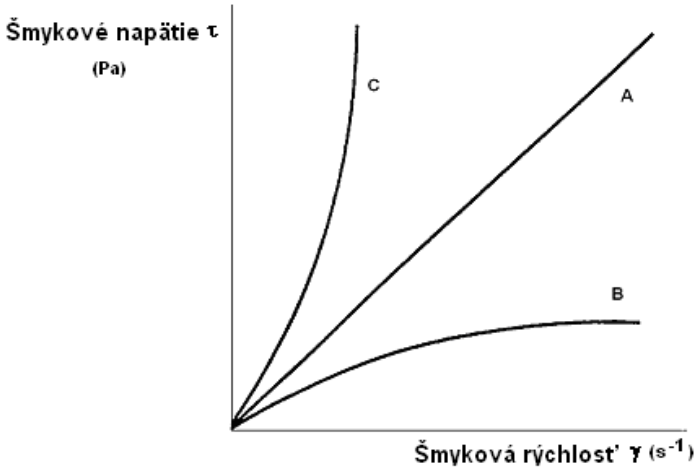
8.4 Spracovanie plastov

8.4.1 Úvod

Spracovanie plastov [28, 29, 40] je jedným z rozhodujúcich faktorov pri aplikácii plastov na spotrebné a konštrukčné výrobky, lebo významnou mierou ovplyvňuje výsledné vlastnosti výrobkov, ale najmä produktivitu výrobných zariadení a tým aj celkovú ekonomiku pri ich uplatnení v praxi. V súčasnosti existuje mnoho spracovateľských technológií, ku ktorým patria tzv., klasické, ako je **vytlačovanie, vstrekovanie, lisovanie a valcovanie**, ale aj novšie, ako **odlievanie, reakčné vstrekovanie zváranie ultrazvukom. a pod**. Spracovanie prevažnej väčšiny polymérov na polotovary (tyče, dosky fólie) a členitých výrobkov je umožnené ich tekutosťou pri určitej teplote a tlaku.

Pri lineárnych polyméroch (termoplastoch) sa potrebná tekutosť získava ohrevom nad teplotu tavenia T_m v prípade kryštalických polymérov a nad teplotu toku T_t pri amorfných polyméroch. Z technologického hľadiska dostatočne malá viskozita umožňujúca tvárnenie materiálu sa dosahuje u amorfných polymérov pri teplote T_g + 100°C a u kryštalických polymérov T_m + 70°C. Pri týchto spracovateľských teplotách a podmienkach sa taveniny polymérov chovajú ako tzv. štruktúrne viskózne kvapaliny. Veľký význam pri spracovaní má viskozita polymérnej taveniny, pričom ich vnútorné trenie vyjadrené šmykovým napätím τ sa neriadi Newtonovou hypotézou ideálnych kvapalín. Pre ideálne kvapaliny totiž platí, že šmykové napätie τ je priamo úmerné rýchlostnému gradiendu a súčiniteľ viskozity je konštantný. Z toho vyplýva, že sila potrebná k tvárneniu polymérnej taveniny nie je priamo úmerná rýchlosti vstrekovania, resp. šmykovej rýchlosti. Na obr. 8.7 je znázornená závislosť šmykového napätia od šmykovej rýchlosti pre Newtonovské, pseudoplastické (štruktúrne viskózne) a dilatantické chovanie kvapalín.



Obr. 8.7 Závislosť šmykového napätia od šmykovej rýchlosti pre newtonovskú A, pseudoplastickú B a dilatantickú C kvapalinu.

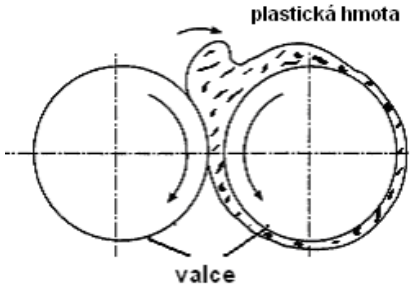
Súčiniteľ dynamickej viskozity tavenín polymérov klesá s rastúcou šmykovou rýchlosťou, t. zn., že sú pseudoplastické. Napr. rozvetvený polyetylén má pri šmykových rýchlostiach menších ako 10^{-2} s^{-1} a teplote 126°C viskozitu 10^5 Pas. Pri vyšších šmykových rýchlostiach sa polyetylén chová pseudoplasticky a jeho viskozita klesne až na hodnotu 10^4 Pas. Nakoľko zvyšovaním teploty viskozita tavenín polymérov klesá, je pri vyšších teplotách potrebná menšia sila pre ich premiestňovanie. Vzhľadom k obmedzenej teplotnej stálosti polymérov je však možné taveninu ohrievať len do teplôt, kde nehrozí nebezpečie tepelného rozkladu. Polyméry priestorovo sieťované (kaučuky, vytvrditeľné živice) sú spracovateľné len v prechodnom štádiu, kedy ešte neprebehli sieťovacie reakcie a kedy môžu získať ohrevom a tlakom potrebnú tekutosť. Po vytvorení trojrozmernej siete sú netaviteľné.

Rozhodujúcou podmienkou pre výber postupu spracovania je druh plastu. Reaktoplasty sa spracovávajú odlišne ako termoplasty. Reaktoplasty potrebujú horúcu formu, aby došlo k polykondenzácii. Hmota musí vo forme zostať počas určitej doby. Dotvrdenie môže prebehnúť aj mimo formy.

8.4.2 Predbežná úprava plastov

Miešanie

Väčšinu makromolekulových látok je nutné pred spracovaním na hotové výrobky **zmiešať s prísadami ako sú zmäkčovadlá, plnivá, farbivá, vytvrdzovacie prostriedky, urýchľovače a pod.** Tomuto účelu slúžia miešačky rôznej konštrukcie. V prípade, že k miešaniu plastickej hmoty s prísadami je potrebná zvýšená teplota a vyššia šmyková sila, ako je napr. pri spracovaní PVC, polyetylénu, fenolformaldehydových živíc, miešanie sa robí na miešacích dvojvalcoch. Princíp miešania na dvojvalci je znázornený na obr. 8.8.



Obr. 8.8 Princíp miešania plastov na dvojvalcoch

Plastická hmota spolu s prísadami je vnášaná do priestoru medzi valce, ktoré sú ohrievané. Pôsobením tepla je hmota postupne plastifikovaná, vťahovaná do štrbiny medzi valce, kde nastáva hnetenie a „opása“ predná valec. Postupným prerezávaním a prevracaním vzniknutého pásu dochádza k dokonalému premiešaniu, homogenizovaniu a spojeniu polyméru s prísadami, hlavne plnivami. Miešanie je podporované nerovnakou obvodovou rýchlosťou valcov. Modernejší a výkonnejší je spôsob miešania v hnetacích strojoch rôznej konštrukcie, pri ktorých možno dosiahnuť väčšiu presnosť miešania pri ľahšej manipulácii.

Tabletovanie

Pri lisovaní plastických hmôt hlavne termoplastov je neekonomické používať voľné lisovacie prášky. Účelnejšie je práškovitú hmotu na špeciálnych tabletovacích strojoch predlisovať do vhodných tabletiek, ktoré sa vkladajú do lisovacích foriem. Tabletovaním sa urýchľuje dávkovanie, znižujú sa straty pri lisovaní a celkove sa zlepšuje pracovné prostredie. Tablety umožňujú účinný predohrev a tým sa urýchľuje lisovací cyklus.

Granulácia

Niektoré plastické hmoty spracovávané vo vytlačovacích a vstrekovacích strojoch, najmä automatických sú prevedené z pôvodného práškovitého stavu do formy viac - menej

pravidelných častíc - granulí. Tieto sa sypú do zásobníkov strojov a umožňujú presné dávkovanie. Granulácia sa robí tak, že plastická látka získaná polymerizáciou sa za tepla väčšinou na závitkových vytlačovacích strojoch vytlačí na tenké pásy alebo tyčinky, ktoré po vychladnutí sa drvia alebo sekajú na granule.

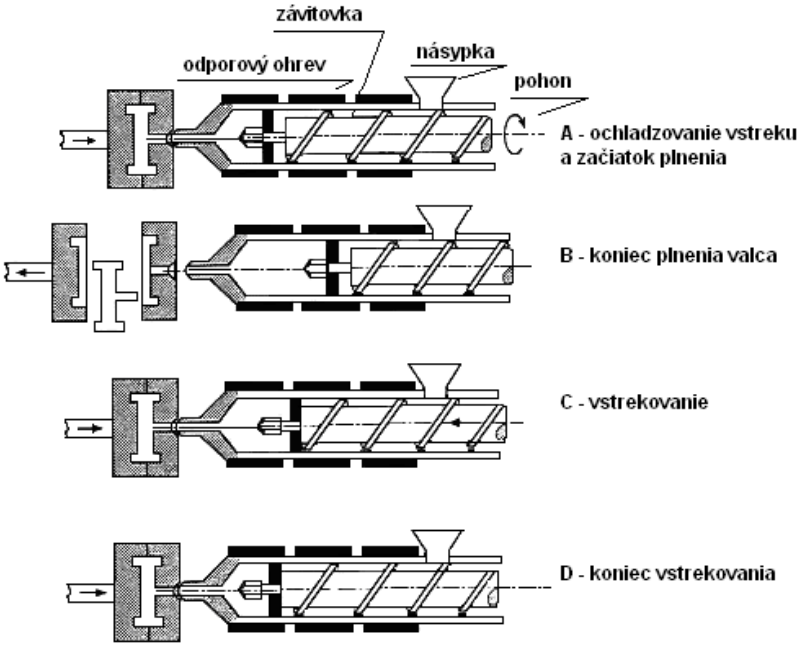
8.4.3 Spracovanie plastov

Vstrekovanie

Vstrekovanie je jednou z hlavných technológií pri spracovaní plastov. Vstrekovanie umožňuje ekonomicky produkovať kvalitné, dostatočne presné výrobky zo širokého výberu plastov. V súčasnosti sa vstrekovaním spracováva cca 20 % polymérov. Pracovný postup sa vyznačuje tým, že **plastická hmota je roztavená v tavnej komore a pôsobením piestu je vstrekovaná tryskou do dutiny ochladzovacej formy**. Hmota po ochladení pod teplotu zosklenenia je vybratá z formy. Pri vstrekovaní vytvrditeľných živíc prebieha vo forme, vyhriatej na vhodnú teplotu vytvrdzovanie (zosieťujúca reakcia), pri vstrekovaní kaučuku vulkanizácia.

Vstrekovanie je cyklický proces s priemernou dobou cyklu pri termoplastoch od 15 do 120 s. Doba cyklu závisí od vlastností polyméru a veľkosti výrobku. Hmotnosť vstreku sa pohybuje od niekoľko gramov do 25 kg. Vstrekovacie stroje sú rôznej konštrukcie. Staršie a dnes už málo používané stroje majú piestový systém a mechanické uzavieracie formy.

Určitou nevýhodou piestových vstrekovacích strojov je, že pre zlú tepelnú vodivosť plastických hmôt dochádza ku prehrievaniu a deštrukcii polymérov a okrem toho týmto spôsobom nie je možné taviť väčšie množstvo plastickej hmoty, potrebnej na vstrekovanie veľkých vstrekov. Preto v súčasnosti sa častejšie používajú vstrekovacie jednotky, v ktorých je plastická látka upevnená v tavnej komore vybavenej závitovkou. Funkcia závitovky je dvojaká. Predovšetkým mieša plastickú hmotu v priebehu tavenia, čím zabraňuje miestnemu prehriatiu a umožňuje väčšie výkony celej jednotky. Tavenina sa hromadí pred koncom závitovky a závitovka pred ňou ustupuje do zadnej polohy. V druhej fáze operácie závitovka pôsobí ako piest a vstrekuje taveninu do formy. Schéma závitového vstrekovacieho stroja (extrúdera) a jeho činnosť v jednotlivých etapách je na obr. 8.9. V etape A sa začína miešanie taveniny. V etape B je ukončené miešanie taveniny. V etape C je vlastné vstrekovanie taveniny a v etape D je ukončené vstrekovanie.

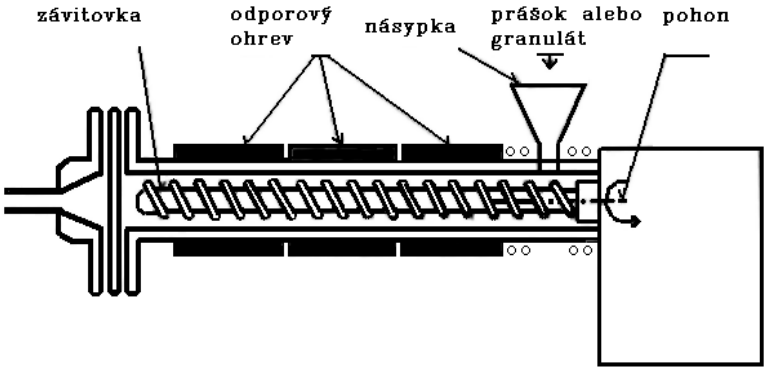


Obr. 8.9 Funkcia závitového vstrekovacieho stroja v jednotlivých etapách

Vysoké nároky sa kladú na vstrekovacie formy. Sú vyrábané z kvalitných nástrojových ocelí, lebo sú namáhané vysokým tlakom a na opotrebenie pri stálej zmene teploty. Moderné vstrekovacie stroje sú plne automatizované, takže výroba výrobkov najmä z termoplastov je veľmi efektívna.

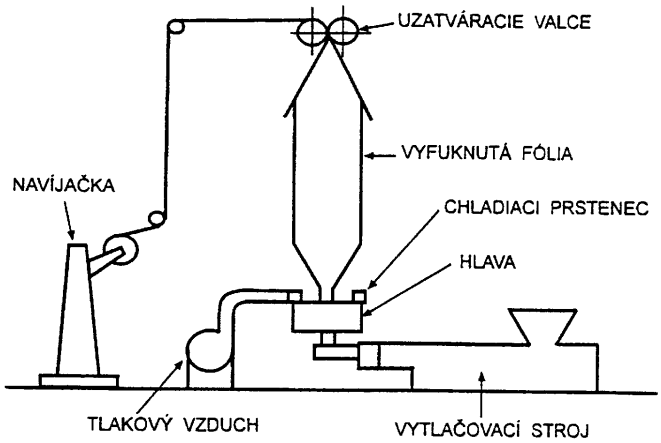
Vytláčanie

Vytláčanie sa od vstrekovania líši len tým, že je to **nepretržitý proces**, pri ktorom je tavenina vytlačovaná závitovkou do voľného priestoru. Vytlačovaním sa vyrábajú geometricky nenáročné výrobky ako dosky fólie, profily a pod. Vo vytlačovacom stroji sa granulovaný polymér dopravuje vyhrievaným valcom pomocou závitovky. Pri rýchlobežných vytláčacích strojoch sa trením zmäkčeného polyméru vytvára také množstvo tepla, že stačí na jeho prechod do stavu viskózneho toku. Elektrický ohrev je potrebný len na premenu granulátu do kaučukovo - plastického stavu. Väčšinou sú stavané stroje jednozávitové a dvojzávitové. Schéma jednozávitového vytláčacieho stroja je znázornená na obr. 8.10.



Obr. 8.10 Jednozávitový vytláčací stroj (extrúder)

Z vytláčacieho stroja prechádza kalibrovacou hlavou, vodným kúpeľom a ďalej na deliacu linku na navíjací bubon pri menších priemerov rúr. Na obr. 8.11 obrázku je znázornené vytláčacie zariadenie na výrobu fólií.



Obr. 8.11 Schéma zariadenia na výrobu fólií

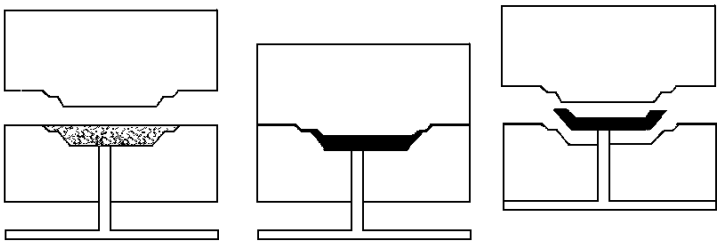
Pri tomto spôsobe výroby vytláčaná rúra závitovkovým vytláčacím strojom ešte v plastickom stave je nafúknutá vzduchom na mnohonásobný priemer. Vzniknutý rukáv z tenkej a obojstranne orientovanej fólie je rovnomerne odoberaný a navíjaný.

Lisovanie

Lisovanie je najstaršou technológiou, ktorou sa spracovávali len lisovacie hmoty na báze fenolformaldehydových a iných reaktoplastických živíc. V súčasnej dobe sa lisovaním spracovávajú aj lisovacie hmoty na báze epoxidových a nenasýtených polyesterových živíc. Vo zvláštnych prípadoch je možné lisovať aj termoplasty a to v prípade, keď majú zlú tekutosť, ako napr. vysokomolekulové polyetylény.

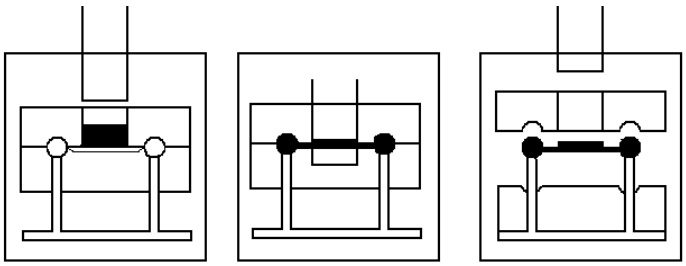
Výrobky sa lisujú v kovových, obvykle elektricky vyhrievaných formách, ktoré sú umiestnené na hydraulických lisoch. Lisovacie hmoty sa do formy vkladajú ako predhriate tablety. Potrebná tekutosť sa získava ohrevom za súčasného pôsobenia tlaku. K dosiahnutiu požadovanej hustoty priestorovej siete, od ktorej sú závislé mechanické a fyzikálne vlastnosti plastov, je potrebná určitá minimálna doba. Táto je obvykle závislá od reaktivity vytvrdzovaného systému a od hrúbky steny. Obvykle na 1 milimeter hrúbky je potrebný čas 30 až 60 s. Teplota pri lisovaní fenoplastov býva 150 až 180°C. Epoxidové a polyesterové živice vyžadujú nižšie lisovacie teploty a tlaky. Lisovaním sa vyrábajú tiež laminátу s plnivom vo forme tkanín, rohoží a drevených dýh.

Postup priameho lisovania plastov je na obr. 8.12.



Obr. 8.12 Postup priameho lisovania

Niektoré druhy plastov sa dajú tvarovať len prietlačným lisovaním (obr. 8.13). Takto sa dajú vyrábať aj výlisky s kovovými vývodmi (konektory).



Obr. 8.13 Postup prietlačného lisovania konektorov

Vysokotlakým priamym lisovaním sa vyrábajú najrozmanitejšie výrobky, hlavne pre elektrotechnický priemysle. Nízkotlakým lisovaním sa spracovávajú polyesterové a epoxidové živice v kombinácii so sklenenými vláknami na veľké, väčšinou tenkostenné výlisky. Do tejto skupiny lisovania patrí aj lisovanie pomocou vákua, kde lisovací tlak vyvodzuje tlak atmosféry. Nízkotlakým lisovaním sa lisujú člny, karosérie áut, nádrže, športové potreby a pod.

Zváranie

Z dvoch hlavných skupín plastov sú zvariteľné len termoplasty. Reaktoplasty sa nedajú zvárať, pretože ich nemožno znovu priviesť do plastického stavu.

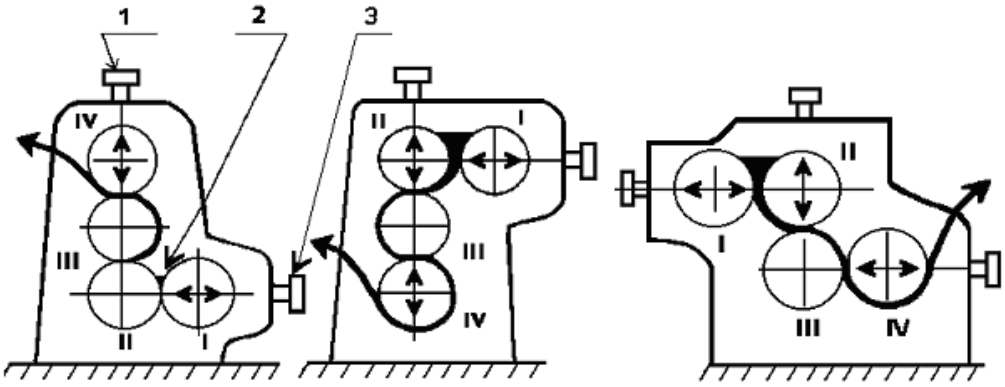
Zváranie je podľa STN 05 0010 nerozoberateľné spojenie plastov účinkom tepla a tlaku, bez alebo s použitím prídavného materiálu rovnakého alebo podobného zloženia. Podľa druhu zváraných hmôt sa ich povrch v mieste zvaru privedie do plastického (zriedkavo

do tekutého) stavu a primeraným tlakom sa spojí. Nastáva pritom trvalé spletenie makromolekulových hmôt spojovacích častí. Povrch zváraných dielcov sa splastizuje pri ich ohriatí na teplotu o 70 až 80°C vyššiu ako je teplota tavenia kryštálov (T_m) danej hmoty. Nevýhodou plastov je ich citlivosť na prehriatie, kedy nastáva ich degradácia.

Na zváranie konštrukčných plastov sa v prevažnej miere používa zváranie horúcim plynom s prídavným materiálom a zváranie horúcom zrkadlom. Ďalšie spôsoby zváranie sú napr.: zváranie polyfúziou, trecie zváranie, zváranie ohranovaním, vytláčacie zváranie, ultrazvukové zváranie atď. Nie všetky spôsoby zváranie sú vhodné na ľubovoľné druhy plastov. Napr. na rúry a dosky z PVC a PMMA je vhodné zváranie horúcim plynom a z PE a PP je vhodnejšie zváranie horúcim zrkadlom, polyfúziou a trením. Polyamidy sa výhodne zvárajú trením a PS ultrazvukom.

Ďalšie spôsoby spracovania

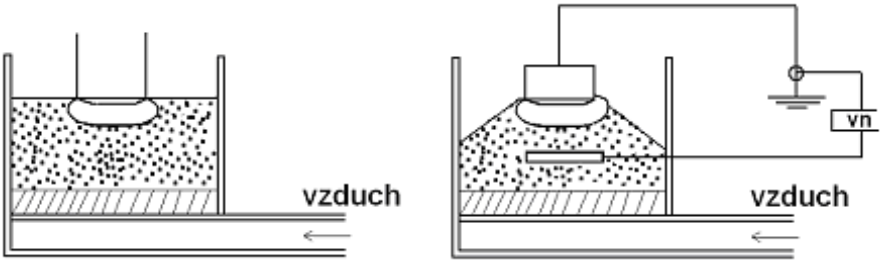
- *Tvarovanie*: dosky a rúry z lineárnych polymérov sa tvarujú podobne ako plechy a kovové rúry. Pracuje sa pri zvýšených teplotách. Pri lineárnych amorfných polyméroch medzi T_g (teplota skleného prechodu) a T_t (teplota tavenia) a pri kryštalických v okolí T_m (teplota tavenia kryštálov). Po vytvarovaní sa polotvar rýchle ochladí dostatočne hlboko pod teplotu T_g resp. T_m. Nakoľko deformácie vzniknuté pri tvarovaní sú vo veľkej miere pružnej povahy, dochádza pri opätovnom ohriatí výrobku nad T_g k uvoľneniu pružných deformácií a tým ku zmene tvaru. Najčastejšie sa používa vákuové tvarovanie a tvarovanie pomocou tlakového vzduchu.
- *Valcovanie*: Valcovanie sa používa na výrobu fólií o hrúbke 0,1 až 0,6 mm. Týmto spôsobom sa spracováva hlavne mäkčený PVC. Pri valcovaní možno fólie priamo nanášať na textilný a papierový pás.
- *Kalandrovanie* – alebo valcovanie plastikových termoplastov a kaučukov na tenké dosky a fólie. Valcovacie stroje alebo kalandre majú zvyčajne dva až päť otáčavých temperovaných valcov s rovnakým priemerom a s rôznou obvodovou rýchlosťou. Na výrobu tenkých dosiek a fólií z PVC, PE, PP sa najviac používajú štvorvalcové stroje (obr. 8.14). Plast sa pretlačuje veľkým tlakom, ktorý pôsobí veľmi krátko, len počas priechodu medzi valcami, ale opakuje sa pri prechode medzi valcami a strieda sa s beztlakovou fázou kalandrovania, kedy je plast valcom unášaný k ďalšej medzere.



Obr. 8.14. Schéma 3 druhov štvorvalcových kalandrov (1 - mechanizmus nastavovania geometrie medzi valcami, 2 – plast, 3 –mechanizmus nastavovania medzery medzi valcami)

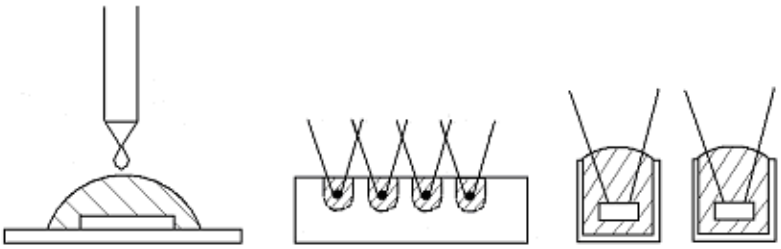
- *Nanášanie*: Nanášanie je výrobný postup, pri ktorom je plastická hmota nanášaná v dostatočne hrubej vrstve na podkladový materiál (papier, textil kov a pod.) Nanášaním mäkčeného PVC na textilný podklad sa pripravuje umelá koža - koženka. Kovové predmety možno nanesením plastu žiarovým striekaním alebo vírovým nanášaním chrániť proti korózii. Týmto spôsobom sa pripravujú nádrže, potrubia, kotle a pod. Na nanášanie sa používa polyetylén, polyamidy, epoxidové živice, teflón a pod.

- *Vírivé spekanie* (technológia puzdrenia elektronických súčiastok) (obr. 8.15)



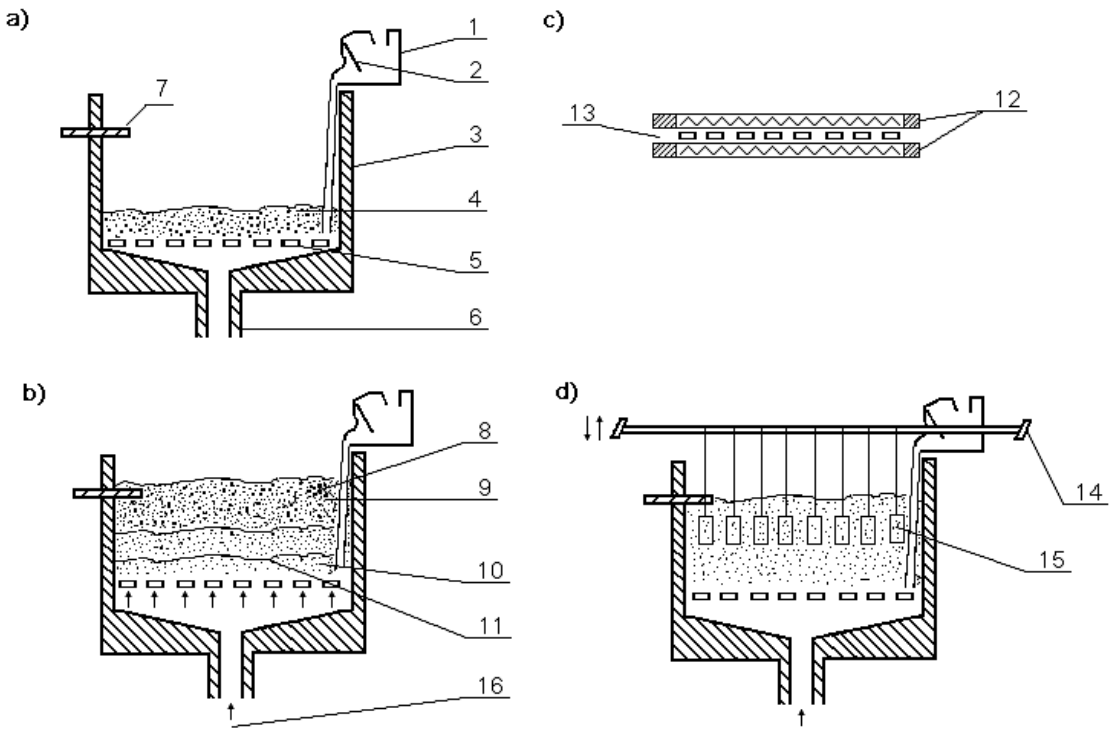
Obr. 8.15 Vírivé spekanie súčiastok s jednostrannými vývodmi

- *Zakvapávanie*, zalievanie do odnímateľnej formy a zalievanie do trvalej formy (obr. 8.16).

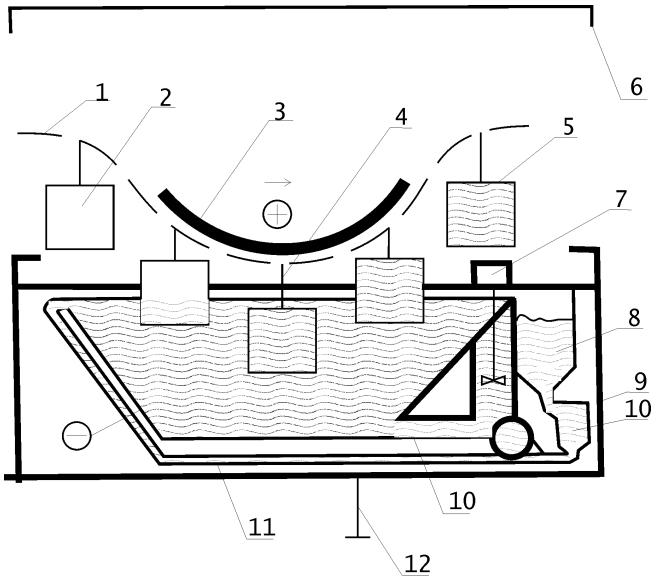


Obr. 8.16 Zakvapávanie, zalievanie do odnímateľnej formy a zalievanie do trvalej formy

- *Vytváranie výrobkov z jemných plastových prachov (fluidizácia):* Výrobky sa vytvárajú nanášaním plastových častíc, ktorých veľkosť je medzi 70 až 80 μm, na horúce substráty vo fluidizačných zariadeniach. Po vytvrdení naneseného prachu vznikajú na plochách a hranách substrátov súvislé ochranné vrstvy s ochrannou izoláciou, prípadne s puzdriacou (ochrannou) funkciou. Vrstva prachu sa vznesie prúdom stlačeného plynu, ktorý do nádoby prichádza z perforovaného dna. Častice víria a dostávajú sa do styku s rozohriatým substrátom, kde sa zachycujú a keď je teplota dostatočne vysoká, tavia sa a zlievajú (obr. 8.17). Hrúbka vrstvy závisí od druhu plastu, jeho akosti, tlaku plynu, teplote a stavu povrchu substrátu. Opakovaním celého procesu (nanášanie a zlievanie častíc prachu) možno zväčšiť hrúbku nanesenej vrstvy. Fluidizačným nanášaním epoxidových prachov v automatických zariadeniach sa puzdria drobné elektronické a elektrotechnické súčiastky, napr. keramické kondenzátory, odpory, jednoduché integrované obvody, cievky, a pod.
- *Elektroforetické nanášanie disperzií* predstavuje máčanie substrátu v elektroforetickej vani (obr. 8.18). Používa sa na nanášanie vodných alebo vodou riediteľných disperzií na elektricky vodivé substráty, na ktorých plochách, hranách a v dutinách sa vytvárajú rovnomerne hrubé povlaky, ktorých hrúbka sa riadi intenzitou elektrického poľa.



Obr. 8.17 Schéma nanášania jemných plastových prachov vo fluidizačnom zariadení
(a) pred zavedením plynu: 1 – vibračný zásobník prachu, 2 – klapka, 3 – fluidizačná nádoba, 4 – vrstva prachu v kľude, 5 – pórovité dno nádoby, 6 – prívod plynu, 7 – indikátor hladiny,
b) po zavedení plynu: 8 – horná hladina vznosu, 9 – víriaci prach s vysokou hustotou, 10 – víriaci prach s najmenšou hustotou, 11 – spodná hladina vznosu,
c) zahrievanie substrátu, 12 – topné tyče infračerveného žiarenia, 13 – v medzere medzi tyčami sa zohrievajú substráty bezprostredne pred vnesením do fluidizačnej nádoby,
a) nanášanie prachu, 14 – držiak substrátu, 15 – substráty ponorené v hustej vrstve prachu vo vznose, 16 – smer prúdenia plynu



Obr. 8.18 Schéma zariadenia pre nanášanie disperzií elektroforézou
1 – transportér s elektricky vodivými závesmi, 2 – substrát, 3 – vstup do elektrického poľa, 4 – substrát s nanesenou vrstvou disperzie, 5 – postup substrátu k sušiarni, 6 – lapač pár, 7 – miešadlo disperzie, 8 – zásobník disperzie, 9 – ochranná klietka, 10 – filtre, čerpadlo, 11 – potrubie, 12 – uzemnenie ochrannej klietky, 13 – vaňa (katóda)

Pri výrobe plastov sa spotrebováva energia. Približná spotreba elektrickej energie rôznych spôsobov výroby plastových výrobkov je v tab. 8.9.

Tabuľka 8.9 Približná energetická náročnosť výroby plastových výrobkov

Spôsob výroby	**kWh/ tona plastu**	**Poznámka**
Polymerizácia na substrátoch	150 – 2 000	Tenké vrstvy alebo fólie, lepšie izolačné a termické vlastnosti.
Liatie	100 – 1 000	Menej presné, väčšie výrobky, malé série, pomalá výroba, žiadne straty plastov.
Vstrekovanie	1 200 – 25 000	Veľmi presné výrobky, rýchla výroba, veľmi nákladné zariadenia, značné straty plastov.
Pretlačovanie	1 000 – 2 500	Veľmi presné výrobky, rýchla výroba, veľmi nákladné zariadenia, značné straty plastov.
Vytlačovanie	550 – 1200	Len jednoduché tvary, rýchla výroba malé straty, veľké výrobné výkony, zložité výrobné zariadenia.
Kalandrovanie	200 – 2 500	Len jednoduché tvary, fólie, dosky, rýchla výroba, takmer žiadne straty plastov.
Lisovanie	600 – 1200	Zložité tvary, pomalá výroba, jednoduché výrobné zariadenia, malé alebo žiadne straty plastov.
Striekanie, razenie, vysekávanie, ťahanie	100 – 1 000	Tvarom jednoduché výrobky, jednoduché výrobné zariadenia, veľmi malé straty plastov.
Obrábanie	200 – 1 800	Veľmi presné výrobky, pomalá výroba, veľmi nákladné zariadenia, značné straty plastov, len pre malé série.