

Krivljenje plastičnih brizganih izdelkov

Tomaž Kastelic^{ab*}, Gašper Cafuta^b, Nikolaj Mole^a

^aUniverza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana (*tomaz.kastelic@fs.uni-lj.si)

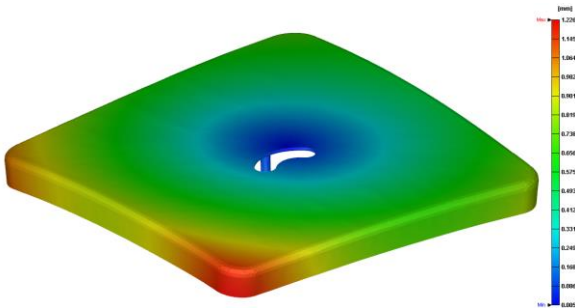
^bCafuta inženiring, simulacije in svetovanje d. o. o., Kalce 5J, 1370 Logatec

Plastični brizgani izdelki so po izmetu iz orodja izpostavljeni krivljenju in krčenju. Glavni vzrok za to so zaostale napetosti, ki nastajajo v izdelku skozi celoten proizvodni proces. V prispevku so opisani mehanizmi njihovega nastanka ter njihov vpliv na končno geometrijo izdelka. Na koncu obravnavamo še možne načine za zmanjšanje ali odpravo krivljenja.

Uvod

Brizganje plastike je zaradi svoje univerzalnosti in hitrosti produkcije postal najpogostejši način izdelave plastičnih izdelkov. Omenjeni proces omogoča hitro proizvodnjo izdelkov kompleksnih oblik z uporabo raznovrstnih materialov, zaradi česar najdemo brizgane plastične izdelke na široki paleti aplikacij. Kljub več desetletnemu razvoju procesa nekateri izzivi ostajajo odprti. Eden od teh je krivljenje izdelka, ki lahko poslabša tako njegovo dimenzijsko kot tudi vizualno funkcionalnost.

Krivljenje je pojav, ki spremlja vse plastične brizgane izdelke, nastopi pa v fazi ohlajanja po izmetu iz orodja. Takrat je izdelek izpostavljen prostemu krčenju in krivljenju. Z izbiro optimalnih procesnih parametrov, ustrezno izbiro materiala ter dobro konstrukcijo orodja je krivljenje mogoče tudi minimalizirati. Za lažje razumevanje krivljenja je potrebno poznati mehanizem nastajanja zaostalih napetosti, ki v največji meri vplivajo na končno obliko izdelka.



Slika 1: Krivljenje izdelka pravilne škatlaste oblike (rezultat simulacije brizganja, prikaz velikosti pomika po krivljenju - Moldex3D).

Zaostale napetosti

Zaostale napetosti v brizganem izdelku nastajajo skozi celoten proces proizvodnje. V splošnem ločimo tri vrste zaostalih napetosti, ki se ločijo po mehanizmu nastanka [1]:

1. *Termično inducirane zaostale napetosti.* Sem spadajo zaostale napetosti, ki nastanejo zaradi neenakomerne temperaturne porazdelitve po volumnu izdelka, kar povzroči neenakomerno krčenje in posledično tvorbo zaostalih napetosti.
2. *Tlačno inducirane zaostale napetosti.* Nastanejo zaradi faze naknadnega tlaka, ki nastopi takoj po fazi polnjenja. Staljena

sredica pod tlakom pritiska na že strjene plasti, medtem ko se te ohlajajo in debelijo.

3. *Tokovno inducirane zaostale napetosti.* Orientacija molekul in napetosti, ki so prisotne zaradi tokovnih razmer v talini, ostanejo zaradi hitrega ohlajanja ukleščene v strjenem materialu.

Tlačno inducirane zaostale napetosti so posebej značilne za proces brizganja plastike, prisotne pa so zaradi specifične tlačne zgodovine ter zaradi faze naknadnega tlaka. V literaturi se tlačno inducirane napetosti pogosto prišteva v sklop termično induciranih napetosti, ki v tem primeru upoštevajo tako nehomogeno ohlajanje izdelka kot tudi vpliv naknadnega tlaka.

Opravljen je bilo več raziskav, pri katerih so merili zaostale napetosti v brizganih izdelkih [2-5]. Značilna je krivulja, ki odraža porazdelitev zaostalih napetosti po debelini stene izdelka v treh značilnih plasteh – natezna-tlačna-natezna porazdelitev. Pri omenjenih napetostih govorimo o napetostih v smeri simetrijske ravnine stene izdelka. Porazdelitev je prikazana na sliki 2.

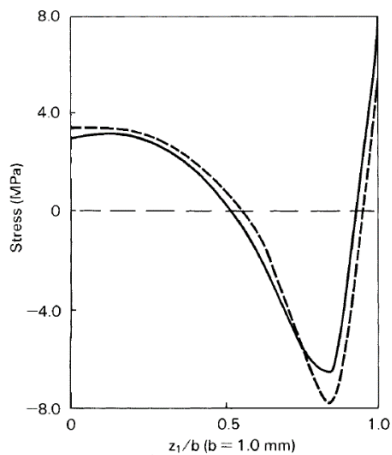
Omenjena značilna porazdelitev je povezana s fazami med procesom brizganja [1]. Prva strjena plast se pojavi ob steni orodja ($\xi_1/b = 1$). Zaradi ohlajanja se želi krčiti, vendar ji to preprečuje stik z orodjem - vnašajo se natezne zaostale napetosti. Tlačna cona na sliki 1 se pojavi zaradi faze naknadnega tlaka. V času te faze je staljena sredica izpostavljena visokemu tlaku, ki v material vnaša tlačne napetosti, ki se s počasnim strjevanjem materiala proti sredici pretvorijo v zaostale tlačne napetosti. V nadaljevanju se dolivek strdi, faza naknadnega tlaka konča in tlak v preostanku staljene sredice popusti. Sledi izmet izdelka, po katerem se kos prosto ohlaja in krči. Že strjene plasti preprečijo sredici, da bi se prosto skrčila, zato v sredini nastanejo natezne normalne zaostale napetosti.

V primeru enakih temperatur na zgornji in spodnji steni orodja bo tudi porazdelitev zaostalih napetosti simetrična, posledično pa zaradi samih zaostalih napetosti izdelek ne bo podvržen krivljenju. V primeru nesimetrične porazdelitve temperature, pa bo tudi profil zaostalih napetosti po debelini stene izdelka nesimetričen, to pa vodi v deformirano geometrijo izdelka.

Tokovno inducirane napetosti so povezane z orientacijo molekul, ki se pojavi zaradi tokovnih razmer v fazi polnjenja. Če je temperatura polimera večja od temperature steklastega prehoda T_g , se molekulske verige prerazporedijo v smeri toka. Zaradi visoke hitrosti ohlajanja se polimer strdi, še preden pride do relaksacije napetosti ter orientacije molekul. Rezultat so »zamrznjene« strižne napetosti in orientirane molekule [6]. V splošnem velja, da večja hitrost taline povzroči večjo orientacijo molekul. Nasprotno pa večja temperatura zmanjša orientacijo, saj je omogočena daljša relaksacija po prekinitvi toka [7].

Pri tem je potrebno poudariti, da so tokovno inducirane napetosti zaradi hitre relaksacije pri visokih temperaturah

majhne [8] in za razred velikosti manjše od termično induciranih [2,6]. Izmerjene zaostale napetosti so tako večinoma termično inducirane [9]. Kljub temu je omenjeni mehanizem vir anizotropije mehanskih, termičnih in optičnih lastnosti materiala [6], ki pa ima posreden vpliv na krčenje in krivljenje [1,2].



Slika 2: Porazdelitev zaostalih napetosti po debelini izdelka z_1 v smeri vzdolž simetrijske ravnine [4].

Drugi vplivi na krivljenje izdelka

Hitrost ohlajanja. Imamura [10] je pokazal, da je zveza med tlakom, specifičnim volumnom in temperaturo materiala (PvT) odvisna od hitrosti ohlajanja. Še posebej je to izrazito pri delno kristaliničnih polimerih, kjer je dosežena stopnja kristalizacije pri hitrejšem ohlajanju manjša. Posledično je manjša tudi (lokalna) sprememba specifičnega volumna, kar posredno vpliva na krivljenje izdelka.

Orientacija vlaken. Krivljenje je v veliki meri odvisno tudi od prisotnosti vlaken v materialu in njihove orientacije. Raztezanje in krčenje kompozitnega materiala v smeri vlaken je manjše v primerjavi z osnovnim materialom matrice, posledično pa lahko prisotnost vlaken popolnoma spremeni končno obliko izdelka. [8]

Anizotropne materialne lastnosti. Orientacija molekul, ki je prisotna zaradi tokovno induciranih napetosti, je vzrok za anizotropne materialne lastnosti. Še posebej je to izrazito pri koeficientu linearnega temperaturnega raztezka. Izkaže se, da je skrčec v smeri debeline stene nekajkrat večji od skrčka v smeri simetrijske ravnine, do razlike pa prihaja tudi med skrčkoma vzdolž in prečno na tok taline.

Odpravljanje krivljenja

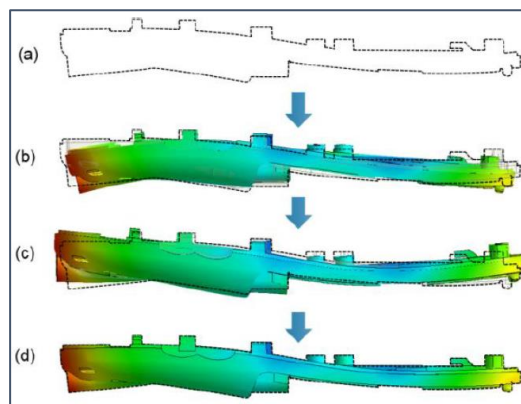
V praksi se krivljenju težko popolnoma izognemo, je pa mogoče vsaj na kritičnih mestih zagotoviti potrebno funkcionalnost. Najpogosteje se efekt krivljenja poskuša izničiti preko optimizacije procesnih parametrov. S pravo kombinacijo je mogoče vrednost krivljenja zmanjšati tudi za 70% [11]. Slabost metode je ta, da optimizacija vedno poteka na konkretnem primeru, za izračun optimalne kombinacije pa je potrebno zadostno število izvedenih eksperimentov ali simulacij.

Eden od načinov zmanjšanja termično induciranih zaostalih napetosti, ki sicer v največji meri pripomorejo h krivljenju, je tudi optimiziranje temperirnega sistema, s čimer dosežemo bolj

homogeno temperaturo na stenah kalupne votline in posledično tudi manjše krivljenje.

Krivljenje je mogoče deloma odpraviti tudi z variacijo debeline sten tankostenskega izdelka. Z optimalno kombinacijo debeline sten po posameznih odsekih je mogoče zmanjšati ukrivljenost izdelka ter zmanjšati spreminjanje ukrivljenosti v primeru manjših variacij procesnih parametrov [12].

Obliko končnega izdelka pa je možno kompenzirati tudi s spreminjanjem oblike kalupne votline. Največkrat je to izvedeno s popraviljem geometrijskega modela na kritičnih mestih ali z uporabo »obratne geometrije«, s katero so pomiki, prisotni zaradi krivljenja in krčenja izdelka, upoštevani v nasprotni smeri.



Slika 3: Kompenzacija krivljenja preko uporabe ti. »obratne geometrije« [13].

Zaključek

Vse večja kompleksnost izdelkov ter naprav ustvarja potrebo po proizvodnji kosov visoke kakovosti. V primeru brizganih izdelkov je potrebno v največji meri minimizirati krivljenje in krčenje. V prispevku smo kot glavni razlog za krivljenje navedli zaostale napetosti, ki nastajajo skozi celoten proizvodni proces. Opisali smo mehanizme nastanka ter njihov vpliv na končno geometrijo izdelka. Omenili in opisali smo tudi nekaj drugih vplivov, ki prav tako prispevajo h krivljenju. To so hitrost ohlajanja, orientacija vlaken ter anizotropne materialne lastnosti. Ob koncu smo navedli še nekaj rešitev za odpravo krivljenja. Najpogostejši način je izbira optimalne kombinacije procesnih parametrov, pri čemer si lahko pomagamo z optimizacijskimi metodami.

- [1] P. Kennedy. *Flow analysis of injection molds*, 2013.
- [2] W. F. Zoetelief. *Polym. Eng. & Science*, **36** (1996) 1886-1896.
- [3] R. Wimberger-Friedl. *Orientation, stress and density distributions in injectionmoulded amorphous polymers determined by optical techniques*, 1991.
- [4] C. H. V. Hastenberg. *Polym. Eng. and Science*, **32** (1992) 506-515.
- [5] M. Thompson. *Polymer Engineering and Science*, **24** (1984) 227-241.
- [6] L. F. A. *Progress in Polymer Science*, **20** (1995) 403-4575.
- [7] H. B. Daly. *Journal of Injection Molding Technology* **2** (1998) 59-85.
- [8] R. Zheng. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **84** (1999) 159-190.
- [9] M. R. Kamal. *Polymer Engineering & Science*, **42** (2002) 1098-1114.
- [10] S. Imamura. *Kobunshi Ronbunshu*, **53** (1996) 693-699.
- [11] T. Erzurumlu. *Materials & Design*, **27** (2006), 853-861.
- [12] B. H. Lee. *Polym.-Plast. Techn. and Eng.*, **36** (1997) 791-807.
- [13] C. T. Huang, *SPE ANTEC Anaheim* (2017) 1575-1580.