

Jan ZIOBRO

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Sanoku

ANALIZA WYBRANYCH ZJAWISK WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADZIE WLEWOWYM FORM DO GUMY

W artykule dokonano identyfikacji obszarów występowania niepożądanych zjawisk występujących podczas wtrysku elastomerów. Scharakteryzowano ich znaczenie oraz zaproponowano rozwiązanie eliminujące ich skutki. Opisano również wybrane parametry nastawcze, znacznie ułatwiające przygotowanie wtrysku reaktywnego. Proces numerycznych rozważań prowadzono w programie Moldex3D, stosując uprzednio przygotowany kinetyczno-reaktywny model materiałowy Cross-Castro-Macosco. Przebieg wulkanizacji mieszanki chloroprenowej CR prowadzono na podstawie kombinowanego modelu sieciowania Kamala-Souroura-Ryana.

Słowa kluczowe: guma, symulacja wtrysku, prędkość wtrysku, program Moldex3D

Wstęp

Problematyka analiz numerycznych procesu wtrysku materiałów polimerowych dotyczy ważnego i ciągle rozwijanego zagadnienia. Temu rozwojowi sprzyja również presja ze strony przemysłu do sukcesywnego obniżania kosztów produkcji oraz minimalizacji czasu wprowadzania na rynek nowych produktów. Jednocześnie występuje ciągły wzrost wymagań jakościowych. Ogół tych warunków wpływa na intensywny rozwój systemów i aplikacji komputerowych, znacznie ułatwiających spełnienie podanych założeń. W tym celu powstały aplikacje CAE, których zadaniem jest sprawdzenie wielu kryteriów, jakie występują w procesie wtrysku polimerów [9, 10]. Problemy występujące w kanale zasila-
jącym są związane z takimi zjawiskami, jak: zaburzenia płynięcia, zawirowania, przytrzymywanie i odrywanie warstw przypowierzchniowych związane z procesem sieciowania, tarcie w warstwach przypowierzchniowych itp. Z tych powodów trudno jest utrzymać pożądaną laminarny przepływ w układzie wtryskowym, który gwarantuje uzyskanie właściwego i równomiernego wypełnienia gniazd. Wpływa również na zmniejszenie poziomu obciążeń formy [5÷9]. Dzięki symulacji numerycznej, sprawdzającej stopień poprawności wypełnienia

gniazd, unika się kosztownego testowania formy oraz związanej z tym konieczności naprawy formy, co znacząco zmniejsza czas i koszty jej wykonania.

Wybrane parametry nastawcze

W procesie wtrysku polimerów kluczowe znaczenie ma właściwa postać modelu materiałowego. W systemie Moldex3D analiza i opis zjawisk zachodzących podczas wtrysku odbywają się dzięki zdolności wykorzystywania różnorodnych modeli materiałowych. W zależności od rodzaju wtryskiwanego polimeru dobiera się odpowiednią postać modelu materiałowego. Podaną dalej analizę wtrysku mieszanki prowadzono przy zastosowaniu kinetyczno-reaktywnego modelu lepkości **Cross-Castro-Macosco** (1) [1, 5, 6, 10]:

$$\eta = \frac{\eta_0 \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{C_1 + C_2 \alpha}}{1 - \left(\frac{\eta_0 \gamma^*}{\tau^*} \right)^{1-n}}, \quad \eta_0 = A \exp\left(\frac{T_b}{T}\right), \quad T_b = \frac{E_\eta}{R} \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_a + K_b \alpha^m)(1 - \alpha^n), \quad K_a = A \exp\left(\frac{-T_a}{T}\right), \quad T_a = \frac{E_a}{R} \quad (2)$$

$$K_b = B \exp\left(\frac{-T_b}{T}\right), \quad T_b = \frac{E_b}{R}$$

gdzie: A, B, C₁, C₂, n, m, α_g, K_a, K_b, T_a, T_b, E_a, E_b, E_η, – współczynniki,
 α – wskaźnik sieciowania,
 η₀ – lepkość początkowa,
 R – uniwersalna stała gazowa,
 T – temperatura,

Opis przebiegu wulkanizacji wykonano, stosując kombinowany model Kamala-Souroura-Ryana (2) [7, 9, 13]. Na zjawisko sieciowania w znacznym stopniu wpływają: temperatura i czas przebiegu procesu. Wtryskiwany wulkanizat o temperaturze 170°C w czasie większym niż 25 s może uniemożliwić poprawne wypełnienie gniazd. Dobór określonego modelu analitycznego jest ściśle uzależniony od rodzaju materiału badań oraz dostępności odpowiedniej aparatury badawczej. Należy podkreślić, że większość tych opisów została ustalona na podstawie metod doświadczalnych.

W numerycznej analizie procesu wtrysku materiałów reaktywnych zachodzi konieczność określenia odpowiedniej objętości wtrysku, zwanej **pojemnością uplastyczniania** [14], uwzględniającej skurcz, możliwy przepływ wsteczny w układzie cylindra wtryskowego, reakcję sieciowania i jej wpływ na objętość, stosowanie poduszki reszkowej itp. Dlatego też dokładne określenie tej wymaganej pojemności stanowi jeden z głównych problemów przy ustalaniu danych wejściowych. Materiały gumowe mają przeciętnie poziom skurczu $S = 2,0 \div 2,5\%$. Ślimaki do elastomerów sieciujących, takich jak guma, posiadają specjalną konstrukcję skutecznie uniemożliwiającą cofnięcie stopu z formy oraz dokładne oczyszczanie resztek tworzywa ze stożkowej końcówki. Dlatego podczas wtrysku mieszanek gumowych zwykle nie stosuje się poduszki reszkowej. Po uwzględnieniu stanu wtryskarki oraz innych czynników, praktyczny dobór wymaganej objętości uplastyczniania określa zależność:

$$V_u = V_w (a + 1) \quad (3)$$

gdzie: V_u – pojemność uplastyczniania,

V_w – pojemność wtrysku,

$a = 0,025 \div 0,035$ – współczynnik doświadczalny, uwzględniający skurcz i inne czynniki.

Pojemność wtrysku V_w , będącą objętością gniazd i kanałów doprowadzających tworzywo, można ustalić na podstawie modelu 3D, korzystając z oprogramowania Inventor. W przypadku poszukiwania odpowiedniego modelu analitycznego wtryskiwanego tworzywa drogą numerycznej symulacji odwrotnej, konieczne jest pobranie z pulpitu sterującego pracą wtryskarki rzeczywistej wartości pojemności uplastyczniania V_u . Wówczas błąd obliczeniowy będzie najmniejszy. Drogę dozowania (plastyfikacji) S_{pl} , czyli składową szybkiego przemieszczenia się ślimaka podczas wtrysku oraz wolnego podczas fazy docisku, można wyznaczyć, stosując zależność [4, 14]:

$$S_{pl} = \frac{4 V_u}{\pi D^2} \quad (4)$$

gdzie: D – średnica ślimaka,

S_{pl} – droga dozowania,

V_u – pojemność uplastyczniania.

Dobór właściwej pozycji ślimaka rozpoczynającej proces wtrysku należy do jednych z najbardziej odpowiedzialnych zagadnień. Przyjęta zbyt duża droga dozowania skutkuje powstaniem błędu nastawczego w postaci wypływu, natomiast zbyt mała droga dozowania powoduje powstanie niedolewu. Te niedogodności są częściowo niwelowane przez specjalne kanały o przekroju kołowym

w gniazdach formy, które zapobiegają wyciekowi wulkanizatu w płaszczyźnie podziału.

Kolejny parametr nastawczy t_n , czyli nominalny czas wtrysku [4, 12, 14], zwykle jest dobierany na podstawie wykresu reometrycznego Mooneya lub Monsanto, w zależności od tzw. czasu podwulkanizowania mieszanki, określającego przydatność danego tworzywa do technologii wtrysku. Prędkość wtrysku v stanowi kluczowy parametr bezpośrednio wpływający na wypełnienie gniazd. Doświadczalnie stwierdzono, że zbyt mała prędkość wtrysku powoduje zwiększenie oporów przepływu [4, 14]. Wolny przepływ sprawniej transferuje energię cieplną z powierzchni gniazda formy oraz znacznie intensywniej wyzwala mechanizmy sieciowania. Nadmierna prędkość skutkuje powstaniem dużych naprężeń ścinających oraz tarcia w warstwach przypowierzchniowych i w miejscach nieciągłości przekrojów [14]. Efektem nadmiernej wartości prędkości wtrysku może być możliwość powstania niedolewu lub innych wad wypraski, spowodowanych lawinowym przebiegiem wulkanizacji. Zatem prędkość wtrysku zależy od stabilności danej mieszanki i stanowi kompromis pomiędzy wartościami parametrów wejściowych. Średnią prędkość wtrysku można wyznaczyć za pomocą zależności:

$$v_{sr} = \frac{S_{pl}}{t_n} \quad (5)$$

Prędkość wtrysku jest uzależniona od właściwości mieszanki i przyjmowana w zakresie $v = 2 \div 10$ mm/s. W praktyce jest ona stopniowana malejąco z uwagi na fakt utrzymania laminarnego przepływu, który gwarantuje również uzyskanie równomiernego poziomu obciążeń formy. Ten pożądany laminarny przepływ wpływa na zmniejszenie możliwości rozszczelnienia formy.

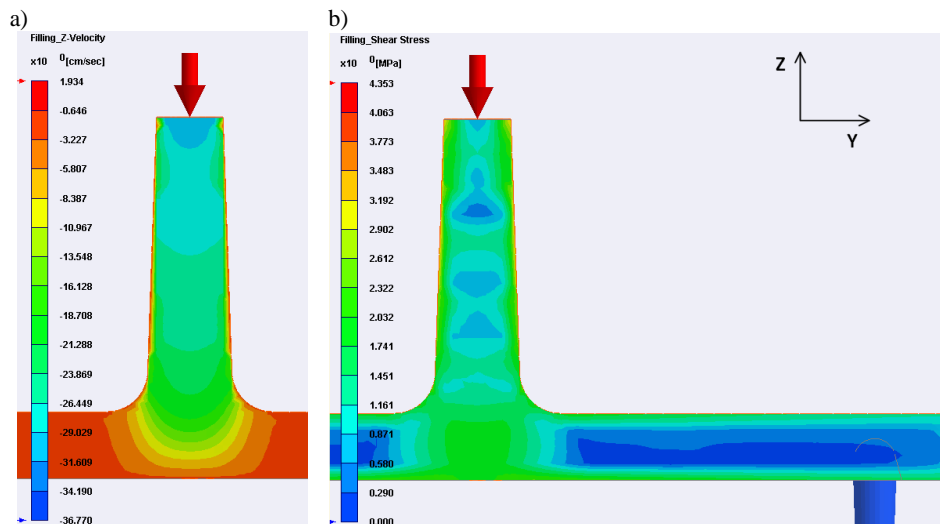
Dobór parametrów nastawczych znacząco wpływa na jakość otrzymywanych wyrobów i ekonomiczność produkcji. Uzyskanie powtarzalności produkcyjnej wymusza często odpowiednią korektę parametrów nastawczych dla konkretnego przypadku. Jest to szczególnie ważne nie tylko w procesie ustalania danych wejściowych dla programów numerycznej symulacji wtrysku, ale także w systemie sterowania pracą wtryskarki.

Opis eksperymentu

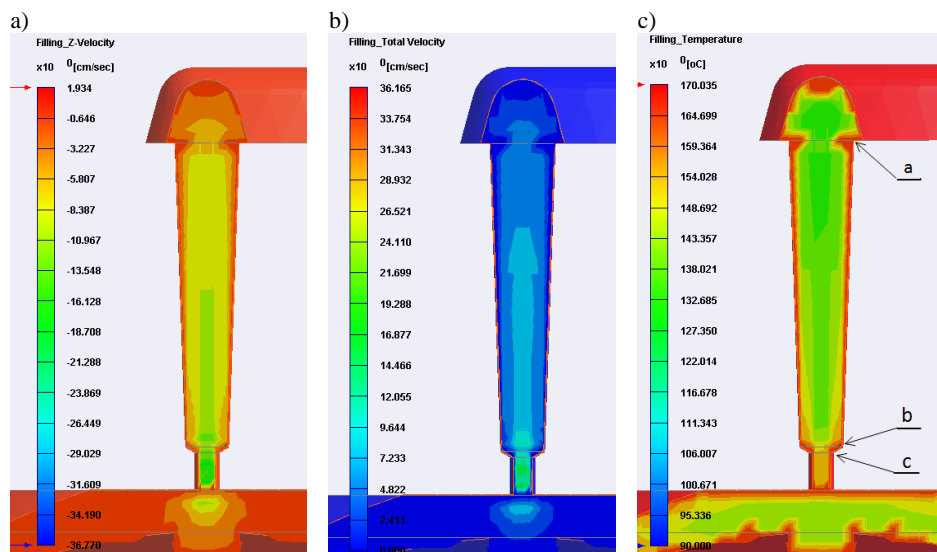
Głównym celem przeprowadzonej analizy było zidentyfikowanie obszarów, w których mogą występować niepożądane zjawiska, oraz ograniczenie ich wpływu. Materiał badań stanowiła mieszanka na bazie kauczuku chloroprenowego CR [2, 7]. Postać modelu materiału do badań [9÷11, 13] ustalono doświadczalnie. Do analizy przygotowano model dyskretny 3D, zawierający około

2.8 mln czworosiennych elementów. W przebiegach symulacji uwzględniono również bezwładność, grawitację oraz mikromechanikę orientacji cząstek na podstawie modelu Halpina-Tsai [10]. Po określeniu odpowiednich wartości nastawczych wykonano symulację numeryczną wtrysku do 16-gniazdowej formy w programie Moldex3D. Analiza ta pozwoliła na określenie miejsca występowania zaburzeń laminarnego przepływu.

Rysunek 1. przedstawia spadek prędkości przepływu we wlewie głównym oraz różnice naprężeń ścinających. Naprężenia te w znacznej mierze powstają jako efekt odbicia płynącego wulkanizatu od dolnej powierzchni formy. Zaobserwowano, że w połączeniu dolnej części wlewu głównego z kanałem doprowadzającym występuje tzw. strefa martwa płynięcia wulkanizatu, w której zanika przepływ tworzywa. W górnej części wlewu głównego jest najniższa temperatura wulkanizatu, więc reakcja sieciowania przebiega najwolniej. Toteż praktyczną wizualną kontrolę poprawności procesu wulkanizacji wykonuje się po uprzednim odcięciu około 20 mm od górnej powierzchni wlewu głównego. Sprawdzanie to odbywa się co kilka cykli po ustaleniu powtarzalności produkcyjnej. W toku prowadzonych symulacji numerycznych, przy zastosowaniu programu Moldex3D określono poziom naprężeń ścinających w kanale zasilającym w końcowej fazie wypełnienia, w wyniku przecięcia płaszczyzną wzdłużną YZ. We wspomnianej martwej strefie wystąpiła kumulacja naprężeń. Pojawienie się tych naprężeń w fazie wtryskiwania może być powodem wyzwolenia mechanizmu sieciowania, co objawia się gwałtownym wzrostem lepkości przepływającego wulkanizatu. Powyżej tej strefy wystąpiła nieciągłość rozkładu naprężeń ścinających (rys. 1b).



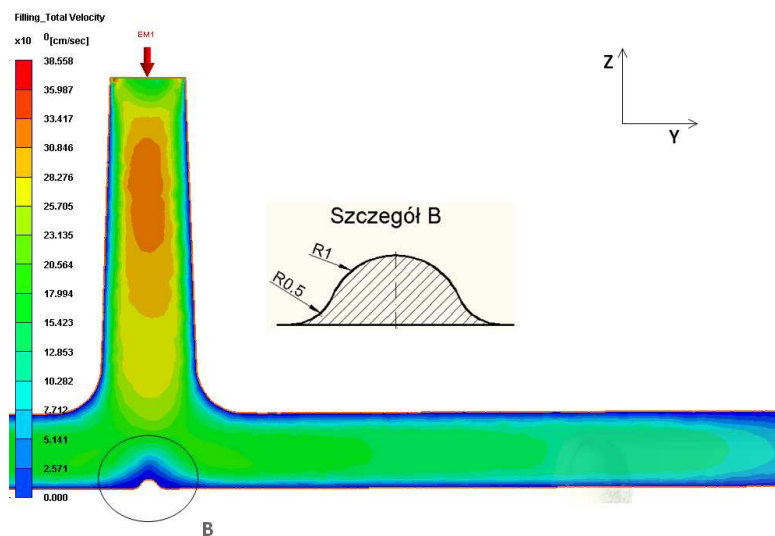
Rys. 1. Rozkład prędkości (a) oraz naprężeń ścinających (b) w przekroju układu wlewowego
Fig. 1. Distribution of velocity (a) and shear stresses (b) in intersection of gating system



Rys. 2. Rozkłady prędkości pionowej (a), prędkości wypełnienia (b) oraz rozkład temperatury (c)
 Fig. 2. Distribution of vertical velocity (a), injection velocity (b) and temperature (c)

Z rozkładów prędkości przepływu wulkanizatu w przewężce, uzyskanych podczas symulacji procesu wtrysku (rys. 2a oraz 2b), wynika, że prędkość ta ulega 10-krotnemu zwiększeniu. W tym samym czasie podnosi się temperatura przepływającego elastomeru o około 30 stopni (rys. 2c), co powoduje poprawę właściwości reologicznych tworzywa, poprzez zmniejszenie jego lepkości. Zaobserwowano również efekty zaburzeń laminarnego przepływu w miejscach nieciągłości przekrojów. Zaburzenia te objawiają się wzrostem temperatury w przekrojach krytycznych. Na podstawie analizy rozkładu szybkości ścinania można wysnuć wniosek, że występuje tu zjawisko znacznego hamowania warstw przyściennych, w efekcie czego napierające warstwy, trąc o siebie, powodują wzrost temperatury.

W celu poprawienia warunków przepływu zaproponowano rozwiązanie polegające na umieszczeniu w układzie zasilania specjalnie zaprojektowanego elementu (rys. 3., szczegół B). W formie rzeczywistej wspomniany element powinien być umieszczony na powierzchni płyty przesuwanej centralnie pod wlewem głównym. Zastosowana modyfikacja kanału doprowadzającego miała na celu poprawienie warunków laminarnego przepływu. Zabieg ten znacząco wyrównał prędkość płynięcia w tym układzie (rys. 3.). Dzięki zastosowaniu tej modyfikacji uzyskano zmniejszenie naprężeń ścinających we wlewie głównym i kanale zasilającym oraz zmniejszenie prędkości ścinania w przewężce do 140 s^{-1} . Operacja ta pozwoliła również zmniejszyć spadki prędkości w rozpatrywanym przekroju oraz poprawić rozkład temperatury.



Rys. 3. Rozkład prędkości wypełnienia

Fig. 3. Injection velocity distribution

Omówione badania prowadzono pod kątem uzyskania poprawnej jakości wypełnienia gniazd. Dzięki zastosowanej modyfikacji układu zasilania uzyskano zmniejszenie czasu wypełnienia. Odnotowano również redukcję poziomu obciążeń formy. To zaproponowane proste rozwiązanie nie stanowi żadnego problemu ekonomicznego ani technologicznego, nie wpływa również na koszty formy. Prowadzone numeryczne analizy wtrysku elastomeru CR pozwoliły na pokazanie zjawisk, jakie towarzyszą temu procesowi. Wskazano strefy newralgiczne oraz zaproponowano rozwiązania poprawiające przepływ w układzie zasilania. W efekcie tych zmian uzyskano pożądany laminarny przepływ w układzie zasilania formy.

Podsumowanie

Przeprowadzona symulacja numeryczna wtrysku mieszanki CR dostarczyła szeregu interesujących spostrzeżeń, które mogą znacznie ułatwić przygotowanie procesu wtrysku. Rekomendowany zakres stosowania prędkości wtrysku wynosi $v = 2 \div 10$ mm/s. Do wyznaczania odpowiedniej pozycji ślimaka, umożliwiającej właściwe wypełnienie gniazd, zaproponowano zależność (4).

W celu uzyskania laminarnego przepływu zaleca się przyjmowanie początku drugiego stopnia prędkości ślimaka, odpowiadającego nieco większej pojemności wypełnienia. Dla pierwszego stopnia prędkości ślimaka występuje największy poziom oporów przepływu w układzie zasilania formy i dyszy wtry-

skarki. Przemieszczenie się ślimaka dla ostatniego stopnia powinno być jak najkrótsze.

W przewężce zaobserwowano przyrost temperatury o 30 stopni oraz 10-krotne zwiększenie prędkości przepływającego wulkanizatu. Zidentyfikowana geometria martwej strefy płynięcia została zastąpiona odpowiednio dobranym profilem umieszczonym w dolnej płycie formy. Rozwiązanie to pozwoliło uzyskać laminarny przepływ w układzie zasilania. Wprowadzenie modyfikacji konstrukcji pozwoliło uzyskać równomierny przepływ. Dzięki temu zmniejszył się poziom naprężeń ścinających podczas przepływu wulkanizatu. Działania te pozwoliły skrócić czas wypełnienia formy oraz zmniejszyć jej obciążenie. Ogół tych dokonań pozwala zwiększyć szczelność formy, co wpływa na jakość wyprasek oraz ekonomiczność prowadzonego procesu.

Literatura

- [1] Cadmould Rubber, User's Manuals, Simcon.
- [2] De Sadhan K., White J.R.: Rubber Technologist's Handbook Rapra Technology Limited, UK. Przekład: Poradnik technologa gumy, Instytut Przemysłu Gumowego STOMIL, Piastów 2003.
- [3] Heneczkowski M., Oleksy M., Wojturska J.: Technologia przetwórstwa tworzyw sztucznych z przykładami ćwiczeń laboratoryjnych, OW PRz, Rzeszów 1999.
- [4] Johannaber F.: Wtryskarki. Poradnik użytkownika, Plastech, Warszawa 2000.
- [5] Kallien L.: Optimalization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts with 3D Simulation, Sigma Engineering GmbH, Aachen 2004.
- [6] Koorevar A.: Symulation technology, The Sampre Conference, Paris 2002.
- [7] Koorevar A.: Fast, Accurate, Reliable 3D Reactive RTM Simulation. <http://www.polyworx.com>.
- [8] Kwiecień J.: Siła zamykania formy – trudności związane z określeniem potrzebnej wartości, <http://doradztwotechniczne.webpark.pl/sila.htm>
- [9] Łokieć A.: Symulacje procesu wtrysku w oparciu o program Cadmould. www.mesco.com.pl.
- [10] Moldex3D – nowy produkt do symulacji wtrysku tworzyw sztucznych. GMSys-tem, Mechanik, 4/2006.
- [11] Pękała M., Radkowski S.: Gumowe elementy sprężyste, PWN, Warszawa 1989.
- [12] Smorawiński A.: Wtrysk elastomerów, Plastech, Warszawa 2001.
- [13] Wingard C.: Aging study of neoprene FB uncured rubber in support an obsolescence issue for EPDM rubber insulation used in the Reusable Solid Rocket Motor of the Space Shuttle, *Thermochimica Acta*, 357-358 (2000), 30-312.
- [14] Zawistowski H., S. Zięba.: Ustawianie procesu wtrysku, Plastech, Warszawa 2003.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008/2010 jako projekt badawczy N503 147934

THE ANALYSIS OF CHOSEN PHENOMENA APPEARANCE IN GATING SYSTEM OF MOULDS TO RUBBER

In the article it has been carried out the identification of the regions in which appears undesirable phenomenon during the injection of elastomers. Their meaning has been characterized and the solution to eliminate their effects has been suggested. Moreover the chosen adjustable parameters were described, they considerably make the preparation of reactive injection easier. The numerical process of dissertation was conducted in Moldex3D program. It was carried out on the basis of Cross-Castro-Macosco kinetic-reactive model material that had been prepared in the previous process. The course of the chloroprene CR compound was conducted on basis of Kamal-Sourour-Ryan combined crosslinking model.

Keywords: rubber, simulation of injection, injection velocity, Moldex3D code

Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.