

Iterativno vodenje procesa brizganja na osnovi direktnega merjenja tlaka v kalupni votlini orodja

Dragan Kusić in Aleš Hančič
TECOS Razvojni center orodjarstva Slovenije
Kidričeva 25, 3000 Celje
dragan.kusic@tecos.si , ales.hancic@tecos.si

Iterative control of injection molding process based on direct pressure measurement inside the mold cavity

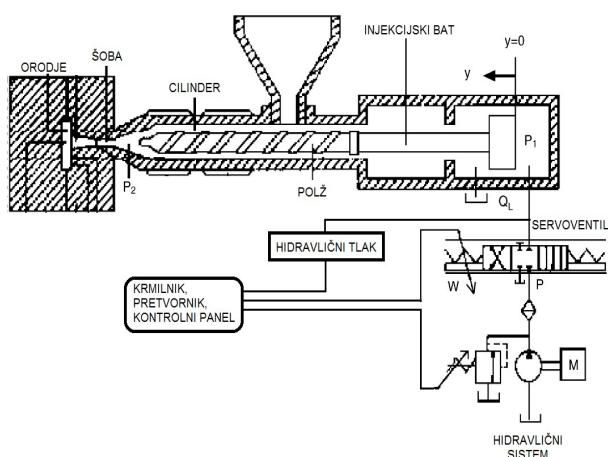
Measuring the pressure inside the mould cavity is directly related to the quality of injection-molded plastic products, as well as with the selected process parameters, which also affect the course of the pressure curve. From the latter, we can easily estimate the expected deviation in production during each cycle. These deviations, which are the result of process nonlinearities can be significantly reduced by introducing an iterative learning, as shown in this article, where the level of deviation was evaluated on the basis of the pressure curve deviations from the set reference pressure trajectory inside the holding pressure phase, which is the key to reduce the level of shrinkage and warping of injection molded plastic products. The obtained experimental results confirm the effectiveness and viability of using the iterative learning method to improve the quality of molded products between production cycles. In addition to the cavity pressure measurements it is extremely important to measure the melt temperature due to changes in thermodynamic properties of the melt, such as viscosity, mechanical properties, and the visual appearance of injection molded products, etc., which also affect the final product quality.

Kratek pregled prispevka

Merjenje tlaka v kalupni votlini orodja je direktno pogojena s kvaliteto brizganih plastičnih izdelkov kot tudi z izbranimi procesnimi parametri, ki prav tako vplivajo na sami potek tlačne krivulje. Iz slednje lahko enostavno ocenimo pričakovane deviacije v proizvodnji v vsakem posameznem ciklu. Omenjene deviacije, ki so posledica nelinearnosti samega procesa, lahko bistveno zmanjšamo z uvedbo iterativnega učenja, kot je predstavljeno v tem članku, kjer smo nivo deviacije ocenjevali na osnovi odstopanj poteka tlačne krivulje od postavljene referenčne tlačne trajektorije v fazi delovanja naknadnega tlaka, ki je ključna za zmanjšanje nivoja zvijanja in krčenja brizganih plastičnih izdelkov. Dobljeni eksperimentalni rezultati potrjujejo smotrnost in upravičenost uporabe iterativne učne metode za izboljšanje kvalitete brizganih izdelkov med posameznimi proizvodnimi cikli. Poleg meritve tlakov je izredno pomembna še meritev temperature taline, zaradi spreminjanja termodinamičnih lastnosti taline, kot npr. viskoznost, mehanske lastnosti, vizualni izgled brizganih izdelkov itd., ki prav tako vplivajo na končno kakovost produkta.

1 Uvod

Brizganje termoplastičnih materialov je eden glavnih postopkov za proizvodnjo različnih plastičnih izdelkov. Brizgalni stroji in orodja različnih velikosti so najbolj pogosto uporabljeni del opreme in nujen predpogoj, da lahko prično predelovati termoplastične materiale s tem postopkom. Sam proces brizganja je relativno preprost in sestavljen iz sledečih faz: vbrizgavanje, preklon na naknadni tlak, plastificiranje ter ohlajanje. Zgradba tipičnega hidravličnega brizgalnega stroja prikazuje slika 1.



Slika 1: Primer poenostavljene zgradbe hidravličnega brizgalnega stroja.

Proizvodni cikel se začne najprej z zapiranjem orodja, kjer zapiralna enota zapre najprej obe polovici orodja. Nato sledi faza brizganja, kjer je potrebno predhodno nasuti v lijak termoplastični material v obliki granul, ki se v ogrevanem cilindru stopi, polž pa tako nastalo polimerno talino potiska naprej. Pri tem je pomembno da, ko se akumulira dovolj polimerne taline lahko polž z aksialnim pomikom naprej potisne to talino preko šobe v orodje tj. orodno votlino, ki ustreza geometrijski obliki izdelka. Potem ko se polimerna talina v orodju ohladi na ustrezno temperaturo, moramo še pred tem vbrizgati dodatno količino polimerne taline z namenom

kompenziranja krčenja polimerne taline pri strjevanju v želeno obliko. Tako vbrizgano polimerno talino pustimo v orodju, da se ohladi na temperaturo, ki je ustrezna za izmetavanje izdelka iz orodja. Proizvedeni plastični izdelek po koncu časa ohlajanja z odpiranjem orodja posledično bodisi izmečemo iz orodja ali pa ga npr. primemo s pomočjo robotske roke in najprej prestavimo na tekoči trak, odrežemo dolivek, po potrebi obrežemo in zložimo. Plastične ostanke od takšnega izdelka lahko običajno ponovno recikliramo in kasneje ponovno uporabimo. Sam proces brizganja ima poleg številnih prednosti, kot npr. velike serije proizvodnje, relativno majhen izmet, visoka stopnja avtomatizacije, doseganje visokih toleranc ipd., tudi nekaj slabosti, kot npr. visoki investicijski stroški v izdelavo ustreznega orodja ter visoki obratovalni stroški.

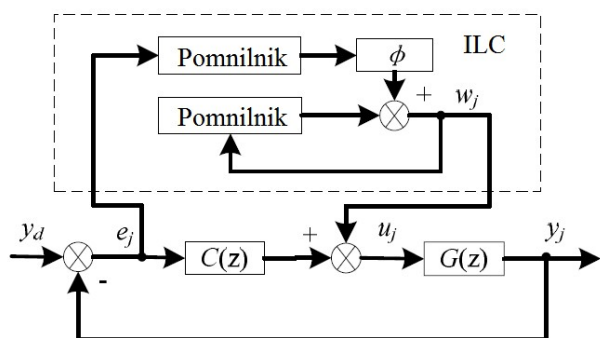
Tlak v notranjosti orodja tekom faze brizganja sunkovito naraste dokler ni notranjost popolnoma volumsko zapolnjena. Posledično tlak naraste do nivoja naknadnega tlaka, kjer običajno držimo točno določen profil z namenom kompenziranja krčenja polimerne taline. Omenjeni profil tlaka v notranjosti orodne votline moramo med posameznimi proizvodnimi cikli držati in ponavljati saj je ključni faktor, ki vpliva na kakovost brizganega plastičnega izdelka.

Optimalni profil tlaka vpliva na ustrezno zapolnitev končnega izdelka, kot tudi na prelitost in nezapolnjenost samega izdelka v primeru, če je ta previsok oz. prenizek. Sama dinamika notranjega tlaka je običajno hitra, časovno spremenljiva in nelinearna. Iz tega razloga je zaželeno, da se razvije ustrezna strategija vodenja notranjega tlaka v orodju s pomočjo procesnih parametrov in ustrezne tehnike vodenja glede na uporabljen krmilnik brizgalnega stroja ter vrsto komunikacije z njim. Na takšen način lahko približno ponovimo termodinamično zgodovino polimerne taline in posledično zagotovimo kakovostne brizgane plastične izdelke.

V preteklosti so bili predlagani številni algoritmi za vodenje notranjega tlaka v orodju. Karmal in ostali [1] so prikazali študijo apliciranja PI in PID algoritmov v te namene, medtem ko so številni drugi avtorji uporabljali adaptivne algoritme [2-3]. Iterativno učenje lahko kategoriziramo v področje inteligentne metodologije vodenja, ker ponazarja učni pristop za izboljšanje odziva nekega sistema, kateri deluje ponavljajoče v nekem danem časovnem okvirju. S pomočjo informacij iz prejšnjih iteracij lahko inteligentno izboljša oz. iterativno izboljšuje odziv nekega sistema [4]. Iterativno učenje je možno uporabiti za doseganje popolnega sledenja nekega sistema oz. objekta, kljub temu da je le-ta nelinearen, negotov ali pa neznan tako, da je to metodo smiselno vpeljati tudi v proces brizganja zaradi svoje izrazite ponavljajoče narave delovanja.

2 Izvedba vodenja

Blok diagram krmilnega sistema za izvedbo vodenja z iterativnim izboljševanjem trajektorije notranje tlaka v orodju je prikazan na siki 2.



Slika 2: Blok diagram krmilnega sistema.

V blok diagramu predstavlja $G(z)$ objekt vodenja na osnovi notranjega tlaka, y_d in y_j predstavljata pričakovano trajektorijo in izhod objekta (informacija o poteku notranjega tlaka), e_j predstavlja napako, del okvirja, ki je črtkan predstavlja zunanjo krmilno enoto za izvedbo predkrmiljenja (feedforward controller), w_j je njegov izhod, $C(z)$ je krmilnik stroja, ϕ je učna konstanta učnega sistema, u_j je vsota vrednosti iz obeh krmilnikov, pomnilniška bloka

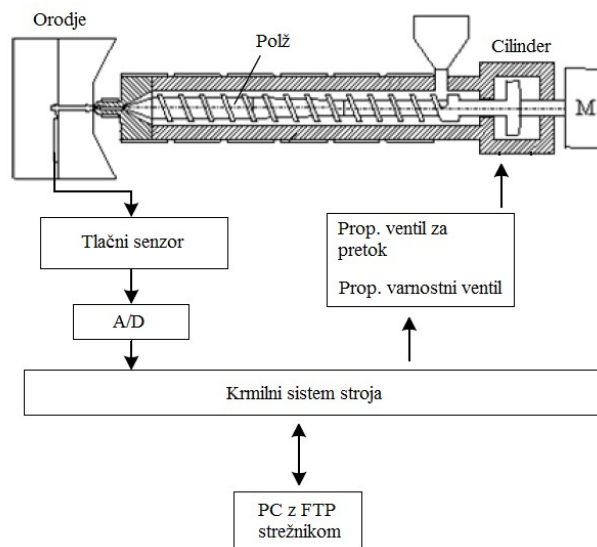
predstavljata elementa, ki shranjujeta u_{j-1} in e_{j-1} iz prejšnjega cikla. Končno enačbo predkrmilnega dela lahko zapišemo kot

$$u_{j+1} = w_{j+1}(k) + C(z)e_{j+1}(k) \quad (1)$$

pri čemer je

$$w_{j+1}(k) = w_j(k) + \phi e_j(k+1) \quad (2)$$

Praktična izvedba vodenja procesa brizganja je prikazana na sliki 3. Uporabljen je bil kvarčni tlačni senzor Kistler tip 6153C, ki je nameščen v notranjosti orodja za brizganje testnih ploščic dimenzij 60x60mm in lahko meri notranje tlake do velikosti 2000 bar. Slednje se uporabljajo za namen testiranja skrčkov različnih termoplastičnih materialov.



Slika 3: Praktična izvedba vodenja procesa brizganja na osnovi meritev notranjega tlaka.



Slika 4: Tlačni senzor Kistler tip 6153C.

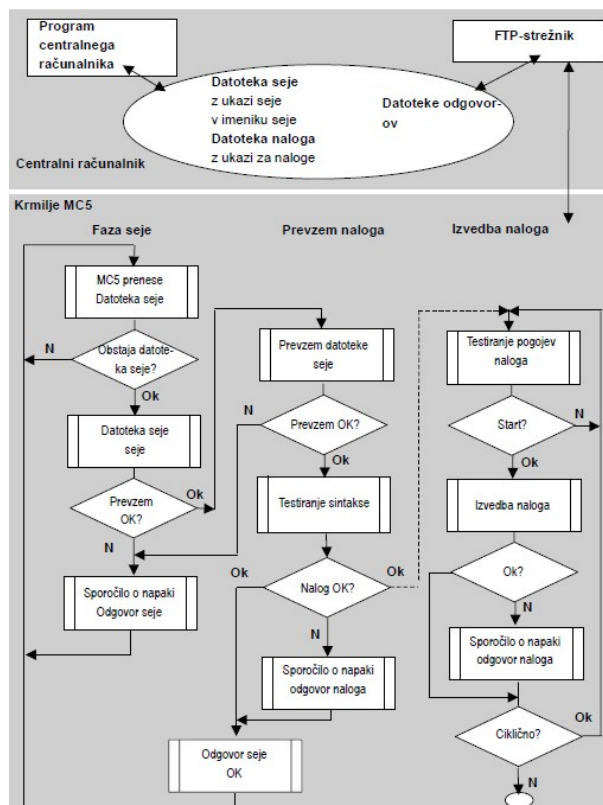
Temperaturo orodja smo merili na zunanji površini s klasičnim J-tipom termočlena (klasa 1). Vsi praktični testi so bili izvedeni na 80-tonskem hidravličnem brizgalnem stroju KraussMaffei KM80SP380CX (slika 5) z uporabo PP materiala ISOFIL H40 C2 F NAT za brizganje testnih ploščic.



Slika 5: KraussMaffei KM80SP380CX brizgalni stroj.

Za komunikacijo med krmilnikom stroja in centralnim računalnikom z vzpostavljenim FTP strežnikom smo uporabili ethernet vmesnik z Euromap 63 standardom, ki določa prenos podatkov iz stroja in v stroj s pomočjo tekstovnih datotek v kateri so posamezni ukazi, poročila in procesni parametri. Vmesnik s Euromap 63 standardom je potrebno aktivirati na samem stroju in nastaviti potrebne poti ter naslove za komunikacijo. Natančen potek izmenjave datotek in načina preverjanja pravilnosti komunikacije je prikazan na sliki 6. Po Euromap 63 standardu smo izdelali lasten program v centralnem računalniku v VisualBasic-u, ki zbira ukaze v datoteko (npr. potrebne temperature, hitrost brizganja, velikost in trajanje naknadnega tlaka po stopnjah) in jih odloži na določeno mesto (mapa seje v centralnem računalniku). Krmilje stroja si prenese te datoteke s pomočjo komunikacije s FTP-strežnikom (postopek *Polling*) in šele nato procesira. Krmilnik stroja prenaša datoteke z začasnim imenom in jih preimenuje šele takrat, ko je vsebina do konca zapisana. Pri neustrezni prekinitvi komunikacije sečasne datoteke

nahajajo v ciljnih mapah. Te datoteke je treba iz varnostnih razlogov izbrisati. Vse datoteke sej in odgovorov brišemo takoj po tem, ko smo jih preverili.



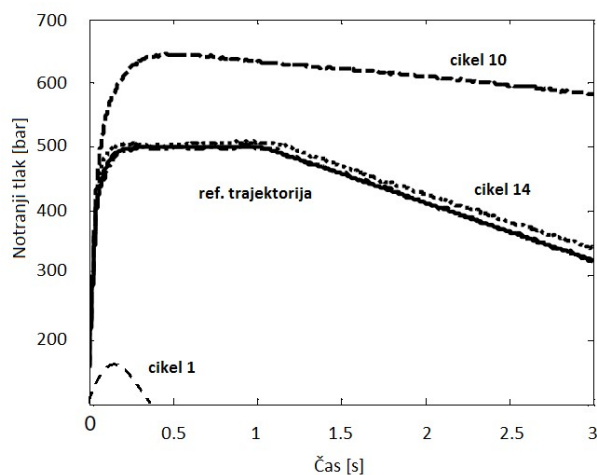
Slika 6: Diagram poteka komunikacije s strojem.

3 Rezultati testiranj

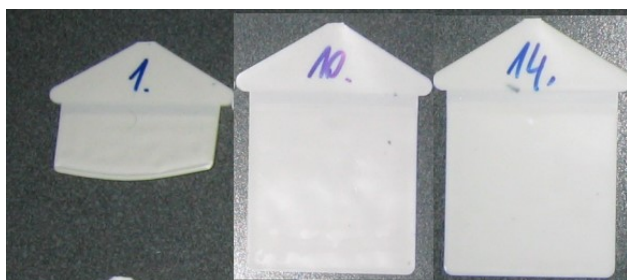
Za izvedbo testiranj je bila izbrana vrednost učne konstante 0.37, celoten čas cikla po koncu testiranj je bil cca. 20 sekund, začetna hitrost brizganja 50 mm/s, začetni naknadni tlak velikosti 100 bar v trajanju 0,25 sekunde. Vse tri parametre, ki vplivajo na sami potek in obliko trajektorije tlačne krivulje smo iterativno spreminjali v posameznih ciklih glede na izmerjeni potek notranjega tlaka v fazi brizganja skladno z Euromap 63 standardom. Končni potek trajektorije notranjega tlaka med posameznimi cikli je prikazan na sliki 7. Kot je vidno smo v 1. ciklu tipali notranji tlak, ki je bil precej nizek cca. 131 bar.

V naknadnih ciklih smo potem iterativno spreminjali brizgalno hitrost (povečevali) ter velikost in čas trajanja naknadnega tlaka. V 10.

ciklu smo uporabili preveliko velikost in čas naknadnega tlaka (604 bar in 6,53 s) pri 70 mm/s ter dobili preveliko odstopanje od definirane referenčne trajektorije poteka notranjega tlaka v orodju. Iz tega razloga je bilo potrebno v nadaljnjih ciklih ta dva parametra postopoma zmanjševati na osnovi ekspertnega znanja in določiti pravo kombinacijo omenjenih procesnih parametrov, kjer bo pogrešek med referenčnim in izmerjenim potekom notranjega tlaka čim manjši. Dobro ujemanje z referenčno trajektorijo notranjega tlaka smo dobili šele v 14. ciklu, kjer je znašala velikost naknadnega tlaka v dveh stopnjah 516/505 bar in skupni čas trajanja 4,4 sekunde.



Slika 7: Rezultat iterativnih potekov tlačnih krivulj v posameznih ciklih.



Slika 8: Primer nabrizganih testnih ploščic v 1., 10. in 14. proizvodnem ciklu.

Na sliki 8, ki prikazuje nabrizgane testne ploščice v posameznih ciklih, je razvidno da je bil 1. cikel precej slab, kjer testna ploščica ni bila niti 50% volumsko zapolnjena in smo s težavo izmerili notranji tlak na začetku testne ploščice. V 10. ciklu je bila ploščica že

volumsko zapolnjena, vendar pogrešek prevelik, medtem ko je bil minimalen v 14. ciklu z ustrezno nastavljeno velikostjo (v dveh stopnjah) in časom trajanja naknadnega tlaka.

4 Zaključek

Kvaliteta vsakega končnega brizganega plastičnega izdelka je direktno povezana s tlakom in temperaturo v kalupni votlini orodja. Zaradi tega je smiselno orodje opremiti z ustreznimi senzorji, kar je že postala obvezna praksa v avtomobilski industriji, kjer se poleg sledljivosti zahteva tudi sprotno spremljanje in protokoliranje vseh ključnih proizvodnih parametrov. Omenjeni senzorji so trenutno že na visokem tehnološkem nivoju razvitosti, zato se trenutno precej vlaga v razvoj namenske programske rešitve, ki bi bila sposobna interpretirati ključne informacije o kakovosti brizganih izdelkov in učinkovitostjo proizvodnje iz množice podatkov. Slednje dobimo v vsakem novem ciklu, ki je lahko dolg nekaj sekund do par minut odvisno od velikosti in geometrije izdelka ter števila orodnih gnezd.

S pomočjo iterativnega vodenja procesa brizganja na osnovi meritev notranjega tlaka je možno spremljati kakovost brizganih izdelkov in po potrebi na osnovi znanja iz prejšnjih ciklov spremeniti ključne procesne parametre in zmanjšati odstopanje glede na določeno referenčno trajektorijo.

5 Literatura

- [1] M. R. Kamal, W. I. Patterson, N. Conley, D. Abu Fara, G. Lohfink, Dynamic and control of pressure in the injection molding of thermoplastics, Polym. Eng. Sci., Vol. 27, 1403-1410, 1987.
- [2] C. P. Chiu, J. W. Wei, and M. C. Shih, Adaptive model following control of the mold-filling process in an injection molding machine, Polym. Eng. Sci., Vol. 36, 1123-1129, 1991.
- [3] S. M. Smud, D. O. Harper, P. B. Deshpande, Advanced process control for injection molding, Polym. Eng. Sci., Vol. 31, 1081-1085, 1991.
- [4] K. K. Tan, J. C. Tang, Nonlinear Control of an Electrohydraulic Injection Molding Machine via Iterative Adaptive Learning, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 3, 65-72, 1999.