

# Vliv K-hodnoty na mechanické vlastnosti PVC směsi

Bc. Lukáš Kozár

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš KOZÁR**

Osobní číslo: **T11029**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv K – hodnoty na mechanické vlastnosti PVC směsi**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma.**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část.**
- 3. Provedení experimentu.**
- 4. Výhodnocení naměřených výsledků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP.**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

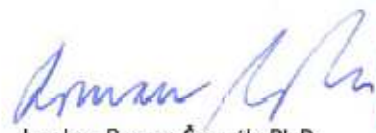
Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*





prof. Ing. Berenika Hausnerová, 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<sup>1)</sup>;
- 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<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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, 10. 5. 2013

.....

---

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

(1) Vysoká škola 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.

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

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

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

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

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

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

## ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo sledování vlivu K – hodnoty v PVC směsi na její mechanické vlastnosti. Připravily se čtyři totožné směsi, které se lišily pouze typem PVC s K – hodnotou 60, 65, 70 a 75. Zamíchané směsi se následně zhomogenizovaly na dvouválci a zhotovily se fólie. Z fólií se připravily zkušební tělesa pro mechanickou zkoušku tahem a ze zbylé fólie se vylisovala zkušební tělesa pro zkoušky tvrdosti, mikrotvrdosti a destruktivní zkoušku padajícím tělesem. Výsledky byly vyhodnoceny a prodiskutovány v závěru.

Klíčová slova: PVC, K-hodnota, zkušební tělesa, mechanické vlastnosti

## ABSTRACT

The aim of this thesis was to study the influence of K -values in PVC compounds on its mechanical properties. Prepared with a mixture of four identical, differing only by the type of PVC with K -value of 60, 65, 70 and 75. Stirred mixture was then homogenized for twin cylinder engine and made the film. The films were prepared specimens for mechanical tensile test and the rest of the foil pressed in specimens for testing the hardness, microhardness and destructive examination falling body. The results were evaluated and discussed in the conclusion.

Keywords: PVCK-value, the test specimens, the mechanical properties

Touto cestou děkuji společnosti Fatra, a.s. za pomoc s realizací výzkumu a doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi ochotně udílel v době sestavování diplomové práce.

Motto:

Nestačí jen něco vědět, je třeba to i využít, nestačí něco chtít, je třeba to i vykonat.

GOETHE

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>13</b>
<b>1 POLYVINYLCHLORID</b> .....	<b>14</b>
1.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POLYVINYLCHLORIDU .....	14
1.2 MONOMER VINYLCHLORID .....	14
1.3 VÝROBA POLYVINYLCHLORIDU.....	16
<b>2 ROLE K-HODNOTY U PVC</b> .....	<b>18</b>
2.1 STANOVENÍ VISKOZITY PRO VÝPOČET HODNOTY K .....	18
2.2 STANOVENÍ LOGARITMICKÉHO VISKOZITNÍHO ČÍSLA.....	21
<b>3 SESTAVOVÁNÍ SMĚSÍ</b> .....	<b>23</b>
3.1 ADJEKTIVA OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI PVC .....	23
3.2 ZMĚKČOVADLA .....	23
3.3 STABILIZÁTORY .....	24
3.4 MAZIVA .....	24
3.5 SEPARAČNÍ ČINIDLA .....	24
3.6 PLNIVA .....	25
3.7 PIGMENTY .....	26
3.7.1 Anorganické pigmenty .....	26
3.7.2 Organické pigmenty .....	27
<b>4 SKLADOVÁNÍ A DOPRAVA MATERIÁLŮ</b> .....	<b>28</b>
4.1 SKLADOVÁNÍ KAPALIN .....	28
4.2 DOPRAVA KAPALIN .....	29
4.3 SKLADOVÁNÍ SYPKÝCH MATERIÁLŮ.....	29
4.4 DOPRAVA SYPKÝCH MATERIÁLŮ .....	30
<b>5 MÍCHÁNÍ PVC SMĚSÍ</b> .....	<b>31</b>
<b>6 ZÁKLADNÍ ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE PVC A JEJICH PRODUKTY</b> .....	<b>32</b>
6.1 VÁLCOVÁNÍ .....	32
6.1.1 Válcované výrobky .....	32
6.2 PŘÍMÉ LISOVÁNÍ PVC .....	33
6.3 VSTŘIKOVÁNÍ.....	33
6.4 VYTLAČOVÁNÍ .....	34
<b>7 MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b> .....	<b>35</b>
7.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	35
7.1.1 Kondicionování .....	35
7.2 VLIV TEPLoty NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ .....	35
7.2.1 Sklovitý stav .....	36
7.2.2 Kaučukovitý stav .....	36
7.2.3 Viskózní stav .....	37



7.3	ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK .....	37
7.4	ZKOUŠKA TAHEM .....	37
7.5	ZKOUŠKA TLAKEM .....	39
7.6	ZKOUŠKA OHYBEM.....	40
7.7	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	41
7.7.1	Zkouška tvrdosti měřena dle Brinella .....	41
7.7.2	Zkouška tvrdosti měřena dle Vickerse .....	41
7.7.3	Zkouška tvrdosti měřena dle Shoreho .....	42
7.8	RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST .....	43
7.8.1	Metoda Charpy .....	44
7.8.2	Metoda Izod .....	45
7.8.3	Rázové zkoušky padajícím závažím .....	45
7.9	INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI .....	46
7.9.1	Metoda Oliver a Pharr .....	47
<b>8</b>	<b>RECYKLACE PVC .....</b>	<b>54</b>
8.1	MECHANICKÁ RECYKLACE .....	54
8.2	RECYKLAČNÍ PROCES VINYLOOP .....	55
8.3	SPALOVÁNÍ .....	56
8.4	SKLÁDKOVÁNÍ .....	56
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY .....</b>	<b>59</b>
10.1	POLYMER POLYVINYLCHLORID .....	59
10.1.1	Polyvinylchlorid s hodnotou K60 – Neralit 601 .....	59
10.1.2	Polyvinylchlorid s hodnotou K65 – Ongrovil S - 5064 .....	59
10.1.3	Polyvinylchlorid s hodnotou K70 – Ongrovil S - 5070 .....	59
10.1.4	Polyvinylchlorid s hodnotou K75 – Solvin 275SC .....	59
10.2	ZMĚKČOVADLO – DINP (DIIZONONYLPHTHALATE) .....	60
10.3	PLNIVO – CALPLEX 2T .....	60
10.4	EXTERNÍ MAZIVO – LUWAX A POWDER .....	60
10.5	TEPELNÝ STABILIZÁTOR – CA/ZNSTABIOL 2881-4 .....	60
<b>11</b>	<b>NAVAŽOVÁNÍ A MÍCHÁNÍ SMĚSI .....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>HOMOGENIZACE A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....</b>	<b>63</b>
12.1	HOMOGENIZACE NA LABORATORNÍM DVOUVÁLCI .....	63
12.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	64
<b>13</b>	<b>ZKOUŠKA TAHEM.....</b>	<b>66</b>
13.1	MĚŘENÍ VZORKU PVC S ROZDÍLNOU K-HODNOTOU .....	66
<b>14</b>	<b>ZKOUŠKA TVRDOSTI.....</b>	<b>70</b>
<b>15</b>	<b>INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI.....</b>	<b>72</b>
<b>16</b>	<b>ZKOUŠKA PADAJÍCÍM TĚLESEM.....</b>	<b>75</b>
<b>17</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>81</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>84</b>

## ÚVOD

Výroba polymerních materiálů patří dlouhodobě k výrazným činnostem v průmyslových oblastech, zabývajících se kontinuálním výzkumem a vývojem daných produktů. Cílem tohoto snažení je zdokonalování vlastností polymerů, snižování nákladů na výrobu a výrobek, rozšiřování oblastí reálných aplikací polymerních materiálů, omezování zátěže životního prostředí a redukce negativních dopadů na život člověka. Jedna z oblastí tohoto výzkumu je zaměřena na zkoumání a vývoj kompozitních materiálů za použití polymerní matrice z PVC a plniva na bázi nerostných materiálů. [1]

Průmyslové odvětví, zabývající se přípravou, výrobou a zpracováním PVC, má velmi bohatou historii v zajišťování a uspokojování společenských potřeb. [1]

Lidé žijící v městských aglomeracích s litinovými rozvody pitné vody vědí, že chladné počasí a studená voda s sebou přinášejí problémy s nevyhnutelným praskáním potrubí a následným prosakováním vlhkosti. Díky polyvinylchloridu se začaly pro rozvody pitné i odpadní vody používat pevné a odolné PVC trubky. Vinylové trubky mají dlouhou historii díky vysoké spolehlivosti a bezpečnosti při dodávkách vody po celém světě. [1]

PVC také poskytuje systémy s dobrou povětrnostní odolností a nehořlavostí. Díky těmto vlastnostem začal polyvinylchlorid postupně nahrazovat původní materiály jako je dřevo, kov, beton, azbest, textil, aj., a to zejména ve stavebním průmyslu, automobilovém průmyslu, oděvním průmyslu, také při výrobě hraček, sportovních potřeb, elektrických přístrojů, a podobně. Ve stavebním průmyslu se PVC začalo používat pro výrobu okenních profilů, podlahových a střešních krytin. V automobilovém průmyslu se PVC začalo uplatňovat v interiérech automobilů, zejména při výrobě přístrojových panelů a dveřních výplní. Mezi další aplikace, při kterých došlo k náhradě původních materiálů, patří izolace elektrických vodičů a kabelů elektrospotřebičů jak v domácnostech, tak v průmyslu. Původně se jako izolant používala pryž obalená textilní tkaninou. Tato kombinace byla však nahrazena PVC díky jeho dobrým elektrickým vlastnostem a nízké hořlavosti. Hračky a sportovní potřeby, které se ještě v první polovině 20. století vyráběly výlučně z pryže, se s rozmachem chemického průmyslu v 60. letech minulého století začaly produkovat téměř výhradně z PVC. [1]

Ve výčtu všech aplikací, ve kterých bylo za dobu jeho historie použito polyvinylchloridu jako ekvivalentu původních materiálů by bylo možno pokračovat dál. Zjistili bychom, že se změnou tržních podmínek v poválečném světě a zejména s rostoucí spotřebou se vý-

znam PVC neustále zvyšoval. Díky dobrým zpracovatelským a užitným vlastnostem a také nízké ceně se PVC postupně stal jedním z nejvíce používaných polymerů ve všech oblastech moderního života. [1]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYVINYLCHLORID

Polyvinylchlorid se vyrábí polymerací vinylchloridu. Obecně se s jeho názvem můžeme setkat pod zkráceným označením PVC. Základní stavební jednotkou je vinylchlorid. Ve světovém měřítku se řadí na třetí příčku nejvíce používaným termoplastickým polymerem díky svým vlastnostem.

### 1.1 Základní vlastnosti polyvinylchloridu

Mezi výborné vlastnosti, kterými tento polymer disponuje, stojí za zmínku dobrá odolnost vůči chemikáliím, mechanická odolnost, nízká hořlavost a dobrá zpracovatelnost, předchází jej pouze polyetylén a polypropylén. Z hlediska generovaných výnosů se jedná o jeden z nejhodnotnějších produktů chemického průmyslu. [3]

Neměkčené PVC má vlastnosti, jejichž kombinace není obecně dosažitelná u jiných plastových materiálů. [2]

- vynikající odolnost vůči vodě, kyselinám, alkáliím a organickým kyselinám
- nízká permeabilita vodních par, kyslíku a mnoha těkavých sloučenin
- vysoká tvrdost, odolnost proti oděru a vysoká mechanická pevnost
- dobré elektroizolační vlastnosti
- vysoký lesk a transparentnost
- samozhášivost, která je daná vysokým obsahem chloru ( $55,5 \pm 1\%$ ) [2]

V důsledku zátěže životního prostředí a toxicity vznikající při likvidaci výrobků z PVC se některé jeho aplikace začaly nahrazovat například polyolefiny, materiály na bázi silikonu, apod. Nicméně, světový trh s PVC roste v průměru o 5 % ročně s tím, že v roce 2016 by mohl dosáhnout výše výroby a zpracování cca 40 milionů tun. PVC může být, vyráběno v tvrdé, měkčené, lehčené i houževnaté formě. PVC má širokou škálu použití

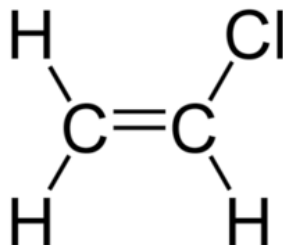
např. v oděvním, stavebním, elektrotechnickém, elektronickém a automobilovém průmyslu. Běžně se také používá v nábytkářském průmyslu, při výrobě dětských hraček, sportovních potřeb a podobně. [3]

### 1.2 Monomer vinylchlorid

Vinylchlorid je za normální teploty a tlaku bezbarvý plyn nepříjemně nasládlého aroma. Je běžně skladovatelný a zpracováván v kapalně formě. Je vysoce toxický a také je rozpust-

ný v hydro-karbonových olejích, alkoholech, chlorovaných rozpouštědlech a mnoha běžných organických kapalinách. [4]

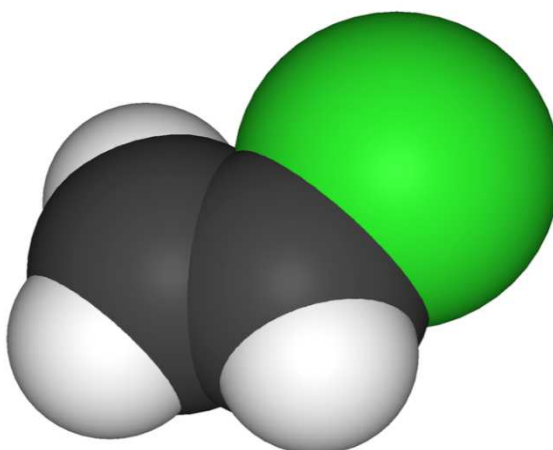
Fyzikální vlastnosti vinylchloridu jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 1. Strukturní vzorec vinylchloridu.[9]

Tab. 1. Charakteristické vlastnosti vinylchloridu.[4]

Název IUPAC	chloroethene
Názvy ostatní	vinylchlorid
Vzorec molekuly	$C_2H_3Cl$
Molekulová hmotnost	bezbarvý plyn
Vzhled	62,4985 g/mol
Hustota	0,91 g/ml
Teplota tání $T_m$	-154 °C
Teplota varu	-13 °C



Obr. 2. Molekula vinylchloridu.[8]

### 1.3 Výroba polyvinylchloridu

K přípravě technicky použitelných vinylových polymerů byla vyvinuta řada technologických postupů patřících mezi radikálové polymerace. [2]

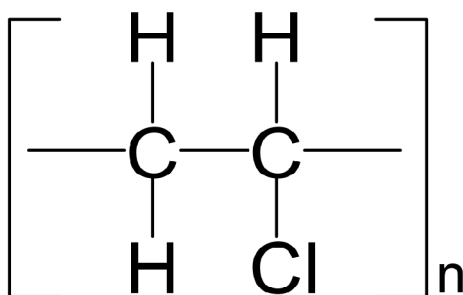
*Polymerace v bloku* – zde je rozpouštědlem samotný monomer. Takto získaný polymer vypadává ze systému ve formě jemné sraženiny. [2]

*Polymerace v roztoku* – monomer musí být rozpustný v použitém rozpouštědle, tzn., že polymer se získává ve formě roztoku (polyvinylchlorid v 1,2-dichlóretanu) anebo vypadává ve formě sraženiny (polyvinylchlorid v n-butanu). [2]

*Polymerace v emulzi resp. v disperzi* - monomer je emulgován ve vodě, která obsahuje emulgátor a polymerací vzniká emulze - latex, resp. disperze (velikost částic je 0,01–3  $\mu$  m) polymeru ve vodě. [2]

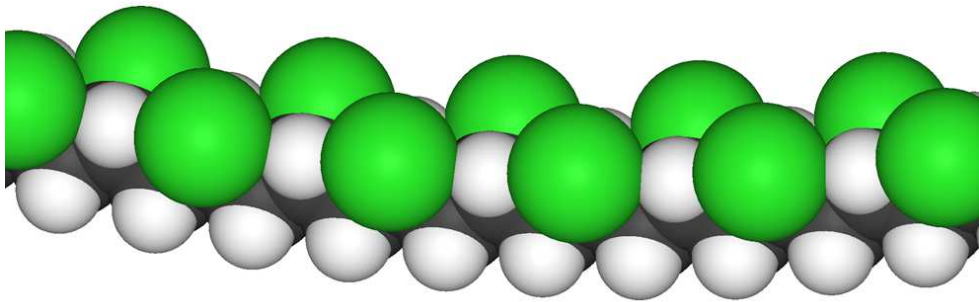
*Polymerace v suspenzi* – monomer je mechanicky dispergován ve vodě nebo jiné kapalině, do níž je přidáno malé množství stabilizátoru suspenze. Polymer vypadává z roztoku ve formě jemných částic o velikosti 0,01 – 0,5 mm. [2]

V průmyslovém měřítku se převážná část vinylchloridu polymeruje ve vodě, přičemž se pracuje v emulzi anebo v suspenzi. Produkty, získané suspenzí, mají oproti emulzním polymerům některé přednosti, jako je menší nasákovost vody, lepší elektrické vlastnosti a schopnost vytvářet s vhodnými stabilizátory transparentní výrobky. Emulzní polymerací se získávají polymery vhodné na výrobky méně náročné na zpracování, hlavně na fólie, desky a trubky. V omezené míře se polyvinylchlorid vyrábí polymerací v bloku anebo v roztoku. [2]



Obr. 3. Konstituční jednotka.[4]





Obr. 4. Molekula PVC.[4]

Tab.2. Vlastnosti PVC. [4]

Název IUPAC	Polychloroethene
Názvy ostatní	Polyvinylchlorid
Molekulová hmotnost	30000 - 150000
<b>Vlastnosti</b>	
Youngův modul (E)	2900-3300 MPa
Pevnost v protažení	50-80 MPa
Prodloužení s přetržením	20-40%
Notch test	2-5 kJ/m <sup>2</sup>
Teplota tání T <sub>m</sub>	212 °C
Teplota skelného přechodu	87 °C
Nasákavost	0,04-0,4

## 2 ROLE K-HODNOTY U PVC

Polyvinylchlorid má oproti jiným plastickým hmotám přednosti, zejména v ceně, v mechanických a elektrických vlastnostech a ve velmi dobré odolnosti proti chemickým sloučeninám. Ve většině případech se dnes setkáváme se suspenzním PVC, které v mnoha směrech předčilo PVC emulzní. Především lepšími elektrickými vlastnostmi, méně absorbují vodu, lepší tepelná stabilita a možnost výroby transparentních výrobků. [2]

Polymery s nižší hodnotou  $K$  (55-65) lze v důsledku dobrých tokových vlastností taveniny použít na tvrdé, neměkčené výrobky a technologii vstřikování. V praxi je označujeme jako Novodury-PVC U. Je-li hodnota  $K$  u polymeru větší než 65, jsou nutné vyšší teploty při zpracování, abychom docílili dobré tokové vlastnosti pro tváření. Vyšší teplota je však spojena s narušováním stability PVC. Proto se zpracovávání PVC s vyšší hodnotou  $K$  využívá pro měkčené směsi (přidávání změkčovadel), které v praxi označujeme jako Novoplasty- PVC P. Změkčovadla nám umožňují snížit zpracovatelskou teplotu, tak aby nedošlo k narušení stability. [2]

### 2.1 Stanovení viskozity pro výpočet hodnoty $K$

Podle viskozity se vypočítá hodnota  $K$ , která je uzanční hodnotou charakterizující lineární polymer z hlediska střední molekulové váhy. Nahrazuje se viskozitní hodnotou, která PVC rozliší s větší přesností, ale hodnota  $K$  je stále ještě používána zahraničními výrobci ke klasifikaci PVC.[2]

Pro stanovení viskozity se používá Hópplerova kuličkového viskozimetru (obr.), kterým lze měřit viskozitu ve velkém rozsahu a s přesností  $\pm 0,1$  až  $0,5\%$ . Při měření se zjišťuje, za jak dlouho propadne kulička zkoušenou kapalinou ve skleněné, přesně kalibrované trubici skloněné pod úhlem  $10^\circ$ . Dráha padající kuličky, určená k měření, je dána dvěma kroužky (kalibračními značkami) na trubici. Při stanovení viskozity se kulička volí tak, aby nejkratší doba jejího pádu byla 15 vteřin a nejdelší 300 vteřin. Přesnost stanovení viskozity závisí na udržování konstantní teploty při měření. Proto je pro temperování nezbytný termostat.[2]

Absolutní viskozita se vypočítá podle vzorce:

$$\eta = t(S_k - S_f) \quad (1)$$

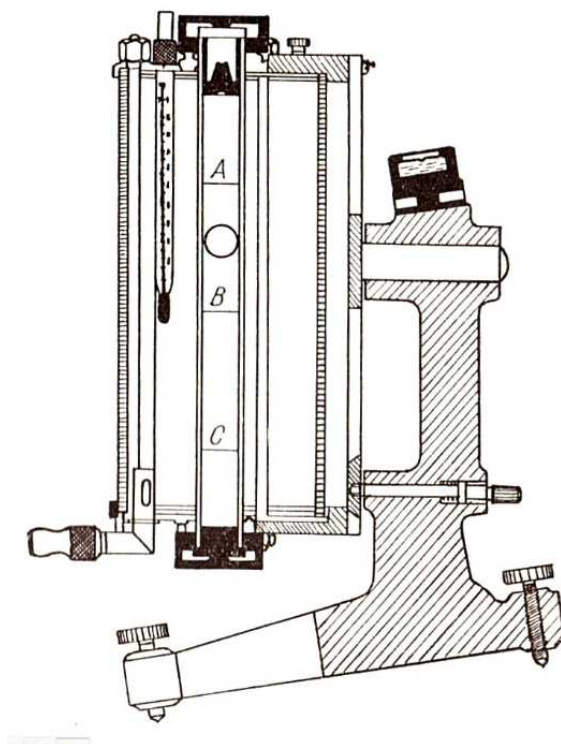
$\eta$  - absolutní viskozita [cP],

$t$  - doba pádu kuličky,

$S_k$  - specifická váha kuličky,

$S_f$  - specifická váha kapaliny při teplotě měření

$k$  - konstanta kuličky.[2]



Obr. 5. Hópplerův kuličkový viskozimetr. [2]

Pro vlastní stanovení se odváží přesně 1 g PVC, předem vysušeného (3 hodiny) při 80 °C, odměrné baňky na 100 ml a rozpustí se v 70-80 ml cyklohexanonu p. a. Roztok se nechá 24 hodin stát. Po uplynutí této doby se zahřeje 10 minut v glycerínové lázni při teplotě 100 °C. Nato se vytemperuje na 25 °C, obsah baňky se doplní cyklohexanonem po značku a protřepe se. Před měřením viskozity se doporučuje roztok zfiltrovat skleněným filtračním kelímkem. Viskozita se měří při teplotě 25 °C a kulička se volí tak, aby její pád trval nejvýše 100 vteřin. Viskozita se vyjadřuje v centipoisech. Měření se opakuje 5krát a pro výpočet se bere průměrná hodnota. Během měření musí být zaručena teplota s přesností na 0,05 °C. Roztok před měřením se temperuje 15 minut ve viskozimetru.[2]

Hodnota  $K$  se vypočítá podle FIKENTSCHERAa je definována vztahem:

$$\frac{\log \eta / \eta_0}{c} = \frac{75k^2}{1+1,5kc} + k \quad (2)$$

$\eta$  - viskozita roztoku při 25 °C [cP],

$\eta_0$  - viskozita rozpouštědla na stejném viskozimetru při 25 °C [cP],

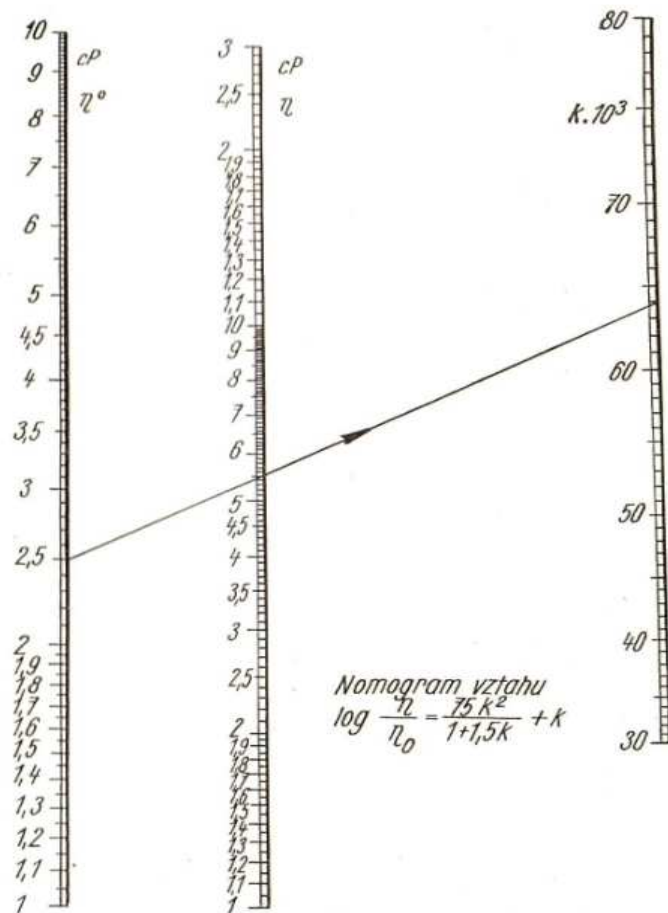
$c$  - koncentrace polymeru v gramech ve 100ml rozpouštědla (obvykle 0,5-1 g),

$k$  - hodnota charakterizující polymer.[2]

Hodnota  $K$  se vypočte z měření  $\eta_r$  podle rovnice:

$$K = \frac{1,51g\eta r - 1 + \sqrt{\left(1 + \frac{200}{c} + 2 + 1,51g\eta r\right) * 1,51g\eta r}}{(150 + 3c) * 10^{-3}} \quad (3)$$

Podstata zkoušky spočívá v měření viskozity 1% roztoku PVC v cyklohexanonu a viskozity cyklohexanonu při 25 °C. FIKENTSCHER udává hodnotu  $K$  pro polymer vyjádřením koncentrace v gramech na 100 ml rozpouštědla a násobením výsledku 1000. Hodnotu  $K$  lze odečíst na nomogramu (obr.) tak, že se spojí hodnoty viskozit rozpouštědla a roztoku. Příмка prodloužená do stupnice  $k \cdot 10^3$  již udává hodnotu  $K$  bez výpočtu.[2]



Obr. 6. Nomogram pro grafické určení  
 K-hodnoty. [2]

## 2.2 Stanovení logaritmického viskozitního čísla

Stanovení Logaritmické viskozitní číslo je smluvní hodnota charakterizující polymer z hlediska střední molekulové váhy. Je odvozeno ze vztahu:

$$l_{v.č.} = \frac{\ln \eta / \eta_0}{c} \quad (4)$$

$\eta_0$  - viskozita čistého cyklohexanonu při 25 °C,

$\eta$  - viskozita roztoku PVC při 25 °C,

$c$  - koncentrace 0,005 g/ml při 25 °C [2]

Pro vlastní stanovení se vzorek PVC suší 3 hodiny při 80 °C. Po vychladnutí v exsikátoru se na analytických vahách odváží 0,5 g vzorku a vpraví do odměrné baňky na 100 ml. Při-

lijí se 70 ml p. a. cyklohexanonu a nechá 24 hodin stát. Pak se roztok zahřívá 10 minut v glycerínové lázni při 100 °C. Po ochlazení se baňka vytemperuje na 25 °C, doplní se cyklohexanonem po značku a důkladně promíchá. Před měřením viskozity se roztok přefiltruje nejlépe skleněným filtračním kelímkem S2 nebo G2. Ke stanovení viskozity se použije Ubbelohdova viskozimetru I podle ČSN 65 6216 s konstantou  $k= 0,01$ . Hodnota log. viskozitního čísla je číselně odlišná od hodnoty  $K$ . [2]

Pro srovnání zhruba platí:

*Tab. 3. Orientační hodnoty přepočtu log. viskozitního čísla a  $K$ -hodnoty. [2]*

Log. viskozitní číslo	Hodnota $K$
25- 50	35-50
50- 75	50-60
75-100	60-70
100-130	70-80
130-160	80-90

### 3 SESTAVOVÁNÍ SMĚSÍ

Podle požadované jakosti výrobků a zvoleného technologického postupu obsahují výrobky kromě PVC i jiné suroviny, tvořící s nimi směs. Směsi jsou suroviny dokonale smíchané v určitém poměru, udaném v receptuře. Jejich vzájemný poměr se určuje podle předepsané jakosti výrobku a s ohledem k navrženému technologickému postupu (válcování, vstřikování, vytlačování apod.). [2]

#### 3.1 Adjektiva ovlivňující vlastnosti PVC

Přísady jsou látky, které zásadně ovlivňují vlastnosti a zpracovatelnost plastů. Tyto přísady jsou rozptýleny v polymerní matici, tak že mění molekulovou a chemickou strukturu polymeru. Podle účinku na změnu vlastností polymeru lze přísady rozdělit na:

- Přísady ovlivňující fyzikální vlastnosti plastů- změkčovadla, plniva, barviva, pigmenty, maziva, nadouvadla, separační činidla, antistatika, síťovací prostředky.
- Přísady ovlivňující degradaci materiálu – antioxidanty, stabilizátory, zhaséčící činidla, světelné a tepelné stabilizátory.

Pro správnou účinnost je důležité poměrné zastoupení přísad a kvalitní rozptýlení a difúze těchto látek do polymerních směsí. Kvalita dispergace přísad je ovlivněna způsobem místění, chemickou povahou a fyzikální vlastností přísad (prášek, granulát, suspenze, kapalina). [5]

#### 3.2 Změkčovadla

Pomocí změkčovadel lze dosáhnout vyšší ohebnosti polymerů, které jsou při nižších teplotách ve sklovitém stavu. Tyto organické látky jsou málo těkavé, tuhé nebo kapalné. Smísením s polymery vytváří měkčenou směs vyznačující se sníženou viskozitou taveniny, elastického modulu a snížením skelného přechodu  $T_g$ . Podle snášlivosti změkčovadel s polymery lze tyto látky rozdělit na:

- Snášlivé změkčovadla – vysoký podíl rozpuštění změkčovadla v polymerní směsi
- Nesnášlivé změkčovadla – vyznačují se omezeným rozptýlením změkčovadla v polymeru. To vede k vytvoření dvou fází ve směsi: hmoty s vysokým podílem změkčovadla a zároveň hmoty s malým obsahem změkčovadla. Jako změkčovadla se v technické praxi používají estery kyseliny ftalové, fosforečné, vícesytných

mastných kyselin nebo polyesterové, epoxidové změkčovadla a mnoho dalších látek lišících se v použití pro různé druhy polymerů. [5]

### 3.3 Stabilizátory

PVC se zpracovává na výrobky tvářením na různých výrobních linkách. Vzhledem k tomu, že během zpracování je PVC vystaven účinkům zvýšené teploty za současného katalytického působení kovového povrchu té části zařízení, v němž je tvářen, neobejdeme se při jeho zpracování bez tepelných stabilizátorů, i když zařízení pro tváření mají regulační systémy, které udržují teplotu na požadovanou výši. Výběr stabilizátoru není jednoduchý, protože nesmí ovlivnit typickou barvu polymeru ani jiné vlastnosti PVC. Musí být bez zápachu a zdravotně nezávadný (na bázi bárium-zinek, vápník-zinek a nebo oktylcínu).[5]

### 3.4 Maziva

Pro snížení přilnavosti zpracovávané taveniny na součásti výrobního zařízení jsou do polymerních směsí přidávány maziva. Tyto látky vytvářejí na povrchu taveniny mezivrstvu, která snižuje tření při toku a potlačuje vznik velkého množství disipovaného tepla v systému. Maziva jsou používány pro různé způsoby zpracování polymerů. Výrazně zlepšují zpracovatelské vlastnosti a kvalitu výrobku (povrchovou kvalitu, odolnost proti korozi) především u vstřikování, vytlačování nebo lisování. Jako maziva jsou často použity kyseliny stearové nebo její soli (Li, Ca, Ba, Al, a Mg), minerální a rostlinné oleje, živočišné tuky, přírodní vosky, parafíny. Podle účinku lze maziva rozdělit:

- Maziva s vnějším účinkem – částečně rozpustné v polymeru. Omezeně vystupují napovrch směsi a vytváří tak mezivrstvu oddělující polymer a pracovní povrch.
- Maziva s vnitřním účinkem – relativně dobře rozpustné v polymeru, čím snižují viskozitu taveniny.[5]

Důležitou vlastností maziva je částečná rozpustnost v polymeru a daná adheze k molekulám polymeru. Teplota tání maziva má být taková, aby vytvářela dostatečně pevný film. Při nízké teplotě tání maziva se nevytváří dostatečný film a u vysoké teploty tání se nevytváří požadovaná celistvost filmu. [5]

### 3.5 Separační činidla

Při zpracování plastů např. vstřikováním, lisováním, tepelným svařováním může dojít k nalepení polymeru na tvářecí nebo tvarovací součásti výrobního zařízení. Zabránění této



přilnavosti materiálu na tvářecí součásti, lze přidáním separačního činidla do směsi. Tyto látky snižují mechanické přilnutí taveniny vlivem mezimolekulární síly, vznikajících při zvýšených teplotách. Konstrukční řešení formy musí obsahovat potřebné prvky zaručující jednoduché vyhození hotového výrobku z tvářecích ploch. Důležitým prvkem je zkosením formy nebo průduchy, dostatečná jakost a čistota povrchu tvářecích zařízení.[5]

Jako separační činidla se používají různé druhy vosků, mýdel nebo vynikající vlastnosti vykazují silikonové nátěry (např. polydimethylsiloxan). Polysiloxanová činidla se vyznačují dobrou tepelnou stabilitou i za teplot kolem 300°C. Tyto látky se používají ve formě vosků, nátěrů, prášků, maziv nebo folii při výrobě např. plošných epoxidových laminátů. Nanášení se provádí namočením formy do separačních činidel nebo nástřikem formy. [5]

### 3.6 Plniva

Pro úpravu mechanických nebo tokových vlastností, povrchových vzhledů nebo snížení ceny výrobku se používají plniva. Přidáním plniv do směsi se mění hustota, tvrdost, pevnost, zpracovatelnost a zlepšuje se elektrická vodivost, oděruvzdornost, teplotní vzdornost, chemická odolnost atd. Plniva se používají především pro reaktoplasty jako jsou fenoplasty a aminoplasty nebo kaučuky. U termoplastů je použití plniv omezené. Podle původu lze plniva rozdělit na:

- Organická – celulóza, dřevěná nebo proteinová moučka atd.
- Anorganická – grafit, břidlice, křemičitý písek, azbest, mastek atd.[5]

Přidáním plniva o jemné velikosti se téměř nemění základní vlastnosti polymerního materiálu. Hrubo zrnité částice plniva výrazně zhoršují mechanické vlastnosti. Obsah plniv tzv. kompozitních materiálu výrazně zlepšuje pevnost, tepelnou roztažnost, tvarovou stálost atd. Smrštění výrobku se přidáním plniv zmenšuje, ale je rozdílné ve směru kolmém a podélném k ose plnění. [5]

*Skleněná plniva* – využívají se ve formě vláken, vloček, tkanin, mikrokuliček a rohoží. Vyznačují se vysokou propustností světla a dobrými mechanickými vlastnostmi, při plnění polyamidů, polyesterových a epoxidových laminátů.

*Azbestová vlákna* – podle druhu azbestu zlepšují pevnost materiálu. Pevnost v tahu je oproti skleněným výztužím u všech azbestových plniv nižší. Výhodou je mírně vyšší tuhost, lepší rozměrová stálost, menší smrštitelnost a dobrá odolnost vůči kyselinám.

*Slída* – dobré dielektrické a tepelné vlastnosti

*Minerály* – používají se ve formě prášku s funkcí plniva a výztuže. Materiály jako je živec, křemičitany, křemen se používají do směsí z polyolefinů, polykarbonátů, polyamidů, polyepoxidů, polyvinylchloridů, polyesterů atd.

*Práškové polymery* – speciální plniva na bázi syntetických nebo přírodních polymerů. Pro vodu a vodní páru mají dobré sorpční vlastnosti. Vykazují hydrofilní vlastnosti, z tohoto důvodu se používají k výrobě hygienických syntetických ústí.

*Metallické prášky* – jedná se o kovové materiály především z bronzu nebo hliníku k plnění acetátů a polyamidů. Zlepšují tepelnou a elektrickou vodivost a umožňují následné pokovování. Prášek mědi se používá jako stabilizátor a vyztužovadlo pro polyamid 66. Plniva na bázi olova a barya pohlcují rentgenové záření.[5]

*Organická plniva*- dřevná moučka se uplatňují u výrobku spotřebního zboží nebo elektroizolačních prvků. Významné uplatnění má i celulóza, sója, proteiny a skořápky různých plodů. [5]

### 3.7 Pigmenty

Barvení polymerních výrobků pro zajištění estetického vzhledu je možné pomocí pigmentů nebo barviv. Pigmenty jsou nerozpustná prášková barviva dávající odstín nebo krycí schopnost dané hmotě nebo nátěru. Barviva jsou organické rozpustné látky ve hmotě. Organické barviva nebo pigmenty přilnuté na nosičích jako je např. plnivo se nazývají substráty. Podle původu lze pigmenty rozdělit na:

- Anorganické
- Organické
- Bronze (práškové kovy)[5]

#### 3.7.1 Anorganické pigmenty

*Oxid titaničitý* – jediný bílý pigment s mající dobré barvicí účinky a krycí schopnost, chemickou odolnost, tepelnou stabilitu a nízkou cenu.

*Oxid železa* – ve formě přírodního původu nebo synteticky vyrobený. Přírodní oxid železa obsahuje nečistoty ale je levnější. Synteticky vyrobený oxid má lepší čistotu a barvicí účinky.

*Olověné barvy a pigmenty* – světelně stálé, s dobrou tepelnou stabilitou. Chromová žlutá a molybdenová oranž poskytuje čisté a výrazné odstíny žluté a oranžové. Dlouhodobé použití může vytvořit karcinogeny.

*Prášky kovů* – nejčastěji měď, bronz a nejpoužívanější hliník. Měď a bronz často chemicky reagují s polymery a vytváří tak vyrudnutí barvy. [5]

### **3.7.2 Organické pigmenty**

*Saze* – nejpoužívanější organický pigmenty. (např. kanálové, termické, acetylenové, lampové saze)

*Azopigmenty* - představují asi 2/3 světové produkce organických barviv. [5]

## 4 SKLADOVÁNÍ A DOPRAVA MATERIÁLŮ

Skladování a doprava materiálu jsou průvodním jevem každého výrobního procesu ve všech průmyslových odvětvích. Pro jejich uskladnění slouží sklady, které se mohou dělit podle různých charakterů (druh materiálu, objem, interní-externí apod.). Materiál může být ve dvou formách:

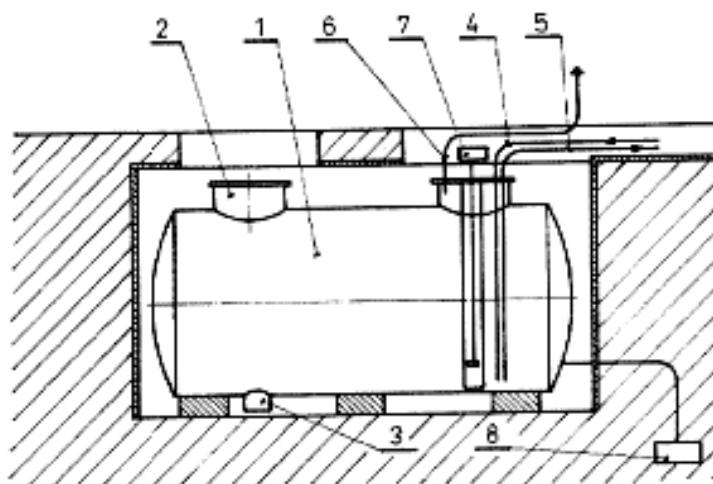
kapalný – zde můžeme zařadit např. stabilizátory (Ba/Zn), změkčovadla (DOP, DINP)

sytký – polymer (PVC), plnivo ( $\text{CaCO}_3$ ). [2]

### 4.1 Skladování kapalin

Kapaliny se skladují v nadzemních nebo podzemních zásobnících. Materiálové provedení a způsob uložení zásobníku je dáno povahou skladované kapaliny. Zvláštním předpisům pro skladování podléhají agresivní a toxické a hořlavé kapaliny. Pro výrobu plastických hmot se nejčastěji setkáváme s požadavkem skladování na hořlavé kapaliny (podle třídy).

Přepravní obaly, kontejnery, nádrže a technologická zařízení, včetně uzávěr a ostatních armatur, musí být z materiálu, který je odolný vůči chemickým účinkům a hořlavých kapalin a zároveň musí splňovat podmínky pro těsnost. [2]



Obr. 7. Podzemní zásobník na hořlavé kapaliny.

1 - zásobník, 2 - průlez, 3 - odkalovací jímka, 4 - přítok, 5 - odtok, 6 - odvodušnění,

7- stavoznak, 8- uzemnění[2]

## 4.2 Doprava kapalin

Kapaliny jsou dopravovány ze zásobníků do technologických zařízení potrubím. Podle jejich vzájemné polohy (vzdálenost, výškový rozdíl hladin) se určuje technologie, kterou bude kapalina dopravována:

*samospádem* - pro vertikální členění výroby

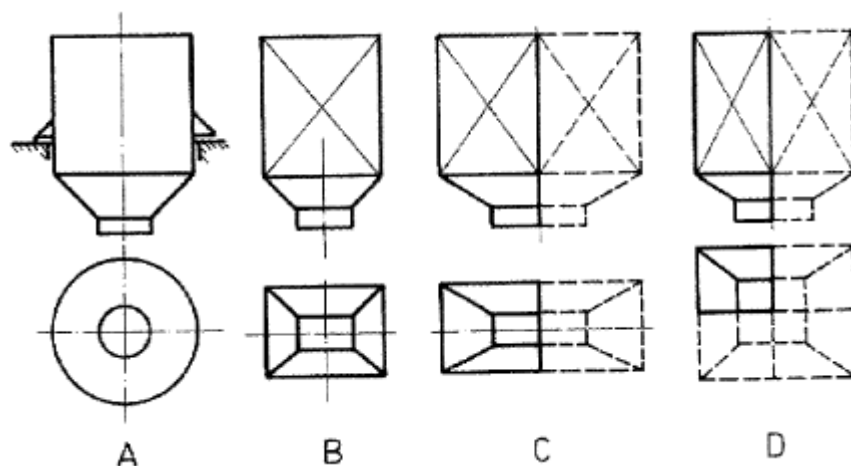
*přetlačování* - jednoduchý a spolehlivý způsob dopravy stlačeným plynem

*čerpadla* - nejrozšířenější způsob dopravy, umožňuje všechny směry a velké transportní vzdálenosti (např. objemová- pístová; rotační – zubová, lamelová; hydrodynamická čerpadla). [2]

## 4.3 Skladování sypkých materiálů

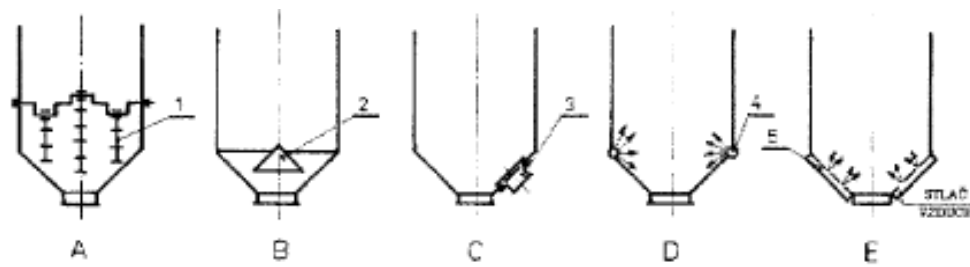
Hromadné skladování lze realizovat na volných skládkách nebo v zásobnících. V praxi se preferuje ukládání do zásobníků nebo sil z důvodů efektivního využití skladových ploch a potřeby pro zásobování technologických zařízení. [2]

Zásobník musí být konstrukčně navržen tak, aby splňoval všechny funkce, které jsou na skladování a dopravu sypkých materiálů kladeny, zejména úplné a snadné vyprázdnění a maximální využití úložného prostoru. Tyto funkce zajišťuje tvar zásobníku.



Obr. 8. Tvary a uspořádání zásobníků[2]

Nejpoužívanější pro velké objemy je kruhový zásobník (A). Pro malé kapacity se využívá čtvercové nebo obdélníkové (B), kde můžeme využít zastavení plochy (C, D).



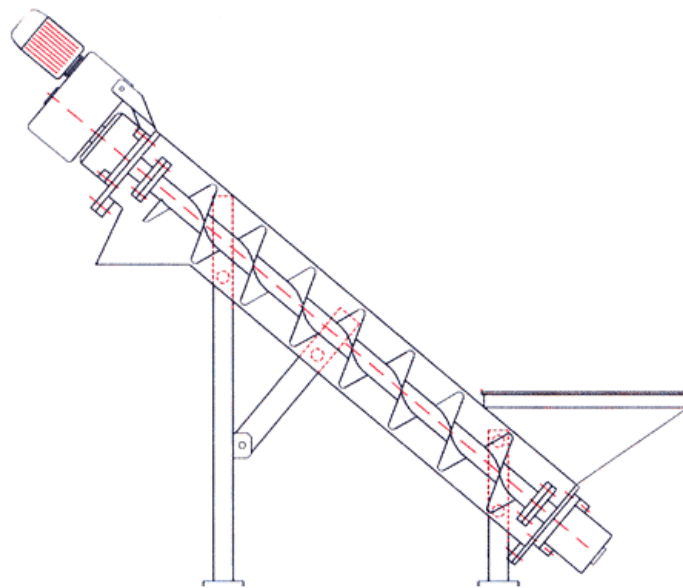
Obr. 9. Pomocná zařízení na vyprázdnění.

A - mechanické, B,C- vibrační, D,E - pneumatické,

pozice: 1- ozubená tyč, 2,3-budič kmitů, 4,5 - čerící bloky[2]

#### 4.4 Doprava sypkých materiálů

Sypké materiály je třeba do zásobníků, nebo ze zásobníků k dalšímu zpracování dopravovat. K tomu slouží řada dopravních zařízení, které z většiny plní funkci dávkování mezi které patří šnekové, korečkové, vibrační, pasové dopravníky a pneumatická doprava.



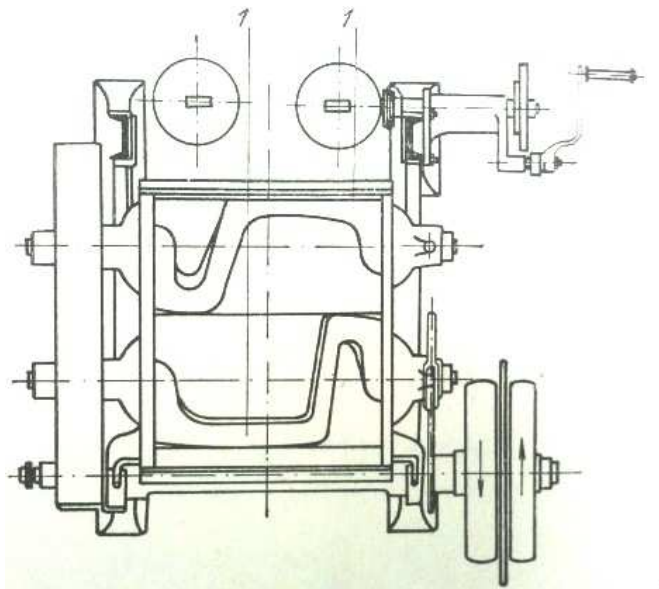
Obr. 10. Šnekový dopravník [10]

## 5 MÍCHÁNÍ PVC SMĚSI

Po odvážení se základní suroviny předběžně smíchají. Způsob, jímž se tato operace provádí, není dosud jednotný, jak pokud jde o pracovní podmínky, tak i po stránce strojního vybavení. Ovlivňuje to nestatečná struktura PVC.[2]

Podmínky, za nichž se jednotlivé součásti směsi smíchávají, posuzujeme především podle teploty.[2]

PVC, pigmenty a změkčovadla se mohou smíchávat za běžné teploty např. v ramenném míchacím stroji. Tyto směsi se musí nechat dlouho uležet (8-16 hodin). [2]



Obr. 11. Ramenná míchačka [2]

Při jiném způsobu se směs za předběžného smíchávání ohřívá na teplotu 50-60 °C. Tím se podstatně zkracuje doba potřebná pro uležení směsi (1-2 hodiny). [2]

Jindy se zase při míchání směs ohřívá v míchacích strojích na 130 až 150 °C, takže dojde k částečné želatinaci. Takto upravené směsi se mohou ihned zpracovávat na míchacím a ohřívacím dvouválci. Jednotlivé složky se při míchání ohřívají proto, aby se urychlilo a usnadnilo působení změkčovadel na částičky PVC. Tím se výrobní proces urychlí.[2]

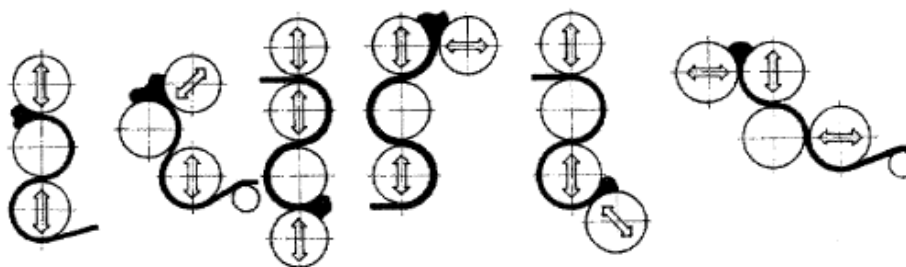
Existuje celá řada technologických zařízení pro míchání směsí: KO hnětače, dvouválce, fluidní míchačky, kuželové míchačky aj. [2]

## 6 ZÁKLADNÍ ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE PVC A JEJICH PRODUKTY

Tvářením rozumíme technologické postupy charakterizované podstatným přemíst'ováním částic zpracovávané hmoty.

### 6.1 Válcování

Válcování v užším slova smyslu je technologický postup, kterým se zhotovují fólie nebo desky zpravidla mezi vyhřívanými válci válcovacích strojů. Válcovací stroje tvoří tedy základní článek příslušného technologického zařízení. Toto zařízení se může skládat i z jiných částí (zařízení odvíjecí, navíjecí, chladicí, dezénovací aj.) a tvořit tak výrobní linku. [2]



Obr. 12. Víceválc pro válcování fólií [2]

#### 6.1.1 Válcované výrobky

Největší zastoupení válcovaných výrobků má stavební průmysl, kde se můžeme setkat s hydroizolačními fóliemi (obr.), dále pak interiérových výrobků jako jsou ve větší míře vinylové podlahoviny nebo ubrusoviny, galanterie aj. [22]



Obr. 13. Aplikace hydroizolačních fólií z PVC [22]



## 6.2 Přímé lisování PVC

Přímým lisováním lze zpracovávat měkčený i neměkčený PVC. Materiál ve vhodném tvaru (prášková směs, fólie, granule) se plní do dutiny formy a pak se působením tepla a tlaku nejprve převede do stavu vysoké plasticity, a pak dalšími změnami tlaku do konečného tvaru. Protože PVC je termoplast, musí se vylisky ve formě vychladit. Chlazením se však tento proces prodlužuje a proto se upřednostňují jiné technologie, jako je např. vstřikování. [2]

## 6.3 Vstřikování

Vstřikování není u PVC tak rozšířeno, jako např. při zpracování polystyrénu, polyetylenu, polyamidů apod. U PVC se většinou naráží na horší tokové vlastnosti a na poměrně malou tepelnou stálost (degradace). Tyto nepříznivé vlivy se dají eliminovat zařazením stabilizátorů a modifikátorů toku do směsi. [2]

PVC je dodáváno ve formě granulátu, ten je přes násypku dopravován do plastifikační jednotky. Plastifikační jednotka je ve většině případů tvořena pouzdrem šneku a šnekem, který koná otáčivý (homogenizace směsi) a přímočarý pohyb (vstřikovací tlak). Tavenina je pod tlakem dopravována do dutiny uzavřené formy. Vstřikování PVC se využívá v obuvnictví na výrobu podešví a holínek.



*Obr. 14. Holínka vyrobená z PVC*

## 6.4 Vytlačování

Vytlačováním označujeme zpravidla technologický postup, při kterém zpracovávaný materiál se tváří v plastickém stavu průtokem přes profilovací pásmo (hubici). Pro vytlačování plastických hmot se používá stroje šnekových nebo pístových.

Práškový nebo granulovaný materiál se plní z násypky do šneku, který jej dopravuje jednotlivými pásmy za současného ohřevu a hnětení.

Vytlačování PVC je velmi rozšířené. Využívá se hlavně pro jednoduché profily základní tvarů, až po složitější tzv. koextruze (vytlačování měkčeného i neměkčeného materiálu) dále pak oplášťování drátu a kabelů. [2]



*Obr. 15. Profil schodové lišty vyroben z granulátu [23]*

## 7 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti polymerů se odvíjí od jejich velikosti a tvaru makromolekul, chemického složení, druhu struktury (amorfní, krystalické) a závislosti teploty na čase. [11]

### 7.1 Příprava zkušebních těles

Připravit zkušební tělesa můžeme přímo ze zkoušeného materiálu ve formě prášku (aglomerátu) nebo jiného polotovaru (granulátu). Vulkanizací, vstřikováním, odléváním do forem s tvarem, který je definován v příslušné normě zkoušky. [11]

Dále můžeme získat již z hotového výrobku vysekáváním (z fólie) nebo obráběním (frézování zkušebního tělesa). [11]

Zkušební těleso, které se chystáme podrobit fyzikálním, nebo mechanickým zkouškám musí být podrobeno tzv. kondicionováním. [11]

#### 7.1.1 Kondicionování

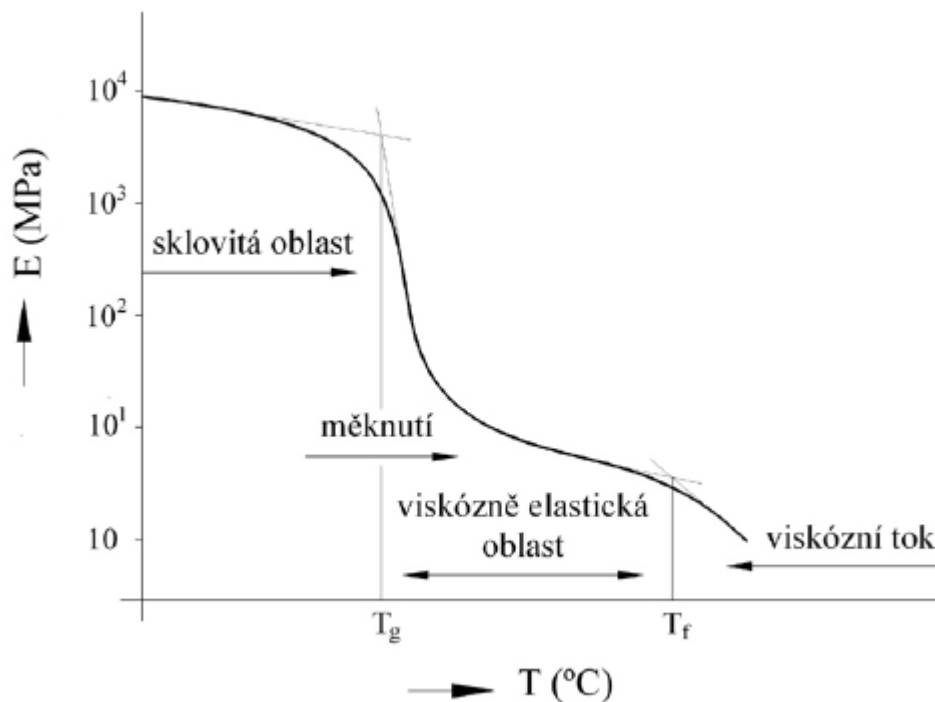
Těleso nesmí být bezprostředně před zkoušením vystaveno fyzikálním, mechanickému nebo chemickému namáhání. Je zde velká možnost, že by mohlo dojít k ovlivnění výsledků zkoušek. [11]

Materiál, který se chystáme podrobit zkouškám, musíme nechat odležet, aby měl čas dosáhnout rovnovážného stavu (teplota, vlhkost). Kondicionováním vzorku se má vyrovnat tzv. historie. [11]

### 7.2 Vliv teploty na mechanické vlastnosti plastů

Kovy jako nízkomolekulární látky mohou existovat ve stavu tuhém, kapalném a plynném.

Polymery vzhledem k rozměrnosti makromolekul ale nemohou být ve stavu plynném. Vyskytují se ve stavu tuhém (sklovitém), kaučukovitém (viskózně – elastickém) a kapalném (viskózním). [7]



Obr. 16. Závislost modulu pružnosti polymeru na teplotě[7]

### 7.2.1 Sklovitý stav

Sklovitý stav se nachází pod teplotou skelného přechodu  $T_g$  a je pro něj charakteristický vysoký modul pružnosti a velmi malá deformace, prakticky nezávislá na čase. Makromolekuly jsou jako celky tuhé, polymer je v tomto stavu tvrdý a křehký. Platí zde Hookův zákon lineární úměrnosti napětí a deformace. [7]

Teplota skelného přechodu  $T_g$  je tedy nejdůležitější fyzikální charakteristika rozhodující o teplotním rozsahu konstrukčního použití plastu. [7]

### 7.2.2 Kaučukovitý stav

Nachází se nad teplotou  $T_g$  a je pro něj charakteristické snadné rozvinutí řetězce při působení zatížení, ale až po určité době. Po uvolnění napětí se řetězce opět pozvolna vracejí do původního stavu, který je pro ně nejstabilnější (viskoelastická deformace). Amorfnní termoplasty a elastomery jsou v tomto stádiu měkké a pružně tvárné, semikrystalické termoplasty jsou pevné a houževnaté. Kaučukovitý stav se projevuje jen v amorfních oblastech polymeru. Reaktoplasty v této oblasti měknou jen málo.[7]

### 7.2.3 Viskózní stav

U lineárních polymerů amorfních leží nad teplotou měknutí  $T_f$ , u lineárních polymerů semikrystalických nad teplotou tání krystalu  $T_m$ . Polymer se nachází ve stavu taveniny.[7]

## 7.3 Rozdělení zkoušek

Podle způsobu stanovení vlastnosti a podle účelu se mechanické vlastnosti dělí na krátkodobé a dlouhodobé.

*Krátkodobé* – vliv relaxačních dějů se považuje za zanedbatelný, stanovení požadovaných parametrů proběhne do několika minut (zkouška tahem, zkoušky tvrdosti)

*Dlouhodobé* – podle charakteru působící síly se dělí na statické (relaxace napětí, kríповé deformační zkoušky) a dynamické (rázová a vrubová houževnatost, cyklické zkoušky). [7]

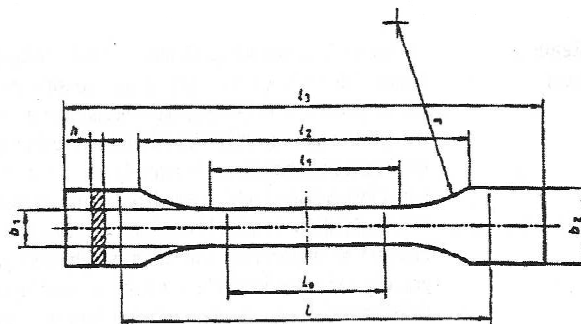
## 7.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem se provádí podle normy ČSN EN ISO 527-1 z 8/1997. Probíhá obdobně jako u kovových materiálů, stejně tak obdobné jsou i vzorce pro výpočet pevnost  $R_m$ , tažnost  $A$  a kontrakce  $Z$ . [12]

Na zkušební těleso se působí ve směru jeho podélné osy stále se zvětšující silou až do okamžiku, při kterém dojde po určité deformaci k jeho přetržení nebo kdy měřené parametry dosáhnou zvolených hodnot. V průběhu zkoušky se trvale zaznamenává síla a prodloužení tělesa. [12]

Vzorky jsou většinou ve tvaru oboustranné lopatky – tzv. osmičky. Volba rychlosti deformace by měla být taková, aby k přetržení došlo kolem 60 sekund. [12]

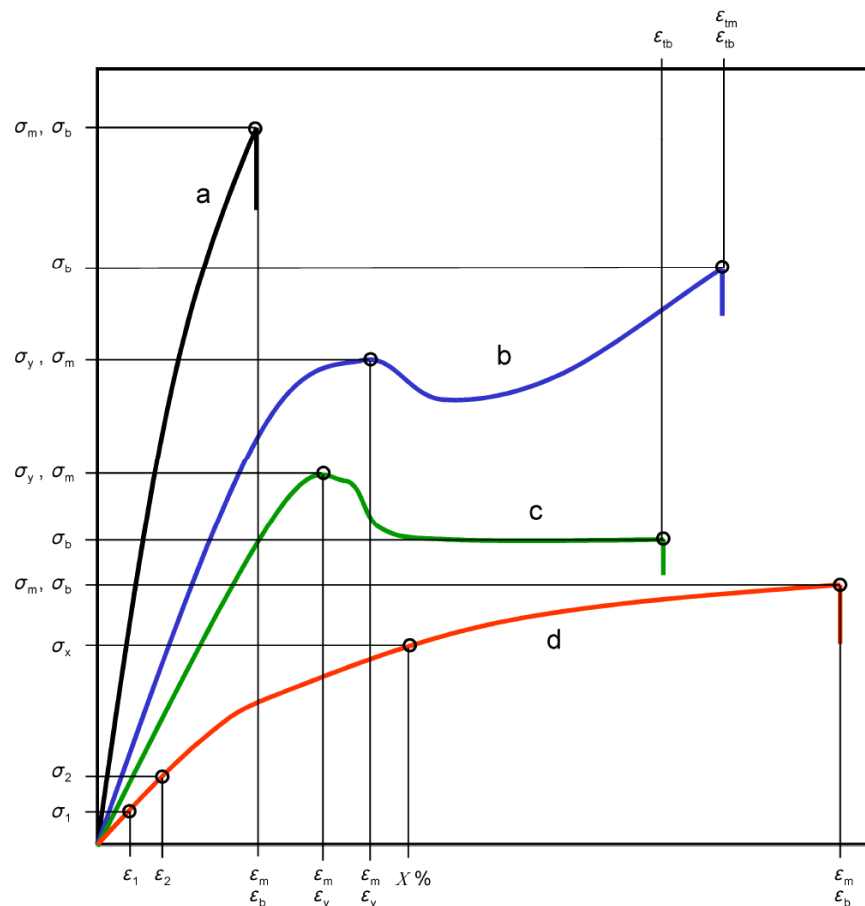
V protokolu je nutné vždy uvádět rychlost deformace, teplotu a relativní vlhkost.[12]



Obr. 17. Tvar zkušební tělesa pro tahové zkoušky [12]

Typ tělesa	Symbol	1A	1B
Celková délka	$l_2$	$\geq 150$	
Délka zúžené rovnoběžné části	$l_1$	$80 \pm 2$	$60 \pm 0,5$
Poloměr	$r$	20 až 25	$\geq 60$
Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi	$l_3$	104 až 113	106 až 120
Šířka konců	$b_2$	$20 \pm 0,2$	
Šířka zúžené rovnoběžné části	$b_1$	$10 \pm 0,2$	
Doporučená tloušťka	$h$	$4 \pm 0,2$	
Počáteční měřená délka	$L_0$	$50 \pm 0,5$	
Počáteční vzdálenost čelistí	$L$	$115 \pm 1$	$l_2 + 5$

Obr. 18. Nejpoužívanější rozměry typů zkušebních těles. [12]



Obr. 19. Charakteristické křivky napětí- poměrné prodloužení plastů a pryží. [12]

- křehké reaktoplasty a amorfní termoplasty
- termoplasty s omezenou možností orientací makromolekul a střední houževnatostí
- termoplasty s dobrou možností orientací makromolekul a větší houževnatostí (hlavně semikrystalické)

d) nekystalizující pryže a blokové polymery. [12]

## 7.5 Zkouška tlakem

Zkouška tlakem u plastů se provádí dle normy ČSN EN ISO 604 z 6/1998. Při tomto druhu namáhání dochází ke zkracování zkušební tělesa. [13]

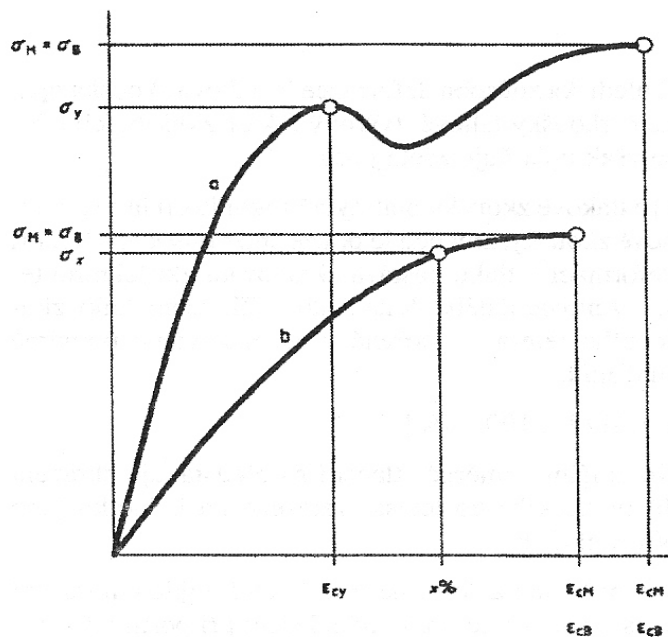
U tuhých, tvrdých a křehkých plastů napětí v tlaku stoupá do meze pevnosti, která je destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztříštění nebo pomalejšímu rozdrcení materiálu. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušební tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost.[13]

Při stlačování houževnatých a měkčích plastů se těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci.[13]

Tlakové vlastnosti jsou konstrukčně zajímavé do meze kluzu.

Zkušební tělesa mají tvar hranolu, válce nebo trubky – délka 10 až 50 mm, šířka 10 mm, tloušťka 4 mm. [13]

V průběhu zkoušky se stanovuje síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušební tělesa.[13]



Obr. 20. Obecné tlakové křivky. [13]

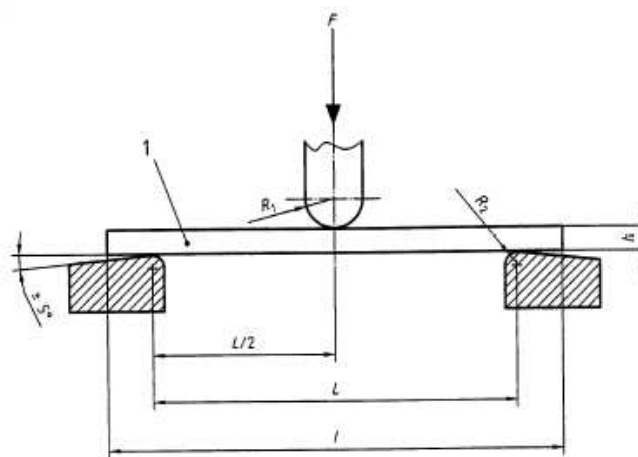
## 7.6 Zkouška ohybem

Další základní zkouškou pro plasty je zkouška ohybem, které je definována normou ČSN EN ISO 178 z 8/1998. [14]

Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky síla (napětí) – průhyb, ze kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. [14]

Zkouška dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné. [14]

V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa. [14]



### Legenda

1 zkušební těleso

$F$  použitá síla

$R_1$  poloměr zatěžovacího tmu

$R_2$  poloměr podpěr

$h$  tloušťka zkušebního tělesa

$l$  délka zkušebního tělesa

$L$  rozpětí mezi podpěrami

Obr. 21. Třítodový systém ohybové zkoušky. [14]

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. [14]

Napětí v ohybu je podílem ohybového momentu  $M$  (při zatížení  $F$ ) a modulu průřezu zkušebního tělesa  $W$ . [14]



## 7.7 Zkoušky tvrdosti

Podstatou zkoušek je vtlačování tvrdých hrotů definovaných tvarů za stanovených podmínek do povrchu zkušebního tělesa. [15]

Principem měření je určení vztahu mezi silou, která vtlačuje tvrdý hrot, a plochou otisku, která vtlačováním hrotu vznikne. [15]

Vzhledem k tomu, že plasty jsou materiály převážně houževnaté a jejich povrchy se vtlačováním více či méně deformují, vyvinuly se tyto zkoušky v měření odporu celého objemu proti vtlačování hrotu. Tvrdost je vlastně vyjádřením tuhosti plastů. [16]

Metody měření se dělí podle tvaru hrotu: kulička, jehlan, kužel, komolý kužel. [15]

Vzhledem k viskoelastickému chování polymerů nelze měřit stopu po vpichu tvrdoměru, ale měří se rovnovážná hloubka vniknutí hrotu při určité konstantní síle vtlačování. Tvrdost (tuhost) může být silně ovlivněna teplotou, stupněm navlhnutí u polárních plastů, stupněm krystalinity. Kondicionování. [2]

### 7.7.1 Zkouška tvrdosti měřena dle Brinella

Tato zkouška je popsána v normě ČSN 640128 z 3/1953. Těleso, které se vtiskuje do zkoušeného materiálu má tvar kuličky o konstantním průměru  $5 \pm 0,1$  mm. Na vzorek působíme konstantním zatížením. [16]

Proměnnou je zde hloubka vtisku, která se po určité době odečítá pomocí hloubkového indikátoru. Tvrdost je vyhodnocována podle vzorce:

$$HB = F/A = F/\pi.D.h \quad [\text{MPa}]$$

- průměr kuličky (mm)

- použitá síla [N]

- doba působení síly [s]

[16]

### 7.7.2 Zkouška tvrdosti měřena dle Vickerse

Průběh zkoušky je popsán v příslušné normě ČSN EN ISO 6507-1, kde se vtlačuje čtyřboký diamantový jehlan do zkoušeného vzorku. [17]

Princip měření spočívá v tom, že po provedení vtisku určitou konstantní silou se měří úhlopříčky vzniklé stopy. Úhlopříčné stopy vzniknou působením jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Tvrdoost se vypočítá podle vzorce:

$$HV = F/A = 1,8544.F/u^2 \text{ [MPa]}$$

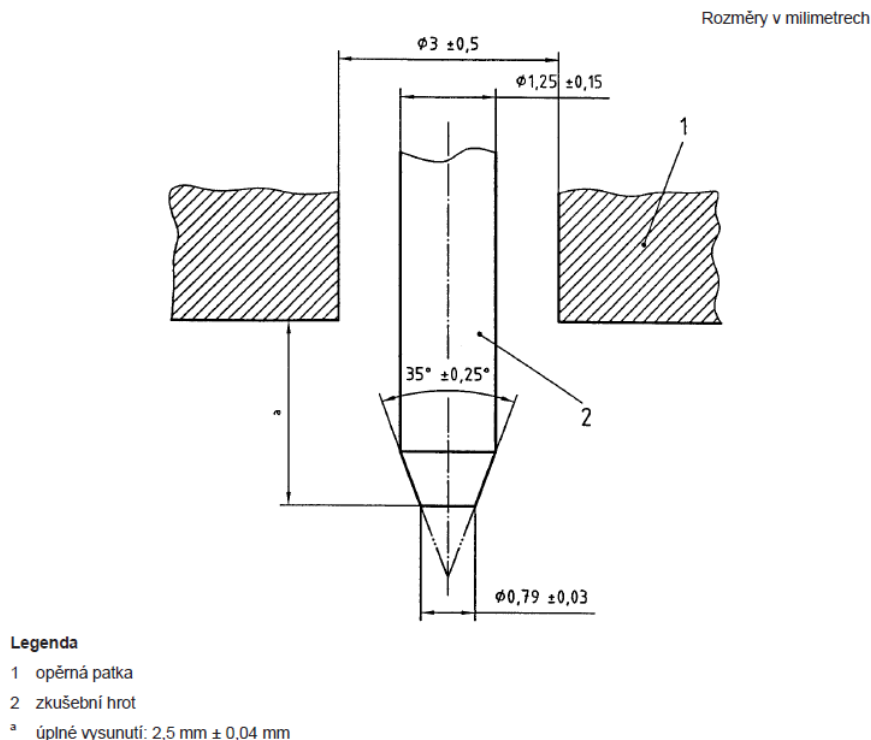
F -použitá síla [N]

u - délka úhlopříčné stopy [mm]. [17]

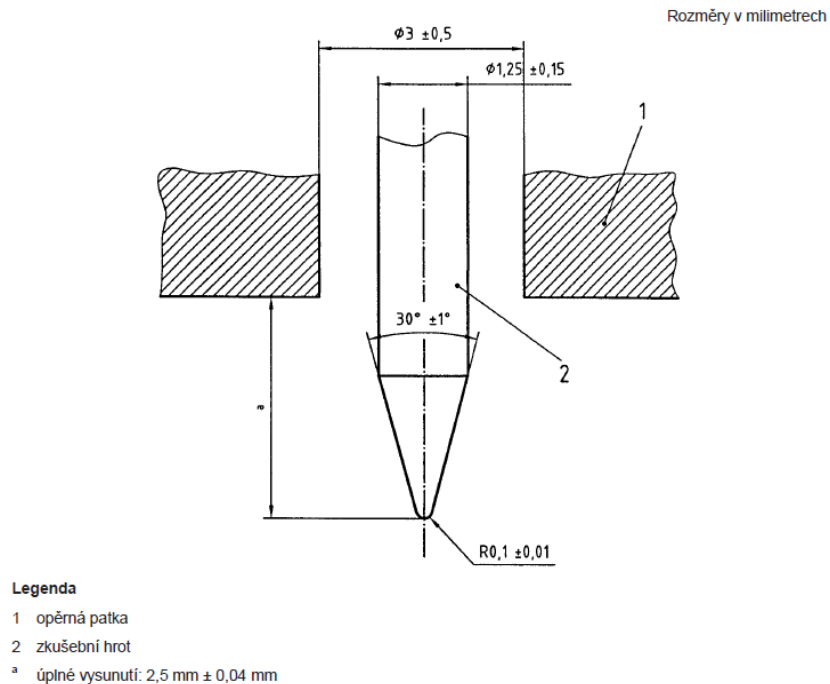
### 7.7.3 Zkouška tvrdosti měřena dle Shoreho

Velice rozšířená zkouška pro plasty, která se řídí normou ČSN EN ISO 868 z 2/1999. Pro měkčené plasty Shore A, pro houževnaté Shore D. [18]

Typické je zatěžování pomocí kalibrovaných pružin, které je nutno před měřením kontrolovat a vynulovat. Hroty mají tvar kužele (typ D) nebo komolého kužele (typ A). Hodnota tvrdosti se odečítá ze stupnice tvrdoměru za  $15 \pm 1$  sekund po jeho přiložení. Výsledkem zkoušky je průměr z 5 měření. [18]



Obr. 22. Zkušební hrot tvrdoměru typu A. [18]



Obr. 23. Zkušební hrot tvrdoměru typu D. [18]

## 7.8 Rázová a vrubová houževnatost

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým charakteristikám. Je to schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Houževnatost představuje energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než se poruší. Zkoušky poskytují určité informace o chování plastů při nárazu. Výsledky stanovení závisí na druhu plastu, jeho složení, teplotě, zkušební metodě, podmínkách provedení zkoušky, tvaru zkušebního tělesa. Houževnatost lze ovlivnit volbou aditiv. [2]

Rázová houževnatost je energie spotřebovaná na porušení zkušebního tělesa vztažená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek, označuje se  $a_n$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). [2]

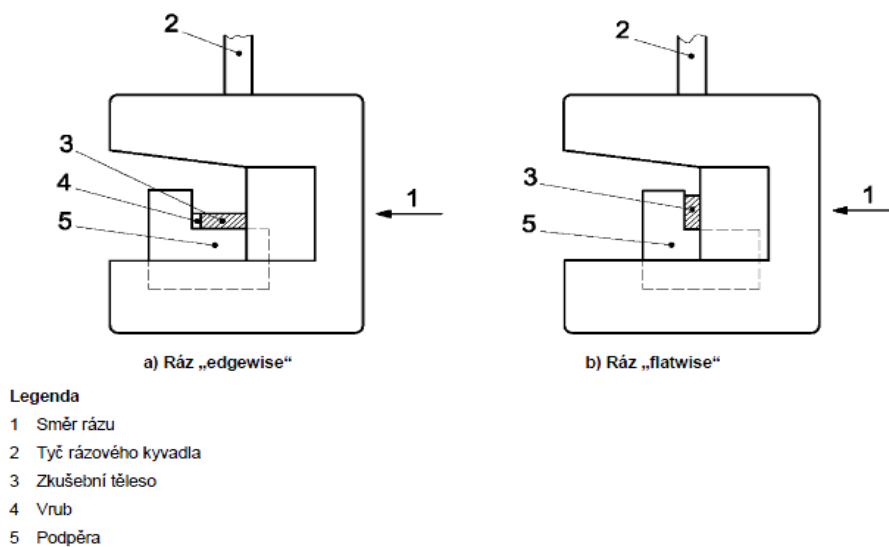
Vrubová houževnatost – plocha kritického průřezu v místě vrubu, označuje se  $a_k$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). Vrubové číslo, vrubová citlivost (poměrná rázová houževnatost) je poměr vrubové a rázové houževnatosti,  $K^Z$  (číslo menší než 1). [2]

Existuje celá řada zkoušek, kterými se dá tato hodnota získat. Mezi takové nejpoužívanější můžeme zařadit metodu Charpy (ČSN EN ISO 179 z 6/1998), Izod (ČSN EN ISO 180 z 6/1998), Dynstat (ČSN 64 0611 z 2/1968), rázové zkoušky tahem a rázové zkoušky padajícím závažím.

### 7.8.1 Metoda Charpy

Kyvadlové kladivo s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles, bývá opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie  $W$  (spotřebovaná práce) odečítá přímo. Odečtené hodnoty mají ležet mezi 10 a 80 % celkového rozsahu stupnice. Vruby ve zkušebních tělesech mohou mít různé tvary (normováno). [19]

Při zkoušce se tělesa ukládají tak, aby vrub byl v tahové oblasti (opačná strana tělesa, jež je provedena deformace). Vliv vrubu je značný, vrubová houževnatost až 10 krát nižší než rázová. [19]



Obr. 24. Břit a bloky podpěr pro zkušební těleso typu 1 v okamžiku rázu. [19]

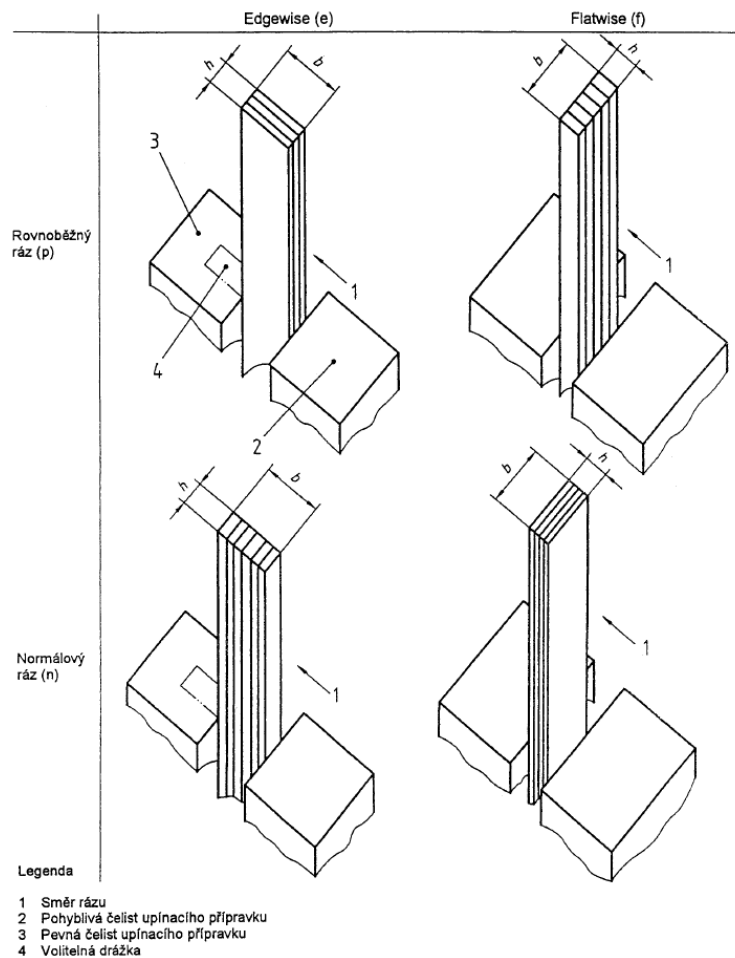
Zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách je přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami. Zkušební těleso je ohýbáno vysokou, nominálně konstantní rychlostí. [19]

V případě rázu na užší stranu za použití zkušebního tělesa opatřeného vrubem je směr rázu veden na opačnou stranu, než na které je umístěn vrub. [19]

### 7.8.2 Metoda Izod

Odlišný způsob přerážení zkušebního tělesa – trámeček se na jednom konci pevně upne a na druhém se přeráží. Tělesa s vrubem ČSN EN ISO 180 z 6/1998 se přeráží ze stejné strany. [20]

Zkušební těleso umístěné jako svislý vetknutý nosník je přeráženo úderem rázového kyvadla, přičemž příčka rázu prochází v dané vzdálenosti od místa upevnění zkušebního tělesa, a v případě zkušebního tělesa opatřeného vrubem v dané vzdálenosti od osy vrubu. [20]

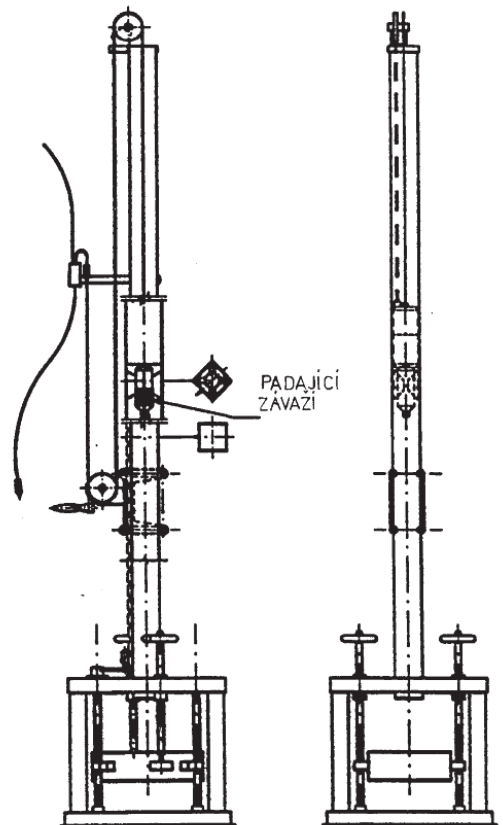


Obr. 25. Znáznornění označení směru rázu. [20]

### 7.8.3 Rázové zkoušky padajícím závažím

Využívají se především pro zkoušení plochých výrobků. Při zkouškách působí na zkušební tělesa volně padající zkušební závaží s různě volenou kinetickou energií. Postupným zvyšováním hmotnosti závaží dojdeme k takové hodnotě energie, která způsobí zlomení vzorku nebo při které praskne 50% zkoušených těles. [21]

Zkušební tělesa uříznutá z delších hlavních profilů jsou vystavena nárazu padajícího závaží, které z určité výšky, při určité teplotě dopadne do bodu ve středu mezi vnitřními stojkami na pohledové ploše profilu. Po ukončení zkoušky se poškození profilu posuzuje vizuálně. [21]

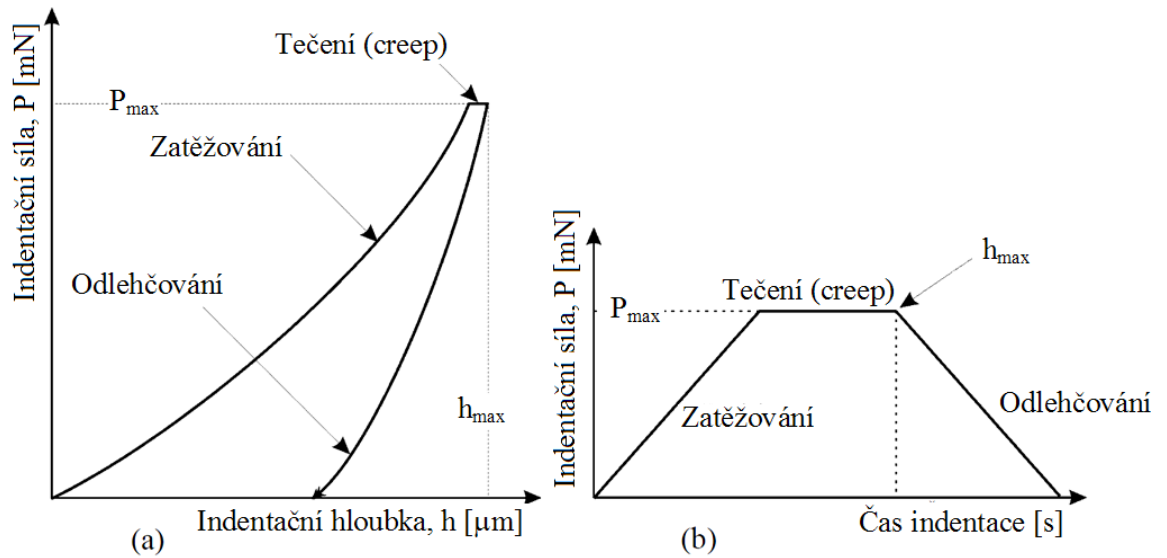


Obr. 26. Zkušební zařízení pro rázovou zkoušku. [21]

## 7.9 Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti – DSI

Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu/poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku (Obr. 27.). [22] [24]

Pomocí instrumentované zkoušky lze vyhodnotit elastický modul, tečení materiálu (creep), lomovou houževnatost, fázové transformace a práci vynaloženou na vtisk. [23]

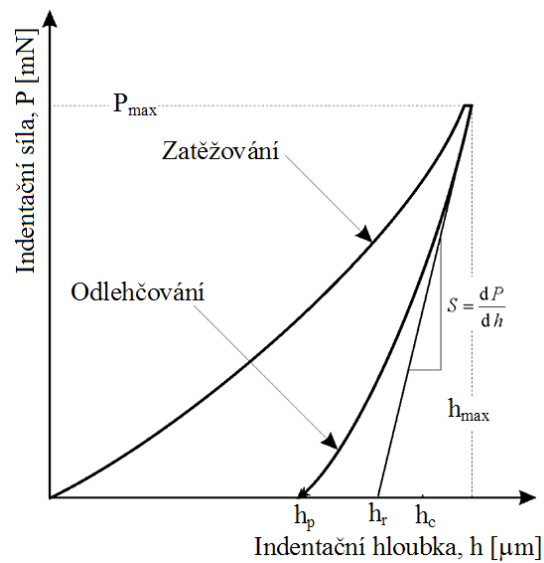


Obr. 27. Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační zkoušky (b). [23]

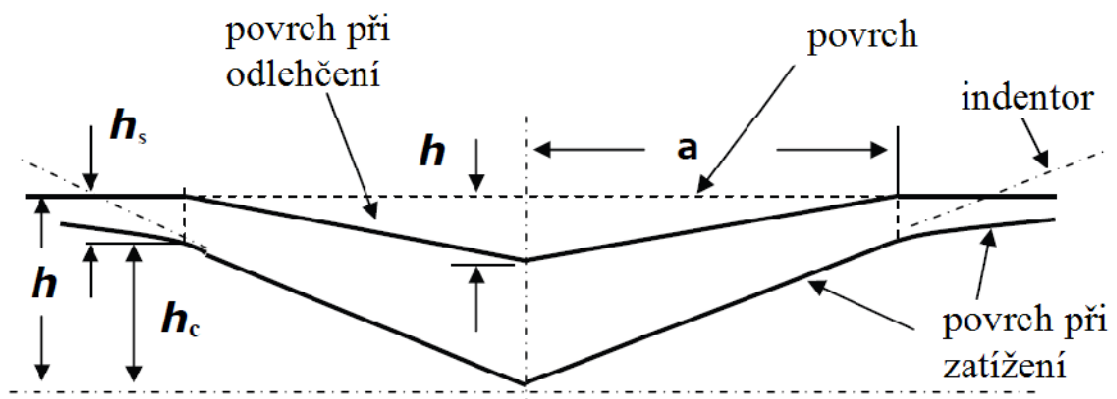
### 7.9.1 Metoda Oliver a Pharr

Výsledkem instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti jsou okamžité hodnoty zatěžující síly  $P$  a hloubky  $h$ . K výpočtu tvrdosti a elastického modulu z těchto dat se v současnosti nejčastěji používá metoda navržená Oliverem a Pharrm. [23] [24]

Metoda je založena na předpokladu elasticko-plastického zatěžování a elastického odlehčování. Základními měřenými veličinami vystupujícími v analýze jsou maximální zatěžující síla  $P_{max}$ , maximální indentační hloubka  $h_{max}$  a kontaktní tuhost  $S$ , definovaná jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky. [23]



Obr. 28. Indentační křivka. [23]



Obr. 29. Schéma zatěžování a odlehčování. [23]

- **Určení tvrdosti**

Vtisková tvrdost HIT je mírou rezistence k trvalé deformaci nebo poškození.

Vtisková tvrdost HIT se obecně definuje jako maximální zatěžující síla  $P_{\text{max}}$  podělené průmětem kontaktní plochy vnikacího tělesa s tělesem zkušebním ( $A_p$ ). [22] [23]

$$H_{IT} = \frac{P_{\text{max}}}{A_p} \quad (4)$$

Martenzova tvrdost HM je funkcí okamžité hloubky vtisku určené při odlehčování indenteru. Tvrdost podle martenze zahrnuje jak plastickou tak elastickou deformaci, proto tato hodnota může být použita pro všechny druhy materiálů.



Martenzova tvrdost  $HM$  je definována jako zatěžující síla  $P$  podělená plochou povrchu vnikacího tělesa  $A_s(h)$  ve vzdálenosti  $h$  od hrotu, tedy: [23] [24]

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} \quad (5)$$

Tvrdost podle Vickerse  $HV$  se určí jako: [23] [24]

$$HM = \frac{P_{max}}{9,81 \cdot A_c(h_c)} \quad (6)$$

Další materiálové veličiny, které lze získat z indentačních zkoušek metodou DSI, je vtiskový neboli indentační modul  $E_{IT}$ , redukovaný modul  $E_r$  a komplexní modul  $E^*$ .

V ideálním případě má vtiskový modul přesně stejný význam jako elastický (Youngův) modul. Obecně se vtiskový modul určí ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$ , přičemž pro indentační vtiskový modul platí: [23] [24]

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (7)$$

kde  $\nu_s$  je Poissonův poměr zkušební tělesa a volí se pro kovové materiály 0,2 až 0,4 a pro polymerní materiály 0,3 až 0,4 a  $E^*$  je komplexní modul.

Redukovaný modul  $E_r$  je definován z následující rovnice: [23] [24]

$$HM = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \sqrt{A_p}} \quad (8)$$

kde  $A_p$  je průmět kontaktní plochy a  $C$  je kontaktní poddajnost.

Komplexní modul  $E^*$  je určen jako: [22] [23]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (9)$$

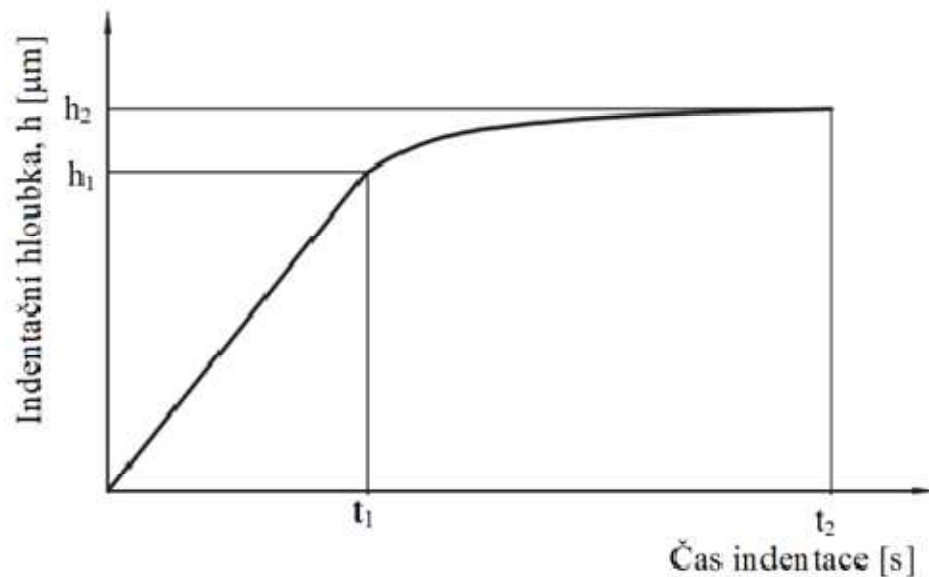
kde  $E_i$  je modul vnikacího tělesa,  $E_r$  je redukovaný modul vtiskového kontaktu a  $\nu_i$  je Poissonův poměr vnikacího tělesa (u diamantu 0,07). [23] [24]

- **Vtiskové tečení**

Jestliže se při konstantním zatížení měří změna hloubky vtisku, může se vypočítat relativní hloubka vtisku, jedná se o hodnotu tečení materiálu (creep). Vtiskové tečení  $C_{IT}$  je určeno ze vztahu: [23] [24]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (10)$$

kde  $h_1$  je hloubka vtisku v čase  $t_1$ , kdy je dosaženo zkušebního zatížení a  $h_2$  je hloubka vtisku v čase  $t_2$  výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení. [24]



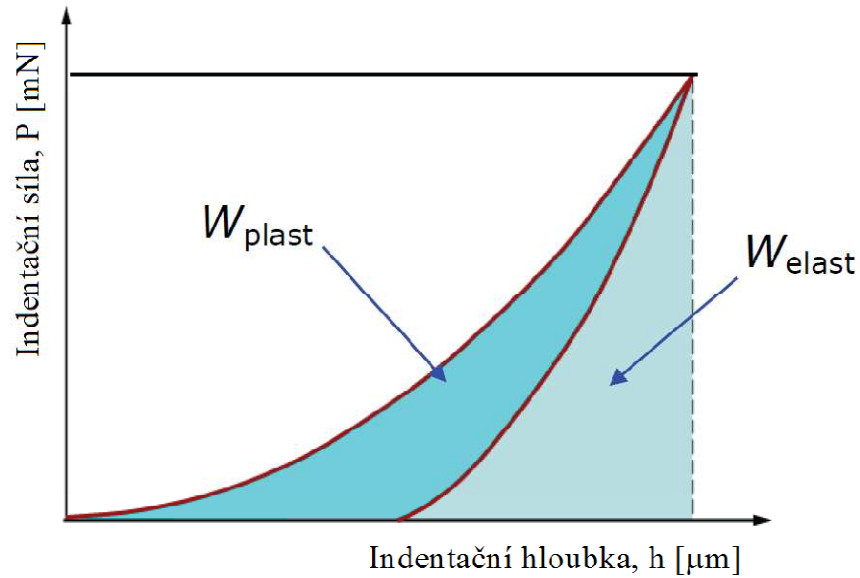
Obr. 30. Vyjádření vtiskového tečení.[23]

- **Deformační práce**

Indentační křivka (obr. 2.08) je obecně zdrojem velkého množství informací. Celková práce  $W_{total}$  spotřebovaná v průběhu indentačního cyklu je rovna ploše pod zatěžovací křivkou. Plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou udává nevratnou plastickou práci  $W_{plast}$  a plocha pod odlehčovací křivkou zase vratnou elastickou práci  $W_{elast}$ . Koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IT}$  je popsán jako podíl elastické práce  $W_{elast}$  a celkové práce  $W_{total}$ . [23]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (11)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (12)$$

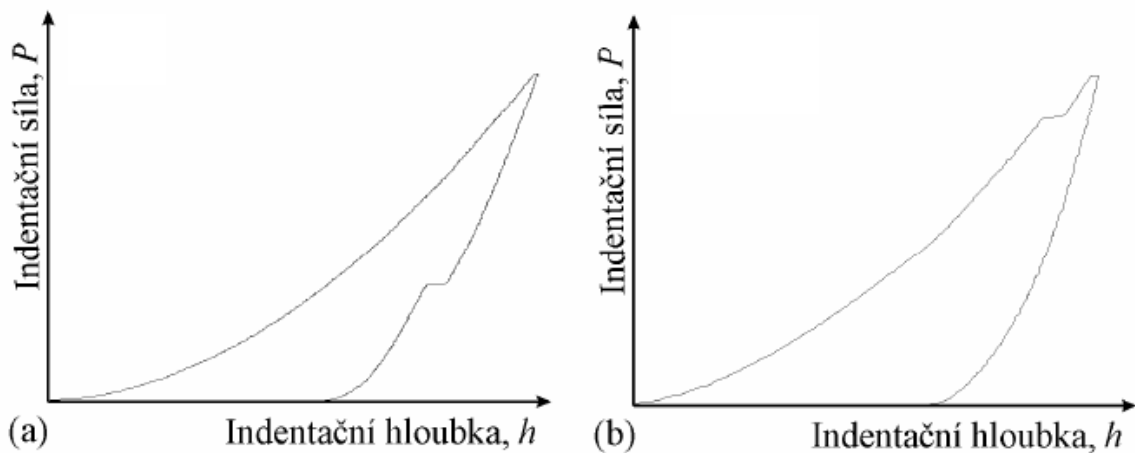


Obr. 31. Indentační křivka. [24]

### 1.1.2. Indentační křivky

Podstatou instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti je kontinuální záznam zatěžující síly  $P$  a okamžité polohy hrotu  $h$ . Grafické vyjádření této závislosti se označuje jako indentační křivka. [22]

Odezva měřeného materiálu na indentaci je hlavním činitelem, který ovlivňuje tvar indentační křivky. Tvar indentační křivky a to jak zatěžující tak odlehčující fázi neslouží pouze k výpočtu tvrdosti a modulu pružnosti, ale je zdrojem dalších velmi důležitých informací. Např. fázová transformace, trhliny a delaminace vrstvy se na indentační křivce projeví nespojitým průběhem (Obr. 32.). [23]

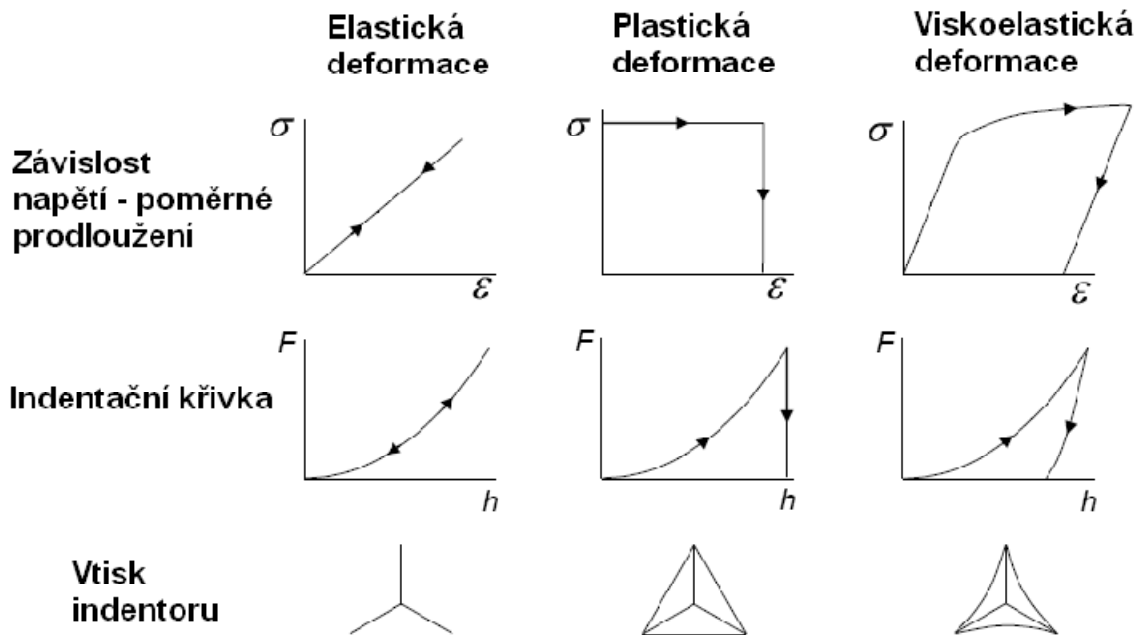


Obr. 32. Nespojitý průběh indentačních křivek (a) fázová transformace, (b) praskání při transformaci. [24]

Jako doplňkovou informaci vypovídající o odezvě materiálu na plynulé zatěžování/odlehčování lze použít grafickou závislost zatížení – čas a nebo závislost hloubka průniku – čas.

Podle reakce na vnější silové působení lze materiály rozdělit do čtyř skupin viz Obr. 33:

1. elastické; 2. elasticko – plastické; 3. plastické; 4. viskoplastické.



Obr. 33. Charakteristické tvary indentačních křivek pro různé materiály. [23]

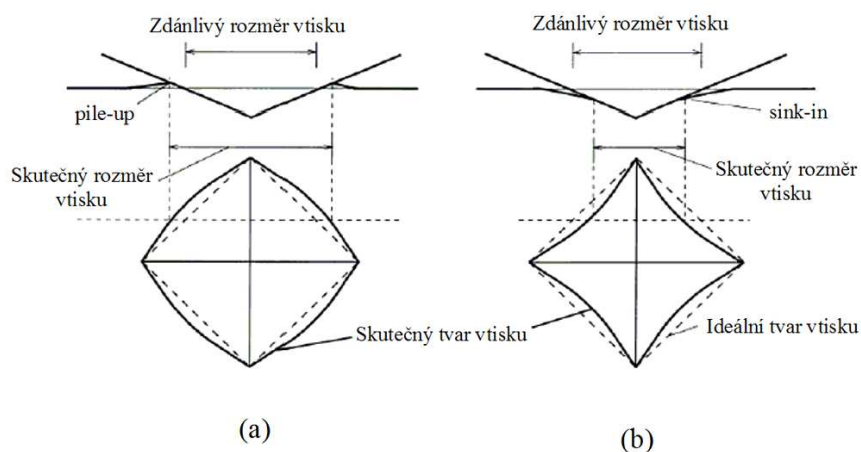
V případě čistě elastické odezvy na indentaci nenastává žádná plastická deformace tj. žádný viditelný zbytkový vtisk. Napětí, která indenter indukují ve vzorku se uloží jako elastická deformační energie, která se v průběhu odlehčování zcela uvolní. U materiálu čistě plastického během indentace nedochází k elastické deformaci. Jestliže uvnitř vzorku nedošlo k rozvoji elastické deformace v průběhu zatěžování, je výsledkem celého indentačního cyklu vtisk, jehož hloubka odpovídá hloubce při maximálně zatíženém indentoru. [23] [24]

Avšak většina materiálů, zejména konstrukčních, reaguje na vnější zatížení elasto-plasticky a jejich indentační křivky tak tvoří střed mezi indentačními křivkami, které vytváří předchozí dvě skupiny materiálů. Zatěžující křivka, elasto-plastického materiálu je určena jak elastickou, tak plastickou deformací indentovaného materiálu. [22]

### 1.1.3. Tvar vtisku

Hlavním cílem indentačních zkoušek je určení mikrotvrlosti a současně elastického modulu zkoušeného vzorku, zaznamenáním průběhu hodnot působícího zatížení na indentor a hloubky průniku indentoru. Jestliže se indentovaný vzorek plasticky deformuje, zůstává v jeho povrchu trvalý vtisk. Velikost vzniklého vtisku je příliš malá na přesné měření optickými technikami, tak jako je tomu u konvenčních zkoušek tvrdosti. Při odlehčování dochází k tzv. relaxaci tj. materiál se „snaží“ dostat do svého původního tvaru uvolňováním elastických deformací. [23] [24]

Je zřejmé, že počáteční deformace při zatěžování jsou elastické. S postupným zvyšováním zatěžující síly dochází ke zvyšování tlaku pod indentorem. Překročí-li takto indukované napětí mez kluzu, pak se projevuje plastická deformace. [2]



Obr. 34. Tvar vtisku, (a) nakupení okraje vtisku (*pile-ip*), (b) vtažení okraje vtisku (*sink-in*). [22]

Pokud v průběhu indentace dochází pouze k elastickému kontaktu, materiál se vtáhne okolo vtisku, mluvíme o efektu *sink-in* (obr. 2.11 b). V praxi však dochází k elasticko-plastickému kontaktu a pak zde může dojít k vtáhnutí materiálu okolo vtisku tj. *sink-in*, nebo k jeho nakupení někdy označované jako vytečení materiálu okolo vtisku pak mluvíme o *pile-up* (obr. 2.11 a). Efekt *pile-up* má tak negativní vliv na určení skutečné velikosti projekční plochy. Efekt *pile-up* podhodnocuje skutečnou projekční plochu až o 60 %, což nadhodnocuje hodnotu tvrdosti a modulu. [23] [24]

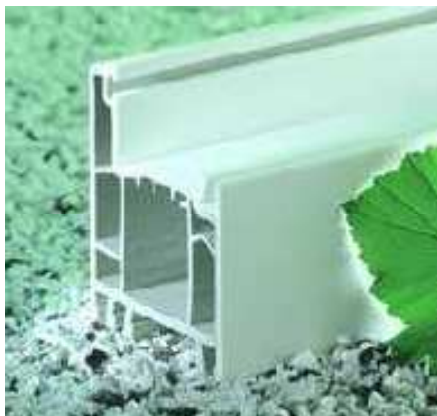
## 8 RECYKLACE PVC

V procesu recyklace se výrobky nebo odpady vzniklé při výrobě shromažďují, třídí a opětovně přetváří na výrobky. Docílíme tak, že vstupní suroviny (polotovary) se nám opět vrací do výrobního procesu a důsledkem toho se sníží objem odpadu, který končí na skládkách. Tyto skládky mají vliv na ekologii – především uvolňování nebezpečných látek do ovzduší, půdy a podzemních vod.

Z tohoto důvodu se s procesem recyklace setkáváme častěji v různých způsobech. Můžeme ji rozdělit na mechanickou nebo chemickou. Odpad však můžeme využít i pro získání energie – spalování. [25]

### 8.1 Mechanická recyklace

Během mechanické recyklace nedochází ke změně chemického složení recyklovaného materiálu. Podmínkou pro efektivitu je velké množství homogenních a vytríděných plastových vratných materiálů (odpadů). Tento způsob mechanické recyklace nám umožňuje vyrábět zboží velmi podobné kvality – primární mechanická recyklace. Výrobky, které lze získat tímto způsobem recyklace jsou nejčastěji: nádoby, trubky, střešní krytiny a okenní rámy. [25]



Obr. 35. Okenní profil z PVC recyklátu [25]

V praxi se také setkáváme se sekundární mechanickou recyklací – recyklace směsných odpadů. Technologicky je náročnější než primární, protože dochází ke zpracování kompozitních výrobků a méně kvalitní průmyslové a technologické a technologické plastové odpady. Problém nastává především při homogenizaci vlivem rozdílných teplot tavení. Výrobky, které vznikají sekundární mechanickou recyklací, se vyznačují nižší užitnou hodno-

tou a využívají se především v zahradní architektuře (zatravnovací dlaždice, obrubníky) nebo jako přepravní jednotky (palety, přepravky). [25]



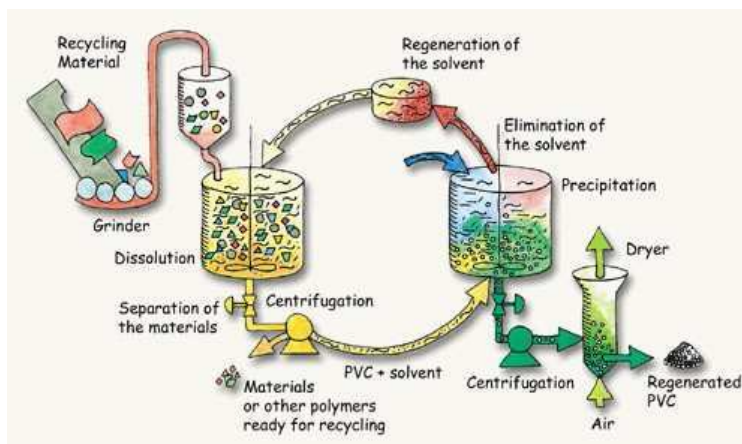
*Obr. 36. Paleta z PVC recyklátu [25]*

## **8.2 Recyklační proces VinyLoop**

Dojde-li k problému se znečištěním pastového odpadu cizorodými látkami, které nelze snadno oddělit nebo je problematické je oddělit běžnými třídícími procesy, zařazuje se recyklační metoda VinyLoop. [25]

Tento způsob recyklace umožňuje recyklovat heterogenní výrobky např. kabely, hydroizolační fólie a podlahové krytiny. [25]

Materiál určená k recyklaci se nejdříve rozemele nebo rozdrťí a vhodným rozpouštědlem (metyletylketon) se PVC rozpustí. Odseparují se různorodé částice (měď z kabelů, výztuže) od PVC a ve vodném roztoku se od sebe oddělí. K rozpouštění dochází za přívodu tepla a znemožnění přístupu vzduchu. Pomocí vodní páry se vysráží rozpouštědlo, které zregeneruje a vrací se zpět do výrobního oběhu. Nakonec se regenerovaný PVC vysuší vzduchem. U recyklátu nedochází k výraznému narušení tepelné stability, tvrdost lze během procesu upravovat dle potřeby. Doporučuje se recyklát využívat na výrobky tmavších odstínů. [25]



Obr. 37. Princip recyklace ViniLoop [25]

### 8.3 Spalování

Pokud nelze PVC recyklovat některým již zmíněným způsobem, můžeme ho využít pro opětovné získání energie tzv. spalováním. Obecně plasty jsou dobře spalitelné již při teplotách okolo 900 °C. PVC co se týče výhřevnosti je na tom obdobně jako dřevo. Přestože při jeho spalování vzniká méně oxidu uhličitého, dochází také k uvolňování nebezpečných zplodin - chlór, dioxiny, furanů, apod. Proto je nezbytně nutné tyto škodlivé plyny během procesu spalování čistit a odstraňovat. [25]

### 8.4 Skládování

Skládování PVC je až poslední možností, jak s tímto odpadem nakládat. Děje se tak ve chvíli, kdy není možné využít vhodný způsob recyklace nebo využití opětovného získání energie. Odpad PVC je ukládán na řízenou skládku, která splňuje všechny kritéria pro ochranu životního prostředí. Tato skládka je přísně sledována a testována na kontaminaci škodlivých látek do okolní půdy. [25]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 9 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv  $K$  – hodnoty na mechanické vlastnosti PVC. Měřené byly pevnostní charakteristiky PVC (pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu apod), zkoušky tvrdosti (Shore A a Shore D), rázová zkouška padajícím tloučkem a zkoušky mikrotvrdosti. Naměřené výsledky byly graficky vyhodnoceny a zpracovány.

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

## 10 POUŽITÉ MATERIÁLY

Směs obsahuje obvykle používané komponenty jako je polymer PVC, plnivo, externí mazivo, tepelný stabilizátor, změkčovadlo a epoxidový sojový olej.

### 10.1 Polymer polyvinylchlorid

Vlastnosti tohoto typu polymeru jsem zmiňoval v předchozích kapitolách. Na trhu se pohybuje spousta výrobců a dodavatelů, kde rozhodujícím faktorem pro výběr je cena a kvalita. Polymer se volí dále dle aplikace a na základě tohoto zjištění se volí K-hodnota u PVC. Pro náš výzkum jsem zařadil do směsi suspenzní PVC.

#### 10.1.1 Polyvinylchlorid s hodnotou K60 – Neralit 601

Suspenzní polyvinylchlorid Neralit 601 je určen na výrobky převážně z tvrdého (neměkčeného) PVC. Pro zpracování je vhodná technologie vstřikování, vyfukování, válcování (kalandrování) a vytlačování. Umožňuje výrobu transparentních výrobků.

#### 10.1.2 Polyvinylchlorid s hodnotou K65 – Ongrovil S - 5064

Ongrovil S-5064 je vhodný především pro tuhé aplikace. Doporučuje se pro vytlačované nebo kalandrované fólie či desky, stejně jako pro vstřikování a výrobu dutých předmětů.

#### 10.1.3 Polyvinylchlorid s hodnotou K70 – Ongrovil S - 5070

Ongrovil S-5070 je vhodný jak pro tuhé a měkčené aplikace. Doporučuje se pro vytlačování kabelových a jádrových izolací, kalandrované a foukané fólie, vytlačované měkčené profily a desky, vstřikované výrobky a výroba tuhých profilů.

#### 10.1.4 Polyvinylchlorid s hodnotou K75 – Solvin 275SC

Jedná se o suspenzní PVC, které je vhodné pro vytlačování a válcování. Požívá se na výrobu oplášťování kabelů (izolace), pružné fólie, nepromokavé membrány a pružné profily.

## 10.2 Změkčovadlo – DINP (diizononylphthalate)

DI-isononyl ftalát (DINP) je směsí izomerů. Je to olejovitá viskózní tekutina. Ve vodě se DINP nerozpouští.

Používá především jako změkčovadlo ve výrobcích z PVC, jako jsou například hračky, oblečení, obuv, podlahové krytiny. Dále své uplatnění nachází v polymerních aplikacích nebo jako složka lepidel, nátěrů, laků a těsnících hmot.

## 10.3 Plnivo – Calplex 2T

Calplex2T plnivo s vysoce kvalitním upraveným povrchem vyráběné z přírodního uhličitanu vápenatého. Povrchovou úpravou se docílíme částice zcela hydrofobní, což je důvod, proč jsou více rozptýlené. Procesní charakteristika se zlepšuje a vlhkostní vazba poklesla. Plnivo se používá u plastických hmot např. pro těsnění v průmyslu a v gumárenském zpracovatelském průmyslu.

## 10.4 Externí mazivo – Luwax a Powder

Uhlovodíkové vosky jako Luwax a Powder jsou pouze mírně rozpustné v PVC, s tím výsledkem, že mají výrazný vnější mazací účinek. Luwax a Powder může být použit jako maziva pro neměkčené a měkčeného PVC. Zabraňuje přehřátí taveniny ve zpracovatelském stroji. Přidáním vosku docílíme zvýšený lesk, hladkost, vodní odpudivost povrchu a snadnější zpracovatelnost. Doporučuje se kombinovat s interním mazivem. Jednou z aplikací, ve kterých Luwax a Powder získává významu je extruze – povrchy jsou hladší, lesklejší, hydrofobní a mají nepřilnavý povrch.

## 10.5 Tepelný stabilizátor – Ca/ZnStabiol 2881-4

Ca/Znstabilizátor je vhodný pro měkčené směsi PVC-P. Zpracovávat se nejvíce hodí u procesu válcování na barvené fólie. Od začátku drží barevnou stálost, dlouhodobou stabilitu, má dobré mazací účinky a dynamickou termostabilitu.

## 11 NAVAŽOVÁNÍ A MÍCHANÍ SMĚSI

Navržená receptura byla testována ve čtyřech variantách (tab. 4-7), kde se měnil pouze polymer PVC dle jeho K – hodnoty.

Tab. 4. Složení směsi s PVC K - hodnota 60.

Surovina	% hm
<b>PVC K60</b> Neralit 601	59,7
<b>Změkčovaadlo</b> DINP	16,5
<b>Plnivo</b> CaCO <sub>3</sub> - Calplex 2T	15
<b>Externí mazivo</b> Luwax a Powder	0,4
<b>Tepelný stabilizátor</b> Ca/Zn -Stabiol 2881/4	2,5

Tab. 5. Složení směsi s PVC K - hodnota 65.

Surovina	% hm
<b>PVC K65</b> Ongrovil 5064	59,7
<b>Změkčovaadlo</b> DINP	16,5
<b>Plnivo</b> CaCO <sub>3</sub> - Calplex 2T	15
<b>Externí mazivo</b> Luwax a Powder	0,4
<b>Tepelný stabilizátor</b> Ca/Zn -Stabiol 2881/4	2,5

Tab. 6. Složení směsi s PVC K - hodnota 70.

Surovina	% hm
<b>PVC K70</b> Ongrovil 5070	59,7
<b>Změkčovaadlo</b> DINP	16,5
<b>Plnivo</b> CaCO <sub>3</sub> - Calplex 2T	15
<b>Externí mazivo</b> Luwax a Powder	0,4
<b>Tepelný stabilizátor</b> Ca/Zn -Stabiol 2881/4	2,5

Tab. 7. Složení směsi s PVC K - hodnota 75.

Surovina	% hm
<b>PVC K75</b> Solvin 275 SC	59,7
<b>Změkčovadlo</b> DINP	16,5
<b>Plnivo</b> CaCO <sub>3</sub> - Calplex 2T	15
<b>Externí mazivo</b> Luwax a Powder	0,4
<b>Tepelný stabilizátor</b> Ca/Zn -Stabiol 2881/4	2,5

Navazování probíhalo do čtyř řádně vyčištěných nádob (hrnce) pomocí laboratorní váhy. Každá nádoba byla individuálně zvážena, pro konečnou kontrolu celkové hmotnosti směsi. Nejdříve se laboratorní váha s nádobou vynulovala a navážily se sypké komponenty. Následně se navážily tekuté komponenty – DINP.

Celková váha nachystaného vzorku pak byla součtem hmotnosti směsi dle receptury a nádoby.



Obr. 38. Navážená směs.

## 12 HOMOGENIZACE A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Navážená a řádně promíchaná směs PVC s adpektivy se plastifikovala na laboratorním dvouválci, ze kterého se vytáhla fólie. Tato fólie byla dále použita pro vyseknutí normalizovaného tvaru zkušební tělesa pro tahovou zkoušku. Ze zbylého materiálu se naplnila lisovací forma pro zkušební tělesa, která dále sloužila pro zkoušku tvrdosti (ShA, ShD), měření mikrotvrdosti a destruktivní zkoušce padajícím závažím.

### 12.1 Homogenizace na laboratorním dvouválci

Míchací dvouválce se svou konstrukcí liší od běžných hnětacích zařízení, ale používají se k hnětení (plastikaci).

Promíchaná směs byla nasypána mezi vyhřáté válce. Při hnětení se kolem předního válce opásal materiál a přebytek hnětené směsi se shromažďoval v návalku nad štěrbinou mezi válci. Válce mají rozdílnou obvodovou rychlost. Opásaný přední válec materiálem má menší rychlost než zadní a proto dochází mezi nimi k hnětení (plastikaci). Tento rozdíl obvodových rychlostí, který se vyjadřuje poměrem (1 : 1,1-1,3), se nazývá skluz. Se zvyšujícím se poměrem intenzita hnětení roste. [26]



Obr. 39. Laboratorní dvouválec

Každý vzorek se homogenizoval po dobu 10 minut a následně byla vytažena fólie. Štěrbina se upravovala tak, aby výsledná tloušťka fólie odpovídala 0,3 mm. Tato hodnota byla dodržena u všech vzorků.



*Obr. 40. Měření tloušťky vytažené fólie*

## 12.2 Příprava zkušebních těles

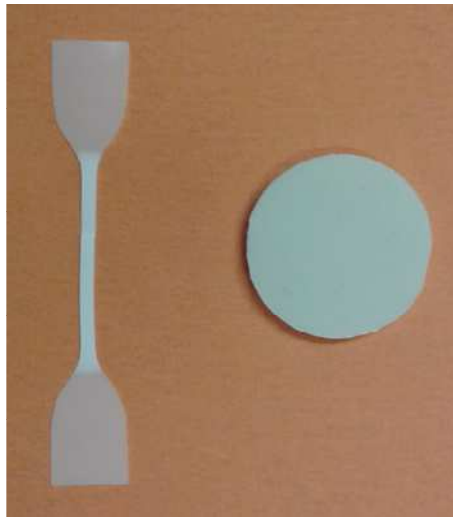
Za pomoci lisu a střížného nástroje se připravily vzorky z fólie pro tahovou zkoušku. Protože fólie byla orientována v podélném a příčném směru, vystříhly se zkušební tělesa souběžně s podélným směrem a kolmo na něj.



*Obr. 41. Lisovací zařízení se střížným nástrojem*



Zbýlý materiál z fólie byl použit pro výrobu zkušebních pro zkoušky tvrdosti, mikrotvrdosti a destruktivní zkoušce padajícím tělesem. Na tyto zkoušky nám postačila kolečka o průměru 60 mm a tloušťce 5 mm. Kolečka se vyrobila ze zbylé fólie vylisováním ve formě.

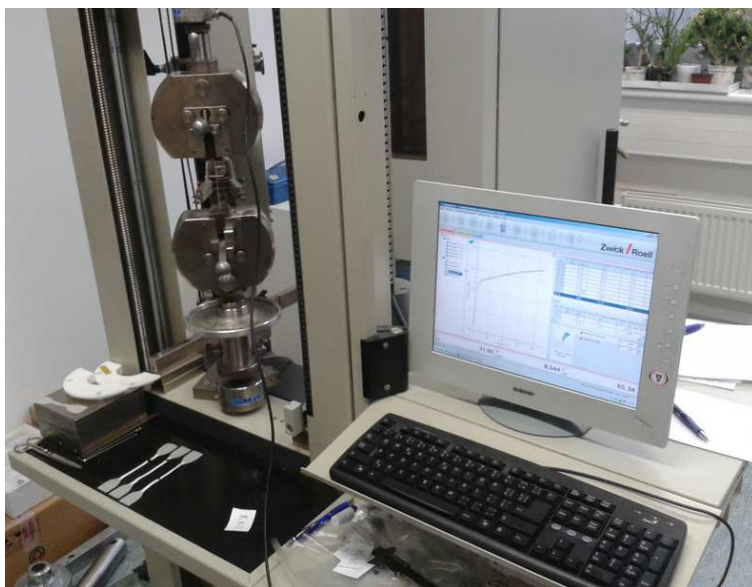


*Obr. 42. Zkušební tělesa*

## 13 ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška tahem je za normálních podmínek (tlak, teplota) jednou z nejběžnějších zkoušek pro získání informací o mechanických vlastnostech zkoušeného materiálu. Byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-1.

Zkušební těleso je namáháno ve směru stejném jako působící síla až do jeho porušení. Průběh zatížení a prodloužení je zaznamenáván do grafu a jeho významné hodnoty jsou zapsány v tabulce.



*Obr. 43. Universální zkušební stroj Zwick 1456*

Pro naši zkoušku byl využit universální zkušební stroj Zwick 1456 s maximálním posuvem příčnicku 800 mm a snímačem síly v rozsahu 2,5 – 20 kN. Zkušební zařízení je opatřeno softwarem pro vyhodnocení zkoušky tahem, ohybem a tlakem. Je možné využít teplotní komoru pro temperaci zkušebních těles. Pro náš výzkum však nebyla použita.

### 13.1 Měření vzorku PVC s rozdílnou K-hodnotou

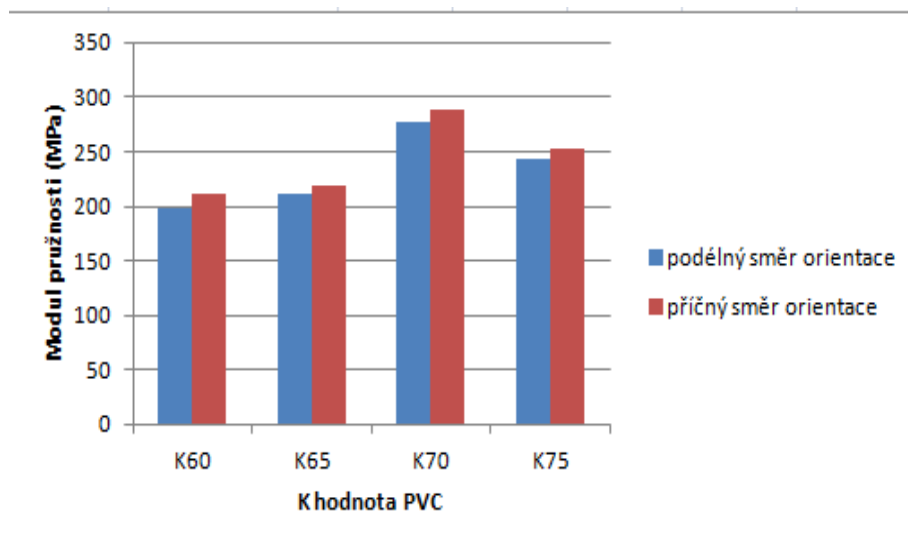
U zkušebních těles, která byla zhotovena válcováním, je třeba zohlednit anizotropii (příčná a podélná orientace).

*Tab. 8. Modul pružnosti v podélném směru orientace*

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (MPa)	199	212	278	244
střední kvad. odchylka	1,41	1,33	1,81	1,78

Tab. 9. Modul pružnosti v příčném směru orientace.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (MPa)	212	218	289	253
střední kvad. odchylka	1,23	1,64	1,71	1,59



Obr. 44. Srovnání modulu pružnosti v podélné i příčné orientaci.

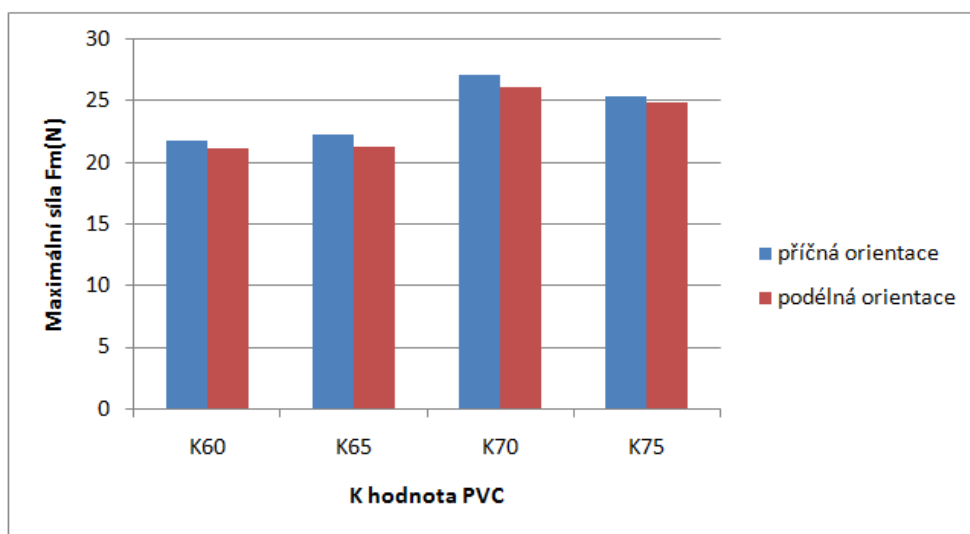
Nejvyšší modul pružnosti byl dosažen u hodnoty K70, jak je patrné z tabulek (Tab. 8., Tab. 9.) a obrázku (Obr. 44), kde dosahoval maximální hodnoty 289 MPa. Nejnižší modul pružnosti jsme naměřili u hodnoty K60, jejíž hodnota byla 199 MPa.

Tab. 10. Maximální síla v podélném směru orientace.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (N)	21,1	21,3	26,2	24,9
střední kvad. odchylka	1,61	1,58	1,22	1,66

Tab. 11. Maximální síla v příčném směru orientace.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (N)	21,8	22,3	27,1	25,4
střední kvad. odchylka	1,63	1,32	1,41	1,22



Obr. 45. Srovnání maximální síly při porušení v podélné a příčné orientaci.

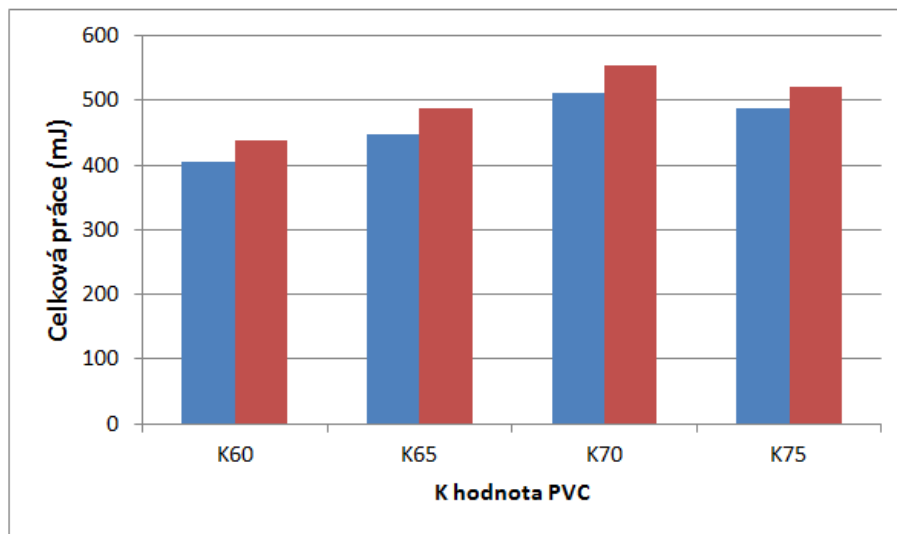
Nejvyšší hodnota maximální síly byla dosažena u hodnoty K70, kterou můžeme vyčíst s tabulek (Tab. 10., Tab. 11.) a grafického znázornění na obrázku (Obr. 45.), kde naměřená hodnota byla 27,1 N a nejnižší dosažená síla byla zjištěna u hodnoty K60, kde jsme naměřili 21,1 N.

Tab. 12. Celková práce v podélné orientaci.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (mJ)	438	487	554	521
střední kvad. odchylka	1,48	1,21	1,19	1,17

Tab. 13. Celková práce v příčné orientaci.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (mJ)	405	447	511	489
střední kvad. odchylka	1,32	1,25	1,39	1,27



Obr. 46. Srovnání celkové práce v podélné a příčné orientaci.

Celková práce potřebná k porušení tělesa byla nejvyšší u vzorku s hodnotou K70, jak můžeme vyčíst s tabulek (Tab. 12., Tab. 13.) a obrázku (Obr. 46.), kde bylo naměřeno 554 mJ a naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u hodnoty K60, kde bylo naměřeno 405 mJ.

## 14 ZKOUŠKA TVRDOSTI

Tvrdość byla měřena metodou Shore D a byla provedena dle normy ČSN EN ISO 868 z 2/1999. Pro měkčí materiály se běžně využívá metoda Shore A. Naše směs se při metodě Shore A pohybovala ve vyšších hodnotách, kde jsem naměřil v průměru 100 ShA. Pro výzkum jsem tedy zvolil metodu Shore D pro vypovídající hodnoty.



Obr. 47. Zkušební těleso pro měření tvrdosti.

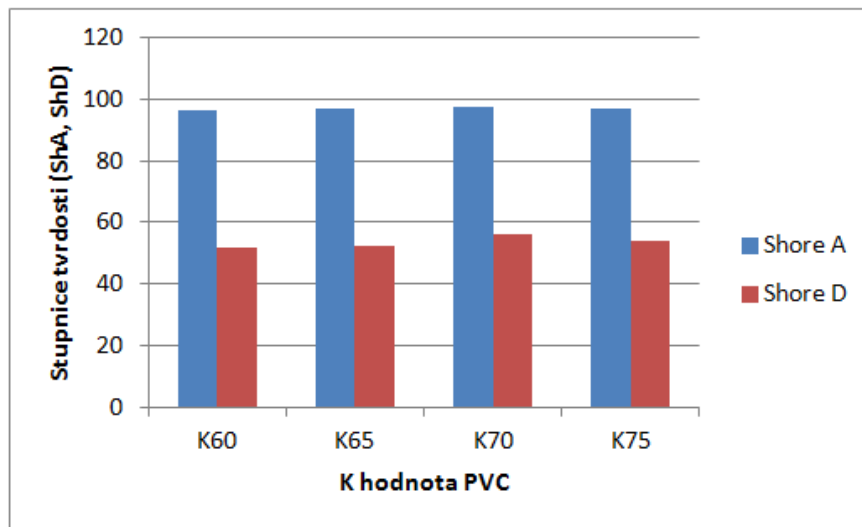
Zkušební tělesa jsem použil vylišované kolečka o průměru 60 mm a tloušťce 5 mm. Před měřením proběhla důkladná vizuální kontrola na zjištění nečistot a defektů, které by mohly měření ovlivnit.

Tab. 14. Měření tvrdosti metodou Shore A.

PVC	K60	K65	K70	K75
∅ hodnota (ShA)	96,7	97,2	97,6	96,9
střední kvad. odchylka	1,19	1,24	1,21	1,15

Tab. 15. Měření tvrdosti metodou Shore D.

PVC	K60	K65	K70	K75
∅ hodnota (ShD)	51,7	52,1	56,1	54,2
střední kvad. odchylka	1,17	1,22	1,23	1,19



Obr. 48. Srovnání tvrdosti metodou Shore A a Shore D.

Nejvyšší tvrdost byla naměřena u vzorku s hodnotou K70, kterou můžeme vyčíst z tabulky (Tab. 15.) a obrázku (Obr. 48.), kde bylo zjištěna hodnota 56,1 ShD a naopak nejnižší naměřená hodnota byla u vzorku s hodnotou K60, kde hodnota dosahovala 51,7 ShD.

Měření metodou Shore A nebylo vypovídající (Tab. 14.).

## 15 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Aplikované zatížení pro samotnou zkoušku mikrotvrdomosti bylo zvoleno 1N s vydrží 90s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla použita 2N/min. Měření byla prováděnou metodou DSI (Depth Sensing Indentation – metoda Oliver &Pharr), pro niž byl zvolen český ekvivalent “Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti“. Poissonovo číslo bylo odhadnuto 0,3 z důvodu, že nebylo možné změřit jeho hodnotu u testovaných zkušebních těles.

Na tuto zkoušku bylo použité stejné zkušební těleso jako při měření tvrdosti metodou Shore.

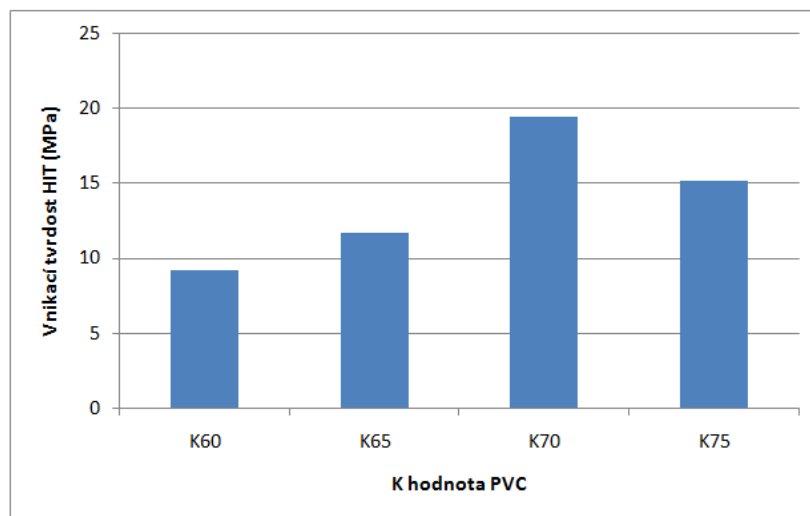


Obr. 49. Zkušební zařízení MicroCombi Tester pro měření mikrotvrdomosti.

Tab. 16. Měření vnikací tvrdosti HIT.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (MPa)	9,19	11,72	19,50	15,19
střední kvad. odchylka	1,18	1,23	1,24	1,16



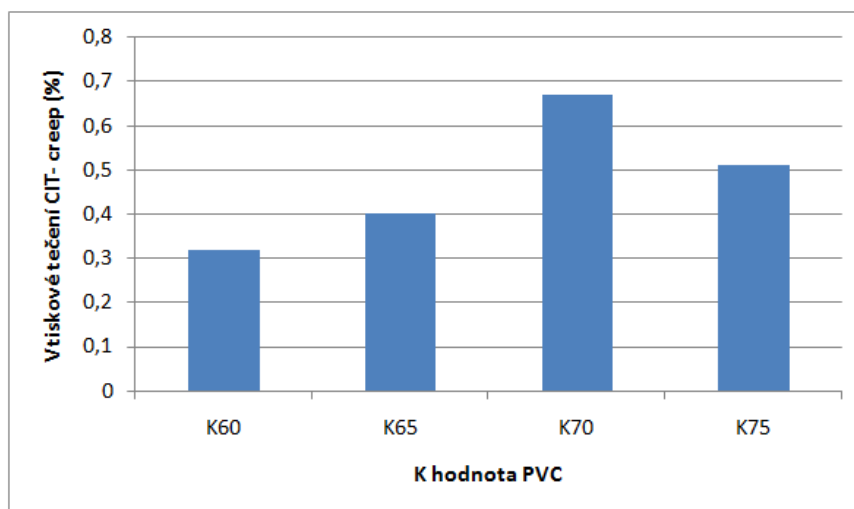


Obr. 50. Srovnání vnikací tvrdosti HIT.

Nejvyšší vnikací tvrdost byla zaznamenána u hodnoty K70, kde byla naměřena 19,5 Mpa, jak můžeme vyčíst z tabulky (Tab. 16.) a obrázku (Obr. 50.). Nejnižší tvrdost pak byla naměřena u vzorku s hodnotou K60, kdy bylo 9,19 MPa.

Tab. 17. Měření vtiskového tečení C<sub>IT</sub>.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (%)	0,32	0,40	0,67	0,51
střední kvad. odchylka	1,11	1,28	1,33	1,49

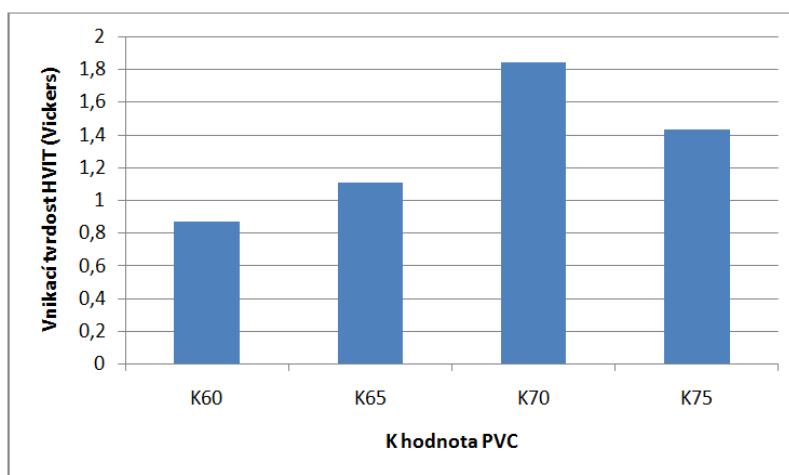


Obr. 51. Srovnání vtiskového tečení C<sub>IT</sub>.

Vtiskové tečení (creep -  $C_{IT}$ ) bylo nejvyšší naměřené u vzorku s hodnotou K70, kde naměřenou hodnotu 0,67 % můžeme vyčíst z tabulky (Tab. 17.) a obrázku (Obr. 51.). Nejnižší naměřená byla 0,32 % u vzorku s hodnotou K60.

Tab. 18. Měření vnikací tvrdosti HVIT dle Vickerse.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (Vickers)	0,87	1,11	1,84	1,43
střední kvad. odchylka	1,27	1,26	1,33	1,49



Obr. 52. Srovnání vnikací tvrdosti dle Vickerse.

Během porovnávání vtiskové tvrdosti dle Vickerse byla zjištěna nejvyšší tvrdost u vzorku s hodnotou K70, kde dosahovala hodnot 1,84 HVIT jak můžeme vyčíst z tabulky (Tab. 18.) a obrázku (Obr. 52.). Nejnižších hodnot nabýval vzorek s hodnotou K60, kde bylo zjištěna tvrdost 0,87 Vickersů.

## 16 ZKOUŠKA PADAJÍCÍM TĚLESEM

Tato zkouška se hodí pro plochá tělesa, proto i zde bylo možné použít zkušební tělesa, která jsme využili u zkoušek tvrdosti. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN ISO 6603-2 na zkušebním zařízení Zwick Roel HIT 230F.

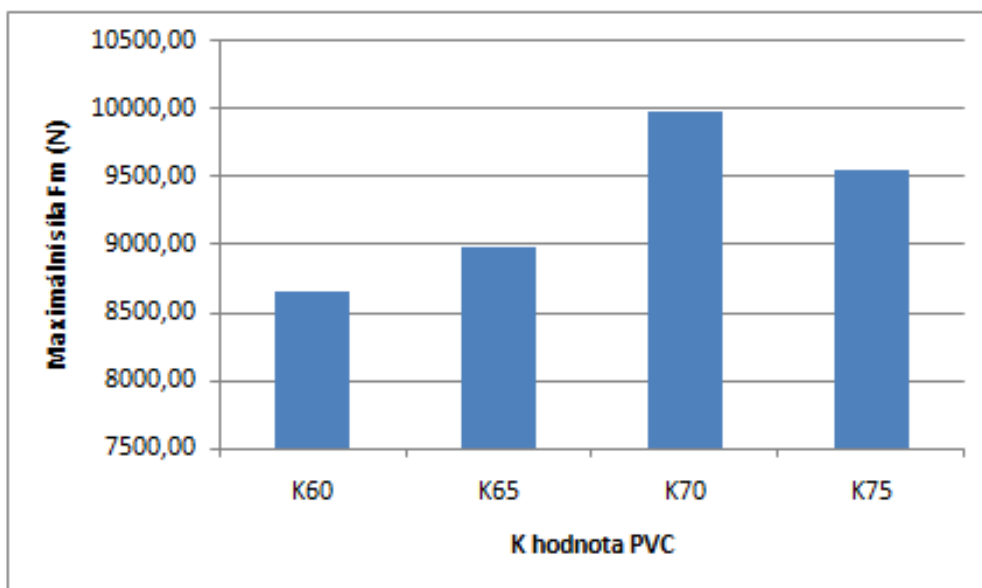
Nejprve jsme zkusili spustit závaží z výšky 600 mm. Při této výšce nebyla dostatečná energie k porušení vzorku. Proto se výška, ze které těleso dopadá na zkušební vzorek, zvýšila na 1000 mm.



Obr. 53. Zkušební zařízení pro ZwickRoell.

Tab. 19. Měření maximální síly pro porušení tělesa.

PVC	K60	K65	K70	K75
Ø hodnota (N)	8657	8986	9985	9548
střední kvad. odchylka	1,84	2,11	1,45	1,74



Obr. 54. Srovnání maximální síly potřebné k porušení tělesa.

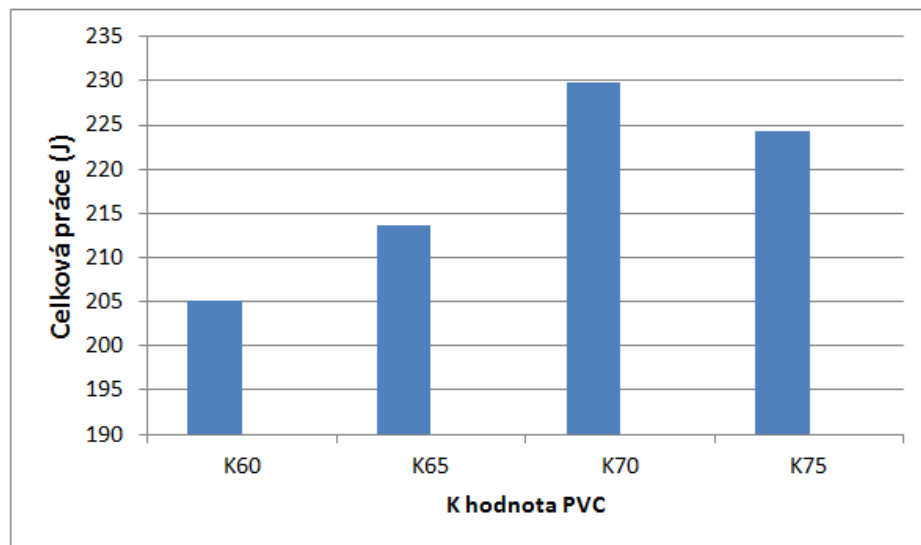
Nejvyšší síla potřebná k porušení testovaného vzorku byla potřeba pro vzorek s hodnotou K70, kde naměřená hodnota byla 9985 N, jak můžeme vyčíst z tabulky (Tab. 19.) a obrázku (Obr. 54.). Nejnižší síla byla u vzorku s hodnotou K60, kde jsme naměřili 8657 N.



Obr. 55. Zkušební těleso s porušením.

Tab. 20. Měření maximální práce pro porušení tělesa.

PVC	K60	K65	K70	K75
$\varnothing$ hodnota (J)	205,1	213,6	229,8	224,3
střední kvad. odchylka	1,64	1,43	1,71	1,54



*Obr. 56. Srovnání celkové práce potřebné k porušení tělesa.*

Celková práce, která byla potřebná k porušení tělesa, dosahovala nejvyšších hodnot u vzorku s hodnotou K70, kde jsme naměřili 229,8 J a nejnižších u vzorku s hodnotou K60, kde bylo zjištěno 205,1 J, jak je patrné z tabulky (Tab. 20.) a obrázku (Obr. 56.).

## 17 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Diplomová práce řeší problém vlivu K – hodnoty PVC na jeho mechanické vlastnosti. Součástí řešené problematiky byla realizace testů mechanických vlastností jako tahová zkouška (pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu), zkoušky tvrdosti (Shore A a Shore D), rázová zkouška padajícím tloučkem a zkouška mikrotvrdosti. Výsledky testů byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků testů tahové zkoušky je patrné, že nejlepších výsledků bylo dosaženo u hodnoty K70. Předpoklad, že nejlepší hodnoty bude vykazovat hodnota K75 se nepotvrdil. Jak u hodnoty dosažené maximální síly v průběhu testu, tak i u modulu pružnosti, který charakterizuje tuhost daného zkušební vzorku, byly maximální hodnoty zjištěny právě u hodnoty K70. Tyto zjištěné hodnoty byly navíc doplněny o hodnoty energie spotřebované na přetržení zkušební tělesa, která dosáhla své maximum také u K70. Nejmenších hodnot bylo dosaženo dle předpokladu u K60. Zajímavým zjištěným rovněž bylo, že při měření tahových zkoušek u zkušebních těles v příčném a podélném směru vykazoval větších hodnot jak maximální síly, tak tuhosti reprezentované modulem pružnosti v tahu příčný směr. Výsledky zkušebních těles u tahové zkoušky v podélném směru vykazaly menší hodnoty maximální síly i tuhosti. To je vzhledem k orientaci makromolekul při přípravě zkušebních těles zajímavé zjištění.

Pro zkoušky tvrdosti byly vybrány dvě pro polymery užívané testy tvrdosti. Jako první byla zvolena zkouška Shore A a následně byly zkušební vzorky testovány zkouškou Shore D. Při zkoušce tvrdosti Shore A bylo zjištěno, že rozsah měření přístroje není pro daný typ zkušební vzorku ideální. Proto bylo přistoupeno k testování zkušební vzorku metodou Shore D. Tak potvrdila stejné zjištěné hodnoty jako u tahové zkoušky. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřené metodou Shore D vykázal zkušební vzorek K 70. Nejmenší hodnota tvrdosti byla vykázána K60. Odolnost zkušební vzorku proti pronikání indetoru bude tedy největší u K70 a nejmenší u K60.

Při zkoušce mikrotvrdosti, která charakterizuje chování povrchové vrstvy, byly zjištěny identické výsledky, jako u předchozích testů. Nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti a tvrdosti dle Vickers byly jistěny u K70. Nejmenších hodnot bylo dosaženo u K60. Podobně dopadly také výsledky vtiskového tečení (creepu) u testovaných zkušebních vzorků. Největší hodnoty creepu byly naměřeny u K70 a nejmenší hodnoty u K60. To je překvapivé zjištění,

protože byl předpoklad, že creep bude přinejmenším klesat právě u vzorku vykazujícím zvýšené hodnoty mikotvrdosti a mikrotuhosti. To se ale při testování nepotvrdilo.

Závěrem testování byly provedeny rázové zkoušky zkušebních vzorku PVC padajícím tloučkem. Také zde byly zjištěny nejvyšší hodnoty síly a práce spotřebované na proražení zkušebního vzorku u K70, zatímco nejmenší hodnotu vykázal zkušební vzorek K60.

## ZÁVĚR

Předložená diplomová práce řeší problém vlivu  $K$  – hodnoty (faktoru) PVC na jeho mechanické vlastnosti. Testy mechanických vlastností zahrnuje makro testy (tahová zkouška, zkoušky tvrdosti a rázová zkouška padajícím tloučkem) a mikro testy (zkouška mikrotvrdosti). Naměřené výsledky testů byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z naměřených výsledků testů je patrné, že nejmenších hodnot mechanických vlastností dosáhl zkušební vzorek PVC s  $K$  – hodnotou 60. Naopak nejlépe ze všech hodnocených zkušebních vzorků dopadl vzorek K70. Do  $K$  – hodnoty 70 dochází u všech testů postupnému nárůstu hodnot mechanických vlastností jak makro, tak v mikro oblasti.  $K$  – hodnota 75 vykazuje mírný pokles v porovnání s maximálními zjištěnými hodnotami mechanických vlastností testovaných zkušebních vzorků.

Pro průmyslové využití lze s dosažených výsledků doporučit PVC s  $K$  – hodnotou 70. Potu jde ovšem o zatížení vzorku konstantním zatížením v průběhu času, může dojít k deformaci v místě zatížení, jak ukázaly výsledky mikrocreepového chování při zkoušce mikrotvrdosti.

U rázových zkoušek bude K70 vykazovat dle zjištěných výsledků výborných vlastností.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Wilkes, C., E., Summers, J., W., Daniels, C., A.; *PVC Handbook*, Carl Hanser Verlag, Munich, 749, 1, ISBN 3-446-22714-8, 2006
- [2] Kubík, J., Gřundel, F. a kol., ; *PVC výroba, zpracování a použití*, SNTL, Praha 660, 2, ISBN 04-619-65, 1965
- [3] Chemeurope.com. *Polyvinilchloride* [online] [cit. 2013-01-15]  
<<[http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Polyvinyl\\_chloride.html/](http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Polyvinyl_chloride.html/)>>
- [4] Wikipedia the free encyclopedia. *Vinilchloride* [online][cit. 2012-12-08]  
<<[http://en.wikipedia.org/wiki/Vinyl\\_chloride](http://en.wikipedia.org/wiki/Vinyl_chloride)>>
- [5] ŠTĚPEK, Jiří; ZELINGER, Jiří; KUTA, Antonín. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Vyd. 1. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. 637 s
- [6] Hluchá, M., *Strojírenská technologie*, Praha:SNTL, 1981
- [7] Ptáček, L. a kolektiv *Nauka o materiálu 2.*, Brno:CERM 2002
- [8] Wikipedia the free encyclopedia. *Vinilchlorid* [online][cit. 2013-14-02]  
<<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Vinylchlorid>>>
- [9] Wikipedia the free encyclopedia. *Polyvinilchlorid* [online][cit. 2013-14-02]  
<<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid>>>
- [10] Wikipedia the free encyclopedia. *Strojní a technologická zařízení*[online]  
[cit. 2013-12 02]  
<<<http://www.progresstechnology.cz/strojni-a-technologicka-zarizeni/katalog/strojni-a-technologicka-zarizeni/dopravniky/snekovy-dopravnik.html>>>
- [11] ČSN EN ISO 291: 1998, *Kondicionování*, Praha: Český normalizační institut
- [12] ČSN EN ISO 527-1: 1997, *Zkouška tahem*, 1997
- [13] ČSN EN ISO 604: 1998, *Zkouška tlakem*, 1998
- [14] Měřínská, D., *Zpracovatelské inženýrství polymerů*, [přednášky], 2011-2012, Zlín

- [15] Ptáček, L. a kolektiv *Nauka o materiálu 1.*, Brno:CERM 2002
- [16] ČSN 640128: 1953, *Zkoušky tvrdosti – měření podle Brinella*, 1953
- [17] ČSN EN ISO 6507-1:1999, *Zkouška tvrdosti podle Vickerse*, 1999
- [18] ČSN EN ISO 868: 1999, *Zkoušky tvrdosti podle Shoreho*, 1999
- [19] ČSN EN ISO 179: 1998, *Stanovení vrubové houževnatosti Charpy*, 1998
- [20] L. Gajdůšková, Bakalářská práce, *Recyklace PVC*, 2009
- [21] ČSN EN 477:1995, *Stanovení odolnosti proti proražení hlavních profilů pomocí padajícího závaží*, 1995
- [22] Fatrafol.cz., *Fatrafol* [online] [cit. 2013-01-15]  
<<<http://www.fatrafol.cz/>>>
- [22] Fatra.cz., *Vytlačované plastové profily* [online] [cit. 2013-01-15]  
<<[www.fatra.cz/cz/produkty/vytlacovane-plastove-profily](http://www.fatra.cz/cz/produkty/vytlacovane-plastove-profily)>>
- [22] H. Vaskova, D. Manas, M. Ovsik, M. Manas, M. Stanek, “*Instrumented Micro hardness Test and Raman Spectroscopy Analyse of Beta-Irradiated Polyamide 12,*” in Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 329-332.
- [23] D. Manas, M. Hribova, J., M. Manas, M. Ovsik, M. Stanek, D. Samek, *The effect of beta irradiation on morphology and micro hardness of polypropylene thin layers*, *Thin Solid Films*, Volume 530, 1 March 2013, Pages 49–52.
- [24] M. Ovsik (5%), D. Manas(40%), M. Manas(15%), M. Stanek (15%), M. Hribova (15%), K. Kocman (5%), D. Samek (5%), “*Irradiated Polypropylene Studied by Microhardness and WAXS*“, 2012, *Chemickelisty*, Volume 106, pp. S507-510. ISSN 0009-2770.
- [25] Ducháček, V., *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, ISBN 80-7080-617-6, 2006
- [26] Měřínská, D., *Zpracovatelské inženýrství polymerů*, [přednášky], 2011-2012, Zlín

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PVC	Polyvinylchlorid
$\eta$	viskozita [cP],
W	energie [J]
F	síla [N]
T <sub>g</sub>	teplota skelného přechodu
T <sub>f</sub>	teplota měknutí
T <sub>m</sub>	teplota tání
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
$\sigma_m$	mez pevnosti v tahu [MPa]
Ba/Zn	Sloučenina na bázi baria a zinku
Ca/Zn	Sloučenina na bázi vápníku a zinku
CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý
DINP	di-izononylfталát
DOP	di-oktylfталát
CIT	vtisková tvrdost
ShA	jednotka měření dle Shore A
ShD	jednotka měření dle Shore A
HIT	vnikací tvrdost
HVIT	vnikací tvrdost dle Vickerse

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Strukturní vzorec vinylchloridu.[9]</i> .....	15
<i>Obr. 2. Molekula vinylchloridu.[8]</i> .....	15
<i>Obr. 3. Konstituční jednotka.[4]</i> .....	16
<i>Obr. 4. Molekula PVC.[4]</i> .....	17
<i>Obr. 5. Hópplerův kuličkový viskozimetr. [2]</i> .....	19
<i>Obr. 6. Nomogram pro grafické určení</i> .....	21
<i>Obr. 7. Podzemní zásobník na hořlavé kapaliny.</i> .....	28
<i>Obr. 8. Tvary a uspořádání zásobníků[2]</i> .....	29
<i>Obr. 9. Pomocná zařízení na vyprázdnění.</i> .....	30
<i>Obr. 10. Šnekový dopravník [10]</i> .....	30
<i>Obr. 11. Ramenová míchačka [2]</i> .....	31
<i>Obr. 12. Víceválce pro válcování fólií [2]</i> .....	32
<i>Obr. 13. Aplikace hydroizolačních fólií z PVC [22]</i> .....	32
<i>Obr. 14. Holínka vyrobená z PVC</i> .....	33
<i>Obr. 15. Profil schodové lišty vyroben z granulátu [23]</i> .....	34
<i>Obr. 16. Závislost modulu pružnosti polymeru na teplotě[7]</i> .....	36
<i>Obr. 17. Tvar zkušebního tělesa pro tahové zkoušky [12]</i> .....	37
<i>Obr. 19. Charakteristické křivky napětí- poměrné prodloužení plastů a pryží.[12]</i> .....	38
<i>Obr. 18. Nejpoužívanější rozměry typů zkušebních těles. [12]</i> .....	38
<i>Obr. 20. Obecné tlakové křivky. [13]</i> .....	39
<i>Obr. 21. Tříbodový systém ohybové zkoušky. [14]</i> .....	40
<i>Obr. 22. Zkušební hrot tvrdoměru typu A. [18]</i> .....	42
<i>Obr. 23. Zkušební hrot tvrdoměru typu D. [18]</i> .....	43
<i>Obr. 24. Břit a bloky podpěr pro zkušební těleso typu 1 v okamžiku rázu. [19]</i> .....	44
<i>Obr. 25. Znárodnění označení směru rázu. [20]</i> .....	45
<i>Obr. 26. Zkušební zařízení pro rázovou zkoušku. [21]</i> .....	46
<i>Obr. 27. Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační zkoušky (b). [23]</i> .....	47
<i>Obr. 28. Indentační křivka. [23]</i> .....	48
<i>Obr. 29. Schéma zatěžování a odlehčování.[23]</i> .....	48
<i>Obr. 30. Vyjádření vtiskového tečení.[23]</i> .....	50
<i>Obr. 31. Indentační křivka. [24]</i> .....	51

<i>Obr. 32. Nespojité průběh indentačních křivek (a) fázová transformace, (b) praskání při transformaci. [24].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 33. Charakteristické tvary indentačních křivek pro různé materiály. [23].....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34. Tvar vtisku, (a) nakupení okraje vtisku (pile-ip),(b) vtažení okraje vtisku (sink-in).[22] .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 35. Okenní profil z PVC recyklátu [25] .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36. Paleta z PVC recyklátu [25] .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37. Princip recyklace ViniLoop [25].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38. Navážená směs. ....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 39. Laboratorní dvouválec .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 40. Měření tloušťky vytažené fólie.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41. Lisovací zařízení se střížným nástrojem.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 42. Zkušební tělesa .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 43. Universální zkušební stroj Zwick 1456 .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 44. Srovnání modulu pružnosti v podélné i příčné orientaci. ....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 45. Srovnání maximální síly při porušení v podélné a příčné orientaci. ....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 46. Srovnání celkové práce v podélné a příčné orientaci. ....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 47. Zkušební těleso pro měření tvrdosti. ....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 48. Srovnání tvrdosti metodou Shore A a Shore D.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49. Zkušební zařízení MicroCombi Tester pro měření mikrotvrdosti. ....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 50. Srovnání vnikací tvrdosti HIT. ....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 51. Srovnání vtiskového tečení CIT. ....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 52. Srovnání vnikací tvrdosti dle Vickerse. ....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 53. Zkušební zařízení pro ZwickRoell. ....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 54. Srovnání maximální síly potřebné k porušení tělesa. ....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 55. Zkušební těleso s porušením. ....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 56. Srovnání celkové práce potřebné k porušení tělesa. ....</i>	<i>77</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Charakteristické vlastnosti vinylchloridu. [4]</i> .....	15
<i>Tab.2. Vlastnosti PVC. [4]</i> .....	17
<i>Tab. 3. Orientační hodnoty přepočtu log. viskozitního čísla a K-hodnoty. [2]</i> .....	22
<i>Tab. 4. Složení směsi s PVC K - hodnota 60</i> .....	61
<i>Tab. 5. Složení směsi s PVC K - hodnota 65</i> .....	61
<i>Tab. 6. Složení směsi s PVC K - hodnota 70</i> .....	61
<i>Tab. 7. Složení směsi s PVC K - hodnota 75</i> .....	62
<i>Tab. 8. Modul pružnosti v podélném směru orientace</i> .....	66
<i>Tab. 9. Modul pružnosti v příčném směru orientace.</i> .....	67
<i>Tab. 10. Maximální síla v podélném směru orientace.</i> .....	67
<i>Tab. 11. Maximální síla v příčném směru orientace.</i> .....	67
<i>Tab. 12. Celková práce v podélné orientaci.</i> .....	68
<i>Tab. 13. Celková práce v příčné orientaci</i> .....	68
<i>Tab. 14. Měření tvrdosti metodou Shore A.</i> .....	70
<i>Tab. 15. Měření tvrdosti metodou Shore D.</i> .....	70
<i>Tab. 16. Měření vnikací tvrdosti HIT.</i> .....	72
<i>Tab. 17. Měření vtiskového tečení CIT.</i> .....	73
<i>Tab. 18. Měření vnikací tvrdosti HVIT dle Vickerse.</i> .....	74
<i>Tab. 19. Měření maximální síly pro porušení tělesa.</i> .....	75
<i>Tab. 20. Měření maximální práce pro porušení tělesa.</i> .....	76