

Optimalizace rozměrové stability výrobků z lehčeného LDPE

Bc. Ondřej Kopunec

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Kopunec**
Osobní číslo: **T12458**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace rozměrové stability výrobků
zálehčeného LDPE**

Zásady pro vypracování:

Vypracování teoretické části zaměřené na přípravu pěnových produktů:

- možnosti přípravy pěnových produktů
- technologické možnosti přípravy pěn
- vlivy procesních podmínek na strukturu připravených pěn

Vypracování praktické části zaměřené na přípravu extrudovaných pěn:

- extruze napěněných desek
- změna procesních podmínek přípravy
- příprava zkušebních těles
- charakterizace připravených napěněných struktur a zkušebních těles
- vyhodnocení vlivu procesních parametrů na výsledné vlastnosti pěn

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Landrock, A. H.: Handbook of Plastic Foams

Throne, J. L.: Thermoplastic Foam Extrusion

Klempler, D., Sendjarevic, V.: Polymeric Foams and Foam Technology

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.

Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014


Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: KOPUNEC ONDŘEJ

Obor: VI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 7.5.2014

Kopunec

²⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou zaměřenou na polymerní pěny. V teoretické části jsou popsány základní pojmy pro pochopení struktury polymerní pěny a na závěr konvenční technologické procesy pro výrobu pěnových výrobků. Praktická část řeší rozměrovou stabilitu LDPE pěnového výrobku ve formě tlustostěnné desky. Nejprve byly popsány suroviny pro výrobu LDPE pěnových desek, následovně i výroba LDPE desek a příprava vzorků. Měření byla prováděna dle uvedených mechanických a destruktivních zkoušek, které měly určit chování pěny v procesu zrání.

Klíčová slova: pěna, struktura, buňka, extruze, nadouvající činidlo.

ABSTRACT

The Master thesis deals with the problems focused on polymeric foams. In the theoretical part describes the basic concepts for understanding of the structure polymeric foams and conclusion of conventional technological processes for the production of foam products. The practical part deals with the dimensional stability of the LDPE foam product in the form of thick plates. The raw materials were described for the production of LDPE foam boards and following manufacture LDPE plates and sample. The measurement preparation are carried out according to mechanical and destructive tests that should be determine the behavior of foam in the aging process.

Keywords: foam, structure, cell, extrusion, foaming agent.

Tímto bych chtěl poděkovat mým vedoucím diplomové práce, pánu Ing. Tomáši Sedlákoví, PhD za vedení a rady při tvorbě diplomové práce a panu Ing. Ondřeji Krátkému, za poskytnutí odborných znalostí. Mé poděkování patří také firmě SPUR a.s., která mi poskytla výrobní prostředky a měřicí zařízení nezbytné pro tvorbu praktické části.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 STRUKTURA PĚNY	12
1.1.1 Otevřené a uzavřené buňky pěny	12
1.1.2 Zdánlivá hustota	13
1.1.3 Kvantitativní parametry buněčné struktury.....	14
1.1.4 Tvar buněk	15
2 PŘÍPRAVA POLYMERNÍCH PĚN	17
2.1 NADOUVADLA PRO PĚNOVOU VÝROBU	19
2.1.1 Fyzikální nadouvadla	19
2.1.2 Chemické nadouvadla	21
2.2 VZNIK A RŮST BUNĚK.....	23
2.3 ÚLOHA NUKLEANTŮ A ADITIV	25
2.3.1 Nukleační činidla	25
2.4 INDUKČNÍ KONCEPT TVORBY BUBLIN	26
2.5 POČÁTEČNÍ A INERCIÁLNÍ RŮST BUBLIN	27
2.6 TRANSPORTNÍ JEVI	28
2.7 DIFUZNÍ RŮST BUBLINEK	28
2.8 RŮST VYSOCE HUSTOTNÍ PĚNY	29
2.9 RŮST NÍZKO HUSTOTNÍ PĚNY	30
2.10 ŠÍŘENÍ PLYNU BĚHEM PĚNÍCÍHO PROCESU	31
2.11 STABILIZÁTORY PĚNY	32
2.12 POST-EXTRUZNÍ SMRŠTĚNÍ PĚNY	32
3 HLAVNÍ PROCESNÍ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU PĚN	34
3.1 VSTŘIKOVÁNÍ PĚN	34
3.2 EXTRUZE PĚNY	37
3.2.1 Extruze vysoce hustotní pěny.....	38
3.2.2 Extruze nízko hustotní pěny.....	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
5 POUŽITÉ SUROVINY PRO VÝROBU LDPE PĚNOVÝCH DESEK	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
5.1 NÍZKO HUSTOTNÍ POLYETHYLÉN (LDPE)..	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
5.2 DALŠÍ SUROVINY PRO VÝROBU LDPE PĚNOVÝCH DESEK	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH PŘÍPRAVA	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.1 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ AKUMULAČNÍ EXTRUZÍ	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A ZKUŠEBNÍCH TĚLES	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7 ZKUŠEBNÍ METODY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

7.1	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7.2	STANOVENÍ POČTU BUNĚK	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7.3	STANOVENÍ ODPORU PROTI STLAČENÍ	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7.4	STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7.5	STANOVENÍ ROZMĚROVÉ STÁLOSTI	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
8.1	VLIV PERFORACE.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
	Vliv perforace na rozměrovou stabilitu u neperforovaných a perforovaných vzorků.....	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv perforace na rozměrovou stálost u neperforovaných vzorků	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv perforace na rozměrovou stálost u perforovaných vzorků	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv perforace na trvalou deformaci u perforovaných vzorků	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv perforace na odpor proti stlačení u perforovaných vzorků	Chyba! Záložka není definována.
8.2	VLIV ROZTEČE VPICHŮ PERFORACE	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
	Vliv rozteče vpichů perforace na rozměrovou stálost	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv rozteče vpichů perforace na trvalou deformaci	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv rozteče vpichů perforace na odpor proti stlačení	Chyba! Záložka není definována.
8.3	VLIV JEMNOSTI STRUKTURY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
	Vliv jemnosti struktury na rozměrovou stálost	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv jemnosti struktury na trvalou deformaci	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv jemnosti struktury na odpor proti stlačení ...	Chyba! Záložka není definována.
8.4	VLIV OBJEMOVÉ HMOTNOSTI.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
	Vliv objemové hmotnosti na rozměrovou stálost..	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv objemové hmotnosti na trvalou deformaci....	Chyba! Záložka není definována.
	Vliv objemové hmotnosti na odpor proti stlačení	Chyba! Záložka není definována.
	ZÁVĚR	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	46
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
	SEZNAM OBRÁZKŮ	49
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	54

ÚVOD

Nejběžnější materiály, od lehkých kovů, přes polymery, sklo keramiku a beton až k oceli mají hustotu v rozmezí od $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ do $8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Od nepaměti přitahovaly pozornost lidí látky, které se vyznačovaly spojením lehkosti a pevnosti a navíc byly výbornými tepelnými izolanty. Zpočátku to byly přírodní materiály, např. pemza o hustotě $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, korek, jehož hustota se pohybuje od 200 do $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, balzové dřevo o hustotě od 130 do $240 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Později, s vývojem techniky vznikl pojem „lehčené hmoty“. Tento pojem zahrnuje materiály obsahující dutinky (póry) nej-různějších velikostí a tvarů, které snižují hustotu původního (nelehčeného) materiálu. [1]

Polymery patří mezi vědní odvětví intenzivně se rozvíjející od počátku 20. století. V průběhu vývoje polymerních materiálů získali nezanedbatelný význam polymerní pěny, které vynikají jedinečnými vlastnostmi a všestranným použitím a tak pronikly do všech oblastí moderního života. V první řadě to jsou izolační materiály, jako jsou tepelné, akustické, či elektrické. Vedle toho se čím dál častěji uplatňují pro obalové aplikace až po různé speciální využití v medicíně. Polymerní pěny nachází své uplatnění i ve sportovních odvětvích jako tlumící prvek vůči rázům, ale i jako protihluková ochrana sluchu apod. V neposlední řadě, nám pěny v dnešní době slouží k výrobě odlehčených výrobků, což se využívá u sendvičových panelů. Existuje ještě nespočet dalších všudypřítomných aplikací polymerních pěn, které bychom mohli vyjmenovat. Z takto širokého spektra využití pěn, by bylo užitečné se jimi dále zabývat a stále se je snažit zdokonalovat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STRUKTURA PĚNY

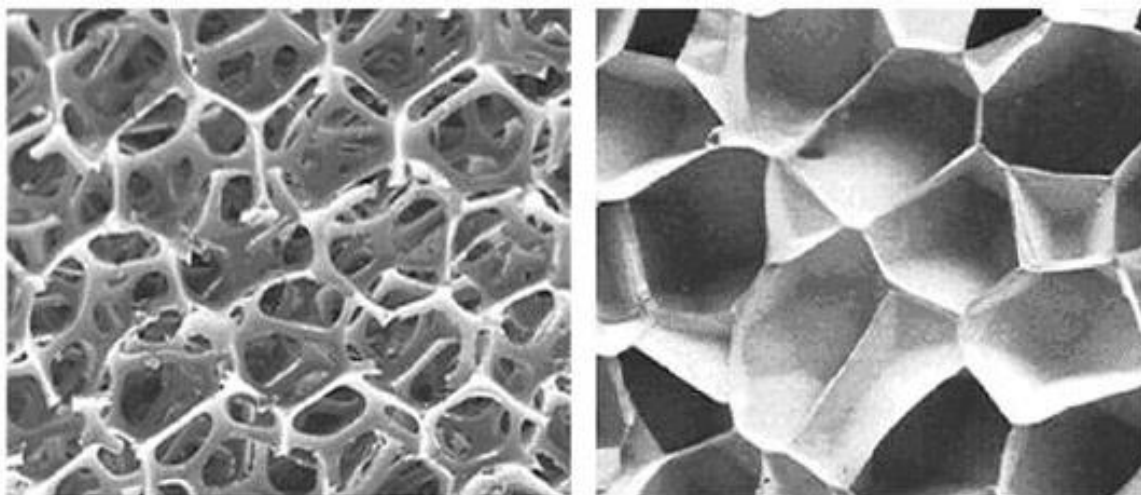
Obecně platí, že systémy plněné plynem se vyznačují pórovitostí, která je nejjednodušším statistickým parametrem pro většinu systémů. Nicméně je nutné poznamenat, že u pěnových polymerů může být pórovitá struktura tvořena dvěma typy buněk - otevřenými nebo uzavřenými póry. Taky bychom měli vzít v úvahu skutečnost, že na rozdíl od anorganických porézních systémů (pěnové sklo, pěnové keramiky, pěnový beton apod.) dochází k významné interakci mezi polymerní a plynou fází. Pěnové polymerní systémy jsou ovlivněny složením plynné fáze, která s ohledem na povahu tohoto plynu, vyplňuje dutiny, čímž se vytváří buněčná struktura. Dokonce i se stejnými expanzními procesními podmínkami a se stejným složením polymerní směsi, se faktor poréznosti (hustota) výsledného pěnového polymeru může měnit v širokých mezích změnou chemického složení plnicího plynu. Polymerní pěny se rovněž liší od anorganických porézních materiálů, protože chemická povaha plnicího plynu a jeho tlak v dutinách (buněk), má vliv na chování a fyzikální vlastnosti pěnových polymerů a na dobu používání pěny.[2]

Chceme-li popsat strukturu pěny kvantitativně, musíme brát v úvahu tyto parametry:

- relativní počet otevřených a uzavřených buněk
- zdánlivá hustota (objemová hmotnost)
- velikost buněk
- tvar buněk [2]

1.1.1 Otevřené a uzavřené buňky pěny

Na snímcích Obr. 1 pořízených z elektronového mikroskopu, porovnávají navzájem typické mikrostruktury otevřených a uzavřených buněk polymerních pěn. Na prvním snímku můžeme díky dobré hloubce ostrosti sledovat interiér otevřené pěny. Zde je vyobrazeno to, že mezi buňkami těchto pěn může procházet vzduch. Druhý snímek vpravo zobrazuje uzavřené buňky, které jsou tvořeny propojenými plochami. [3]



Obr. 1 Otevřené buňky vlevo a uzavřené buňky vpravo. [4]

Tyto rozdíly ve fyzické struktuře jsou zodpovědné za různé vlastnosti polymerních pěn. Srovnáme-li uzavřenou pěnovou buněčnou strukturu s otevřenou, pak mají otevřené buněčné struktury nejen vyšší absorpční schopnost pro vodu a vlhkost, ale i vyšší propustnost pro plyny a páry. Otevřená pěnová struktura má méně účinné tepelně a elektricky izolační schopnosti, ovšem její zvukově izolační vlastnosti jsou lepší.[2]

U pěny s otevřenou buněčnou strukturou je volný prostor buněk tvořen vzduchem, zatímco u uzavřených buněk se může plynný prostor skládat z vodíku, oxidu uhličitého a těkavé látky, v závislosti na tom, jaké bylo použito nadouvadlo. Samozřejmě, difuzní procesy postupně nahrazují plynné nadouvadlo vzduchem, ale po určitou dobu, může původní plynná fáze z nadouvadla mít vliv na některé vlastnosti polymerní pěny, včetně tepelné vodivosti nebo elektrické vodivosti i stability tvaru. 2]

1.1.2 Zdánlivá hustota

Zdánlivá hustota (objemová hmotnost), je parametr, který charakterizuje relativní obsah pevné a plynné fáze v materiálu, dále je to i základní morfologický parametr pěnových polymerů a je příbuzný všem příslušným fyzikálním vlastnostem pěnové polymerní hmoty, jako jsou pevnost, termo-fyzikální vlastnosti a elektrické vlastnosti.[2]

Moderní technologie umožňují výrobu pěnového polymeru s velmi širokým spektrem hustoty ρ , od 3 do 900 kg/m³, odpovídajícím hodnotám plnicího plynu od 99,5

% do 10 %. Hodnota ρ se používá k rozdělení všech lehčených polymerních hmot do pěti tříd:

- velmi lehké ($\rho=3-50 \text{ kg/m}^3$)
- lehké ($\rho=50-200 \text{ kg/m}^3$)
- střední ($\rho=200-500 \text{ kg/m}^3$)
- těžké ($\rho=500-700 \text{ kg/m}^3$)
- supertěžké ($\rho>700\text{kg/m}^3$)

Obecně se hustota určuje z pevné polymerní fáze a plynné fáze. To se vztahuje k plnění pěny plynem, jako je vyjádřeno v rovnici (1), kde ρ_p je hustota polymerní fáze, která je rovna poměru celkové hmotnosti materiálu a rozdílu mezi celkovým objemem materiálu a objemem buněk; ρ_g je hustota plynu v buňkách a G je plynová náplň, která se rovná poměru objemu buněk k celkovému objemu materiálu.[2]

$$\rho = \rho_p(1 - G) + \rho_g \quad (1)$$

V praxi se hustota polymerních pěn vypočítá, jako poměr hmotnosti vzorku m na geometrický objem V_o .

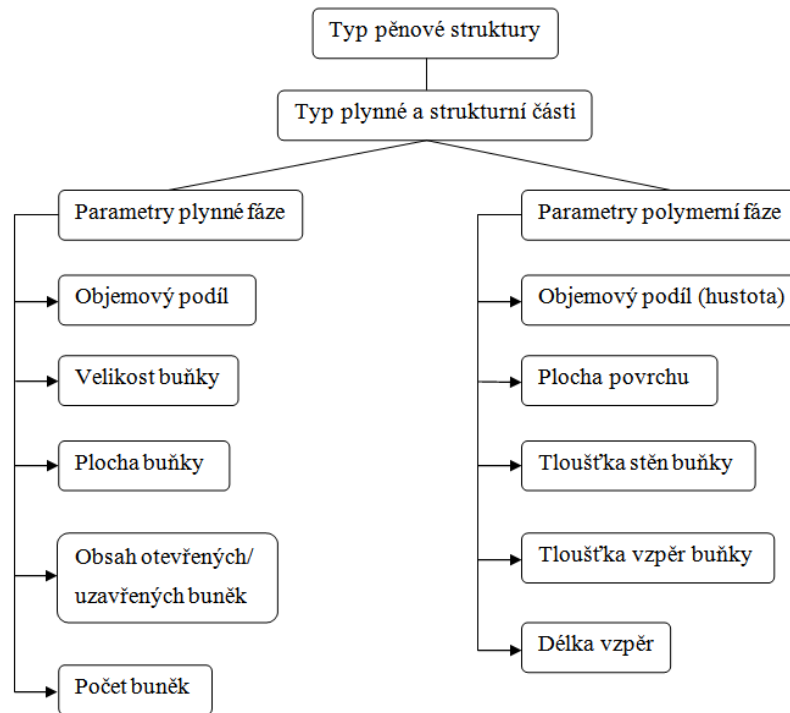
$$\rho = \frac{m}{V_o} \quad (2)$$

kde hustota ρ je dána v kg/m^3 nebo g/cm^3 . [2]

1.1.3 Kvantitativní parametry buněčné struktury

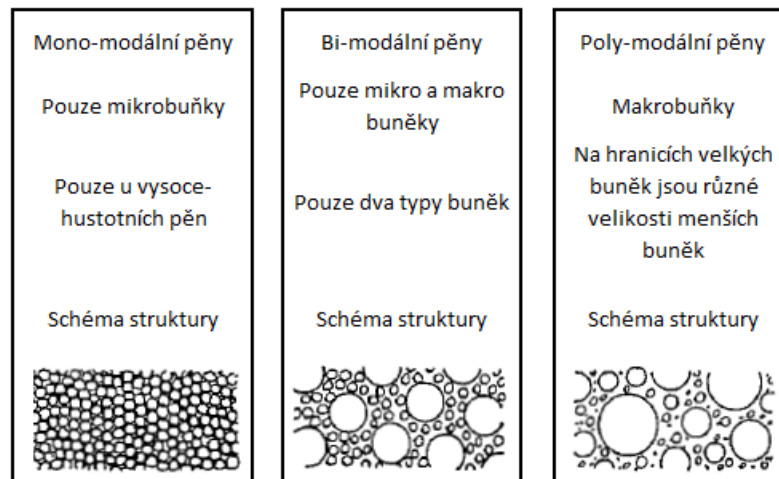
Jak buněčné struktury, tak i všechny druhy polymerních pěn, můžeme klasifikovat jako anizotropní (většina komerčních pěn) a izotropní (jako např. strukturální pěny).

Bez ohledu na typ buněk (makro nebo mikro buňky), jakákoliv buněčná struktura může být charakterizována mnoha kvantitativními parametry v plynné fázi i pevné fázi. Schéma na Obr. 2 nám ukazuje, že existují nejméně čtyři parametry v plynné fázi (velikost buněk, tvar buněk, obsah buněk - otevřené nebo zavřené buněk, počet buněk) a čtyři parametry pevné fáze (plocha povrchu, tloušťky stěn a vzpěr buněk, délka vzpěr).[2]



Obr. 2 Kvantitativní parametry buněčné struktury, zahrnující parametry pro plyn a pro pevnou fázi [2]

Další klasifikace buněčné struktury polymerních pěn je založena na mono, bi-modulární a poly-modulární koncepcí na Obr. 3[2]



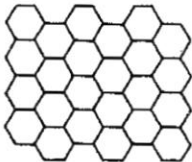
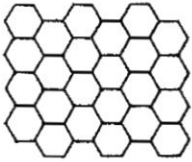
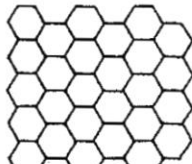
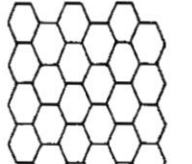
Obr. 3 Hodnocení buněčné struktury pěn na základě mono-, bi- a poly-modálních konceptů.[5]

1.1.4 Tvar buněk

Nízko hustotní polymerní pěny s uzavřenou buněčnou strukturou mají polygonální buňky různých tvarů a velikostí.

Anizotropie tvarů buněk

Morfologie skutečné polymerní pěny se liší od ideální (teoretické) pěny v jednom zásadním případě. Skutečné polymerní pěny mají buňky, které jsou podlouhlé ve směru pění. To je asi proto, že i přes množství polymerní pěny nebyla mechanická namáhání během pění rovnoměrná. Další komplikací je, že v daném směru mají buňky různé poměry stran (poměr největší k nejmenšímu lineárnímu rozměru). Z tohoto důvodu, musíme přezkoumat části materiálu nejen z různých pozic v hloubce bloku (nebo šířky), ale také v různých rovinách vzhledem k základní rovině.[2]

Úsek tvaru buněk	Tvar buněk	
	Ideální tvar	Reální tvar
Pohled kolmo na směr pění		
Pohled rovnoběžný na směr pění		

Obr. 4 Anizotropie buněk [5]

2 PŘÍPRAVA POLYMERNÍCH PĚN

Lehčené polymerní hmoty lze vyrobit různými způsoby, např. vmícháním dutých plniv, vymýváním rozpustného plniva, odpařením těkavého plniva, spékáním plných nebo pórovitých granulí, speciálními polymeračními technikami nebo tzv. napěňováním, což je nečastější případ.[1]

Ke vzniku buněčné struktury může dojít mechanicky (našleháním kapalné polymerní směsi). Dále také i vypařováním nízko-vroucích kapalin, nebo pomocí inertních plynů, chemickou reakcí jednotlivých složek polymerní směsi nebo také tepelným, katalytickým nebo radiačním rozkladem nadouvadel.[1]

Vytvořená buněčná struktura se může ustálit ochlazováním polymeru pod jeho teplotu tání, nebo zesklňením (u termoplastů), sesít'ováním (u reaktoplastů), resp. vulkanizací (u kaučukových směsí). Tyto pochody je nutno sladit tak, aby k ustálení nedocházelo příliš brzy, kdy materiál ještě není do žádné míry vylehčen, nebo naopak pozdě, kdy vytvořené buňky již mají nerovnoměrnou strukturu nebo dokonce dochází k poklesu objemu vznikajícího lehčeného výrobku.[1]

Mechanickým napěňováním se vyrábějí lehčené materiály, což jsou vlastně pěny. Tento proces nachází své uplatnění např. při výrobě močovinoformaldehydových lehčených materiálů. Kapalný roztok pryskyřice se smíchá s tvrdidlem, emulgátorem a pěnovým stabilizátorem. Poté se kapalný roztok našlehá a nalije do formy a nechá se vytvrdit. Jestli k vytvrzení dojde za běžné teploty, pak je ještě třeba nakonec sušit v sušárně při teplotách kolem 50°C.[1]

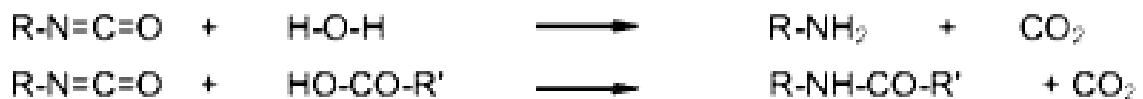
Mechanickým způsobem se napěňují také plastysoly (disperze polymeru ve změkčovadle), polyvinylchloridy a také směsi na základě kaučukových latexů. Vytvořené jemné vzduchové bubliny je nutno stabilizovat podobně jako v předešlém případě. Za tímto účelem se přidávají do polymerní směsi tzv. pěnivá činidla, což jsou povrchově aktivní látky typu mýdel. Ke stabilizaci vytvořené pěny, tj disperze plynu v kapalině, dochází vytvořením tenkostěnného obalu částic dispergované fáze. Napěněné plastisoly polyvinylchloridu se pak želatinují a směsi kaučukových latexů se vulkanizují.[1]

Lehčení plyny a nízko vroucí kapaliny nacházejí své uplatnění především při výrobě lehčeného polystyrenu, polyvinylchloridu, polyethylenu a fenolplastů.

Zpěnitelný polystyren se zpravidla vyrábí tak, že se styren polymeruje suspenzním způsobem za přítomnosti těkavých alifatických uhlovodíků, např. pentanu, který jsou rozpuštěný v monomeru, ale nerozpustný v polymeru. Získají se granule polystyrenu zakalené rozptýleným uhlovodíkem. Předpěnění se provádí s pomocí zahřátí nad teplotu měknutí polymeru a následovně se dodávají jako polotovar zpracovatelskému průmyslu. Tam se dopění účinkem tepla z vodních par na požadované tvary výrobků v děrovaných formách.[1]

Při výrobě lehčeného polyvinylchloridu se plastisoly sytí inertním plynem, např. vzduchem, dusíkem, oxidem uhličitým nebo směsí plynů, ke kterým patří methan, propan, ethylen, propylen, helium, argon, eventuálně nízkovroucí kapaliny, jako jsou např. pentan, hexan, heptan, oktan, penten, hexen, ethanol, methanol, aceton, methylketon a to buď za zvýšeného tlaku nebo za snížené teploty (asi -5°C). Při druhém způsobu dochází k vypěnění za běžné teploty a tlaku a k želatinaci buď rovněž na dopravním pásu ve vysokofrekvenčním poli, nebo v teplovzdušném tunelu u tvarových výrobků ve formách.[1]

Lehčení polymerů výpary vlivem chemické reakce je způsob pro výrobu polyurethanových pěn. Využívá se probíhající reakce izokyanátových skupin s vodou nebo organickými kyselinami za vývoje oxidu uhličitého:



Lehčení polymerů nadouvadly se obvykle provádí běžně dvěma způsoby. A to buď za přítomnosti fyzikálních nadouvadel nebo chemických nadouvadel nebo ve speciálních případech kombinací těchto dvou způsobů. Tyto způsoby budou nadále podrobně vysvětleny a poté by bylo dobré objasnit základní principy tvorby pěny, jak již bylo na začátku zmíněno (vznik a růst buněk s další související problematikou).[1]

Při napěňování má tvorba lehčeného polymeru tyto tři stádia:

- vznik buněk (nukleace),
- růst buněk,

-ustálení buněk.[5]

2.1 Nadouvadla pro pěnovou výrobu

Nadouvadla jsou materiály, které se v plynné fázi rozšiřují termoplastickou taveninou zpravidla po snížení tlaku. Fyzikální nadouvadla jsou materiály, které jsou vstříkované do procesu buď jako kapaliny, nebo plyny. Některé fyzikální nadouvadla jsou nízko-vroucí kapaliny, jako je například pentan nebo izopropyl-alkohol, které zůstanou v kapalném stavu v termoplastické tavenině, když je pod tlakem. Když se tlak sníží, pak nadouvadlo rychle vypařuje a odchází z roztoku s polymerem a tavenina začne expandovat. Dalším typem nadouvadla jsou tzv. inertní plyny, jako je oxid uhličitý nebo dusík. Tyto materiály se rozpustí jako páry v polymerní tavenině a odcházejí z roztoku taveniny a plynu a dochází tím k rozšíření polymerní taveniny. Chemická nadouvadla jsou materiály, které se rozkládají ve výrobě plynů při zpracování. Chemická nadouvadla používají rozložitelný materiál, který produkuje plyn nebo plyny při rozkladu. V tomto případě se musí chemická nadouvadla nejprve rozložit, pak se vyprodukovaný plyn chová jako při fyzikálním plnění, ale s ovlivňujícími efekty zbytkového materiálu z chemického nadouvadla. Z povahy tvorby plynu tedy můžeme nadouvadla klasifikovat jako fyzikální a chemické. Rozpustnost plynu v roztaveném polymeru se řídí podle následující rovnice.[6]

$$S = H * P \quad (3)$$

Kde je:

S - rozpustnost;

H - Henryho konstanta;

P - tlak plynu. [6]

U běžně používaných polymerů je Henryho konstanta pro oxid uhličitý 1,5 až 4 krát větší, než pro dusík. [6]

2.1.1 Fyzikální nadouvadla

Fyzikální nadouvadla jsou známy pro svoji vhodnost v procesu tvorby pěny a pěnové výroby. V prvních dnech mu byla připsána jeho vynikající rozpustnost u termoplastických polymerů. Minters a Tadberg zveřejnily směšovací metodu a její okamžité zavedení v napěňování polystyrenu již v roce 1935. Ve stejné době bylo objeveno, že

pro kryogenní systémy a tím i polymerní pěny. Od té doby se stal z pění fyzikálními nadouvadly velmi zajímavý předmět. V roce 1950, se začaly stavět základy pěnové extruze a polyuretanové pěny s fyzikálními nadouvadly jako pomocné nadouvadla. Fyzikální pěnicí činidlo hrálo podstatnou roli v samém počátku vývoje polymerní pěny, zvláště když plastikační zařízení bylo ještě v rané fázi. V roce 1980 bylo zjištěno, že halogenové uhlovodíky poškozují vrchní atmosféry. V současné době musí být vhodné fyzikální nadouvadla charakterizována dle určitých předpisů aspektů a jejich dopadů na životní prostředí. Tyto charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 1.[6]

Tab. 1 Charakteristika fyzikálních nadouvadel[7]

Aspekty pro výběr fyzikálního nadouvadla	
Fyzikální	Těkavost (bod varu)
	Kritická teplota
	Latentní teplo
	Vodivost
Chemické	Henryho konstanta
	Reaktivita
	Stabilita
Transportní	Difuzivita
	Permeabilita
	Plastikace
Bezpečnostní	Hořlavost
	Toxicita
Životního prostředí a regulační	Ozón
	Skleníkový efekt
	Smog
	Zápach
Dostupnost	Náklady
	Snadná manipulace
	Skladování

V Tab. 2 jsou uvedeny běžně používané fyzikální nadouvadla pro termoplastické pěny a jejich vlastnosti (molární hmotnost, bod varu, tlak páry, hustota kapaliny, tepelná vodivost páry). Tyto vlastnosti ovlivňují funkci procesu fyzikálního nadouvání. I když tyto materiály se nechovají jako ideální plyn, můžeme jejich chování aproximovat k chování ideálního plynu.[6]

Dobrá rozpustnost plynu v polymerní tavenině je velmi důležitá pro fyzikální nadouvadla. Pokud má nadouvadlo špatnou rozpustnost, je potřeba použít velké množství energie pro vstup nadouvadla do roztoku. To se obvykle provádí zvýšením tlaku v tavenině, což usnadňuje rozpouštění nadouvadla v polymeru. Ovšem čím vyšší tlaky působí na taveninu, tím se v tavenině tvoří smykové teplo, pak je obtížnější taveninu ochladit na optimální teplotu pění. Konečným výsledkem je to, že nejnižší hustota pěny, dosažena špatně rozpustným nadouvadlem, je vyšší než u pěny vyrobené s vysoce rozpustným nadouvadlem.[6]

Tab. 2 Vlastnosti fyzikálních nadouadel[6]

Název	Chem. Vzorec	Molární hmotnost [g/mol]	Bod varu [°C]	Tlak páry [kPa]	Hustota kapaliny [g/cm ³]	Vodivost páry [W/mK]	Hořlavost
Propane	C ₃ H ₈	44,1	-42,1	409,5	0,49	0,0179	ano
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58,1	-0,5	243,1	0,57	0,0159	ano
i-Butane	CH ₃ (CH ₃)CHCH ₃	58,1	-11,7	348,4	0,55	0,0161	ano
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72,2	36,1	68,3	0,621	0,0141	ano
i-Pentane	CH ₃ (CH ₃)CHCH ₂ CH ₃	72,2	27,9	98,1	0,615	-	ano
HCFC-22	CHF ₂ Cl	86,5	-40,8	1043,8	1,194	0,0106	ne
HCFC-142b	CF ₂ ClCH ₃	100,5	-9,2	338,9	1,11	0,0108	ano
HFC-152a	CHF ₂ CH ₃	66	-24,7	598,5	0,899	0,0136	ano
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	153	27,1	91,5	1,46	0,0095	ne
CFC-11	CFCl ₃	137	23	105,6	1,476	0,0082	ne
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	120,9	-29,8	651,6	1,311	0,01	ne
MeCl	CH ₃ Cl	50,5	-24,2	566,5	1,098	0,0106	ano
MeCl ₂	CH ₂ Cl ₂	84,9	40,1	56,7	1,322	0,0084	ne
Oxid uhličitý	CO ₂	44	-78,5	-	-	0,0165	ne
Dusík	N ₂	28	-195,8	-	-	0,0258	ne
Kyslík	O ₂	32	-183	-	-	0,0266	ne

2.1.2 Chemické nadouvadla

Chemické nadouvadla jsou historicky známá u pekařských produktů. Endotermická chemická nadouvadla byla původně používána jako nukleační činidla pro přímé zplyňování pěnového polystyrenu. Jejich použití jako efektivní chemické nadouvadlo

bylo objeveno až za nějaký čas. Chemické nadouvadla jsou pevné nebo kapalné látky, které se rozpadají za určitých podmínek k tvorbě výparů. Tyto výpary se potom chovají jako fyzikální nadouvadla v plastikačním procesu. Většina chemických nadouvadla jsou pevné látky s jemných částic, které se rozkládají v určitém rozmezí teplot. Teplota rozkladu by měla být ve stejném rozsahu jako je zpracovatelská teplota taveniny polymeru. Plyn, který se získá výsledkem rozkladu chemického nadouvadla, má několik vlivů v procesu a výsledném produktu. Oxid uhličitý se lépe zpracovává, vzhledem k tomu, že je dobře rozpustný v polymerních materiálech a má nižší tlak páry než dusík. Chemická nadouvadla, která generují oxid uhličitý, pak tvoří jemnější buňky s nižší hustotou a lepším povrchem v kratším časovém intervalu, než chemické nadouvadla generující dusík. Nicméně, například pro plasty s vysokou viskozitou taveniny a pro vstřikování dílů, které jsou obtížně vyplnitelné, je lepší použití generování dusíku. Dusík poskytuje vyšší generování tlaků a tím lepší expanzi pěny pro účinnější zaplnění formy. Míra objemu vygenerovaného plynu danou hmotností chemického nadouvadla, je důležité pro určení relativní účinnosti ve srovnání s jinými typy nebo třídami nadouvadla. Nejčastěji používané chemické nadouvadla, které generují oxid uhličitý nebo dusík, jsou uvedeny v Tab. 3 s jejich podrobnými vlastnostmi. Specifický objem může být použit k porovnání chování těchto dvou plynů v rozšíření v polymerních pěnách. Dusík zaujímá větší objem pro stejné množství materiálu a tato skutečnost částečně ukazuje, proč rozšíření dusíku během napěňování plastů je velmi rychlé a obtížně kontrolovatelné. Dalším faktorem, který ovlivňuje účinnost nebo rychlou expanzi je rozpustnost nadouvadla v polymeru. [6]

Chemická nadouvadla jsou obecně rozdělena do dvou kategorií (exotermní a endotermní). Exotermní nadouvadla generují při rozkladu tepelnou energii a endotermní tepelnou energii naopak pohlcují. Ovšem ve skutečnosti tyto vlastnosti generování nebo absorbování tepla velmi málo nebo vůbec nemají vliv na teplotu taveniny polymeru nebo výrobku. Hlavní účinek generace tepla nebo pohlcení tepla, se projevuje v rychlosti a teplotě rozkladu. Jakmile začne exotermní rozklad, je těžké jej zastavit před tím, než dosáhne úplného rozkladu. To má za následek rychlejší rozklad v úzkém teplotním rozmezí. Ovšem pokud je exotermní nadouvadlo v polymeru v malém množství (kolem 5%), může být reakce zastavena rychlým ochlazením. Endotermické nadouvadla na druhou stranu požadují dostatečnou tepelnou energii, která podporuje trvalý rozklad.[6]

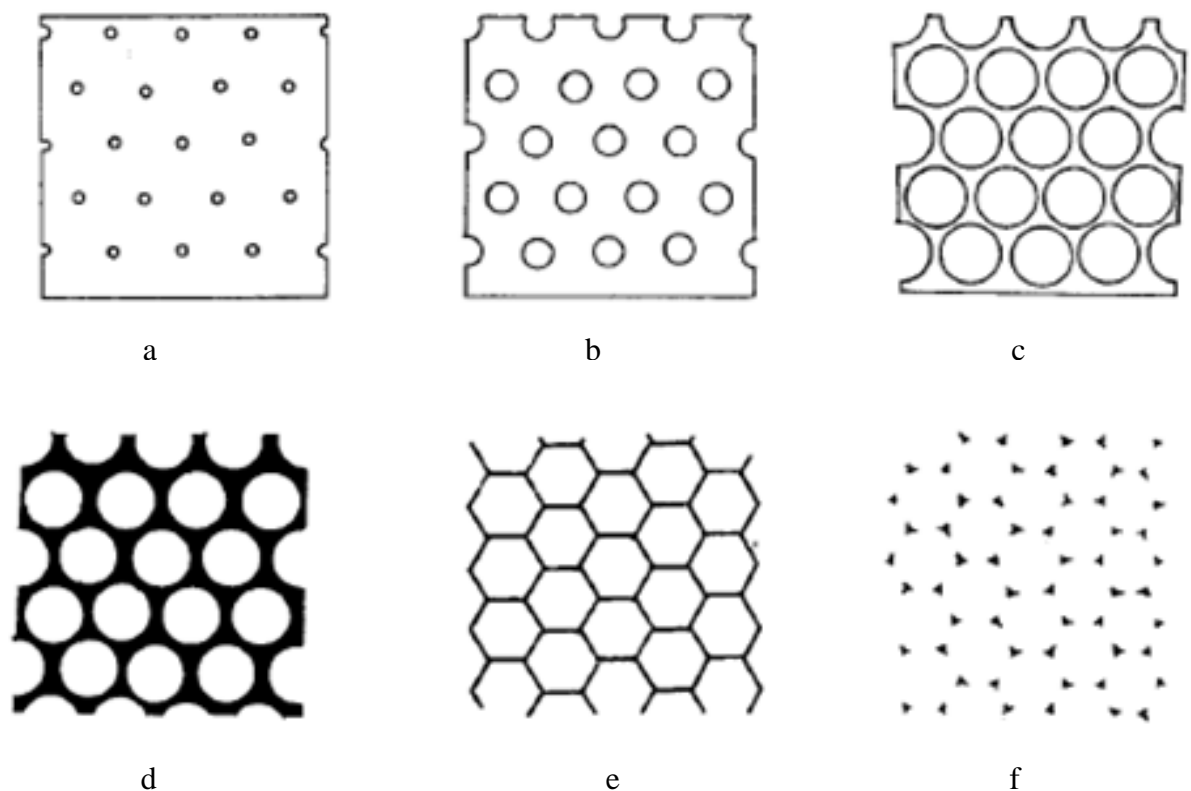
Tab. 3 Komerčně používané chemické nadouvající činidla [6]

*SBH je chemicky aktivován ve vodě.

Zkratka	Chemický název	Reakce (endotermní, exotermní)	Teplota rozkladu [°C]	Uvolňování plynu cc/gm	Uvolněný plyn
	Kyselina citronová	Endotermní	160-210	120	CO ₂
ADCA	Azodikarbonamid	Exotermní	205-212	220	N ₂
OBSH	Benzenesulfonylhydrazid	Exotermní	158-160	125	N ₂
TSH	p -Toulen sulfonyl hydrazid	Exotermní	110-120	115	N ₂
TSS	p - Toulen sulfony semikarbazid	Exotermní	228-235	140	N ₂
DNPT	Dinitrosopentamethylentetramid	Exotermní	190	190	N ₂
5PT	5 phenyltetrazol	Exotermní	240-250	220	N ₂
SBH	Borohydrid sodný	Endotermní	*	2000	H ₂

2.2 Vznik a růst buněk

Všechny komerční pěny vznikají z mikroskopických pórů, které rostou na nukleárním činidle v polymerní tavenině, což můžeme vidět na Obr. 5. Všechny mikrobublinky zpočátku rostou jako izolované buňky v nekonečném médiu (polymeru nasyceného plynem). Finální hustota produktu závisí na koncentraci plnicího plynu, poté závisí na rychlosti, s jakou plyn difunduje do rostoucích bublin a na teplotě polymerní taveniny.[2,5]



Obr. 5. Fáze vývoje pěny. [5]

a – izolované mikrobubliny v nekonečné polymerní tavenině; b – rostoucí bubliny; c – tvoření membrány; d – zastavení růstu bublinek, typických pro nízko-viskózní termoplasty a polyuretanové termosety; e – tvorba membrány, typické pro vysoce viskózní termoplasty; f – otevření buněk, narušení membrán

Následující čtyři faktory ovlivňují růst bublin, ať už jsou to nízko hustotní nebo vysoce hustotní polymery.

1) Nukleační místa: Bublinky se nukleují na náhodných místech v tavenině, nebo je nukleace inhibována v bezprostřední blízkosti rostoucí bubliny.

2) Nukleační čas: Náhlé snížení tlaku, jak tavenina prochází vytlačovací hlavou, způsobuje, že většina zárodků bublin se objeví ve stejnou dobu. Nicméně pokud se uvolňuje plyn chemickou reakcí, může dojít k nukleaci bublin až během dlouhé doby.

3) Kinetika difuze plynu, z taveniny do bubliny, zákonitě ovlivňuje růst bublin.

4) Zhrubnutí buněk: difuze plynu mezi sousedními bublinkami nestejně velikosti, způsobí buněčné zhrubnutí, jako menší bublinka se zmenší na úkor větší. Případně, může dojít z důvodu zhroucení stěny ke sloučení buněk.[3]

2.3 Úloha nukleantů a aditiv

Bubliny se tvoří samovolně v objemu taveniny polymeru nebo na cizí látce nebo nukleantech v tavenině. Nukleační místa zahrnují zbytky katalyzátoru, nezreagované chemické pěnící činidlo a zbytky pěnícího činidla, mikroskopické kovové šupinky z procesního zařízení, nečistoty, prach z okolního prostředí, síťovací částice, neroztavený polymer, velmi vysoké nebo velmi nízké molekulové hmotnosti polymeru, cizí odlišný polymer, velmi vysoké nebo velmi nízké molekulové hmotnosti polymeru, mazací oleje a ulpělé nečistoty, degradovaný polymer. Míra nukleovaných bublin je řízena nejlépe přidáním malého množství anorganických nukleantů, jako je třeba talek nebo uhličitan vápenatý. Mnoho polymerních přísad působí jako nukleační činidla. Nízkomolekulární aditiva mohou tvořit povlak anorganických nukleantů a utěsnit případné nukleační místa. Jakožto zvýšení tlaku taveniny a teploty, se s více nukleačního činidla vytváří více menších pěnových buněk. Typické dávkování anorganických nukleantů je menší než 1%. Mezi nimiž patří anorganické nukleační částice o velikostech od 1 do 20 mikronů, avšak částice mají tendenci se shlukovat při vyšších dávkách a jemnějších velikostech částic.[2]

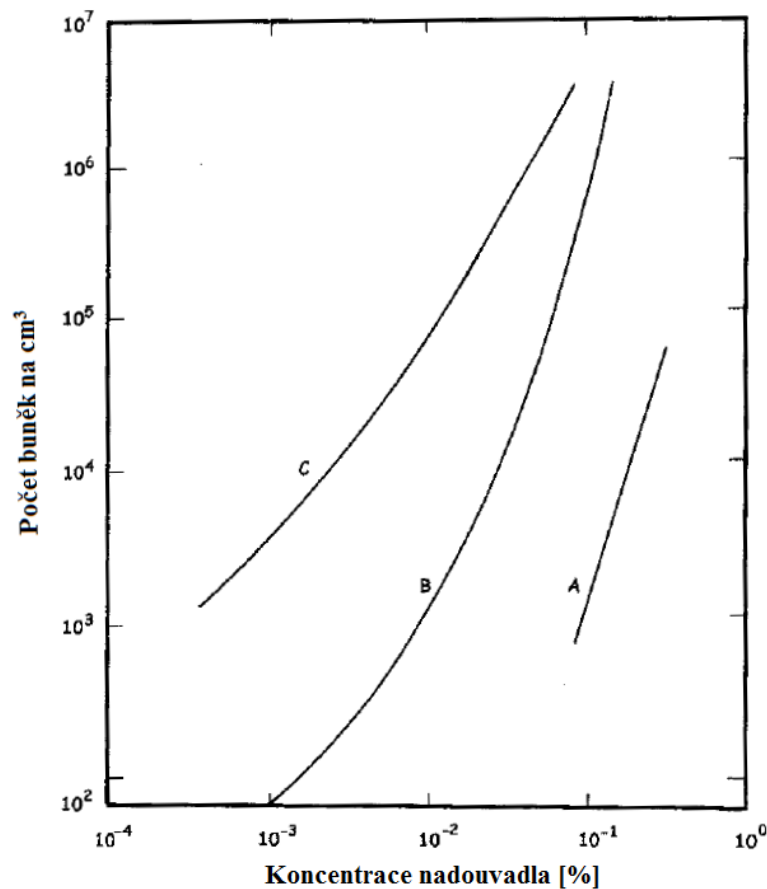
2.3.1 Nukleační činidla

Téměř všechny pěny používají nukleační činidlo nebo nukleantů v té či oné podobě. Hlavním úkolem nukleantů je poskytnout povrch, na kterém se začnou vytvářet zárodky bublin. Existují dva hlavní typy nukleantů. Pasivní nukleanty, které poskytují nukleační mikropóry, kolem nichž se mohou tvořit mikrobulinky. Pasivní nukleanty jsou buď anorganické, nebo organické. Mastek (talek) a skelná vlákna jsou příklady anorganických pasivních nukleantů. Anorganické nukleanty jsou většinou mikročástice. Menší částice mají tendenci se shlukovat. Hrubší částice nepřináší jemné buňky. Rozhraní mezi dvěma polymery nebo mezi organickou látkou a polymerem, může působit jako místa pro nukleaci bublinek. Malé množství polyolefinu a polyethylen-tereftalátu a malé množství minerálního oleje u některých polyolefinů působí jako pasivní mezifázové místa pro nukleaci bublin. Je třeba dbát na použití minerálního oleje s anorganickými nukleanty, protože olej utěsní praskliny a trhliny v nukleačních plochách a tím brání nukleaci.

Aktivní nukleanty působí nejen jako nukleační místa pro tvorbu bublin, ale také poskytují nadouvání plynem, pro tvorbu mikrobublin. Jako příklad je třeba uvést, malé

množství chemického nadouvadla přidané do polymeru, které se používá s fyzikálním nadouvadlem. V tomto případě chemické nadouvadlo slouží jak pro růst bublinek, tak zbytky nerozloženého nadouvadla slouží jako iniciační místa pro růst bublin, do kterých může difundovat fyzikální nadouvadlo.

Obr. 6 ilustruje účinek míchání chemických a fyzikálních nadouvadel na počtu bublin pro vysoce hustotní polyethylenovou pěny.[2]



Obr. 6 Vliv nadouvajícího činidla na počet bublin v polyethylenu[2]

A: pouze chemické nadouvadlo azodikarbonat;

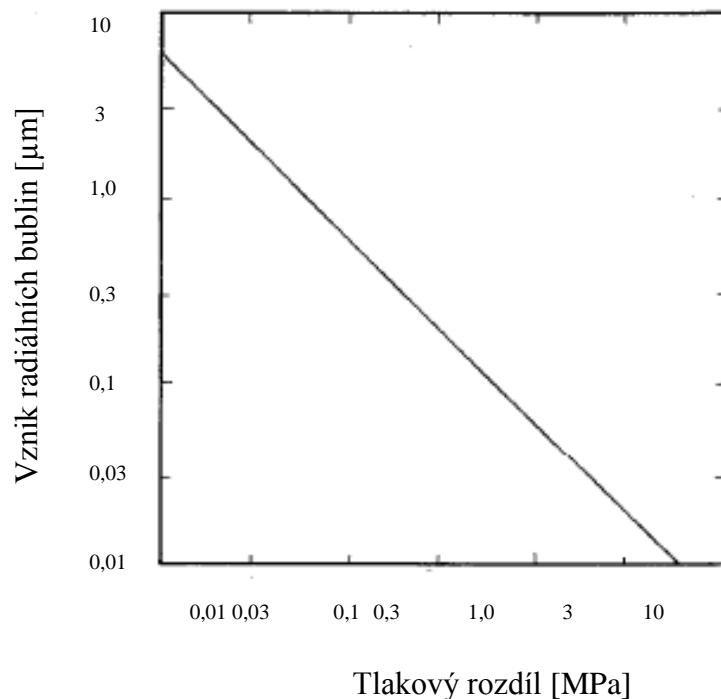
B: Směs azodikarbonátu a dusíku;

C: Směs azodikarbonátu s převahou dusíku.

2.4 Indukční koncept tvorby bublin

Bubliny se mohou vytvářet do té doby, dokud je tlak taveniny vyšší než tlak potřebný k udržení nadouvajícího plynu v roztoku. Tento tlak se někdy nazývá kritický, tlak rozpustnosti nebo tlak pěny. Zpravidla by měl být tlak taveniny čtyř až pěti násobný

v průběhu celého procesu až do doby, před vytlačovací hlavou. Vzhledem k tomu, že polymer opouští vytlačovací hlavu, tlak taveniny klesne pod tuto tlakovou rozpustnost a mikrobublinky o průměru 0,1 až 1 μm se začínají vytvářet na nukleantu a to jen v případě, když je tlak taveniny nižší než tlak plynu uvnitř bubliny pěny, což můžeme vidět na obr. 7. Pevnost polymerní taveniny brání rychlému snížení tlaku extrudátu. Doba snížení tlaku pro vznik zárodku inerciální bubliny v oblasti růstu se nazývá doba indukce. Může se jednat o několik milisekund. [2]



Obr. 7. Vztah mezi vznikem bublin a rozdílu tlaku bublineky a polymerní taveniny.[2]

2.5 Počáteční a inerciální růst bublin

Poté co jsou vytvořeny mikrobublinky, které rychle rostou. Větší mikrobubliny se vytváří při vyšších tlacích taveniny, než menší mikrobubliny a tak spotřebovávají nadouvající plyn, který by mohl být použitý pro růst menších bublin. Obecně vzato velké bubliny pohlcují malé bublinky). Pokud je viskozita polymeru nízká, počáteční růst bublin bude explozivně rychlý. Nízká teplota polymeru a nízká koncentrace nadouvajícího plynu polymeru, má za následek pomalý růst bublin během této fáze růstu. Tato fáze se nazývá inerciální růst, protože polymer sám o sobě odolává vnitřním silám. Tato fáze růstu většinou trvá méně než jednu sekundu, během této doby bublina vyroste od submikronové velikosti do cca 100 μm . Odpařovací chlazení tě-

kavého nadouvadla v bublinkovém rozhraní může pomoci ke snížení inerciálního růstu.[2]

2.6 Transportní jevy

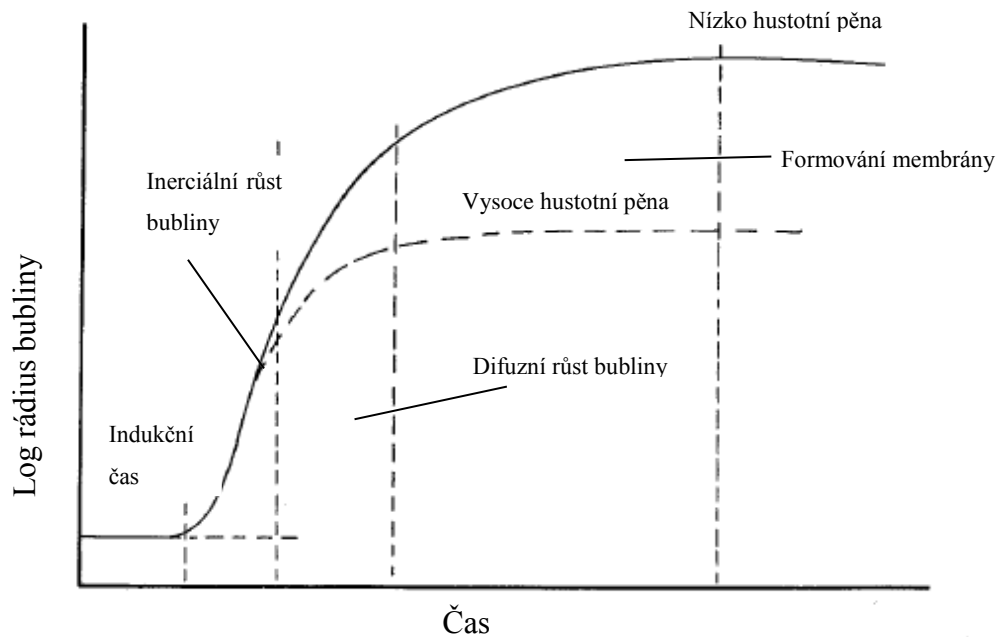
Difúze a permeabilita jsou příslušné jevy ve zpracování pěny a po zpracování pěny. Ve skutečnosti, difúze je primárním transportním mechanismem pro růst bublin, bez ohledu na termoplastické nebo teplem tvrditelné pěny. Řízení rozdílu koncentrace v rozhraní taveniny a bubliny dochází k difuzi za všech okolností. Jak bublina začne růst, zvýšení objemu bublinu způsobuje pokles koncentrace plynu v bublině, aby dále podporovala šíření plynu z polymerní matrice na plynové bubliny. Je třeba poznamenat, že primárně nestabilita představuje expanzi a difuzi na přenos hmoty. Můžeme mít rychlou expanzi a přesto pomalou difúzi, nebo pomalou expanzi a rychlou difúzi, v závislosti na nestabilitě a kombinaci difuzivity. Difuzivita (nebo difuzní koeficient), ukazuje Arrheniusova teplotní závislost, jak je uvedeno v rovnici (4).[8]

$$D=D_0\exp\left(\frac{\Delta E}{R.T}\right) \quad (4)$$

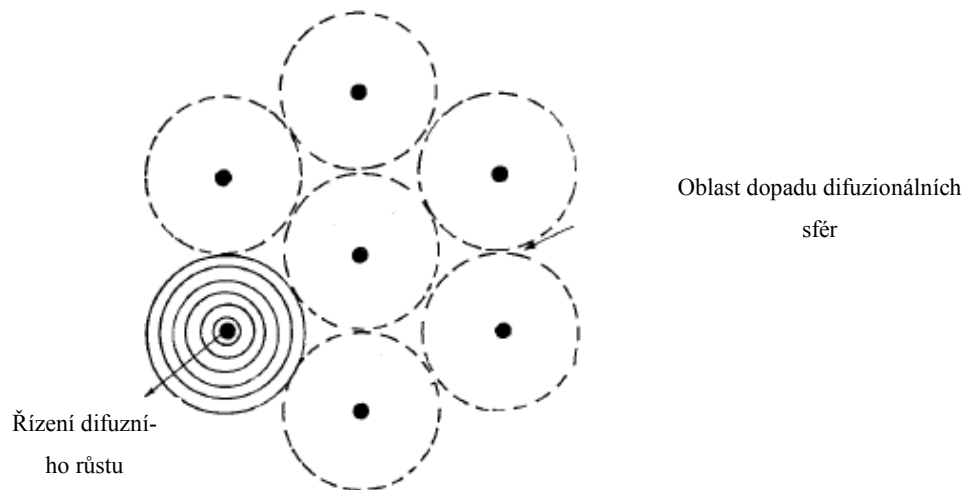
2.7 Difuzní růst bublinek

Jak bublina roste, nadouvající plyn je spotřebováván z okolí bublinek v tavenině. Nadouvající plyn v tavenině v určité vzdálenosti od bubliny difunduje do bubliny. Velké průměry molekul plynu difundují pomaleji než malé molekuly plynu, např. uhlovodíkové plyny difundují pomaleji než dusík. Podobně, hydrochlorfluoruhlovodíkové plyny difundují pomaleji než uhlovodíkové plyny. Obecně platí, že difuze nadouvajícího plynu přes ochlazující se taveninu zpomaluje růst bublin, viz Obr. 8. Oblasti v tavenině, které zásobují rostoucí bubliny se nazývají sféry vlivu, viz Obr. 9. Tyto sféry ovlivňují růst bublin a spotřebovávání nadouvajícího plynu z polymerní taveniny dále zpomaluje růst bublin. Nízká teplota taveniny a malá koncentrace nadouvajícího plynu zpomalují tempo růstu bublin v této fázi. Tato fáze růstu se nazývá difuzní růst. I když viskozita polymeru je stále důležitá, růst bubliny je řízen téměř výhradně rychlostí, při které plyn může dosáhnout místa bubliny. Vzhledem k tomu, difuze z plynu v polymeru do místa bublinky je časově závislá, difuzní tempa růstu

jsou výrazně nižší než inerciální tempa růstu. Bubliny se můžou pouze zdvojnásobit nebo ztrojnásobit v rozmezí desítek sekund.[2]



Obr. 8. Schéma řízení rádiusu bubliny, v různých částech růstu.[2]

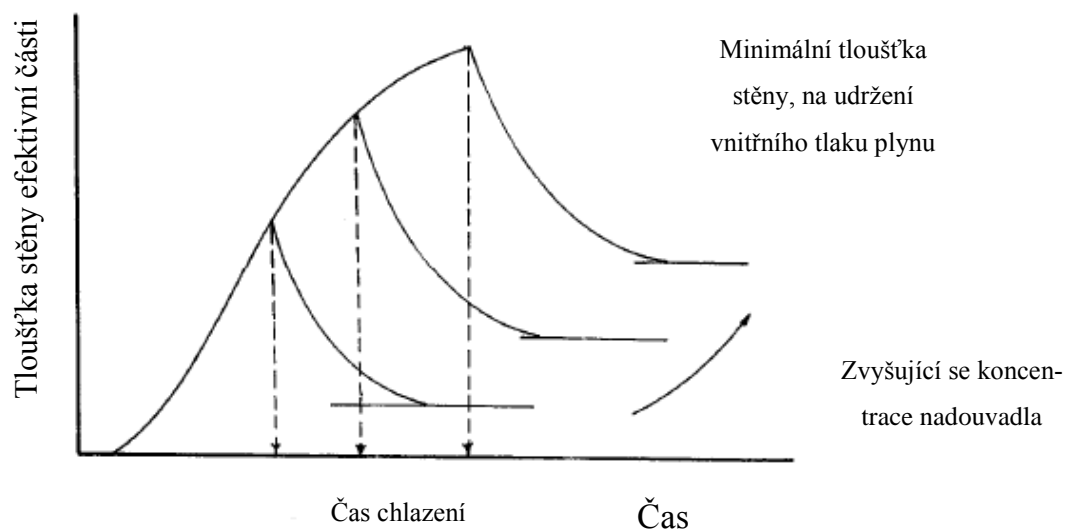


Obr. 9. Schéma difuzně řízeného růstu bublin[2]

2.8 Růst vysoce hustotní pěny

Vysoce hustotní pěny ve formě pásu nebo profilu mají téměř vždy nejvyšší hustotu na povrchu a nižší hustotu v pěnovém jádře. Jak se pěna ochlazuje, vnitřní tlak plynu se snižuje v poměru k teplotě tavení. Buď polymer v blízkosti pevného povrchu není pěna, nebo některé bublinky jsou vytvořeny a pak se zhroutí pod tlakem z pěny rozši-

řující se ze středu. Jak se pěna ochlazuje a kalibruje, povrch pěny se ustaluje. Naopak pěna v jádře stále expanduje, dokud se vnitřní tlak plynu v buňkách nepřiblíží k atmosférickému tlaku. Vysoce hustotní pěna se vyznačuje téměř kulovitým tvarem buněk v jádře a kapkovitým tvarem buněk v přechodu mezi pěnovým jádrem a povrchem a velmi malými nebo žádnými buňkami na povrchu pěny. Nadměrné ochlazení vede k zhrubnutí vnitřní buněčné struktury nebo k velkým buňkám, ale pokud pěna nebude dostatečně ochlazená, pak může vnitřní tlak způsobit narušení kalibrovaných rozměrů, jak je vidět na Obr. 10.[2]

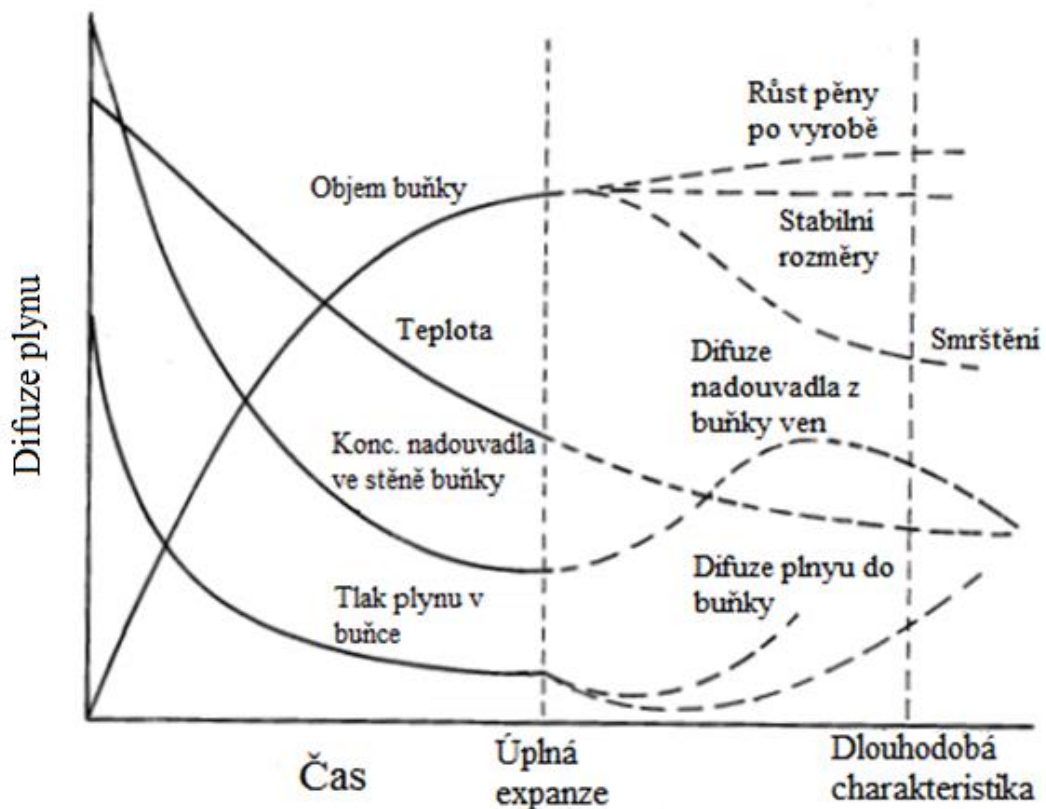


Obr. 10. Časově závislá efektivní tloušťkastěny, jako funkce koncentrace nadouvadla pro vysoce hustotní extrudované termoplastickou pěnu.[2]

2.9 Růst nízko hustotní pěny

Pěny s nízkou hustotou pásu nebo profilu se téměř vždy rozšiřují volně do prostoru vytlačovací hlavou. Volná expanze vede téměř vždy k jednotným, symetrickým buňkám, mající membrány o téměř stejné tloušťce. Struktura buněk v celé tloušťce pěny je jednotná, pokud se povrch rychle ochladí. Pěnové buňky se i nadále rozšiřují, až se vnitřní tlak plynu v buňce nepřiblíží atmosférickému tlaku nebo dokud nezatuhne

polymer, viz obr. 11.[2]



Obr. 11. Schématické znázornění časové závislosti teploty polymeru, objemu buňky, tlaku plynu buňky a koncentrace nadouvadla v rostoucí bublině. Dlouhodobá charakteristika závisí na stabilitě buněk a plynné směsi.[2]

2.10 Šíření plynu během pěnicího procesu

Existují tři cesty, jak se může šířit plyn. Část plynu přechází do rostoucích bublin. Další část plynu uniká do atmosféry a zbytek plynu se rozpustí v polymeru. A proto musíme pro daný polymer vybrat vhodný nadouvající plyn a tím maximalizovat přechod plynu do rostoucích bublin. Plyn, který uniká do atmosféry, je nevhodný pro nadouvání. Ztráta plynu z plochy rostoucí pěny je primární funkcí povahy povrchu k objemu pěny. Extruze tlustostěnných výrobků má menší ztráty nadouvajícího plynu než extruze tenkostěnných výrobků. Volnou pěnovou expanzi omezuje rozpustnost nadouvajícího plynu v polymeru. Mnoho uhlovodíkových nadouvadla je rozpustných v polymerech. Ale také rozsah volné expanze pěny může být omezen, pokud je nadouvající plyn příliš nerozpustný v polymeru. Krystalické polymery mají tendenci odmítnout nadouvající plyn z polymerní matrice, když polymer krystalizuje.[3]

2.11 Stabilizátory pěny

Tyto přísady jsou používány k výrobě stabilní pěny s uzavřenými buňkami. Jak buňky rostou, míra difúze některých nadouvajících plynů v určitých polymerech je natolik vysoká, že plyn se velmi rychle ztratí z pěny. Výsledkem je buněčný kolaps a nadměrné smrštění pěny. To platí zejména pro uhlovodíkové plyny pro nadouvání polyolefinů. Malé množství stabilizátorů buněk, zejména mastných kyselin nebo titančitanu, jsou přidány k polymeru k potlačení difúze. Tyto stabilizátory buněk jsou obvykle rozpustné v polymeru při teplotě tavení, ale fáze se rozdělí při ochlazení polymeru a vytvoří celistvý povlak na membránách buněk. Tento povlak zpomalí rychlost difúze plynu přes membránu buňky. Glycerol monostearát(GMS) je hlavní stabilizátor používaný pro stabilizaci polyolefinové pěny. Dávkování stabilizátoru v praxi, bývá kolem 1 až 1,5%. [2]

2.12 Post-extruzní smrštění pěny

Smrštění pěny se liší s vnitřní strukturou pěny (otevřené a uzavřené buňky). Jak je vidět na obr. 1 otevřenými buňkami volně prochází vzduch a proto je smrštění této otevřené struktury závislé na vlastnostech polymeru. Pro tuto diplomovou práci je nadále důležité objasnit smrštění extrudované pěny s uzavřenou buněčnou strukturou.

Čerstvě extrudovaná pěna může být rozměrově nestabilní při běžné pokojové teplotě. Jak se pěna ochladí, vnitřní tlak v buňce poklesne pod atmosférický tlak. Jestliže pěna neudrží rozdíl mezi atmosférickým tlakem a tlakem plynu buněk, dojde ke stlačení nebo smrštění rozměrů. Plyn z buněk uniká přes jejich polymerní stěny do ovzduší a vzduch vniká do polymeru. Jestliže plyn z buněk uniká nižší rychlostí, než vzduch, může vnitřní tlak plynu v buňce zvýšit nad atmosférický tlak. Pokud pěna neudrží nárůst nárůstu rozdílných tlaků, bude pěna expandovat nebo dojde k nárůstu rozměrů. Rozměry pěny je případně stabilizovat, když vnitřní tlak plynu buňky se rovná atmosférickému tlaku. [2]

V minulosti se používalo jako nadouvadlo chlorofluorovodík. Difúze tohoto plynu z PE pěny byla mnohem nižší než míra difúze vzduchu do pěny, takže rozměry výroby byly stabilní, ale měl škodlivé dopady na životní prostředí. V dnešní době se používá pentan nebo izobutan, nicméně uniká rychleji z pěny, než vzduch do pěny vstu-

puje, takže je zde nebezpečí zhroucení rozměrů pěny. Stabilizační přísady (stearamidy, mono-glyceridy) jsou používány pro extruzi LDPE pěny, nadouvané isobutanem. Smrštění délky extrudátu došlo po uplynutí asi jednoho měsíce. Některé z těchto modifikátorů mají antistatické vlastnosti, které jsou důležité, pokud je hořlavý nadouvací plyn. Destilovaný mono-glycerid byl neúčinnější při stabilizaci rozměrů. Tab. 4 uvádí permeabilitu LDPE tenké folie měřené v jednotkách Barrer = $10^{-11} \cdot (\text{cm}^3 \text{O}_2) \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mm Hg})$. Fólie byly použity na místo pěny, protože není možné přesně zjistit geometrii polymeru pěny a další. [9]

Tab. 4 Permeabilita a difuzní koeficient pro LDPE folii[9]

Permeabilita a difuzní koeficient pro LDPE folii				
Permeace plynu	Permeabilita [Barrer]		Difuzní koeficient při 30 °C [$10^{-6} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	
	LDPE	LDPE 2% SS	LDPE	LDPE 2% SS
Vzduch	1	0,6	72	54
n-butan	5,3	0,2	48	19
SS: stearyl stearamid				

3 Hlavní procesní technologie pro výrobu pěn

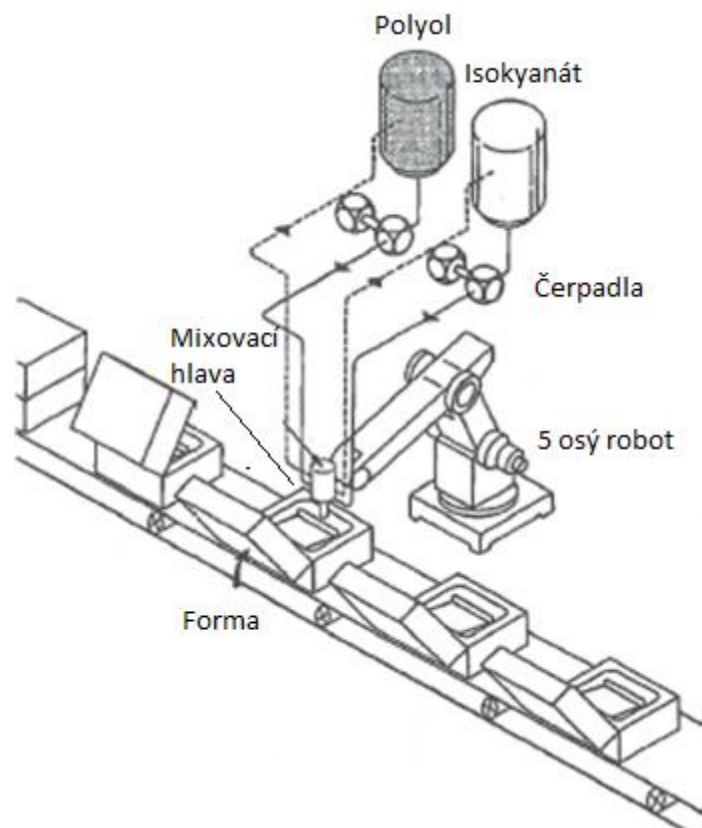
Proces pění je velmi zajímavý a unikátní jev. Má dynamický charakter, tlak, teplota a objem se mění v celém procesu. Stabilní pěnový výrobek je vytvořen až na konec. Musíme si představit výrobu pěny už od laboratorních konceptů až po komerční výrobní linky, což zahrnuje širokou škálu úkolů. V této kapitole se budeme snažit pochopit několik technologických řešení pro výrobu pěny v inženýrské praxi.[8]

3.1 Vstřikování pěn

Vstřikování do forem je velmi populární plastikační technologií, a to zejména díky rozmanitým konstrukcím forem. Následujících pět procesů jsou využívány v průmyslu z různých důvodů:

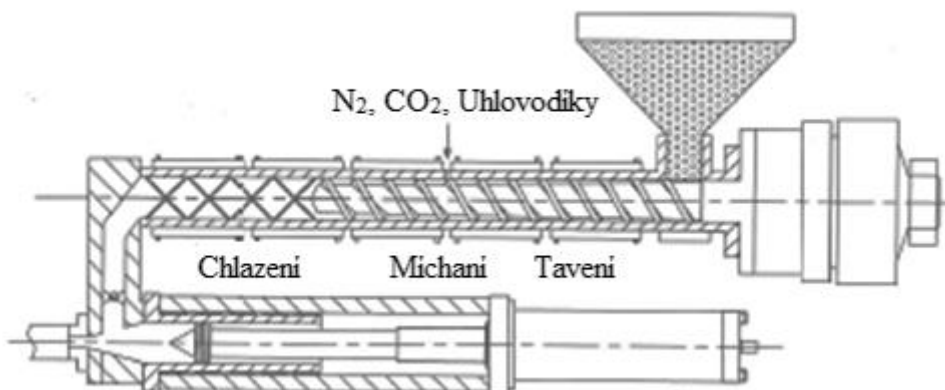
1. Reaktivní vstřikování do forem (RIM) napěněním.
2. Nízkotlaké strukturní formy pro napěňování.
3. Co-vstřikování strukturální do forem pro napěňování.
4. Vstřikování do forem za pomoci plynu.
5. Mikrobuněčné vstřikování.[8]

Pro reaktivní vstřikování do forem (RIM), se používají dvě tekuté reaktivní složky, jako jsou například polyol a izokyanát s katalyzátorem, které se čerpají do směšovací komory, kde se tekutiny smíchají, a proběhne předběžná reakce. Poté se vstřikuje do formy pod nízkým tlakem pro napěnění. Oba materiály se naplní do formy snadno protože, mají podobnou viskozitu jako voda. Chemická reakce mezi těmito dvěma komponenty vytvoří polyuretanovou pěnu. Pěnový výrobek po ochlazení a vyhození z dutiny formy, je v podstatě připraven k použití.[8]



Obr. 12 Reaktivní vstřikování do forem[8]

U vstřikování do forem, se polymerní tavenina a mísící operace velmi podobné jak u extruze pěny. Je-li plynná fáze přivedena do roztaveného polymeru, a to buď prostřednictvím rozkladu chemického nadouvajícího činidla, nebo rozpuštěním fyzikálního nadouvajícího činidla, pak homogenizovanou taveninu vtlačujeme pístem do teplotně řízené formy pro následné pění, tváření, ochlazení a vyhození z dutiny formy.[8]



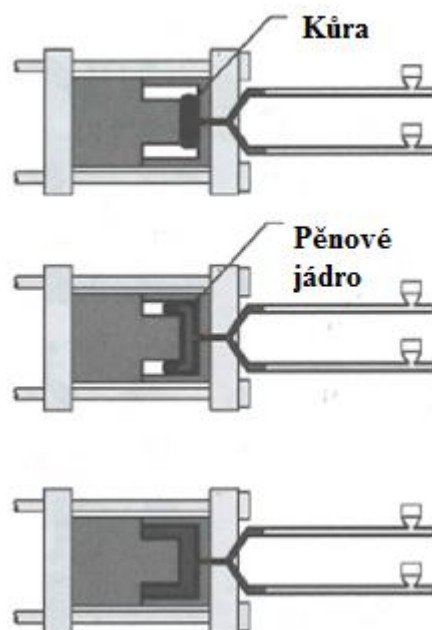
Obr. 13 Typické vstřikovací zařízení pěny do forem[8]

V poslední době přitahuje více pozornosti Co-vstřikování, protože se jedná o horké formy a doba cyklu je nižší. V podstatě, povrch a jádro se vstřikuje do formy střídavě. Jako první se vstříkne povrchová část, poté se vstříkne pěnové jádro a jako poslední krokem se opakuje vstříknutí povrchu. Výsledkem je pak, kompaktní povrch výrobku a pěnové jádro. Ovšem naopak můžeme vyrobit i pěnový povrch a kompaktní jádro. Jednoduché schéma Co-vstřikování je uvedeno na Obr. 14.[8]

Dalším zajímavým postupem je vstřikování plastů za pomoci plynu, ve kterém je další tryska k zavedení plynného dusíku v předepsaných tlacích v různých stupních zpracování. Tímto způsobem, lze vytvářet plynný prostor, tak velký jak 50% objemu vzniklého pěnového produktu. V Tab. 5 ukazuje rozdíly mezi vstřikováním za asistence plynu a vstřikování pěny do forem.[8]

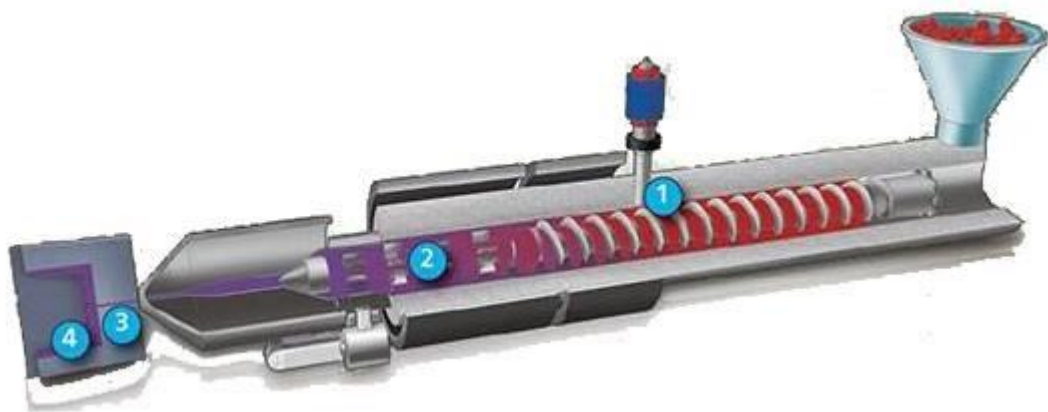
Tab. 5 Stručné porovnání mezi vstřikováním za asistence plynu a vstřikováním pěny do forem[8]

Položka	Vstřikování za asistence plynu	Vstřikování pěny do forem
Struktura	Dvojitý, povrch/jádro	Homogenní
Struktura povrchu	Hladký povrch	Jemné buňky hladkého povrchu
Struktura jádra	Prázdný	Buněčná struktura
Rychlost časového cyklu	Žádná	snížení o 20 - 50%
Úspora materiálu	30 - 70%	20 - 60%



Obr. 14 Co-vstřikování[8]

V poslední době získalo široké použití mikrobuněčné vstřikování do forem. Anorganické fyzikální nadouvající činidlo je zavedeno do taveniny ve směšovací části za vzniku homogenizovaného roztoku taveniny a plynu, který se vstřikuje do nízkotlaké formy. Hlavní výhodou této technologie je snížení doby cyklu a má dobré využití pro výrobu tenkých a malých součástí. Typický postup tohoto procesu je znázorněn na Obr. 15.[8]

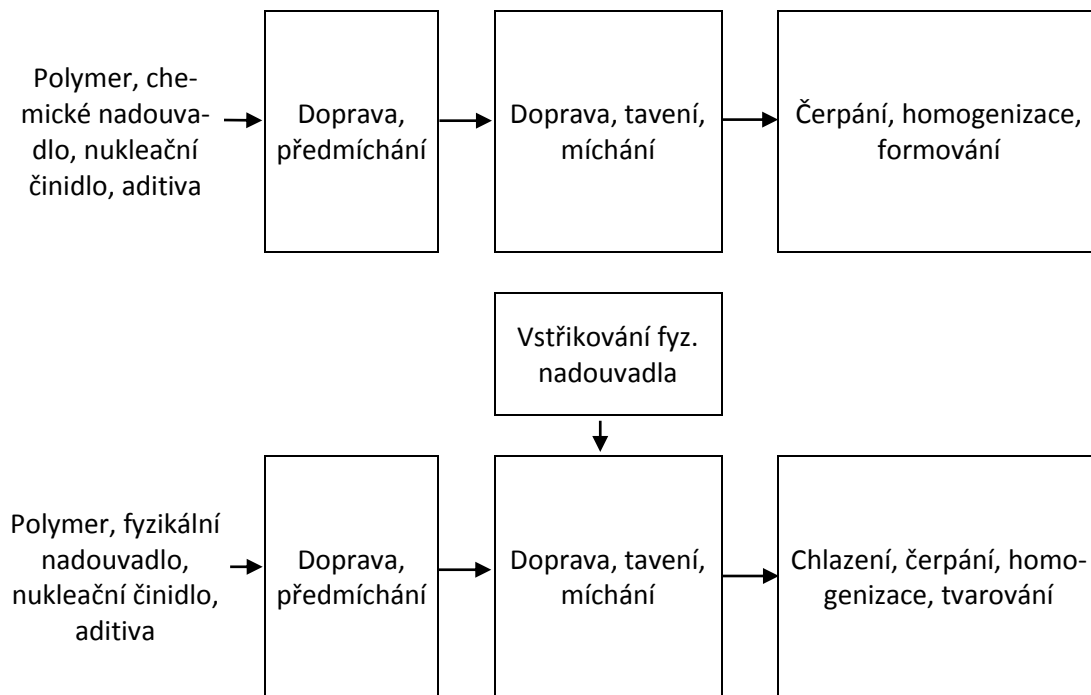


Obr. 15 Mikrobuněčné vstřikování pěny do forem[8]

1) Vstřikování nadouvajícího plynu do polymerní taveniny; 2) Homogenizační míchání - vmíchání plynu do polymerní taveniny; 3) Vstříknutím polymerní taveniny do dutiny. Začátek růstu buněk při nižším tlaku v dutině formy; 4) Regulací tlaku plněním dutiny formy se řídí růst buněk.

3.2 Extruze pěny

Existují dva odlišné extruzní procesy pro výrobu termoplastické pěny. Jeden pro výrobu vysoce hustotní pěny a další pro výrobu nízko hustotní pěny. Vytlačování termoplastické pěny je ovlivněno typem nadouvadla a jeho rozpustnosti a způsobu míchání. Obr. 16 ukazuje postupový diagram těchto dvou výrobních procesů. Polyolefiny mají nízkou pevnost taveniny. Zvýšením pevnosti taveniny (např. snížením teploty taveniny, použitím specifického typu polymeru, přidáním speciálních přísad nebo modifikací síťováním během pění), dojde ke stabilizaci růstu buněk a tak získat lepší strukturu pěny.[6]



Obr. 16 Schéma procesů v extrudéru, při extruzi vysoce hustotní a nízko hustotní pěny [6]

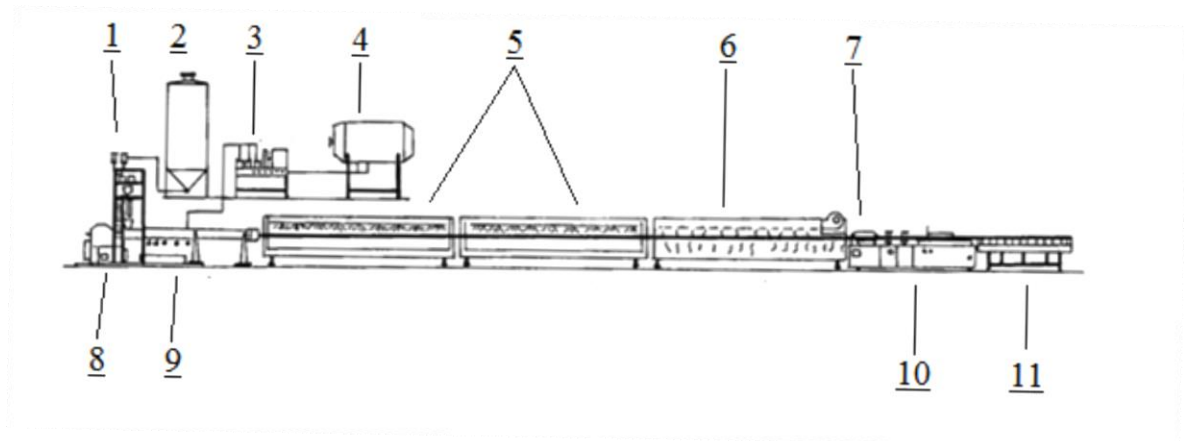
3.2.1 Extruze vysoce hustotní pěny

Vysoce hustotní pěny nacházejí své uplatnění u výrobků, které se tradičně vyrábějí ze dřeva. PVC je nejpoužívanějším polymerním materiálem pro tyto aplikace, díky svým dobrým fyzikálním vlastnostem a cenou. Chemické nadouvající činidla mohou být rozptýleny ve sloučenině s polymerem už během procesu granulace, ale je třeba dbát, aby nedošlo k nadměrným teplotám tání, což by způsobilo, že by se chemické nadouvající činidlo začalo předčasně rozkládat. Tento problém, lze eliminovat a další náklady na granulaci, použitím suché směsi PVC. Jedno šnekové i dvou šnekové extrudéry jsou velmi úspěšně používány při tvorbě vysoce hustotní PVC pěny ze suché práškové směsi.[6]

Pěny s vysokou hustotou můžou být také vytvořeny z PE, ABA, PS, PP a jiných polymerů. Chemické nadouvadla se proto volí v závislosti na teplotě zpracování polymeru. Je-li teplota rozkladu chemického nadouvadla příliš nízká, bude se rozkládat předčasně v extrudéru a uvolněný plyn se dostane přes dávkovací hrdlo ven z extrudéru. Naopak, v případě, že je teplota rozkladu příliš vysoká, nemůže být dosaženo teploty rozkladu nadouvadla a plyn se neuvolní. Teplotu rozkladu, je možno

upravit za pomoci aktivátoru, který indukují rozklad při nízké teplotě. Dodavatelé těchto chemických nadouvajících činidel, vyvinuli materiály vhodné pro různé polymery v závislosti na požadované koncentraci a provozní podmínky. Zkušenosti s vytlačováním pevných výrobků z konkrétních polymerů zvoleného pro pěnovou extruzi je užitečné při nastavování provozních podmínek pěnového vytlačování. Nicméně, další omezení potřebné k vytvoření kvalitní pěny může vyžadovat změnu provozních podmínek, které se obvykle používají pro vytlačování pevných výrobků.[6]

Pěna je vytlačována do různých profilů, jako jsou např. kabely navinuté do rolí. Typická linka pro vysoce hustotní pěny za pomoci fyzikálního nadouvadla je schematicky uvedena na obr. 17.[2]

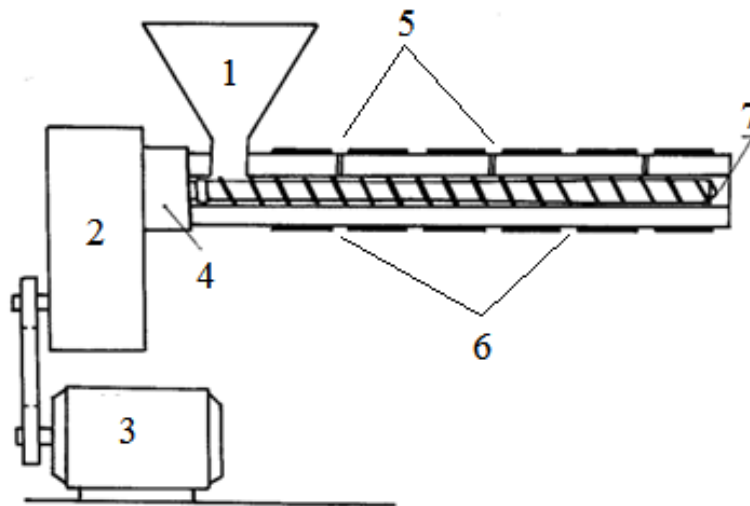


Obr. 17 Schéma výrobní linky, pro extruzi vysoce hustotní pěny, nadouvané za pomoci fyzikálního nadouvadla [2]

1 - dávkovač přísad; 2 - silo; 3 - pumpa fyzikálního nadouvadla; 4 - zásobník fyz. nadouvadla; 5 - vodní sprcha; 6 - vodní mlha; 7 - měřící zařízení; 8 - pohon extrudéru; 9 - extrudér, 10 - dělicí část; skládací zařízení.

Jedno - šnekový extrudér se používá v rozsáhlé míře, když tepelně stabilní vysoce hustotní pěna je vyráběna za použití chemického nadouvadla. Na obr. 18 je zobrazen jedno-šnekový extrudér, který se skládá z tlustostěnného ocelového válce, v němž je umístěn šnek. Válec má vyhřívané pásma, které jsou jednotlivě tepelně regulovány. Šnek poskytuje dobré promíchání a řízení teploty taveniny pro daný polymer. Šnek bývá někdy také vyhříván a to buď horkým olejem, nebo případně elektricky. Na konci válce je připojena vytlačovací hlava. Polymerní složka je přiváděna do šneka

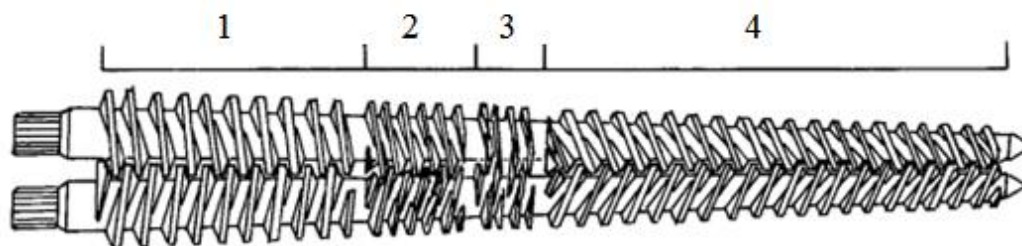
prostřednictvím násypky a to ve formě prášku, nebo granulí. Pokud je chemické nadouvadlo, ve formě prášku, pak se obvykle mísí s polymerem před zavedením do násypky. **Vstupní zóna** extrudéru je chlazená, což je velmi prospěšné pro polymery s nízkou teplotou tavení, které se mohou přilepit na vnitřní povrch válce. Vstupní část tvoří většinou dva až tři závity šneku. Vstupní zóna je optimalizována s nízkými třecími vlastnostmi šneku a vysokými třecími vlastnostmi pracovního válce. Pro polymery s vysokou teplotou tání, se nemusí chladit vstupní zóna. Pozornost musí být vzata v nastavení první zóny, aby se zabránilo předčasnému rozkladu nadouvadla, což bude mít za následek ztrátu a snížení hustoty. Nicméně, příliš nízká teplota první zóny může mít za následek špatné promíchání a tím i špatnou kvalitu extrudátu. [2,6]



Obr. 18 Schéma konvenčního jedno-šnekového extrudéru pro chemicky nadouvané vysoce hustotní pěny[2]

1 - násypka; 2 - převodovka; 3 - elektromotor; 4 - ložisko; 5 - otvory pro termočlánky; 6 - vytápění válce; typ šneku.

Dvou-šnekové extrudéry jsou používány pro tepelně citlivé polymery a aditiva. Existuje mnoho variant dvou-šnekových extrudérů. Šneky mohou být válcové, jak je tomu v případě jedno-šnekového extrudéru, nebo mohou být šneky kuželovité, jak je vidět na Obr. 19. Kuželové dvou-šnekové vytlačovací stroje se používají především v procesech pro tepelně citlivé polymerní pěny jako jen např. PVC pěna. [2]



*Obr. 19 Kuželový dvou-šnek konfigurovaný pro tepelně citlivé
zpěnitelné polymery[2]*

*1 - vstupní (plnicí) část; 2 - kompresní část; 3 - míchací část (polymer - plyn);
4 - výstupní část.*

Dvou-šnekové vytlačovací stroje, můžeme rozdělit, podle smyslu otáčení šneků a to se stejným smyslem a opačným smyslem otáčení. Většina dvou-šnekových extrudérů pro vytlačování vysoce hustotní pěny používá opačný smysl otáčení šneků. Většina těchto extrudérů používá plně do sebe zapadající šneky. Tato funkce dvou vzájemně zapadajících šneků umožňuje, polymerní tavenině se otírat o šroubovici šneku. Typické rozměry L/D dvou-šnekové extrudéru bývají kolem 50, ovšem pro extruzi vysoce hustotní pěny je typický rozměr kolem 30 L/D , při otáčkách šneku 20 až 50 RPM.[2]

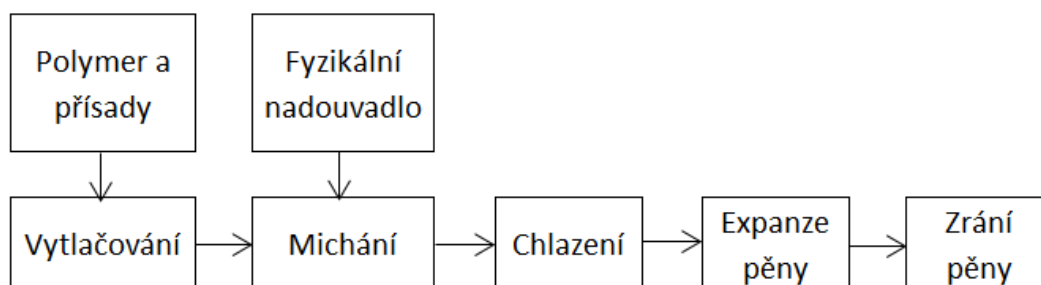
Vytlačovací hlava je umístěna na konci extruzního zařízení. Přechod mezi válcem extrudéru a vytlačovací hlavou se nachází lamač s taveninovým sítím a adaptérem, který převádí průřez válce extrudéru na vytlačovací hlavu. Lamač je děrovaná deska s průměry děr 5 mm na více jak 50% povrchu desky, která přerušuje spirálovitý proud polymerní taveniny. Lamač také tepelně homogenizuje polymerní taveninu. Na lamači se zároveň umísťuje taveninové síto, které slouží k filtraci nežádoucích materiálů, jako např. kousky kovu, neroztavený polymer a další nečistoty z proudu taveniny. [2,6]

3.2.2 Extruze nízko hustotní pěny

Pěny s nízkou hustotou, mohou být vyráběny s použitím kapalného nebo plynného nadouvadla, běžně označovaného jako fyzikální nadouvadla. Tato nadouvadla musí

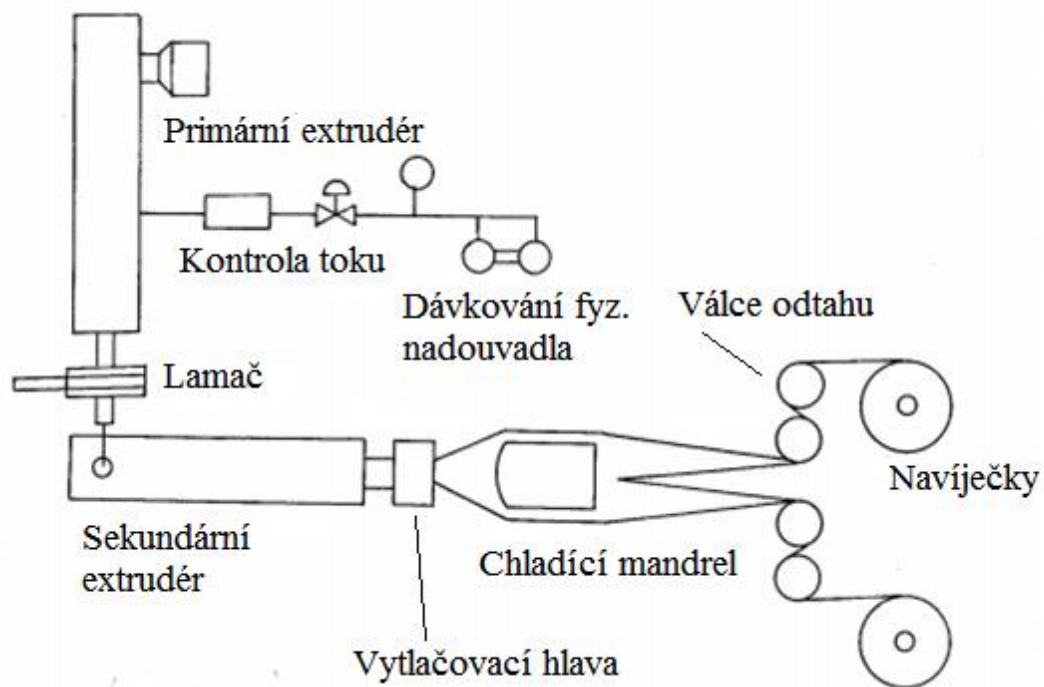
být rozpustné v polymeru při vysokém tlaku a teplotě. Musí být zároveň alespoň částečně nerozpustné při snížení tlaku. Pokud aplikovaný tlak klesne pod úroveň parciálního tlaku nadouvadla, pak se spustí nukleace bublin.[6]

Produkty vyrobené extruzí pěny s nízkou hustotou jsou buď pásy (fólie), nebo desky. Pásové výrobky jsou považovány, pokud mají tloušťku pásu menší jak 15 mm. Deskové výrobky bývají považovány, pokud jejich tloušťka je větší jak 15 mm. Tyto desky se můžou následně vrstvit do větších tloušťky. Zařízení pro extruzi pásů a desek jsou stejné, jen se liší vytlačovací hlavy. Na Obr. 20 můžeme vidět jednotlivé kroky v procesu extruze nízko hustotní pěny, které zahrnují zejména vytlačování, míchání, chlazení, expanzi a zrání pěny.[6]



Obr. 20 Schéma procesu v extrudéru pro nízko hustotní pěny [6]

Mezi hlavní komerční extruzní zařízení pro nízko hustotní pěny patří jedno-šnekový extrudér s dlouhým šnekem, dvou-šnekový extrudér a **tandemový extrudér**, který se skládá z primárního a sekundárního extrudéru. S výjimkou produktů s malým průřezem, které vyžadují nízkou rychlost vytlačování, je většina výrobků polyolefinové pěny vyrobené na lince tandemového extrudéru, jak je znázorněno na Obr. 21. Primární extrudér plastifikuje polymerní taveninu a pak ji míchá s přísadami a s fyzikálním nadouvadlem. Sekundární extrudér (často nazývaný jako chladicí extrudér) míchá a ochlazuje taveninu na optimální pěnicí teplotu při zachování tlaku taveniny, aby se zabránilo předčasnému pění. Sekundární extrudér bývá často delší jak primární extrudér, aby bylo dosaženo efektivního chlazení. Převod taveniny z primárního do sekundárního extrudéru lze nejlépe dosáhnout spojením válce primárního extrudéru přímo do vstupu sekundárního extrudéru, který je vidět na obr. 21.[5]

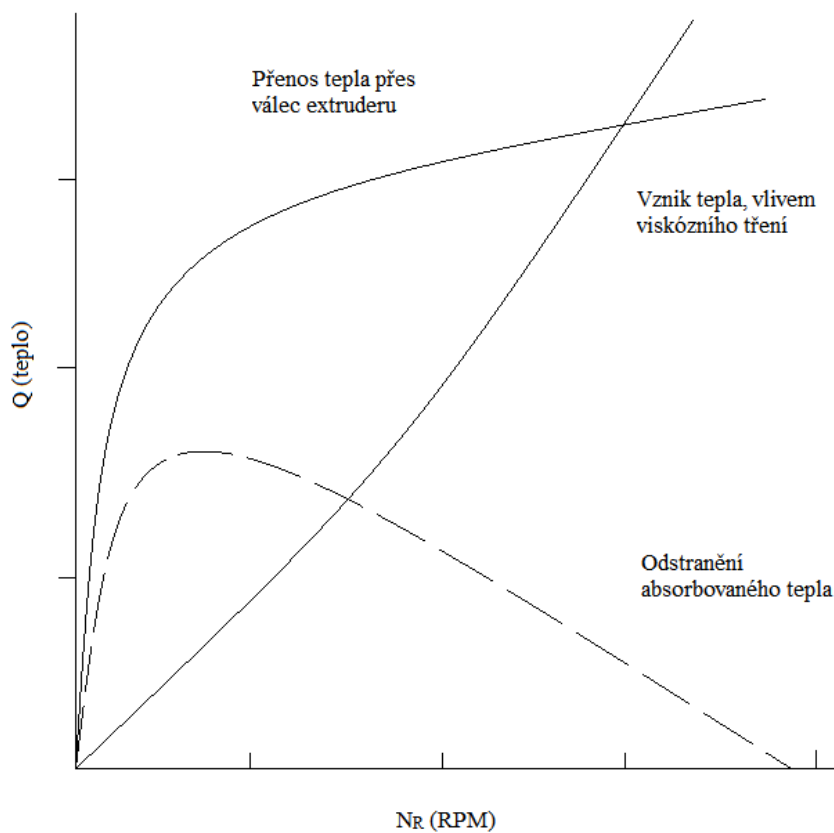


Obr. 21 Schéma tandemového extruzního systému[2]

Dalším způsobem extruze nízko hustotní je za **pomoci extrudéru s dlouhým šnekem** (často nazývaný jako dvoustupňový jedno-šnekový extrudér). Poměr L/D vytlačovacího šneku a válce bývá obvykle od 42 do 60. V první polovině délky válce se dopravuje polymerní materiál a přísadami s následovnou plastifikací a čerpáním taveniny. Fyzikální nadouvadlo se vstříkuje do klesající části šneku. Poté se tavenina ochladí na zbývající části válce. K tepelné homogenizaci taveniny se používají míchací kolíky.[2]

Otáčky šneku jsou prakticky konstantní zdroj mechanické energie, která se může přenést do polymeru jako zdroj tepla přes viskózní tření a disipaci. Toto teplo se stává kritickým problémem, pokud jde o odstranění tepla, které je nezbytné ke stabilizaci pěnicího systému. Pro vytvoření vhodného designu šneku, který zahrnuje každý mechanismus je víc uměním než vědou. Nicméně, prostřednictvím správného návrhu šneku a těsnosti šneku ve válci, extruder lze považovat jako výměník tepla, v tomto pořadí, což značně zvyšuje jeho schopnost pro míchání a kontrolované chlazení. Fáze tání je v podstatě převedení pevných přísad ve formě granulí do roztavené fáze. K tavení dochází, jak už bylo zmíněno transformací mechanické energie na tepelnou vlivem tření a vytápěním válce extruderu. Míchání je další důležitý proces, když je plyn zaveden do polymerní taveniny, distributivní míchací zařízení je ne-

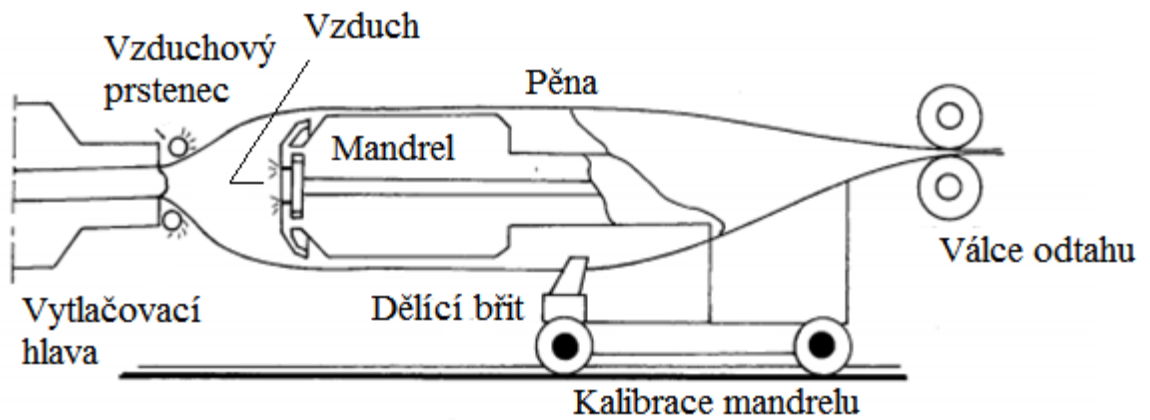
zbytné pro přerušování toku plynu do malých kapes, pro rychlé rozpouštění plynu v tavenině. Po promíchání se očekává homogenní roztok, který se pohybuje na stupni chlazení. To je jednoznačně nejnáročnější část v provedení efektivního komerčního procesu vytlačování pěny. Na jednu stranu, neustálé otáčení šneku, přivádí energii do směsi taveniny a plynu a odvod tepla z válce vyžaduje účinnou plochu povrchu pro snížení objemového tepla. Výměna tepla je ukázaná na obr. 22.[2,7]



Obr. 22 Chladící charakteristiky; vstupní práce a odvod tepla[7]

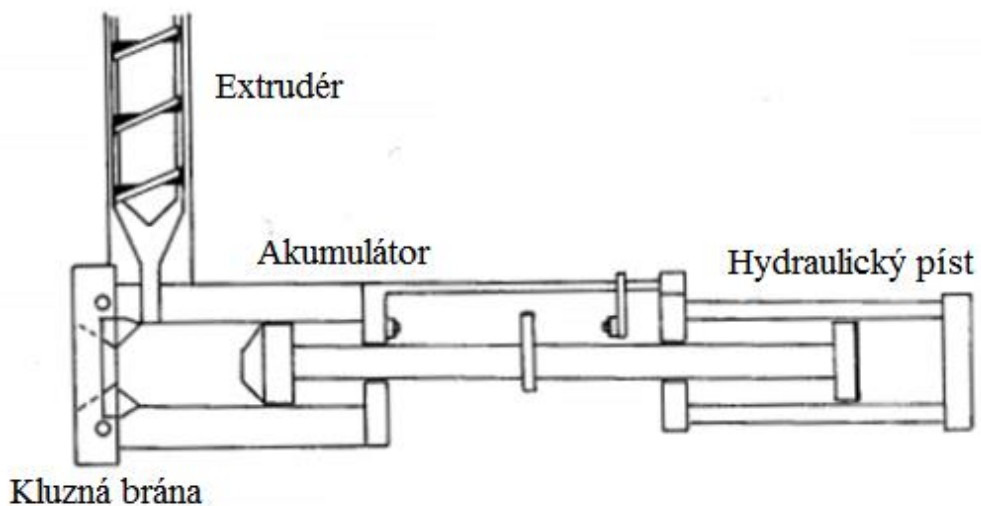
Pěnové stability je dosaženo chlazením vzduchem vnější vrstvy plochy pásu. Rozměry pěnového pásu jsou dosaženy tak, že se uzavřený napěněný pás natáhne z vytlačovací hlavy na mandrel, který můžeme vidět na obr. 23. Studený vzduch z vnějšího kruhového prstence, se používá k chlazení vnějšího povrchu pásu. Povrch mandrelu je chlazen zevnitř průtokem vody a tím ochlazuje vnitřní povrch extrudovaného pásu a zároveň, ze středu mandrelu je přiváděn studený vzduch do proti směru extruze,

který rozfoukává a ochlazuje vytlačovanou pěny. Průměr mandrelu, musí být přizpůsobený, průměru vytlačovací hlavy.



Obr. 23 Schematicky zobrazená funkce mandrelu[2]

Akumulační extrudéry se podobají tandemové lince a používají se pro výrobu tlustostěnných nízko hustotních pěnových desek. Jak je vidět na Obr. 24 zpěnitelná tavenina se převádí do akumuláční části z jednošnekového extrudéru.[5]



Obr. 24 Schéma akumuláčního zařízení [5]

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1996, 56 s. ISBN 8070802650
- [2] THRONE, James L. Thermoplasticfoamextrusion: anintroduction. Mu nich: Hanse-rPublishers, c2004, x, 139 s. ISBN 1-569-90360-3.
- [3] MILLS, N. *Polymer foams handbook: engineering and biomechanicsapplications and design guide*. 1st ed. Boston: ButterworthHeinemann, 2007, xxv, 535 p. ISBN 07-506-8069-5.
- [4] SprayFoamInsulationPhoenix. [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://sprayfoaminsulationphoenix.net/wp-content/uploads/2013/06/open-closed-comparison.jpg>
- [5] KLEMPNER, Daniel a Vahid SENDIJAREVIĆ. Handbook ofpolymericfoams and foam technology. 2nd ed. Munich: HanserPublishers, c2004, xix, 584 s. ISBN 1-56990-336-0
- [6] LEE, S, Chul B PARK a N RAMESH. *Foam extrusion: principles and practice*. Lancaster: Technomic Pub. Co., c2000, xviii, 344 p. Polymeric foams series. ISBN 15-667-6879-9.
- [7] KREBS, Josef a Miloš SOVA. *Termoplasty v praxi: aktuální stav červenec 2003* [online]. 4. aktualizace a doplňky. Praha: Verlag Dashöfer, 2003
- [8] LEE, S, Chul B PARK a N RAMESH. *Polymeric foams: science and technology*. Boca Raton: CRC/Taylor, 2007, 220 p. Polymeric foams series. ISBN 978-084-9330-759.
- [9] *Rapra review reports: Polyolefin Foams*. Shawbury: Rapra, 2003, roč. 14, č. 167. ISSN 0889-3144.
- [10] Petroleum. In: [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/>
- [11] Slovnaft. In: [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: www.slovnaft.sk/repository/
- [12] Mineraly.sci.muni. [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://mineraly.sci.muni.cz/fylosilikaty/mastek.html>
- [13] Multibase. In: [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.multibase.com/fileadmin/documents/pdf/mat_range/Masterbatch_Standard_Range_-_Nov._2011.pdf

- [14] Oxeno. In: [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://oxeno.biz/Internet/upload/produktdaten_EN/iso-butan_englisch.pdf
- [15] Armostat. In: [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.polymerpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds_id=1851
- [16] ČSN EN ISO 845. *Lehčené plasty a pryže – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Česká technická norma, 2009.
- [17] ČSN EN ISO 3386-1. *Měkké lehčené polymerní materiály Stanovení odporu proti stlačení Část 1: Nízkohustotní materiály*. Praha: Česká technická norma, 1999.
- [18] ČSN EN ISO 1856. *Měkké lehčené polymerní materiály - Stanovení trvalé deformace v tlaku*. Praha: Česká technická norma, 2001.
- [19] ASTM D3575-S. *Foam Test Methods: Thermal stability*. USA, 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASTM (American Society for Testing and Materials)

BS (British Standards)

ČSN Česká technická norma

EN Evropská norma

Hg Rtuť

ISO Mezinárodní norma

LDPE Nízko hustotní polyethylén

O₂ Kyslík

Obr. Obrázek

Tab. Tabulka

GMS Glycerol monostearát

STN Slovenská technická norma

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Otevřené buňky vlevo a uzavřené buňky vpravo. [4]</i>	13
<i>Obr. 2 Kvantitativní parametry buněčné struktury, zahrnující parametry pro plyn a pro pevnou fázi [2]</i>	15
<i>Obr. 3 Hodnocení buněčné struktury pěn na základě</i>	15
<i>Obr. 4 Anizotropie buněk [5]</i>	16
<i>Obr. 5. Fáze vývoje pěny. [5]</i>	24
<i>Obr. 6 Vliv nadouvajícího činidla na počet bublin v polyethylenu[2]</i>	26
<i>Obr. 7. Vztah mezi vznikem bublin a rozdílu tlaku bublineky a polymerní taveniny.[2]</i>	27
<i>Obr. 8. Schéma řízení rádiusu bubliny, v různých částech růstu.[2]</i>	29
<i>Obr. 9. Schéma difuzně řízeného růstu bublin[2]</i>	29
<i>Obr. 10. Časově závislá efektivní tloušťkastěny, jako funkce koncentrace nadouvadla pro vysoce hustotní extrudované termoplastickou pěnu.[2]</i>	30
<i>Obr. 11. Schématické znázornění časové závislosti teploty polymeru, objemu buňky, tlaku plynu buňky a koncentrace nadouvadla v rostoucí bublině. Dlouhodobá charakteristika závisí na stabilitě buněk a plynné směsi.[2]</i>	31
<i>Obr. 12 Reaktivní vstřikování do forem[8]</i>	35
<i>Obr. 13Typické vstřikovací zařízení pěny do forem[8]</i>	35
<i>Obr. 14 Co-vstřikování[8]</i>	36
<i>Obr. 15Mikrobuněčné vstřikování pěny do forem[8]</i>	37
<i>Obr. 16 Schéma procesů v extrudéru, při extruzi vysoce hustotní a nízko hustotní pěny [6]</i>	38
<i>Obr. 17 Schéma výrobní linky, pro extruzi vysoce hustotní pěny, nadouvané za pomoci fyzikálního nadouvadla [2]</i>	39
<i>Obr. 18 Schéma konvenčního jedno-šnekového extrudéru pro chemicky nadouvané vysoce hustotní pěny[2]</i>	40
<i>Obr. 19 Kuželový dvou-šnek konfigurovaný pro tepelně citlivé</i>	41
<i>Obr. 20 Schéma procesu v extrudéru pro nízko hustotní pěny [6]</i>	42
<i>Obr. 21 Schéma tandemového extruzního systému[2]</i>	43
<i>Obr. 22 Chladicí charakteristiky; vstupní práce a odvod tepla[7]</i>	44
<i>Obr. 23Schematicky zobrazená funkce mandrelu[2]</i>	45
<i>Obr. 24 Schéma akumulčního zařízení [5]</i>	45

- Obr. 25 Tomografické snímky pořízené v laboratořích UTB ukazují rozdíl mezi zkolabovanou pěnou vlevo a nezkolabovanou pěnou vpravo **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 26. Molekulární struktura LDPE.[10] **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 27 Uspořádání výrobní linky na LDPE pěnové desky. 1 - akumulční zařízení (plastikační jednotka a akumulátor); 2 - odtahová a kalibrační část; 3 - dokalibrace a předchlazení; 4 - vyskládání k ochlazení LDPE pěnových desek; 5 - ořezání okrajů (podélný a příčný ořez); 6 - paleta s hotovými výrobky..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 28 Schéma narušení struktury pěny perforací..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 29 Popis počítání počtu buněk ve struktuře pěny. Buňky, protnuté rýskou byly započteny. **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 30 Tvar zkušební tělesa pro měření odporu proti stlačení o rozměrech 100 x 100 mm **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 31 Univerzální trhací stroj TIRA 2710 s přípravkem pro zkoušku odporu proti stlačení v laboratoři firmy SPUR a.s. **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 32 Přípravek na pro provedení trvalé deformace .. **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 33 Tvar zkušební tělesa pro měření trvalé deformace o rozměrech 25 x 25 mm **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 34 Zkušební těleso pro stanovení rozměrové stálosti v sušárně o rozměrech 200 x 200 mm. Červeně jsou vyznačeny body pro měření tloušťky. **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 35 Časová závislost na relativní rozměrové stabilitě u neperforovaných a perforovaných vzorků - zkouška vlivu perforace, změna rozměrů po výrobě a v daném čase..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 36 Fotografie řezu zkolabovaným vzorkem bez perforace po 60 dnech od výroby **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 37 Časová závislost na změně tloušťky neperforovaných zkušebních vzorků před a po kondicionání **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 38 Časová závislost na relativní rozměrové stálosti u perforovaných vzorků, rozdíl změny rozměrů před a po kondicionání **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 39 Vliv perforace perforovaných vzorků - časová závislost na vlivu relativní trvalé deformace, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace v čase..... **Chyba! Záložka není definována.**

- Obr. 40 Časová závislost na odporu proti stlačení u perforovaných vzorků, první a čtvrté stlačení po 25, 50, 70 %..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 41 Vliv rozteče vpichů - časová závislost na relativní rozměrovou stálost, vliv kondicionování na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 42 Vliv rozteče vpichů - časová závislost na relativní trvalé deformaci, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace v čase **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 43 Vliv rozteče vpichů perforace - vliv množství perforovaných buněk na relativní trvalou deformaci v 9. a 60. den od výroby **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 44 Vliv rozteče vpichů perforace - časová závislost odporu proti stlačení **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 45 Vliv rozteče vpichů perforace - závislost množství perforovaných buněk na odpor proti stlačení v 9. a 60. den od výroby... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 46 Vliv jemnosti struktury - časová závislost na relativní rozměrovou stálost, vliv kondicionování na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 47 Vliv jemnosti struktury - časová závislost na relativní trvalé deformaci, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace v čase **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 48 Vliv jemnosti struktury - vliv množství perforovaných buněk na relativní trvalou deformaci v 9. a 60. den od výroby **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 49 Vliv jemnosti struktury - časová závislost odporu proti stlačení **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 50 Vliv jemnosti struktury - závislost množství perforovaných buněk na odpor proti stlačení v 9. a 60. den od výroby. **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 51 Vliv objemové hmotnosti - časová závislost na relativní rozměrovou stálost, vliv kondicionování na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 52 Vliv objemové hmotnosti - časová závislost na relativní trvalé deformaci, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace v čase..... **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 53 Vliv objemové hmotnosti - časová závislost odporu proti stlačení **Chyba! Záložka není definována.**
- Obr. 54 Fotograficky pořízené snímky struktury zkušebních vzorků **Chyba! Záložka není definována.**

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Charakteristika fyzikálních nadouvadel[7]</i>	20
<i>Tab. 2 Vlastnosti fyzikálních nadouvadel[6]</i>	21
<i>Tab. 3 Komerčně používané chemické nadouvající činidla [6]</i>	23
<i>Tab. 4 Permeabilita a difuzní koeficient pro LDPE folii[9]</i>	33
<i>Tab. 5 Stručné porovnání mezi vstřikováním za asistence plynu a vstřikováním pěny do forem[8]</i>	36
<i>Tab. 6. Vlastnosti polymeru[11]</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 7. Vlastnosti fólie[11]</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 8. Vlastnosti použitého koncentrátu talku v LDPE[13]</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 9. Vlastnosti použitého izobutanu[14]</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 10. Vysoce čištěný glycerol monostearát (GMS)[15]</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 11 Technologický předpis, pro výrobu vzorků, dle objemové hmotnosti a jemnosti struktury</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 12 Vliv perforace – po-výrobní relativní rozměrová stálost, rozdíl změny rozměrů od výroby a při stanoveném čase</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 13 Vliv perforace na rozměrovou stálost u neperforovaných vzorků</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 14 Vliv perforace perforovaných vzorků - vliv kondicionání na rozměrovou</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 15 Vliv perforace perforovaných vzorků - vliv trvalé deformace, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 16 Vliv perforace perforovaných vzorků - odpor proti stlačení</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 17 Vliv rozteče vpichů na rozměrovou stálost - vliv kondicionání na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 18 Vliv rozteče vpichů perforace - vliv trvalé deformace, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 19 Procentuální množství perforovaných buněk v pěnové struktuře zkušebních vzorků, pro vliv rozteče vpichů perforace</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 20 Vliv rozteče vpichů perforace na odpor proti stlačení</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 21 Vliv jemnosti struktury na vliv kondicionání na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Tab. 22 Vliv jemnosti struktury - vliv trvalé deformace, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace</i>	Chyba! Záložka není definována.

- Tab. 23 Procentuální množství perforovaných buněk v pěnové struktuře zkušebních vzorků, pro vliv rozteče vpichů perforace***Chyba! Záložka není definována.**
- Tab. 24 Vliv jemnosti struktury na odpor proti stlačení .* **Chyba! Záložka není definována.**
- Tab. 25 Vliv objemové hmotnosti - vliv kondicionání na rozměrovou stálost, změna rozměrů před sušením a po sušení v čase ..* **Chyba! Záložka není definována.**
- Tab. 26 Vliv objemové hmotnosti - vliv trvalé deformace, změna rozměrů před deformací a po zotavení z deformace* **Chyba! Záložka není definována.**
- Tab. 27 Vliv objemové hmotnosti na odpor proti stlačení***Chyba! Záložka není definována.**

SEZNAM PŘÍLOH

CD ROM