

TECHNOLOGICAL PROBLEMS PREDICTION OF GLASS FORMING IN PRE-MANUFACTURE STAGE

I. Matoušek^{*}

Summary: The paper deals with the problem of numerical simulation of glass forming cycle, particularly of glass pressing. The virtual model for monitoring of glass forming cycle is described. The computational analysis is based on fully coupled thermo-mechanical strategy using staggered solution scheme. The approach to prediction of technological problems already in pre-manufacture stage is introduced.

1. Úvod

Současné trendy v automatické výrobě užitkového skla se vyznačují orientací na tvarově a rozměrově nestandardní výrobky. Tento sortiment však bývá v provozní praxi zdrojem značných technologických problémů.

Pro minimalizaci výrobních nákladů a zajištění vyšší konkurenceschopnosti je podstatná identifikace kritických míst technologického cyklu již ve fázi přípravy výroby, před náběhem provozních zkoušek.

Průběh jednotlivých fází cyklu tvarování skloviny lze efektivně monitorovat s pomocí vhodného počítačového modelu. Kritickým bodem procesu virtuální simulace tvarovacího cyklu však zůstává predikce potenciálních technologických problémů.

2. Popis technologie tvarování skloviny

Fyzikální základ všech technologií používaných pro tvarování skloviny je stejný – požadovaného tvaru je dosaženo prostřednictvím působení vnější síly na dávku skloviny o relativně nízké viskozitě a vytvořený tvar je následně fixován podstatným zvýšením viskozity během ochlazování výrobku.

Cyklus lisování (obr. 1), kterému bude v následující části věnována pozornost, začíná dávkováním relativně teplotně homogenní skloviny do pracovní dutiny sklářské formy. Po kontaktu s pracovním povrchem formy se dávka skloviny samovolně deformuje v důsledku působení gravitační síly, zároveň na rozhraní mezi sklovinou a sklářskou formou dochází k relativně intenzivnímu přestupu tepla ze skloviny do sklářské formy, který se projevuje poměrně výrazným nárůstem viskozity povrchových vrstev dávky skloviny při současném zvýšení teploty pracovního povrchu sklářské formy v okolí vzájemného kontaktu. Dominantní

^{*} Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.: Katedra sklářských a keramických strojů, Technická Univerzita v Liberci, Komenského 2, 461 17 Liberec; tel.: +420 485 354 153, fax: +420 485 354 157; e-mail: ivo.matousek@tul.cz

_____ Engineering Mechanics, Svratka 2006, #270

operací celého tvarovacího cyklu je lisování, v průběhu kterého je dávka skloviny vystavena významnému mechanickému zatížení a během velmi krátké doby rozlisována do požadovaného tvaru. Přestože je tato fáze tvarovacího cyklu z časového pohledu relativně nevýznamná, má rozhodující vliv na kvalitu vyráběné produkce. Ve zbývající části tvarovacího cyklu je skleněný výlisek ochlazován ve sklářské formě a po jeho odebrání z pracovní dutiny je sklářská forma připravována na následující pracovní cyklus.



Obr. 1 Jednotlivé fáze cyklu lisování skloviny

a - dávkování, b - lisování, c - chlazení skloviny, d - příprava formy na následující tvarovací cyklus

3. Formulace řešeného problému

Tvarování skloviny je složitým termomechanickým procesem s dominantním vztahem mezi přenosem tepla a viskózním tokem. Změny teploty jednotlivých komponentů soustavy ovlivňují přenos tepla v celém systému a výrazná teplotní závislost viskozity skloviny významně ovlivňuje tok materiálu a následně i kvalitu vyráběné produkce.

Řešená úloha je v Lagrangeově souřadnicovém systému popsána bilančními rovnicemi

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = X_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i},\tag{1}$$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda \cdot gradT) - div(\dot{q}_R) - 3K\alpha T \dot{\varepsilon}_{ii} \delta_{ij} - s\sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$$
(2)

s příslušnými počátečními a okrajovými podmínkami, kde v je vektor rychlosti toku skloviny, X je vektor objemových sil, σ tenzor napětí, σ' tenzor deviátoru napjatosti, $\dot{\varepsilon}$ tenzor rychlostí deformace, x souřadnice v aktuálním souřadnicovém systému, ρ měrná hmotnost, t čas, c měrné teplo, T je teplota, λ tepelná vodivost, \dot{q} hustota tepelného toku a \dot{q}_R hustota radiačního tepelného toku uvnitř skloviny.

V rozsahu teplot, který odpovídá průběhu tvarování, může být sklovina považována za viskoelastický materiál, popsatelný nelineárním modelem Maxwellova typu (Babcock, 1977). Za předpokladu platnosti aditivního rozkladu tenzoru rychlostí deformace $\dot{\epsilon}$ na složku elastickou $\dot{\epsilon}^{e}$ a viskózní $\dot{\epsilon}^{v}$ (Owen & Hinton, 1980) lze konstitutivní chování vyjádřit

vztahem

kde

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^v, \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{e} = \left(\frac{1}{3K}\frac{\dot{\sigma}_{ii}}{3}\delta_{ij} + \alpha \dot{T}\delta_{ij}\right) + \frac{1}{2G}\dot{\sigma}_{ij}', \qquad (3a)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu} = \frac{1}{2\eta(T)}\sigma_{ij}^{\prime}, \qquad (3b)$$

G je smykový modul pružnosti, *K* objemový modul pružnosti, η součinitel dynamické viskozity, α koeficient teplotní roztažnosti, σ_{ii} 1. invarianta tenzoru napjatosti, *u* vektor posunutí, σ' tenzor deviátoru napjatosti. Vzhledem k velmi krátkým dobám relaxace ($t_0 = \eta/E$) v oblasti intervalu tvarování ($\eta = 10^2 - 10^7 Pas$) bývá elastická složka deformace obvykle zanedbávána a sklovina je považována za nestlačitelnou, obecně ne-Newtonskou kapalinu.

Teplotní závislost viskozity nad transformační teplotou (T_g) je vyjádřena prostřednictvím Vogel – Fulcher - Tammannovy (VFT) rovnice (Fulcher, 1925)

$$\log \eta(T) = A + \frac{B}{T - T_o},\tag{4}$$

v níž A, B, C a T_0 jsou empirické konstanty; v obecném případě při překročení kritické rychlosti deformace pak komplexnější teplotně deformační charakteristikou

$$\eta = \eta(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}, T), \tag{5}$$

kde $\overline{\varepsilon}$ je efektivní rychlost deformace a $\overline{\varepsilon}$ ekvivalentní poměrné přetvoření.

Proces sdílení tepla v tvarovacích nástrojích je popsán rovnicí vedení tepla ve tvaru

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda \cdot gradT) - 3K\alpha T \dot{\varepsilon}_{ii} \delta_{ij}$$
(6)

s odpovídajícími počátečními a okrajovými podmínkami.

Při řešení reálných problémů tvarování skloviny se v důsledku vzájemné kombinace tepelných pochodů na površích jednotlivých komponentů tvarovacích nástrojů resp. skloviny uplatňují složitější okrajové podmínky:

• současný vliv konvektivního a sálavého přestupu tepla na hranici Γ_{α} (O.P. 3. druhu)

$$q = \alpha_{CR} \left(T - T_e \right), \tag{7}$$

kde:

$$\alpha_{CR} = \alpha_C + \alpha_R = \alpha_C + \sigma \varepsilon_c 10^{-8} (T_A + T_{Ae}) (T_A^2 + T_{Ae}^2) ; \qquad (7a)$$

• přestup tepla na rozhraní sklovina – tvarovací nástroje na hranici Γ_P (O.P. 4. druhu)

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{P} = \alpha_{SF} \left(T_{S} - T_{SF}\right), \tag{8}$$

kde α_{CR} je kombinovaný součinitel přestupu tepla (konvekce, sálání), α_{SF} součinitel přestupu tepla mezi sklovinou a formou, ε_c konstanta sálání dokonale černého tělesa, T_A termodynamická teplota.

3

tření (disipace energie) podle (Chen & Kobayashi, 1978)

$$q_f = /F_f / / v_R /, \tag{9}$$

kde F_f je třecí síla

$$F_{f} = f F_{n} \left\{ \left(\frac{2}{\pi} \right) tan^{-l} \left(\frac{\boldsymbol{v}_{R}}{a \mid \boldsymbol{v}_{D} \mid} \right) \right\} d,$$
(9a)

 v_R je relativní rychlost (vzhledem k tvarovanému výrobku) a v_D absolutní rychlost pohybu razníku, *f* součinitel tření, *a* konstanta.

4. Hodnocení cyklu lisování skloviny

Většinu z potenciálních technologických problémů, které se obvykle vyskytují v automatizované výrobě lisovaného skla, je možné identifikovat přímo, na základě vyhodnocení průběhu teplotních a deformačních polí v tvarované sklovině a tvarovacích nástrojích. Jedná se především o:

- nedolisování výlisku v důsledku nedostatečné lisovací síly lisu,
- lepení skloviny iniciované lokálním přehřátím sklářské formy, přičemž kritická teplota lepení je za konkrétních podmínek definována empirickým vztahem (Smrček, 1981):

$$T_{s} = \frac{A+B}{0,81\log p + 1,26\log t + 5,47} + T_{0}$$
(10)

kde t je čas, A, B, T₀ empirické konstanty (4),

• deformace výlisku po vyjmutí ze sklářské formy v důsledku nedostatečného množství tepla odvedeného ze skloviny během tvarovacího cyklu; u lisovaného sortimentu se vychází z předpokladu, že kritickou hodnotou je střední viskozita $\eta = 10^7 Pas$.

Vzhledem k omezeným znalostem reologických vlastností tvarované skloviny a použitému výpočetnímu modelu je značně problematická predikce technologických problémů iniciovaných zhoršenou zpracovatelností skloviny, které se projevují nadměrnou tvorbou vrásek, zvýrazněnou stopou po nástroji, v krajním případě až výskytem trhlinek na povrchu tvarovaných výrobků.

Pro identifikaci oblastí potenciálního výskytu technologických problémů iniciovaných zhoršenou tvarovatelností skloviny byla navržena metodika vycházející z předpokladu, že kvalita povrchu tvarovaného výrobku je v průběhu lisování ovlivněna lokální interakcí teplotních a deformačních polí v tvarované sklovině a pole rychlostí deformace. Pro predikci potenciálních výrobních vad bylo zavedeno kriterium (Matoušek, 2005)

$$k_M = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{KR} \,, \tag{11}$$

které umožňuje na základě vyhodnocení poměru aktuální a kritické rychlosti deformace vyhodnotit kvalitativní úroveň tvarovacího cyklu a pravděpodobnost výskytu technologických vad. Průběh kritické hodnoty rychlosti deformace iniciace křehkého lomu ve sklovině dosud není znám; $\dot{\varepsilon}_{KR}$ má význam kritické rychlosti iniciace pseudoplastického chování skloviny, přičemž se předpokládá lineární závislost mezi kritickou rychlostí iniciace pseudoplastického chování a křehkého lomu ve sklovině. Zároveň se předpokládá, že v oblasti, ve které sklovina

vykazuje vlastnosti Newtonské kapaliny, je vždy dosaženo kvalitního povrchu výlisků. Zavedená kritériální rovnice má pouze relativní význam, rostoucí hodnota autorova kritéria k_M je pouze indikátorem narůstu pravděpodobnosti výskytu vad ve vyráběné produkci. Pro popis teplotní závislosti kritické rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}_{\kappa R}$ byl na základě rozboru publikovaných experimentů (Simmons et al., 1988) odvozen vztah

$$\dot{\varepsilon}_{KR} = 10^{4,66-0.76\log\eta},\tag{12}$$

s předpokládaným omezením platnosti pro silikátové skloviny s minimálním obsahem oxidu $\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$.

5. Praktická aplikace

Možnosti uplatnění kritériální rovnice (11) pro predikci technologických problémů byly testovány na konkrétním tvarovacím cyklu.

Vysoká štíhlá váza (obr. 2) z olovnatého křišťálu o hmotnosti 1,9 kg je lisována na 6-ti pozicovém karuselovém lisu s požadovaným taktem 2,2 výrobku za minutu. Zvláštností výroby uvedeného sortimentu je souběžná výroba šesti váz s odlišným dekorem. V počáteční fázi řešení byly přijaty následující předpoklady technologického charakteru: doba pracovního cyklu lisu 162 s, vyjímání výlisku 88 s od okamžiku dávkování, časová prodleva mezi okamžikem dávkování a začátkem lisování cca. 3,3 s, pracovní cyklus razníku 27s, teplota dávkované skloviny na výstupu z dávkovače homogenní T_S=1050°C, rychlost pohybu razníku v=60mms⁻¹. Geometrické charakteristiky lisovaného výrobku a tvarovacích nástrojů a způsob zatížení umožnily zjednodušit popis problému a úlohu řešit jako rotačně symetrickou. Vzhledem k charakteru řešeného problému (materiálové i geometrické nelinearity, proměnlivý kontakt) byla úloha řešena v prostředí výpočetního systému MKP MSC MARC.



Obr. 2 Tvarovaný výrobek a schéma zjednodušeného (2,5 D) geometrického modelu a - 3D model výrobku sklovina, b – 2,5D model výrobku, c - soustava sklovina - tvarovací nástroje

Teplotní závislost viskozity byla definována prostřednictvím VFT rovnice (4), vliv nelinearity viskózního toku při vyšších rychlostech deformace byl ve výpočetním modelu popsán Simmons-Montroseovým vztahem (Simmons et al., 1988)

$$\eta_z = \frac{\eta}{1 + \frac{\dot{\varepsilon}_i t_0 G_\infty}{\sigma_L}},\tag{12}$$

ve kterém η_z je zjevná hodnota dynamické viskozity, t_0 doba relaxace, G_{∞} smykový modul pružnosti, σ_L kohezní pevnost $\dot{\varepsilon}_t$ tečná složka rychlosti deformace.

Po přiřazení materiálových vlastností sklovině a tvarovacím nástrojům (vložka sklářské formy vyrobena z chromniklové oceli ČSN 17 255, dýnko, držák sklářské formy a lisovací kroužek z feritické šedé litiny, lisovací razník z chromové oceli PN 17 145) byla soustava zatížena počátečními a okrajovými podmínkami, které byly řízeny prostřednictvím speciálních uživatelských podprogramů v závislosti na aktuálních podmínkách a fázi tvarovacího cyklu.

Nezbytnou podmínkou efektivní simulace průběhu lisování skloviny je znalost skutečného vývoje teplotních polí v tvarovacích nástrojích během jednotlivých fází tvarovacího cyklu. V souladu s průběhem reálného tvarovacího cyklu proto byly virtuální tvarovací nástroje cyklicky zatěžovány žhavou sklovinou, stabilizovaného stavu (kvazistacionární charakter teplotních polí) bylo dosaženo cca. v 35 cyklu (obr. 3).





a. - okamžik dávkování $t_c = 0$ s, b. - počáteční fáze lisování $t_c = 5$ s, c. - vyjímání výlisku $t_c = 88$ s

Vývoj rychlosti deformace v tvarované sklovině ve vybraných okamžicích prvé etapy lisování (tj. mezi okamžikem dávkování a lisování) je vykreslen na obr. 4. Dávka skloviny



Obr. 4 Vývoj rychlosti deformace v dávkované sklovině ve vybraných okamžicích a. – čas $t_c = 0,46$ s od okamžiku odstřihu kapky, b. – čas $t_c = 0,47$ s, c. – čas $t_c = 1$ s



Obr. 5 Rozložení teplotního pole (a), pole poměrné ekvivalentní deformace (b) a pole rychlosti deformace ve sklovině v čase $t_c = 4,2$ s

dopadá na pracovní povrch formy s prodlevou cca. 0,45 s od okamžiku odstřižení. Po kontaktu s pracovním povrchem sklářské formy dochází v důsledku setrvačných účinků k výrazným tvarovým změnám dávky skloviny. Rychlost deformace v tvarované sklovině dosahuje extrémních hodnot na počátku kontaktu dávkované skloviny s pracovním povrchem sklářské formy (cca. 250 s⁻¹); následně prudce klesá a těsně před kontaktem skloviny se špičkou razníku se ustálí na hodnotě cca. 0,2 s⁻¹. Pro vývoj poměrné deformace je charakteristický ustálený nárůst po celou dobu tvarování, přičemž v prvé etapě tvarování je její velikost (ekvivalentní) omezena hodnotou 1,25.

Souběžně s tvarovými změnami dochází také k intenzivnímu přestupu tepla ze skloviny do sklářské formy, který výrazně ovlivňuje rozložení teplotních polí (a tedy i viskozity) v tvarované sklovině a následně i časové charakteristiky poměrného přetvoření a rychlosti deformace.

Vlastní proces lisování začíná v okamžiku prvého kontaktu razníku s tvarovanou sklovinou, v čase cca. $t_c = 3,30$ s. Sklovina je postupně vytlačována do pracovní dutiny tvořené sklářskou formou, razníkem a lisovacím kroužkem. V průběhu lisování se zvětšuje kontaktní plocha mezi sklovinou a tvarovacími nástroji, což vede ke zintenzivnění procesu ochlazování povrchových vrstev a následně i k dalšímu nárůstu dynamické viskozity tvarované skloviny. Charakteristické rozložení teplotních a deformačních polí a pole rychlosti deformace v tvarované sklovině v průběhu druhé fáze tvarování je uvedeno na obr. 5. Po zatížení lisovací silou v tvarované sklovině postupně narůstá rychlost deformace z cca. 1 s⁻¹ na počátku na cca. 150 s⁻¹ v závěrečné fázi lisování, přičemž poloha výskytu maxima se postupně přesouvá z oblasti pod špičkou razníku vzhůru proti směru pohybu razníku. Po dosažení oblasti přechodu špičky razníku (kulový vrchlík) v kuželovou část těla se relativní pohyb maxima rychlosti deformace vzhledem ke sklářské formě zastavuje.



Obr. 6 Průběh teploty podél vnějšího povrchu tvarované skloviny ve styku se sklářskou formou mezi body 1 a 2 ve vybraných okamžicích tvarovacího cyklu

Pro hodnocení úrovně tvarovacího cyklu v souladu s (11) je rozhodující časový průběh interakce teplot a rychlosti deformace podél vnějšího povrchu tvarovaného výrobku. Vývoj teplot na vnějším povrchu tvarované skloviny mezi body 1 a 2 je typický monotónním poklesem v průběhu celého tvarovacího cyklu (obr. 6). Charakter rozložení teplotních polí ve sklovině je v závěrečné fázi tvarování výrazně ovlivněn prodlevou mezi okamžikem dávkovní a počátkem lisování, neboť v tomto časovém intervalu dochází k výraznému zachlazení vnějšího povrchu skloviny v oblasti kontaktu s pracovním povrchem sklářské formy. Spodní část vnějšího povrchu výlisku zůstává chladnější po celou dobu kontaktu se sklářskou formou.

Vývoj rychlosti deformace ve vybraných časových okamžicích tvarovacího cyklu je vykreslen na obr. 7. Během lisování rychlost deformace monotónně narůstá, přičemž oblast výskytu maximální hodnoty se postupně posouvá ve směru pohybu razníku. V závěrečné fázi se na křivce rychlosti deformace vytvářejí dvě lokální maxima, prvé v oblasti přechodu kulového vrchlíku razníku v kuželovou část těla a druhé v rovině globálního maxima.



Obr. 7 Vývoj rychlosti deformace podél vnějšího povrchu výlisku ve styku se sklářskou formou mezi body 1 a 2

Vzájemná interakce vývoje teplot a rychlostí deformace byla hodnocena prostřednictvím navržené kriteriální rovnice (11), přičemž průběhy hodnoceného kriteria k_M podél vnějšího povrchu tvarovaného výrobku (v kontaktu s pracovním povrchem sklářské formy) ve vybraných okamžicích tvarovacího cyklu jsou vykresleny na obr. 8. Z uvedených grafů je zřejmé, že postupná akcelerace nárůstu rychlosti deformace, především ve spodní části vnějšího povrchu tvarované vázy (obr. 7), iniciuje nárůst hodnoty navrženého kritéria k_M . Vysoké hodnoty identifikované ve spodní části vnějšího povrchu tvarované vázy v závěrečné fázi lisování jsou indikátorem potenciálního výskytu technologických vad iniciovaných zhoršenou zpracovatelností skloviny.

Tento předpoklad byl potvrzen v průběhu dodatečných provozních zkoušek, neboť

v inkriminované oblasti (do výšky 75 mm) byly na vnějším povrchu výlisků identifikovány vzhledové vady včetně drobných trhlinek vlasového charakteru (obr. 9).



Obr. 8 Vývoj koeficientu $k_M\,$ podél vnějšího povrchu výlisku ve styku se sklářskou formou mezi body 1 a 2



Obr. 9 Vady identifikované na výrobku

6. Závěr

V příspěvku je navržen postup, který na základě vyhodnocení interakce vývoje teplot a rychlosti deformace na vnějším povrchu tvarované skloviny ve styku se sklářskou formou

umožňuje vyhodnotit kritická místa tvarovacího cyklu, která mohou být zdrojem vad iniciovaných zhoršenou zpracovatelností skloviny. Praktická využitelnost navrženého postupu byla ověřena v průběhu provozních zkoušek.

7. Poděkování

Tato práce byla vytvořena v rámci řešení Výzkumného záměru MSM 4674788501, finančně podporovaného MŠMT ČR.

8. Literatura

Babcock, C. L. Silicate glass technology methods. New York: John Wiley & Sons, 1977.

- Chen, C., Kobayashi, S. Rigid-plastic finite lement analysis of ring compression. *Application* of Numerical Method to Forming Processes, The WAM of ASME, 1978, 163–174.
- Fulcher, G. S. Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses. J. of Am. Ceram. Soc., 1925, vol. 8, no. 6, p. 339-355.
- Matoušek, I. Počítačové modelování v automatizované výrobě lisovaného skla, *výzkumná zpráva*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- Mills, J. J. The viscoelastic response of glass during forming. *Glass Technology*, 1973, vol. 14, no. 4, p. 101-105.
- Owen, D. R. J., Hinton, E. Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. Swansea: Pineridge Press, 198.
- Simmons, J. H., et al., Non-Newtonoan viscous flow in soda-lime-silica glass. J. Non-Crystal Solids, 1988, no. 105, p. 313-322.
- Smrček, A. Strojní tvarování skla. Praha: SNTL, 1981.