

## Injekcijsko prešanje za praktičare\* Utjecaj podesivih preradbenih parametara na svojstva otpreska

John GOFF, G&A Moulding Technology

Privedila: Đurđica ŠPANIČEK

### Injection moulding for practitioners

#### Impact of adjustable processing parameters on moulded part properties

*During the publishing of the Journal Polimeri the Editorial board has tended to publish practical experiences in different areas related to polymeric materials. Unfortunately, in the last period this has rarely been the case mostly because of the deficiency of experts willing to share their experiences. Most of the scientists are focused on their own original research or are included in European research as co-workers. Therefore, the Editorial board has requested the English author John Goff to permit translation of some of the texts from his column Moulding Masterclass from the Journal Injection World Magazine. In these articles the author reveals, shares his considerable experience providing educational, practical, and somewhat thought-provoking articles on key aspects of injection moulding optimisation and troubleshooting.*

*John Goff is well known to everybody involved in injection moulding. He has more than 35 years of injection moulding experience, including: mould design and manufacture; materials selection and processing; machine specification and operation; process control and mould assessment and optimisation.*

*He is co-author of numerous books and publications on injection moulding and well-known for his seminars and courses. He was a senior lecturer at the University of London and a manager for process engineering at the Demag Company.*

*He is now one of the managing directors of G&A Moulding Technology which acts as a consultancy for companies in Europe, America and Asia. He conducts training, troubleshooting, process optimisation, mould trials, computer analyses and project management.*

*In the next several issues in this column we will be publishing those texts written by Goff that might be helpful to our experts in solving some practical problems.*

*We wish to express our gratitude to Mr. John Goff and the Editorial board of the Journal Injection World Magazine for their consent to reprint the translations of some articles that will follow.*

### Predgovor Uredništva

*Tijekom izdavanja časopisa Polimeri nastojali smo objavljivati iskustva praktičara s raznih područja povezanih s plastikom i gumom. Nažalost, posljednjih godina to je bilo rijetko. Razloga je više. Sve je manje stručnjaka u praksi koji su spremni prenositi svoja dragocjena iskustva. Pripadnici znanstvene zajednice sve su usmjereniji istraživanjima koja rezultiraju izvornim znanstvenim radovima ili se uključuju kao suradnici u europske projekte. Stoga je Uredništvo zamolilo engleskog autora Johna Goffa da dopusti prijevod tekstova iz svoje rubrike Moulding Masterclass u časopisu Injection World Magazine. U tim tekstovima autor iznosi svoje bogato iskustvo u vidu edukativnih, praktičnih i pomalo provokativnih članaka o ključnim aspektima optimiranja i rješavanja problema vezanih uz injekcijsko prešanje.*

\* Izvorno objavljeno na engleskom u časopisu *Injection World*. / First published in English in *Injection World* magazine.

*J. Goff poznat je svima koji se bave injekcijskim prešanjem već niz godina. Ima više od 35 godina iskustva na području injekcijskog prešanja, uključujući izradu kalupa, izbor materijala i uvjeta prerade, odabir potrebne opreme, kontrolu procesa i automatizaciju te ocjenu i optimiranje toga najproširenijeg cikličkog postupka prerade plastike i kaučukovih smjesa.*

*Suaautor je mnogobrojnih knjiga i publikacija o injekcijskom prešanju i poznat je po svojim seminarima i tečajevima. Bio je viši predavač na Sveučilištu u Londonu i menadžer za procesno inženjerstvo u tvrtki Demag.*

*Trenutačno je jedan od direktora u G&A Moulding Technology, konzultantskoj tvrtki za područje Europe, Amerike i Azije. Bavi se obrazovanjem prerađivača, vodi ekipe za rješavanje konkretnih problema, optimiranje procesa, računalnu analizu i vodi projekte s tog područja.*

*U nekoliko sljedećih brojeva u rubrici Iz prakse prenijet ćemo one Goffove tekstove za koje smatramo kako bi i našim prerađivačima mogli pomoći u rješavanju nekih praktičnih problema. Uredništvo Polimera zahvaljuje J. Goffu i Uredništvu časopisa Injection World Magazine na suglasnosti za objavu tekstova koji slijede.*

### Utjecaj podesivih preradbenih parametara na svojstva otpreska

Serijski članak započinje uvodnim tekstom o boljem razumijevanju nezavisno podesivih varijabli za vođenje procesa (e. *controllable variables*). To su varijable koje prerađivači odabiru radi uspješne proizvodnje uporabljivog proizvoda. Poimence riječ je o parametrima prerade: naknadni pritisak, vrijeme djelovanja naknadnog pritiska, vrijeme ciklusa koje uključuje vrijeme hlađenja otpreska i dopunsko vrijeme hlađenja, sila zatvaranja, frekvencija vrtnje pužnog vijka, položaj pri otvaranju kalupa, put pužnog vijka pri ubrizgavanju i slično. Sve te vrijednosti ulaze u kontrolni sustav opreme za injekcijsko prešanje i često se pretpostavlja kako će se one same podesiti.

Nadalje, navedene veličine mogu se podijeliti na one s kratkotrajnim i dugotrajnim djelovanjem. *Brzo rješenje* za dobivanje potrebnih svojstava taljevine može uključiti volumni kapacitet ubrizgavanja, naknadni pritisak i vrijeme naknadnog pritiska. Kao rezultat tih *skraćениh uvjeta* raste volumen otpreska i dobiva se otpresak malo većih izmjera.

*Dugotrajno rješenje* može uključiti sniženje temperature stijenke kalupne šupljine i taljevine. To dovodi do manjeg skupljanja otpreska, rezultirajući većim dimenzijama otpreska i njegovom boljom dimenzijskom postojanošću tijekom duljeg razdoblja. Poticaj za promjene obično ovisi o odluci prerađivača. Koja je od navedene dvije opcije pravilna?

U konačnici bi se istraživanje trebalo fokusirati na to što se mijenja u samom procesu. Što pridonosi promjeni svojstava otpreska: temperatura, masa, oblik...? Vrlo se često to zanemaruje i ne istražuje se potpuno tijekom inicijalnog ispitivanja kalupa, posebice ako se postupak vodi na *oštrici noža* u velikoj žurbi.

### Četiri koraka do savršenoga injekcijskog prešanja<sup>1,2</sup>

Kako bi se pokazalo da učinkovit odabir prethodno navedenih nezavisno podesivih varijabli stvara integralni dio uvjeta procesa, važno je uzeti u obzir temeljne elemente procesa injekcijskog prešanja.

Injekcijsko prešanje može se u osnovi podijeliti na sustavne elemente, od kojih svaki ukupno i zasebno igra važnu ulogu. Bez sumnje, svaki element zahtijeva osobitu pozornost kako bi se postigao traženi rezultat. Nedostatak takvih detalja rezultira suboptimalnim procesom.

1. Pretvorba prerađivanog materijala od njegova čvrstog stanja, uobičajeno granulata ili praha, u kapljevinu jednolične temperature i viskoznosti. Ako taljevina ne sadržava čvrste ili polučvrste dijelove, tada je homogena.
2. Pretvaranje taljevine u željeni oblik otpreska u kalupnoj šupljini s potrebnim svojstvima u pogledu čvrstoće, vizualnih zahtjeva, minimalnim zamrznutim slojevima i ispravnim volumenom (dobra popunjenost).
3. Stlačivanje taljevine unutar kalupne šupljine tako da se postigne željeni oblik proizvoda koji ispunjava određene fizičke, dimenzijske i vizualne zahtjeve.
4. Učinkovito očvršćivanje rastaljene jezgre otpreska.

Način na koji je raspođijeljena toplinska energija ili uklonjena iz rastaljene jezgre putem vanjskoga očvrstnutog sloja (kožurice) na stijenke metalnoga kalupa bitno utječe na rezultate ciklusa injekcijskog prešanja. Ispravan način odvođenja topline ima za posljedicu ispravno vrijeme ciklusa, postizanje potrebnih dimenzija, oblika i stabilnosti otpreska zajedno s ispravnim vizualnim i fizičkim svojstvima. Nasuprot tomu, problematično i nekvalitetno kalupljenje sasvim je druga priča.

Kontrola temperature stijenke svake kalupne šupljine unutar definiranih granica tvori temelje za učinkovito očvršćivanje i ekonomičnu proizvodnju. Očvršćivanje koje je prebrzo ili presporo dovodi do loše kvalitete proizvoda i pitanja cijene dijelova.

Pogodnim sažimanjem spomenutih četiriju elemenata i njihovim pravilnim redoslijedom moguće je uklanjanje otpresaka iz otvorenoga kalupa uslijed gravitacije ili djelovanjem robota.

Svaki procesni element važan je pri proizvodnji injekcijski prešanih otpresaka. Ako samo jedna od nezavisno podesivih procesnih varijabli nije ispravno podešena, neće se postići optimalan proces ni potrebna uporabna svojstva proizvoda.

Nadalje, odabir nezavisno podesivih parametara procesa može se identificirati s obzirom na temperaturu, vrijeme, pritisak, brzinu i volumen te udaljenost. To bi trebalo biti sinkronizirano kako bi se postigao sinergijski učinak.

Proces injekcijskog prešanja primarno je povezan s procesnim temperaturama. Toplinska energija potrebna za postizanje homogene taljevine ostvaruje se nezavisno podesivim parametrom, temperaturnim profilom postavljenim na cilindru za taljenje. Naime, temperatura taljevine zavisna je procesna varijabla koja ovisi o temperaturnom profilu cilindra za taljenje i vrtnje pužnog vijka te djelujućeg pritiska na taljevinu. Homogenost ovisi i o ulaznoj temperaturi materijala u proces, onoj koja vlada u lijevku za punjenje. Nakon postizanja željenog otpreska ta se energija mora odvesti. Njezina količina ovisi o temperaturi ubrizgane taljevine i temperaturi stijenke kalupne šupljine (to su zavisne procesne varijable). Temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi npr. o temperaturi medija za temperiranje.

### Postići savršeno plastificiranje<sup>3</sup>

Osnova za uspješan proces injekcijskog prešanja kako bi se postigla potrebna točnost i preciznost otpreska je optimalan prijelaz iz čvrstoga u rastaljeno stanje. Odabir pogrešnih parametara za te kritične elemente procesa često je jedini razlog za nekonzistentan i neučinkovit proces.

Za proces uobičajeno nazvan plastificiranje potreban je učinkovit prijelaz dvaju toplinskih izvora: tarne topline (toplina pretvaranja mehaničkog rada trenja u toplinu) i topline dovedene provođenjem sa stijenki cilindra za taljenje na prerađivani materijal. Prerađivači obično kompenziraju nedostatnu taru toplinu (nastalu vrtnjom pužnog vijka) energijom do-

vedenom provođenjem, i to često s prihvatljivim uspjehom, posebice kod amorfnih plastomera kao što su polistiren (PS), akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polistiren visoke udarne žilavosti (PS-HI), polikarbonat (PC), polikarbonat/akrilonitril/butadien/stiren kopolimer (PC/ABS) i polisulfon (PSU).

Problem međutim može nastati posebno tijekom prerade kristalastih plastomera kao što su polipropilen (PP) i poliamid 66 (PA 66).

Tijekom plastificiranja glavni problem mogu postati neplastificirane granule. Često se kratkotrajno pojavljuje, naizgled bez razloga, parcijalni ili potpuni gubitak mekoće taljevine. To rezultira otpreskom s nedovoljnom gustoćom slaganja makromolekula i loše vizualne kvalitete.

Vrlo često nedostatak energije trenja potječe od nemogućnosti motora ubrizgavalice da ostvari potrebnu frekvenciju vrtnje pužnog vijka ( $\text{min}^{-1}$ ). U tom su slučaju moguće različite opcije:

– povišenje temperature cilindra za taljenje (to se događa vrlo često i uspjeh ovisi o tome je li materijal amorfan ili kristalast, o kapacitetu ubrizgavalice i potrebnom vremenu ciklusa)

– povišenje uspornog pritiska pužnog vijka kako bi se postigla potrebna tečljivost taljevine (Omjer ulaska energije je 70 : 30 u korist tarne energije, u usporedbi s energijom provođenja. Ipak, potrebno je razjasniti kako nedostatak bilo kojeg od izvora topline ne može biti kompenziran onim drugim. Nadalje, previše tarne energije skraćuje vrijeme boravka materijala sprječavajući disipaciju energije provođenja unutar taljevine tijekom njezina prolaska uzduž pužnog vijka, rezultirajući različitim stanjima plastificiranosti pri dolasku na njegov vrh. Situacija se dodatno pogoršava kada se koristi veći postotak kapaciteta tarne energije pužnog vijka, zajedno s njegovom povišenom vrtnjom kako bi se skratilo vrijeme vraćanja pužnog vijka u osnovni položaj unutar odabranog vremena hlađenja.)

Usporedbom djelovanja više frekvencije vrtnje pužnog vijka i nižega uspornog pritiska s taljevinom dobivenom optimiranim djelovanjem uspornog pritiska i frekvencije vrtnje pužnog vijka i s boljom kontrolom vremena oporavka taljevine, provedenim uz jednak kapacitet vijka od 65 do 70 % poli(oksimetilena), ustanovljena je daleko veća ujednačenost taljevine uz ove druge uvjete.

Ubrizgavalice se obično kupuju s pužnim vijkom opće namjene. Međutim, geometrija vijka, sposobnost miješanja i usporni prsten (e. *non-return valve*) imaju kritični utjecaj na homogenost taljevine.

Vrlo se često zanemaruje važnost homogenosti taljevine pri rješavanju problema s djelomično kvalitetnim proizvodima ili dimenzijske ujednačenosti. Doduše, hlađenje hladnijih i toplijih područja nehomogene taljevine tijekom procesa očvršćivanja taljevine utječe na stvaranje molekularne strukture. To dovodi do neželjenih zaostalosti naprezanja, posebice kod kristalastih polimera. Takva naprezanja izazivaju promjenu dimenzija i dovode do zakrivljenja i sniženja fizičkih svojstava otpreska.

Proces nekonzistentnosti može se uočiti kada se promatraju informacije na ekranu jedinice za vođenje procesa ubrizgavalice i pokazuje znatno variranje od punjenja do punjenja za posebno važne varijable. Kao što je već navedeno, upravo te važne varijable pokazuju koliko su dobro odabrane samostalno podesive varijable i kolika je učinkovitost njihove interakcije.

Varijable koje utječu na postizanje homogenosti taljevine su:

– *postavljanje temperature cilindra za taljenje*: dobavljači plastomernog materijala nude preporučeni raspon temperatura taljenja s optimumom ili preciznijom vrijednosti koja omogućuje postizanje bolje kontrole procesa. Prema iskustvu autora ovog teksta, iznenađuje koliko se često te informacije ne koriste i u njegovoj su tvrtki ustanovili da će skupina novih osoba na obuci inicijalno odabrati širok raspon vrijednosti temperature cilindra za taljenje. Daljnja komplikacija je ta da neke ubrizga-

valice nude različite temperaturne zone uzduž pužnog vijka i cilindra za taljenje. Time se ponovno vraća na činjenicu da je glavna svrha svakoga pužnog vijka i cilindra za taljenje dobava dovoljne topline kao pomoć glavnom elementu, pužnom vijku, da se trenjem postigne plastificiranje taljevine. Kao što je utvrđeno, kapacitet punjenja stroja i vremenski ciklus utječu na odabir stvarne temperature. Kada je dovedeno previše adijabatne toplinske energije, stvarno izmjerena temperatura taljevine prekoračuje namještenu temperaturu zbog ekscesa (termodinamika!). Zbog toga se najviša namještena temperatura uzduž vijka i cilindra treba podudarati, poklapati s onom tlačne sekcije pužnog vijka i obično se poklapa s prvim dijelom zone taljenja.

– *frekvencija vrtnje pužnog vijka*: vrijednosti frekvencije vrtnje pužnog vijka uvijek su važne u pripremi homogene taljevine, a frekvencija koja se izražava u  $\text{min}^{-1}$  prihvatljiva je ako su iznosi frekvencije u izravnoj korelaciji s prerađivanim materijalom, promjerom i tipom pužnog vijka te ciklusom injekcijskog prešanja. Katkad je odabrana frekvencija vrtnje previsoka ili preniska i temeljena je na zahtjevima ciklusa. Dobavljači materijala još su oprezni s preporukama vrijednosti frekvencije vrtnje pužnog vijka usprkos njegovom znatnom doprinosu u pretvorbi granulata u taljevinu. Već se neko vrijeme umjesto frekvencije vrtnje navodi brzina pužnog vijka u  $\text{mm/s}$ . Nažalost, mnogi proizvođači kalupa još ne shvaćaju razliku između brzine i frekvencije vrtnje pužnog vijka. Naime, ako se uzima u obzir brzina gibanja pužnog vijka, uzima se u obzir i i promjer vijka.

#### Izbor obodne brzine pužnog vijka i kapaciteta prerade <sup>4</sup>

Obodna brzina pužnog vijka uzima u obzir njegov promjer, količinu prerađivanog materijala i geometriju/oblik pužnog vijka.

Većina pužnih vijaka koji se rabe pri injekcijskom prešanju temeljeni su na tzv. osnovnom tipu opće namjene (e. *general purpose*, GP). Međutim, iako svi proizvođači ubrizgavalica proizvode GP vijak, nisu svi dostupni strojevi identični.

U osnovi, konstrukcija ubrizgavalica s GP vijkom obično se temelji na njegovoj radnoj ili učinkovitoj duljini 20 : 1, što znači da frekvencija vrtnje pužnog vijka uzduž radne dužine iznosi 20 puta vrijednost njegova promjera. To se također temelji na koraku između dva navoja koji su jednaki promjeru pužnog vijka.

Stoga se korelacija obodne brzine pužnog vijka temeljena na frekvenciji njegove vrtnje može jednostavno izraziti:

$$v = D \pi n_p$$

gdje je  $v$  – obodna brzina pužnog vijka

$D$  – promjer pužnog vijka

$n_p$  – frekvencija vrtnje pužnog vijka.

Izbor vrijednosti frekvencije vrtnje pužnog vijka važan je za oba procesa, postizanje konzistentnosti taljevine i trajanje ciklusa. Vrlo često postoji kompromisno uravnoteženje između ta dva procesa. Većina procesa injekcijskog prešanja provodi se sekvencijalno, što znači da svaki segment ciklusa treba biti završen prije početka sljedećega. Taj se princip primjenjuje u velikoj mjeri kada pužni vijak treba postići svoj krajnji zaustavni položaj, bez obzira na vrijeme hlađenja otpreska, prije otvaranja kalupa kako bi se on izvadilo iz kalupne šupljine.

Za brze cikluse prerade rabe se ubrizgavalice s paralelnim operacijama za istodobno preuzimanje dvaju ili više elemenata što znači da pužni vijak ne treba postići krajnji položaj prije otvaranja kalupa.

U nastojanjima da se postigne traženi ciklus pri sekvencijalnim operacijama, odabir frekvencije vrtnje pužnog vijka postaje iznimno važan, posebice uz vrlo velik kapacitet cilindra za taljenje. Što je dulji hod pužnog vijka, to je veća sklonost porastu frekvencije vrtnje pužnog vijka iznad preporučene vrijednosti.

Tradicija često diktira odabir frekvencije vrtnje pužnog vijka pod utjecajem odabira ili izračuna vremena hlađenja otpreska.

Pojednostavnjeno, sve dok se pužni vijak vraća u svoj stražnji položaj prije isteka vremena hlađenja otpreska, njegova će brzina biti tako namještena da odgovara tom zahtjevu, bez obzira na to što je takva frekvencija vrtnje pužnog vijka loša. Svaki plastomer ima svoj preporučeni raspon frekvencije vrtnje pužnog vijka. Vrijednosti izvan tog raspona mogu dovesti do nehomogenosti taljevine ili do nedovoljne energije trenja ili nemogućnosti materijala da apsorbira potrebnu toplinu dovedenu provođenjem sa stijenke cilindra za taljenje. Zbog toga frekvencija vrtnje pužnog vijka ovisi o materijalu i promjeru pužnog vijka, a preniska ili previsoka frekvencija vrtnje signifikantno utječe na stabilnost i mogućnost prerade.

Kao što je spomenuto, kapacitet punjenja je kontrolni faktor pri odabiru frekvencije vrtnje pužnog vijka, jer što je veća udaljenost koju on pokriva, to treba i više vremena. Za optimalna svojstva preporučuju se kapaciteti punjenja cilindra za taljenje od 25 do 50 %. Kapaciteti od 50 do 65 % se rabe, ali uz gubitak sposobnosti procesiranja i lošiju kvalitetu proizvoda.

Postupci kalupljenja s kapacitetom punjenja cilindra za taljenje iznad 65 % imaju tendenciju suočavanja s problemom kvalitete i ciklusa. U pogledu pada kvalitete riječ je o slaboj površini gotovog proizvoda u obliku srebrnih linija, posebice pri preradi amorfnih materijala kao što su polikarbonat, poli(metil-metakrilat), ABS, PC/ABS i poli(eter-imid) te celulozni plastomer i u malo manjoj mjeri PS. Te srebrne linije rezultat su slabog plastificiranja, ali se često krivo tumače kao posljedica neodgovarajućeg sušenja.

Kod kristalastih polimera problem kvalitete vezan je uz kratko vrijeme, posebice za polipropilen, polietilen visoke gustoće, poliamid i poli(buten-terefal) kada ciklus injekcijskog prešanja traje do 20 sekundi. Materijal se u tako kratkom vremenu ne stigne potpuno rastaliti zbog slabe provodnosti topline plastomera jer je vrijeme zadržavanja materijala u cilindru jednostavno prekratko.

U nastojanju da se prevlada taj problem, često se povisuje temperatura cilindra za taljenje (u nekim slučajevima signifikantno), što rezultira višom temperaturom taljenja od potrebne pa se ta dodatna toplinska energija prenosi u kalup. Kako bi se zadržala specificirana kvaliteta otpreska, potrebno je ukloniti tu dodatnu toplinu na neki način tijekom faze punjenja, stlačivanja i hlađenja. Vrlo je često kapacitet hlađenja kalupa neadekvatan, pa se javlja potreba produljenja vremena držanja pritiska i/ili vremena hlađenja otpreska umjesto produljenja trajanja ciklusa.

Danas se preporučuje drukčiji pristup izradi otpresaka za koje su potrebni dulji ciklusi. Posebice s tankostjenim otprescima trend je smanjenja kapaciteta punjenja cilindra za taljenje s 25 – 50 % na 15 – 30 %. To omogućuje skraćanje vremena povratka pužnog vijka, dopuštajući mu da se vrati u svoj stražnji položaj prije kompletiranja vremena hlađenje otpreska i s ispravno odabranom obodnom brzinom pužnog vijka.

Držeći materijal u cilindru za taljenje neznatno dulje pri preporučenoj temperaturi taljenja dobiva se stabilnija osnova za preradu. Ako je vremenski ciklus kratak, vrijeme koje materijal provede u cilindru za taljenje nije pretjerano dugo.

Glavni kriterij za niži kapacitet punjenja je mogućnost odabranog tipa ubrizgavalice da postigne određenu brzinu punjenja s kraćim hodom pužnog vijka. To znači da je brzina ubrizgavanja i usporavanja pužnog vijka kako bi se postigla odabrana frekvencija vrtnje pužnog vijka vrlo važna, dakle kretanje naprijed servohidrauličnih i servoelektričnih ubrizgavalica u odnosu na ubrizgavalice sa standardnim pokretanjem ventila i pumpi.

Za optimiran proces operaciju povrata pužnog vijka treba završiti unutar 1 do 2 sekunde od završetka vremena hlađenja. To ne znači da za otpresak relativno dugog vremena hlađenja treba rabiti vrlo nisku frekvenciju vrtnje pužnog vijka. Kako se 70 % energije plastificiranja dobiva od trenja djelovanjem pužnog vijka, njegova preniska vrtnja rezultirat će neodgovarajućom kvalitetom taljevine, nekonzistentnom preradom i lošim svojstvima proizvoda.

Zato odabrana ispravna vrtnja pužnog vijka mora korelirati s njegovom optimalnom obodnom brzinom. Kada je vrijeme povrata pužnog vijka znatno kraće od odabranog vremena hlađenja otpreska, treba uključiti opciju odgode kretanja vijaka; npr. za odabrano vrijeme hlađenja od 22 sekunde, vrijeme uspornog pritiska je 8,4 sekunde i vrijeme odgode kretanja vijka 11,6 sekundi.

### Istraživanje tečenja taljevine<sup>5</sup>

Kako rastu zahtjevi za proizvodnju otpreska s mikrometarskim tolerancijama, kontrola brzine ubrizgavanja postaje imperativ. Stoga će u ovom dijelu teksta biti riječi o osnovnim elementima važnima pri punjenju kalupne šupljine.

Tečenje rastaljenog plastomera pri ubrizgavanju u kalupnu šupljinu kroz razmak između površine jezgre i stijenke gnijezda često se opisuje kao *izvorsko tečenje* (e. *fountain flow*). Ono se javlja kada se rastaljeni materijal potiskuje uzduž razmaka, a vanjski slojevi pri tome dolaze u dodir s obje površine kalupne šupljine. Tada dolazi do *zamrzavanja*, a time i prestanka tečenja te izoliranja tečljive jezgre otpreska koja se potiskuje dalje kroz razmak i popunjava kalupne šupljine. Rezultirajuće čelo tečenja je u obliku parabolične krivulje u kojoj je maksimalna brzina tečenja u središtu strujanja taljevine, a minimalna brzina na površinama u dodiru sa stijenka kalupne šupljine (slika 1)



SLIKA 1 – Posljedica *zamrzavanja* taljevine

Očvrsnuta kožurica (*zamrznuti sloj*) stvara se progresivno kako se puni kalupna šupljina. Materijal ne teče fizički uzduž površine kalupne šupljine, nego je potiskivan prema površinama. Debljina *zamrznutog sloja* sužava se od čela toka prema položaju uzduž puta tečenja kada postaje konstantna. Položaj varira ovisno o različitom obliku i kompleksnosti otpreska ovisno o energiji trenja koja se generira na međupovršinama između *zamrznutog sloja* i rastaljene jezgre otpreska. Širenje tarne energije određeno je brzinom kojom se rastaljeni materijal kreće duž razmaka, a to znači brzinom ubrizgavanja.

Stvarna debljina nastaloga *zamrznutog sloja* određuje vizualne, strukturne i dimenzijske karakteristike rezultirajućeg procesa kalupljenja, otpreska. Uz brzinu ubrizgavanja na debljinu *zamrznutog sloja* utječe i odabir parametara prerade i stvarni presjek stijenke otpreska. Iz tih razloga brzina čela fronte taljevine treba biti optimirana sukladno:

- debljini razmaka (debljini stijenke)
- duljini kojom treba teći taljevina od ušća
- tipu plastomera koji se praobljuje.

Zbog toga tankostjeni otpresci zahtijevaju više brzine ubrizgavanja kako bi se spriječilo prijevremeno zamrzavanje, a time i neujednačena površina gotovog proizvoda. Nadalje, što je veći razmak koji treba prijeći taljevina od ušća da bi popunila kalupnu šupljinu, to je veći njezin utjecaj na

postizanje konzistentnosti. Što je učinkovitiji postupak punjenja kalupne šupljine, to je uspješniji postupak praobljivanja.

Jedan od važnih utjecaja koji se često zanemaruje jest odabir položaja ušća. Svaki plastomer ima svoje karakteristike tečenja s obzirom na duljinu učinkovitog tečenja uz određenu debljinu stijenke. Za svaki materijal postoji faktor tečenja (omjer put tečenja/debljina stijenke) za određenu debljinu stijenke.

Različiti tipovi materijala posjeduju različite sposobnosti puta tečenja. Važno je znati da povišenje debljine stijenke od 1 na 3 mm ne znači automatsko trostruko povećanje puta tečenja. Još je važnije da debljina *zamrznutog sloja* može biti veća od uobičajenih 15 % debljine stijenke, ovisno o odabranim parametrima procesa. Zbog toga konstrukcija otpreska, zajedno s debljinom stijenke i odabranom pozicijom ušća, može biti učinkovito optimirana primjenom određenih simulacijskih programa za računalnu simulaciju tečenja. U tablici 1 prikazani su neki uobičajeni omjeri put tečenja/debljina stijenke za presjek stijenke od 1 mm.

TABLICA 1 – Neke tipične vrijednosti faktora tečenja za debljinu stijenke 1 mm (raspon ovisi o materijalu)

Materijal	Kratica	Faktor tečenja: debljina stijenke
Akronitril/butadien/stiren	ABS	100 – 200 : 1
Etilen/vinilacetat	EVA	180 – 230 : 1
Polistiren visoke žilavosti	HIPS	250 – 340 : 1
Poli(eten) visoke gustoće	PE-HD	200 – 270 : 1
Poli(eten) niske gustoće	PE-LD	200 – 300 : 1
Linearni poli(eten) niske gustoće	PE-LLD	180 – 250 : 1
Poli(amid) 6	PA 6	160 – 300 : 1
Poli(amid) 66	PA 66	180 – 300 : 1
Poli(amid) 11/12	PA 11/PA 12	180 – 220 : 1
Poli(butilen-tereftalat)	PBT	140 – 220 : 1
Polikarbonat	PC	30 – 110 : 1
Poli(eter-imid)	PEI	70 – 140 : 1
Poli(eten-tereftalat)	PET	220 – 350 : 1
Poli(metil-metakrilat)	PMMA	110 – 170 : 1
Poli(oksimetilen) kopolimer	POM-Co	100 – 250 : 1
Poli(oksimetilen) homopolimer	POM	100 – 250 : 1
Polipropilen	PP	230 – 340 : 1
Poli(fenilen-oksidi)	PPO	100 – 200 : 1
Poli(fenilen-sulfid)	PPS	120 – 185 : 1
Polistiren (opće namjene)	PS	150 – 200 : 1
Stiren/akronitril	SAN	170 – 200 : 1
Polisulfon	PSU	60 – 120 : 1
Poli(eter-sulfon)	PES	60 – 140 : 1
Omekšani poli(vinil-klorid)	PPVC	200 – 250 : 1
Poli(vinil-klorid)	PVC	80 – 190 : 1

Razumijevanje ponašanja tečenja materijala omogućuje neprocjenjive informacije za izbor ispravnih parametara prerade. Osim toga količina tarne topline nastale na međupovršinama *zamrznutog sloja* i rastaljene jezgre otpreska pri punjenju znatno utječe na strukturu i posljedično uporabna svojstva proizvoda.

Dobra praksa kalupljenja svjedoči da popunjenost kalupne šupljine postignuta tijekom punjenja kalupa treba težinski iznositi 95 do 98 %. Popunjenost omogućuje pogodnu nit vodilju za uvođenje primijenjenog pritiska. Za kalupe s više gnijezda variranje u prosječnoj masi po kalupnoj šupljini treba ograničiti na 5 % ili manje. Što su manja odstupanja, postiže se bolja ujednačenost u svakoj kalupnoj šupljini kao rezultat selektivnog

pritiska raspodijeljenoga unutar svake kalupne šupljine zbog skupljanja u kalupnoj šupljini.

Vrlo su česte dvojbe vezane uz 95 ili 98 % popunjenosti. U stvarnosti kalup djeluje popunjeno 100 %, ali, kada se detaljnije pogleda, sadržava nabore i uleknuća nastala zbog stezanja tijekom hlađenja. Ta su uleknuća posljedica nedovoljnog držanja naknadnog pritiska. Samo u slučaju dovoljnoga naknadnog pritiska u kalupnoj šupljini u cilju postiže se vizualno i dimenzijski prihvatljiv otpresak uz porast njegove težine.

Prerađivani plastomeri po svojoj prirodi sadržavaju brojne fleksibilne lance koji sadržavaju određene kemijske elemente: ugljik, vodik, kisik i dušik ili spojeve koji sadržavaju te elemente. Kada se ti lanci istegnu (u stanju rastezanja), otpresak pokazuje dobra fizička svojstva u usporedbi

s proizvodom čija struktura posjeduju visok stupanj stlačenosti zbog kalupljenja.

Općenito, što se kalupna šupljina brže puni, to je otpresak konzistentniji i kvalitetniji. Postoji svakako granična brzina injekcijskog prešanja za svaki plastomer; prebrzo, kao i presporo ubrizgavanje može biti štetno.

#### KORIŠTENA LITERATURA

1. Goff, J.: *Perfection the Process*, Injection World, (2009)10, 31-32.
2. Goff, J.: *Four steps to perfect moulding*, Injection World, (2010)3, 37.
3. Goff, J.: *Achieving perfect plasticization*, Injection World, (2010)4, 25-26.
4. Goff, J.: *Selecting the right screw speed and capacity*, Injection World, (2010)5-6, 33-35.
5. Goff, J.: *Investigating melt flow*, Injection World, (2011)2, 39-41.

- Nastavlja se -

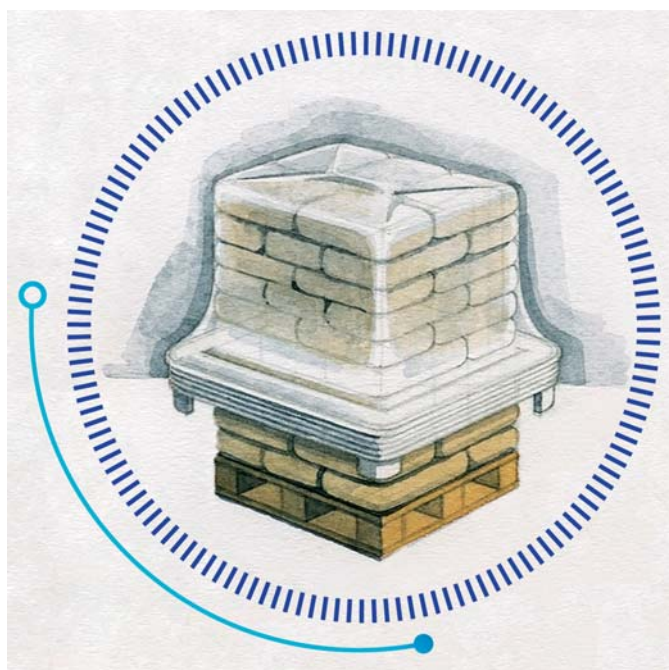
## Razvučeni pokrovi

Jedan od sve traženijih proizvoda za pakiranje tereta, npr. na paletama, jest razvučeni pokrov. U svakodnevnom životu taj je proizvod poznat prema engleskom nazivu *stretch hood* (nj. *Stretchhaube*). To je u osnovi crijevasti film zavaren na jednom kraju koji se navlači na paletu kako bi se učvrstio i zaštitio pakirani teret. Prilikom pakiranja film se reže na odgovarajuću duljinu, zavaruje na gornjem kraju te ga stroj hvata *prstima* koji film rastežu u poprečnom smjeru do dimenzija malo većih od dimenzija palete, nakon čega slijedi navlačenje na paletu. Promjenom duljine filma mijenja se stupanj uzdužnog razvlačenja, koji je također veoma bitan za pravilno fiksiranje tereta.

Mogućnost podešavanja elastičnosti filma i sile pakiranja čini ovaj pokrov idealnim za pakiranje raznih proizvoda, od praznih PET boca do vreća cementa, za što su potrebna potpuno suprotna svojstva nago u prvom slučaju. Međutim popularnost i brz rast ponajviše je stekao paletiranjem građevnog materijala i tereta u vrećama. Uz navedeno, danas se također sve više upotrebljava za pakiranje različitih aparata, poput bijele tehnike, zbog veće isplativosti u odnosu prema kartonu.

Slijedi nekoliko najvažnijih svojstava koja obilježavaju razvučeni pokrov te mu u određenim slučajevima daju prednost pred nekim drugim postupcima pakiranja. Jedno od njih je brzina pakiranja, koja je u odnosu prema omatanju ovom vrstom filma viša za oko 40 %, što je znatna razlika. Drugo važno svojstvo je dobra vodonepropusnost i UV zaštita, jer je paleta zaštićena sa svih pet strana koje su izložene atmosferskim utjecajima. Prilikom manipulacije teretom veoma su važna vizualna svojstva, tj. prozornost filma, kako bi teret mogao biti brzo i točno evidentiran. Time se znatno umanjuje mogućnost pogriješke pri uporabi ili isporuci tereta. U ovom je slučaju razvučeni pokrov također u prednosti, jer je riječ o samo jednom sloju filma, što pri omotavanju razvučenim filmom nije slučaj. Tijekom transporta veoma je važna stabilnost palete kako bi teret u cijelosti i neoštećen stigao na odredište. Ispunjenje tog zahtjeva postiže se odgovarajućim omjerom elastičnosti i sile pakiranja koji ovisi o dimenzijama filma i materijalu od kojeg je izrađen.

Ukupno gledajući, razvučeni pokrov zahtjevan je proizvod jer mora zadovoljiti cijeli niz parametara, od kojih su dva veoma važna: otpornost na kidanje i proboj. Da bi se ispunili svi potrebni zahtjevi, nužno je korištenje kvalitetnih materijala te adekvatne formulacije materijala za određenu vrstu pakiranja. Filmovi za razvučeni pokrov obično su troslojni, tj. imaju dva vanjska zaštitna sloja i unutrašnji, visoko elastični sloj. Većina proizvođača preporučuje uporabu visoko kvalitetnog materijala C8-PE-LLD, dakle linearni polietilen niske gustoće za vanjske slojeve



te kombinaciju plastomera i elastomera, poliolefinske elastomere ili etilen/vinil-acetatnu plastiku (EVAC) za unutrašnji sloj. Vanjski slojevi određuju mehanička i vizualna svojstva, dok unutrašnji osigurava potrebnu elastičnost. Debljine vanjskih slojeva obično su po 20 % ukupne debljine filma, a preostalih 60 % otpada na unutrašnji sloj. Svaki veći proizvođač materijala ima svoje preporuke i recepture za određenu vrstu proizvoda koji se pakira, no zbog samog postupka pakiranja svojstva filma moraju biti izbalansirana u veoma uskim granicama. To zahtijeva nekoliko proba na konkretnom slučaju, prije same proizvodnje. Usprkos spomenutim teškoćama, brojne prednosti čine danas razvučeni pokrov najbrže rastućim postupkom industrijskog pakiranja. Prema *Versalis – Internal Marketing Intelligence*, procjenjuje se da će tržište razvučenog pokriva od 2011. do 2015. rasti 7,5 %, dok procjena za razvučeni film iznosi samo 0,7 %. Mnogi drugi izvori navode slična predviđanja, što jasno pokazuje smjer budućeg razvoja i sve veću uporabu ovog proizvoda i postupka industrijskog pakiranja.

Zoran BLATARIĆ