	60,076	59,050	64,091	62,516
14	59,872	59,897	60,067	64,058	62,722
15	60,129	59,321	60,257	63,913	63,481
16	62,614	58,964	59,261	64,748	64,133
17	62,028	60,937	59,323	64,455	63,547
18	62,779	59,823	57,937	64,454	62,418
19	61,829	59,376	59,942	63,588	62,449
20	60,239	60,539	59,221	63,089	61,595
21	60,592	60,499	60,055	63,614	62,773
22	62,669	60,848	58,745	62,806	62,378
23	58,646	59,705	58,553	64,492	61,985
24	63,884	61,036	61,543	64,603	62,982
25	60,849	58,522	59,428	64,825	62,572
26	63,338	58,342	59,123	62,822	62,319
27	60,610	60,337	59,502	64,006	64,329
28	59,940	60,619	59,105	63,853	63,164
29	60,317	61,787	60,443	64,552	62,803
30	58,840	58,614	59,225	62,497	61,565
31	60,231	59,470	59,045	63,475	61,852
32	60,778	59,423	59,591	62,552	61,883
33	61,066	60,131	60,860	62,868	63,873
34	62,301	60,123	59,841	64,178	62,556
35	63,764	60,721	58,149	62,913	62,775
36	63,555	61,924	60,320	62,772	62,086
37	59,591	60,653	60,158	64,128	63,791
38	63,876	59,361	58,401	63,429	62,947
39	61,870	58,559	60,374	64,933	63,451
40	61,965	58,332	61,594	62,179	63,547
Průměr	61,33	59,86	59,62	63,63	62,89
Chyba	0,24	0,14	0,15	0,12	0,13

Tab. 33: Naměřené hodnoty
kontaktního úhlu fólie OAKN 50 μm

OAKN 50 μm	Objem kapky vody
č. měření	3 μl
1	61,03
2	60,51
3	63,92
4	60,88
5	65,48
6	61,08
7	61,97
8	62,75
9	63,24
10	60,41
11	62,99
12	63,94
13	63,20
14	62,68
15	62,59
16	63,40
17	60,30
18	62,75
19	60,42
20	63,51
Průměr	62,35
Chyba	0,32