

Symulacja numeryczna formowania wtryskowego elastomerów z zastosowaniem programu Moldex3D na przykładzie kauczuku chloroprenowego

Jan Ziobro*

W artykule przedstawiono symulację numeryczną formowania wtryskowego mieszanki kauczuku chloroprenowego do 16-gniazdowej formy z zastosowaniem aplikacji Moldex3D. W badaniach zastosowano modele reaktywne Cross-Castro-Macosko i Kamala-Souroura-Ryana. W tym celu utworzono odpowiednią bazę materiałową z zastosowaniem metody symulacji odwrotnej. Polega ona na pobraniu niezbędnych danych z wtryskarki do programu i cyklicznym wykonywaniu symulacji, aż do osiągnięcia porównywalnych wyników. Dokonano również charakterystyki oprogramowań stosowanych do symulacji procesu wtrysku. Zaprezentowano równania opisujące różne modele obliczeniowe. Przedstawiono zalecenia do przeprowadzania symulacji numerycznych oraz utworzenia bazy materiałowej.

Słowa kluczowe: symulacja formowania wtryskowego, mieszanka kauczukowa, model materiałowy, Moldex3D

The numerical simulation of elastomer injection moulding by Moldex3D software on the example basis of the chloroprene rubber

In the article was presented the numerical simulation of the chloroprene rubber compound injection moulding to 16th-mould cavities by apply Moldex3D software application. In the researches were applied reactive models: Cross-Castro-Macosko and Kamal-Sourour-Ryan. In this goal an appropriate material base has been created by applying a reverse simulation method. It relies on taking the essential data from an injection machine to program and carrying out the cyclically simulations until achievements of comparable results. It has been also made the characterization of applied softwares to simulation of injection process. There was also presented the equation describing different computational model. The recommends to carry out numeric simulation and creation of base material have also been shown.

Key words: simulated injection moulding, rubber compound, material model, Moldex3D

1. Wstęp

Dążenie firm do ciągłego obniżania kosztów produkcji przy jednoczesnym dostosowywaniu się do wzrastających wymagań jakościowych oraz konieczność zminimalizowania czasu wprowadzania wyrobu

* PWSZ Sanok, ul. Mickiewicza 16
jziobro@pwsz-sanok.edu.pl

na rynek wymuszają stosowanie coraz nowszych i bardziej zaawansowanych technologii. Cele te mogą zostać osiągnięte dzięki intensywnemu rozwojowi systemów i aplikacji komputerowych. Stanowi to ogromne wyzwanie dla projektantów, szczególnie w przypadku projektowania procesu technologicznego i form do wytwarzania skomplikowanych wyrobów.

W tym właśnie celu powstały aplikacje CAE biorące pod uwagę różne kryteria prawidłowości tego procesu, np. dokładność wypełnienia gniazd formy, zachowanie

wanie tolerancji wymiarów gotowych detali i in. Systemy te wyposażone są również w moduły optymalizujące, co pozwala zminimalizować „dopakowanie” gniazda, a tym samym uniknąć jego „przeładowania”. Jedną z głównych zalet stosowania symulacji jest możliwość zrównoważenia geometrii układu wtryskowego. Symulacje numeryczne pozwalają równocześnie zminimalizować (a w niektórych przypadkach wyeliminować) niepożądane zjawiska występujące w procesie wtrysku, między innymi takie jak: widoczne linie łączenia strug, porowacenia wyrobów powstałego w wyniku zamknięcia powietrza, nierównomierną jakość powierzchni wyrobów. W wielu tych programach znajdują się funkcje zarządzające, które umożliwiają wykonanie kosztorysu danego wyrobu.

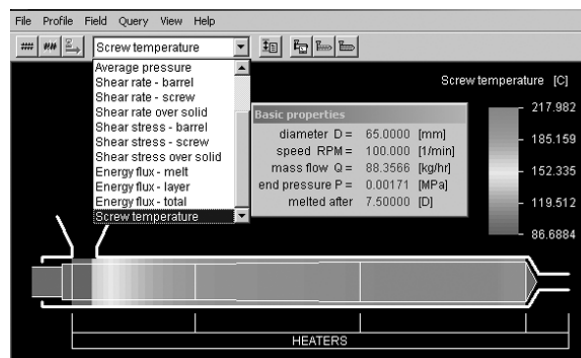
Zagadnienie numerycznej symulacji formowania wtryskowego można rozwiązać używając między innymi takich oprogramowań, jak:

1. Autodesk Moldflow (Insight, Adviser) – oba moduły tego programu mają uniwersalny charakter zastosowania. Jest to narzędzie powszechnie znane i stosowane. Główną zaletą jest łatwość obsługi oraz wyposażona potężna baza materiałowa. Do symulacji wtrysku mieszanek gumowych wykorzystywane są modele i bazy typu reaktywnego, które znajdują się w module Insight.
2. Cadmould – program ma również budowę modułową oraz uniwersalne zastosowanie. Do analizy mieszanek gumowych wykorzystuje także modele reaktywne, znajdujące się w części Cadmould Rubber.
3. Moldex3D (Project, Designer)
4. Polyflow – bardzo zaawansowany system. Umożliwia modelowanie wszelkich zjawisk i stanów związanych z przepływami o dowolnej geometrii i stopniu złożoności (mieszanie, powlekanie, formowanie, rozszerzanie itp.).
5. Cadgum, Fillcalc – wysoce specjalistyczne aplikacje o charakterze rozwojowym, które umożliwiają pełną realizację zagadnień związanych z sieciowaniem elastomerów.
6. Inne, np. 3D-Sigma, I-Deas, C-Flow, Pam-RTM, McKam-II, Tmconcept.

Spośród wielu narzędzi przeznaczonych do symulacji wtrysku polimerów na uwagę zasługuje nowoczesne oprogramowanie Moldex3D tajwańskiej firmy Core-Tech. Cechuje się ono nowatorskimi rozwiązaniami w zakresie obsługi, przeprowadzania różnorodnych analiz (wypełniania, docisku /dopakowania/, skurczu, sieciowania i innych), jak i prezentacji wyników tychże analiz. Program ma zaimplementowany system wymiany plików kompatybilny z: STL, IGS, STEP, Rhino, Cosmos, I-Deas, FEMAP, Pro/Engineers, Ansys, Abaqus, Patran, Nastran, LS-Dyna, VisiSage. Poza możliwością translacji geometrii 3D Moldex umożliwia tworzenie i edycję geometrii formy oraz jej układów: wtryskowego, gniazda formującego, chłodzenia (dotyczy tzw. wtrysku bezodpadowego mieszanek gumowych) [1, 2]. Dużą zaletą systemu jest inteligentny proces automatycznej dyskretyzacji¹ modelu geometrycznego oraz

zagęszczania siatki w miejscach nieciągłości przekroju. Wykorzystywana jest w tym celu metoda objętościowej skończonej VFM oraz objętościowej siatki przyściennej BLM, co zapewnia możliwość badania wyrobów mających skomplikowane kształty. Moldex3D, oprócz możliwości importu obiektów siatkowych z innych aplikacji, tworzy system własnej kombinacji siatki, składającej się z elementów typu: tetra, hexa/voxel, prism, pyramid. Użytkownik posiada możliwość wyboru pięciu poziomów automatycznego generowania zagęszczenia siatki. Aplikacja pozwala analizować wtrysk polimerów: termoplastycznych, termoutwardzalnych (RIM) i wieloskładnikowych. Wewnętrzna baza materiałowa zawiera ok. 5,5 tys. różnego rodzaju tworzyw, w tym materiały na formy oraz czynniki termostatuujące. Istotnym mankamentem tego programu jest brak bazy materiałowej mieszanek gumowych.

Wysoka poprawność analiz osiągnięta jest również dzięki zdolności wykorzystania wbudowanej bazy maszyn zawierającej ok. 1000 wtryskarek czołowych producentów [1, 2]. Możliwość stosowania modułu adaptacyjnych ustawień procesu uplastyczniania odbywającego się w danej maszynie gwarantuje uzyskanie warunków rzeczywistych o szczególnie wysokiej zgodności dla elastomerów termoplastycznych. Przykładowy ekran różnorodności funkcji plastyfikacji prezentuje rys. 1.



Rys. 1. Widok różnorodności funkcji plastyfikacji
Fig. 1. The view of diversities of plasticization functions

Za pomocą tego programu można analizować przemieszczanie się frontu tworzywa z efektami zmian temperatury i spadku ciśnienia wywołanego takimi zjawiskami, jak: tarcie, warstwowe zaburzenie struktury, wpływ grawitacji oraz orientacji makrocząsteczek [1, 2]. Moldex3D, dzięki zdolności wykorzystywania modeli mikromechaniki (standardowego i Halpin-Tsai), pozwala również uwzględnić zorientowanie tychże makrocząsteczek w warstwach przypowierzchniowych, zarówno w wyrobie, jak i w układzie wtryskowym.

¹ Dyskretyzacja – działanie polegające na podziale obszaru na elementy skończone 2D (np. trójkąty, prostokąty, itd.) lub 3D (np. czworościany, graniastosłupy, prostopadłościąny itd.), za pomocą których możliwe jest przeprowadzenie zaawansowanych matematycznie obliczeń.

Faza docisku (dopakowania) opiera się na metodzie zmiany objętości właściwej v , którą można przedstawić na wykresie pvt i dostarcza informacji dotyczących zmian gęstości wyrobu oraz występującego skurczu. Znajomość tej ostatniej właściwości może posłużyć do korekty parametrów nastawczych w celu zminimalizowania skurczu, co może być szczególnie ważne dla wyprasek jakościowych. Wyniki analizy chłodzenia dostarczają informacji o intensywności wymiany ciepła między wtryskiwanym polimerem, gniazdem formy i rdzeniem oraz o nierównomierności jego rozkładu. Pozwala to na określenie odpowiedniej geometrii układu chłodzenia, unikającego miejsc nadmiernej kumulacji ciepła, efektem którego jest skrócenie czasu cyklu. Otrzymywane rezultaty odkształceń w węźle gniazdo/rdzeń/wyrób mają na celu zwiększenie dokładności wyrobu poprzez wykorzystanie możliwości minimalizacji czynników, takich jak: naprężenia szczątkowe, anizotropia, orientacja makrocząsteczek, kształt gniazda i czas chłodzenia [1, 2].

Program jest wyposażony w mechanizm wyświetlania wyników analiz, również częściowego, co pozwala szybciej wychwycić ewentualne błędy i je skorygować. Dodatkowym atutem jest możliwość prowadzenia obliczeń równoległych, co znacząco zwiększa wydajność systemu.

Używając numerycznych technik symulacji wtrysku polimerów można precyzyjniej modelować i analizować wyrób pod kątem poprawności i jakości oraz ekonomiczności, wydatnie redukując przy tym liczbę nieudanych prób występujących podczas tradycyjnego projektowania.

2. Wybrane parametry nastawcze

Prędkość wtrysku

Układ wtryskowy tworzy system kanałów, którymi uplastyczniona mieszanka gumowa płynie z dyszy wtryskarki do gniazd formy. Są to: kanał wlewowy – stożkowy przy wtrysku pionowym, kanały doprowadzające do gniazd, przewężka – zwężone ujście kanału do gniazda formy. Na płynięcie mieszanki w kanałach bezpośrednio wpływa kształt i wielkość ich przekroju, długość, zmiany kierunku strumienia mieszanki, kształt rozgałęzień i gładkość powierzchni kanału. Istotną rolę spełnia przewężka, w której zwiększa się prędkość masowa strumienia mieszanki, a wskutek zwiększonego tarcia podwyższa się jej temperatura i zmniejsza lepkość. W rezultacie uzyskuje się doskonałe napełnienie gniazd formy [3, 4].

Aby nie dopuścić do nadmiernych zmian lepkości mieszanki zaleca się stopniowanie szybkości wtrysku tak, aby utrzymać możliwie jej laminarny przepływ. Prędkość wtrysku v uzależniona jest od właściwości danej mieszanki i praktycznie przyjmowana jest ze stopniowaniem malejącym w zakresie $v = 2 \div 10$ mm/s.

Wartości te ustalane są indywidualnie dla każdego wyrobu. Liczba stopni prędkości nie powinna przekraczać 10. Dla większości wyrobów w formowaniu wtryskowym mieszanek kauczukowych zaleca się przyjmować liczbę stopni prędkości $i = 3 \div 6$. Większą liczbę stopni prędkości poleca się przyjmować dla większych pojemności wtrysku. W przypadku metody ciągłego sterowania profilem prędkości zupełnie wystarczającym jest przyjęcie prędkości v_{max} i v_{min} .

Czas przebiegu składowych procesów (uplastycznienia, wtrysku, docisku, wulkanizacji itp.) z reguły ustalany jest na podstawie praktyki przetwórczej i wykresu reometrycznego. Aby uzyskać powtarzalność wyrobu przy zapewnieniu odpowiedniej jego jakości zwykle zachodzi konieczność odpowiedniego sterowania parametrami nastawczymi. W większości przypadków to zagadnienie jest realizowane podczas testowania formy.

Doświadczalnie stwierdzono, że nieznaczne niedowulkanizowanie sprzyja osiągnięciu najlepszej odporności na rozdzieranie. Najlepszą wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na ścieranie i starzenie wyrób gumowy osiąga w optimum wulkanizacji. Niewielkie przewulkanizowanie gumy sprzyja osiągnięciu najlepszej elastyczności, odporności na pęcznienie i najmniejszego odkształcenia trwałego [5].

Gęstość elastomeru

Do przeprowadzenia symulacji konieczna jest znajomość gęstości elastomeru, zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w fazie płynięcia. Pomiaru gęstości mieszanki gumowej można dokonać:

- za pomocą wagi hydrostatycznej (np. Mohra, Jolly'ego),
- piknometrem,
- przez zanurzenie w cieczy o znanej gęstości.

Do oznaczania gęstości gumy metodą hydrostatyczną wykorzystuje się poniższy wzór (1):

$$\rho = \frac{m}{m - m_1 + m_2} \cdot \rho_c \quad (1)$$

gdzie:

- ρ – gęstość mieszanki gumowej, w g/cm^3
- ρ_c – gęstość cieczy, w g/cm^3
- m – masa próbki mieszanki gumowej zważonej w powietrzu, w g
- m_1 – wskazanie wagi przy całkowitym zanurzeniu w cieczy próbki i częściowym szalki, w g
- m_2 – wskazanie wagi przy zanurzeniu w cieczy szalki, w g

Szczegółowe warunki przeprowadzania tych badań precyzuje norma PN /C-04215.

Oceny gęstości elastomeru w temperaturze wtryskiwania ρ_w można dokonać za pomocą zależności (2):

$$\rho_w = \frac{\rho_{T_0}}{1 + \beta_v (T_w - T_0)} \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_{T_0} – gęstość w temperaturze odniesienia $T_0 = 298$ K

β_v – współczynnik rozszerzalności objętościowej, 1/K

T_w – temperatura wtryskiwania, w K

Niekiedy równanie (6) bywa wykorzystywane do wyznaczenia temperatury zaszklania T_g .

Znajomość obu gęstości materiału jest niezmiernie istotna w procesie formowania wtryskowego. Stanowią one również wartości nastawcze w oprogramowaniach przeznaczonych do symulacji i analiz wtrysku, między innymi w Moldeksie 3D.

Charakterystyczne temperatury

Kolejne wymagane dane wejściowe określają charakterystyczne temperatury (T_w , T), które można ustalić na podstawie termogramu DSC, co przedstawia rys. 2. Wartość temperatury T_m określa się jako pik endotermiczny. Temperatury $T_{m_{min}}$ oraz $T_{m_{max}}$ można wyznaczyć również na podstawie tej części termogramu, dokonując odpowiedniej interpolacji na krzywej DSC (rys. 2a). W procesie formowania wtryskowego bardzo ważną jest temperatura wtryskiwania T_w . Z praktycznego punktu widzenia zaleca się przyjmować możliwie najwyższą, ale bezpieczną temperaturę wtrysku bez podwulkanizacji. Na podstawie praktyki przemysłowej ustalono, że odpowiednie przeskalowanie danych otrzymanych z urządzenia DSC umożliwia pokazanie zakresu występowania poszukiwanych temperatur T_w . Dla badanej mieszanki chloroprenowej wykonano badanie DSC w zakresie 25÷200°C. Na przeskalowanym termogramie (rys. 2b) naniesiono charakterystyczne temperatury: $T_{w_{min}}$, T_w , $T_{w_{max}}$. Ich wartości ustalono na podstawie praktyki przetwórczej. Relację pomiędzy rozważanymi temperaturami T_m i T_w można określić przybliżoną zależnością (3):

$$T_w = T_m + a \quad (3)$$

gdzie:

a – stała przesunięcia temperatury,

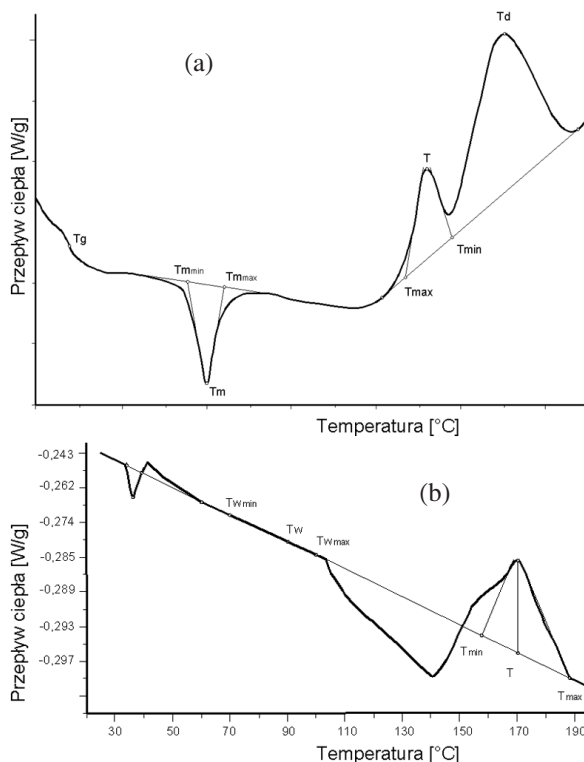
T_m – temperatura płynięcia,

T_w – temperatura wtryskiwania

Zalecaną temperaturę powierzeni formy T określa pierwszy pik egzotermiczny (po temperaturze T_w). Wykonanie odpowiedniej interpolacji na części tej krzywej DSC umożliwia odczytanie wymaganych temperatur powierzeni formy T_{min} i T_{max} .

Temperaturę degradacji T_d na termogramie DSC można określić na podstawie kolejnego piku egzotermicznego występującego za temperaturą T (rys. 2a). Znajomość T_d może służyć do celów porównawczych podczas wykonywania numerycznych symulacji wypełnień.

Dla badanej mieszanki CR określono charakterystyczne temperatury procesu, które stanowią konieczne



Rys. 2. Termogram DSC dla: (a) Neoprenu FB (szybkość ogrzewania 10°C/min) wg [6], (b) mieszanki chloroprenowej (szybkość ogrzewania 10°C/min)

Fig. 2. DSC termogram for: (a) Neoprene FB (heating scan at 10°C/min) by [6], (b) chloroprene compound (heating scan at 10°C/min)

warunki wejściowe do numerycznej symulacji wypełnień. Zbiór tych zdefiniowanych warunków prezentuje tabela. 1. Alternatywnie temperatury te można ustalić z dużym przybliżeniem na podstawie praktyki przemysłowej.

Tabela. 1. Widok zdefiniowanych temperatur procesu
Table. 1. The view of defined process of temperatures

Charakterystyczne temperatury, °C		
Minimalna temperatura wtryskiwania	$T_{w_{min}}$	70
Normalna temperatura wtryskiwania	T_w	90
Maksymalna temperatura wtryskiwania	$T_{w_{max}}$	100
Minimalna temperatura powierzchni formy	T_{min}	160
Normalna temperatura powierzchni formy	T	170
Maksymalna temperatura powierzchni formy	T_{max}	190

Dobór odpowiednich 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 podczas ustalania danych wejściowych dla programów numerycznej symulacji wtrysku, ale także w systemie sterowania pracą wtryskarki.

Modele materiałowe

W symulowaniu wtrysku polimerów kluczowe znaczenie ma właściwa postać modelu materiałowego. W systemie Moldex3D analiza i opis zjawisk zachodzących podczas procesu wtrysku odbywa się dzięki zdolności wykorzystywaniu różnorodnych modeli materiałowych, wśród których najistotniejsze znaczenie mają:

• *Modele lepkości:*

- newtonowski,
- Power-Law (wykładniczy),
- logarytmiczno-wielomianowy,
- Carreau,
- Cross,
- Leonowa,
- Harschel-Bulkey,

• *Modele temperatury:*

- wykładniczy: $f(T) = e^{-b(T-T_r)}$ (4)

- Arrheniusa: $f(T) = e^{\frac{A}{T} - \frac{A}{T_r}}$ (5)

- William-Landel-Ferry (WLF): $f(T) = 10^{\frac{C_1(T-T_g) - C_2(T-T_g)}{C_2 + T - T_g}}$ (6)

• *Modele kinetyczno-reaktywne:*

- newtonowski: $\eta(T) = \eta_0(T)$ (7)

- Castro-Macosko:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \eta_0 \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{c_1 + c_2 \alpha} \\ \eta_0 = A \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \\ T_b = \frac{E_\eta}{R} \end{array} \right. \quad (8)$$

- Power-Law-Castro-Macosko:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{\tau_{yo} \exp\left(\frac{T_y}{T}\right)}{\dot{\gamma}} + K(\dot{\gamma})^{n-1} \\ K = K_o \exp\left(\frac{-C_A(T - T_g)}{C_B + (T - T_g)}\right) \\ K_o = K_\infty \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{c_1 + c_2 \alpha} \end{array} \right. \quad (9)$$

- Cross-Castro-Macosko:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{\eta_0 \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{c_1 + c_2 \alpha}}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \\ \eta_0 = A \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \\ T_b = \frac{E_\eta}{R} \end{array} \right. \quad (10)$$

- Herschel-Bulkely:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{\tau_{yo} \exp\left(\frac{T_y}{T}\right)}{\dot{\gamma}} + K(\dot{\gamma})^{n-1} \\ K = K_o \exp\left(\frac{-C_A(T - T_g)}{C_B + (T - T_g)}\right) \\ K_o = K_\infty \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{c_1 + c_2 \alpha} \end{array} \right. \quad (11)$$

- Kamala-Souroura-Ryana:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\alpha}{dt} = (K_a + K_b \alpha^m) (1 - \alpha)^n \\ K_a = A \exp\left(\frac{-T_a}{T}\right) \\ K_b = B \exp\left(\frac{-T_b}{T}\right) \\ T_a = \frac{E_a}{R} \\ T_b = \frac{E_b}{R} \end{array} \right. \quad (12)$$

gdzie:

- A, B, C, K, a, b, c, d, n, α_g , τ^* – stałe materiałowe
- E – energia aktywacji, kJ/mol
- R – uniwersalna stała gazowa, 8,314 J/(kmol K)
- T – temperatura bezwzględna
- α – współczynnik sieciowania, 0 ÷ 1
- η_0 – lepkość zerowa, Pa·s
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, 1/s
- τ – czas, s

Dobór określonego modelu analitycznego jest ściśle uzależniony od rodzaju badanego polimeru, potrzeby uzyskania określonej dokładności oraz dostępności odpowiedniej aparatury badawczej. Należy podkreślić, że większość tych opisów została ustalona na podstawie przybliżonych metod doświadczalnych [7 ÷ 10].

3. Opis eksperymentu – analiza RIM

Oprogramowania do symulacji wtrysku tworzyw sztucznych nie zawsze są odpowiednie do symulowania bardziej złożonego procesu, jaki ma miejsce podczas wtrysku elastomerów sieciujących, takich jak mieszanki gumowe. Złożoność procesu powodują występujące zjawiska, m. in.: sieciowanie, podwulkanizacja, utrata właściwości sprężystych, przewulkanizowanie, niedowulkanizowanie, utrata połysku powierzchni wypraski, pękanie i przywieranie do powierzchni formy itp.

Celem badania było utworzenie bazy materiałowej i wykonanie symulacji numerycznej wypełnienia formy wtryskowej z jej wykorzystaniem na przykładzie 16-gniazdowej formy z zastosowaniem aplikacji Moldex3D. Realizacja tego celu wymagała poszukiwań

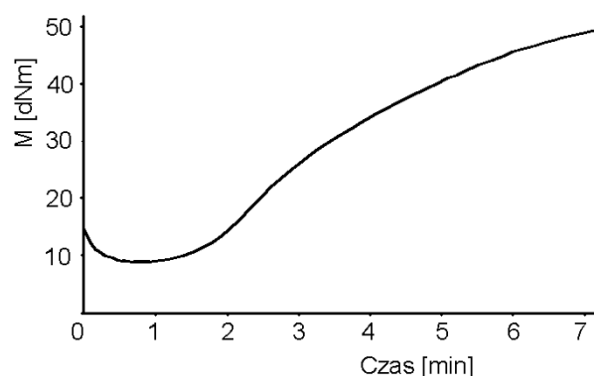
właściwego modelu materiałowego metodą symulacji odwrotnej, polegającej na pobraniu danych ustawczych z wtryskarki i porównaniu ich z wynikami cykli symulacyjnych.

Materiał badań stanowiła mieszanka kauczuku chloroprenowego (CR) o gęstości $1,34 \text{ g/cm}^3$ i twardości 50 Sh A z napelniaczem sadzowym w ilości 27%, przygotowana i zhomogenizowana za pomocą walcarki. Kontrola temperatury powierzchni formy co kilka cykli zapewniała jednorodność warunków. W celu łatwiejszego usuwania wyrobów powierzchnię form pokrywano środkiem rozdzialającym Marbocote. Z pulpitu sterującego pracą wtryskarki pobierano następujące dane: profil szybkości wtrysku, fazy docisku, temperaturę powierzchni formy, parametry układu uplastyczniania (temperatura plastyfikacji, stopień sprężania, średnica ślimaka i jego prędkość obrotową), siłę zwarcia formy, czas cyklu itp. [10, 11], za pomocą których wykonano symulację numeryczną w środowisku Moldex3D. Niektóre właściwości mieszanki i jej wulkanizatu pobrano z laboratorium, a mianowicie: gęstość, maksymalną wytrzymałość, twardość, M300 i wydłużenie przy zerwaniu, wykres reometryczny (czasy wulkanizacji i podwulkanizacji, optimum wulkanizacji, szybkość wulkanizacji) (rys. 3.), zawartość napelniacza sadzowego i skurcz mieszanki.

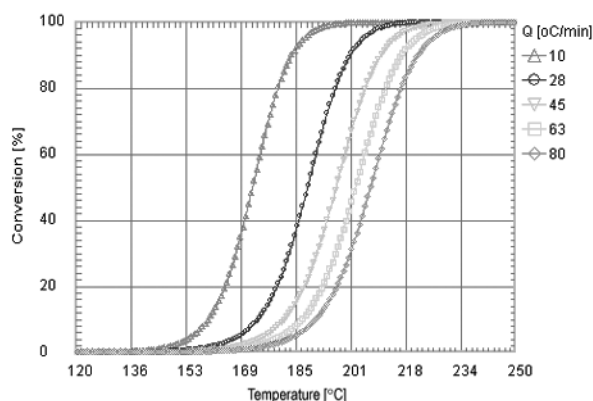
Wykonany model geometryczny układu wtryskowego wyeksportowano do programu Moldex3D, stosując plik wymiany STL o wysokim stopniu gęstości. Następnie utworzono model dyskretny 3D z miejscowymi zagęszczeniami poziomu 4. Model ten zawierał ok. 1, 23 mln elementów typu kombinowanego.

W przebiegach symulacji uwzględniono również bezwładność, grawitację oraz mikromechanikę orientacji makrocząsteczek modelu Halpin-Tsai.

Po wprowadzeniu stałych wartości nastawczych [12 ÷ 23], dokonywano cyklicznych zmian we właściwościach reologicznych w przyjętym modelu materiałowym Cross-Castro-Macosko (10), aż do uzyskania rezultatów wypełnienia gniazd formy porównywalnych z wynikami uzyskanymi na wtryskarce. W tym celu zmieniano wartości współczynników równania Cross-

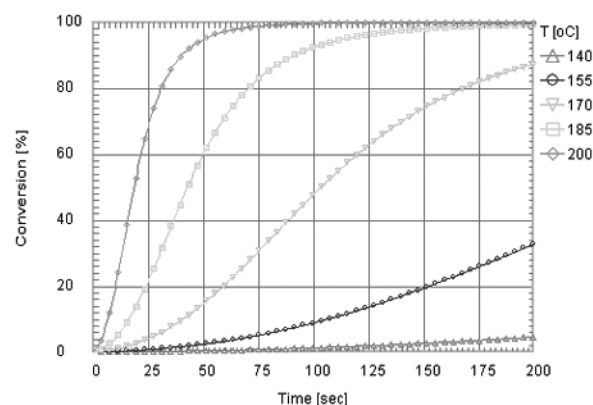


Rys. 3. Krzywa reometryczna mieszanki chloroprenowej w temperaturze 170°C
Fig. 3. Rheometer curve of chloroprene compound at 170°C



Rys. 4. Krzywe sieciowania wulkanizatu CR w funkcji temperatury dla charakterystycznych stałych szybkości ogrzewania

Fig. 4. Cure curves of the CR vulcanizate with a temperature function for the characteristic constant heating scan

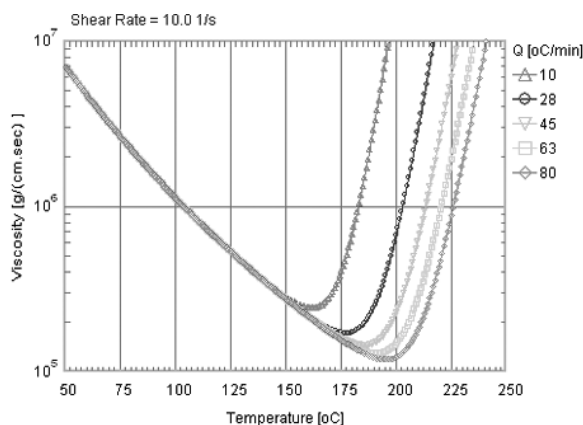


Rys. 5. Krzywe sieciowania wulkanizatu CR w funkcji czasu dla charakterystycznych stałych temperatur

Fig. 5. Cure curves of the CR vulcanizate with time function for the characteristic constant temperatures

-Castro-Macosko (10), porównując wartości ciśnień na wtryskarce z wynikami otrzymywanych symulacji. Proces ten odbywał się w cyklu iteracyjnym aż do osiągnięcia wartości odchyłki (błędu) poniżej 5%. W wyniku tych działań pozyskano szereg wykresów, przy pomocy których dokonano analizy wypełnień. Przedstawione wykresy (rys. 4 ÷ 10) są integralną częścią programu Moldex3D i prezentują wyniki tych badań.

Graficzną formę zapisu przebiegu sieciowania opartą na kombinowanym równaniu Kamala-Souroura-Ryana (12) prezentuje powyższy wykres (rys. 4). Krzywe sieciowania wyznaczone są dla stałych charakterystycznych wartości szybkości ogrzewania Q (10, 28, 45, 63, 80°C/min). Na podstawie rys. 4 można stwierdzić, że zwiększenie szybkości nagrzewania odzwierciedlane jest przesunięciem charakterystycznej krzywej w kierunku wyższych temperatur (tzw. superpozycja temperaturowa). Przebiegi tych wykresów (rys. 4 i 5) dowodzą, że temperatura w znacznym stopniu wpływa na dynamikę wulkanizacji. Na podstawie

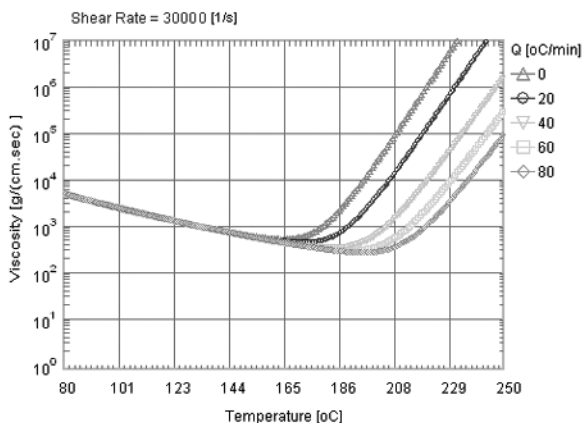


Rys. 6. Krzywe lepkości mieszanki CR w funkcji temperatury dla stałej szybkości ścinania i charakterystycznych stałych szybkości ogrzewania

Fig. 6. Viscosity curves of the CR compound with a temperature function for a constant shear rate and the characteristic constant of heating scan

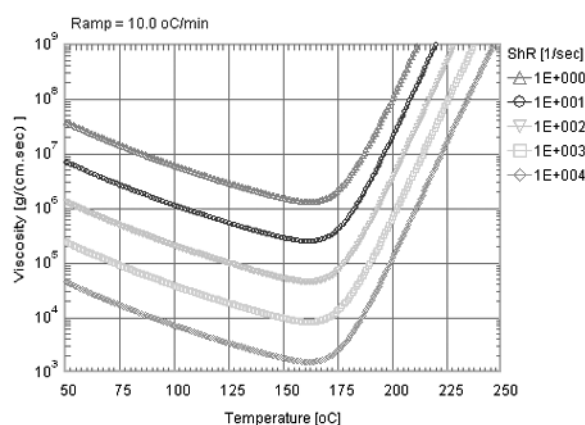
przebiegu tych krzywych sieciowania można wysnuć wnioski, że przekroczenie temperatury 170°C w czasie dłuższym niż 25 s może skutkować niemożliwością poprawnego wypełnienia gniazd z powodu przedwczesnego usieciowania, co przedstawia rys. 5.

Efekty wpływu temperatury na przebieg lepkości badanego elastomeru dla stałych szybkości ścinania 10 1/s i 30 000 1/s przedstawiają rys. 6 i 7. Te charakterystyczne krzywe są wyznaczone jednocześnie dla stałych szybkości ogrzewania. Z przedstawionych rozkładów lepkości (rys. 6 i 7) wynika, że również wzrost szybkość ścinania w znacznej mierze wpływa na zmniejszenie się tej lepkości. Temperaturę minimalnej lepkości (ok. 165°C) odnotowano dla stałej szybkości ogrzewania 10°C/min (rys. 6 i 7). Mieszanka osiągnęła temperaturę lepkości minimalnej ok. 195°C dla szybkości ogrzewania 80°C/min.



Rys. 7. Krzywe lepkości mieszanki CR w funkcji temperatury dla stałej szybkości ścinania i charakterystycznych stałych szybkości ogrzewania

Fig. 7. Viscosity curves of the CR compound with temperature function for constant shear rate and the characteristic constant of heating scan

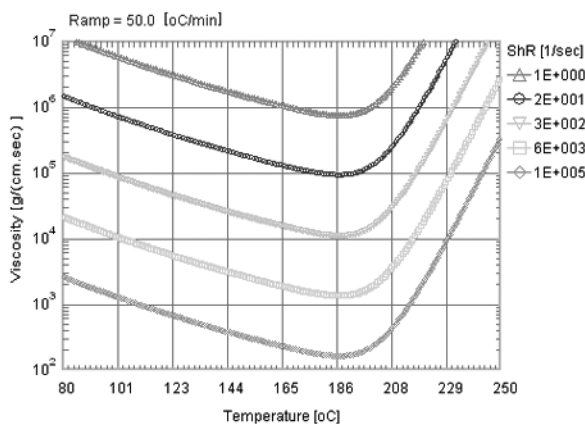


Rys. 8. Krzywe lepkości mieszanki CR w funkcji temperatury dla stałej szybkości ogrzewania i charakterystycznych stałych szybkości ścinania

Fig. 8. Viscosity curves of the CR compound with a temperature function for constant heating scan and the characteristic constant of shear rate

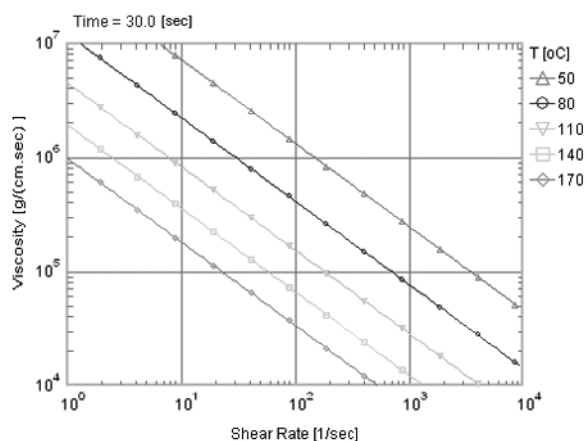
Praktycznym aspektem wypełnia gniazd z przedziałem temperatury bliskiej lepkości minimalnej może być znaczna poprawa jakości wtryskiwanych wyrobów (dokładniejsze odwzorowanie kształtu, równomierna duża gładkość powierzchni, zmniejszenie możliwości zamknięcia powietrza, poprawa połączeń strug płynącego wulkanizatu, zmniejszenie widoczności linii łączeń itp.). Ta mniejsza lepkość również wpływa na minimalizację obciążeń formy, a tym samym zwiększa się jej szczelność, co objawia się zmniejszeniem powstających wplywek.

Wykresy (rys. 8 i 9) demonstrują przebieg krzywych lepkości w zależności od przyrostu temperatury przy stałych szybkościach ogrzewania (10 i 50°C/min) i stałych charakterystycznych szybkościach ścinania. Z przedstawianych na rys. 8 i 9 krzywych wynika, że zwiększenie szybkości ogrzewania spowodowało przemieszczenie się położenia temperatury odpowiadającej lepkości minimalnej z ok. 165°C w kierunku wyższej



Rys. 9. Krzywe lepkości mieszanki CR w funkcji temperatury dla stałej szybkości ogrzewania i charakterystycznych stałych szybkości ścinania

Fig. 9. Viscosity curves of the CR compound with temperature function for constant heating scan and the characteristic constant of shear rate



Rys. 10. Wykresy logarytmiczne lepkości elastomeru CR w funkcji szybkości ścinania dla stałego czasu i charakterystycznych stałych temperatur
 Fig. 10. The viscosity of logarithmic charts of the CR elastomer with function shear rate for constant time and the characteristic constant temperature

temperatury, tj. do ok. 190°C. Równocześnie zmniejszyła się lepkość, a szybkość ścinania wzrosła tylko w górnym zakresie temperatury (rys. 9). Na podstawie tych wykresów (rys. 8 i 9) można wysnuć wniosek, że w tej temperaturze gniazda formy powinny już zakończyć się wypełnianiem. Dalszy wzrost temperatury skutkuje gwałtownym zwiększeniem lepkości w wyniku lawinowego przebiegu procesu wulkanizacji. Warto nadmienić, że zbyt ni wzrost szybkości ścinania może powodować podwulkanizowanie mieszanki, a nawet degradację płynącego tworzywa uniemożliwiając wypełnienie gniazd.

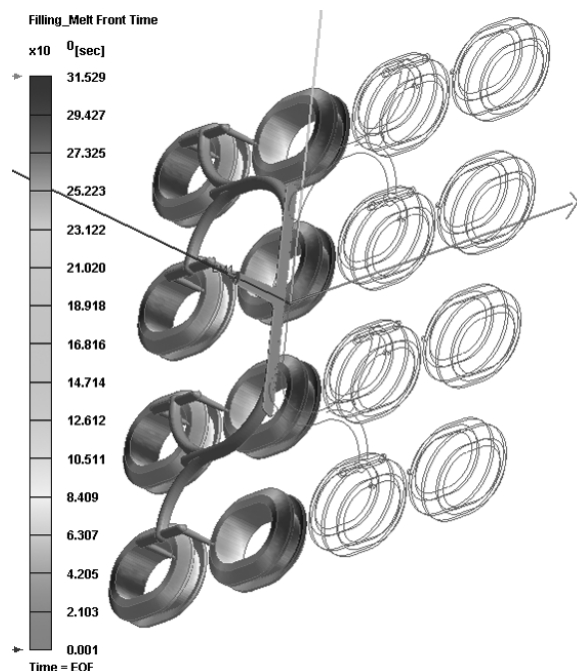
Powyższy podwójnie logarytmiczny wykres (rys. 10) przedstawia krzywe przebiegu lepkości w funkcji szybkości ścinania dla charakterystycznych stałych temperatur. Rozpatrywane krzywe wykonano dla stałego czasu 30 s. Ten wykres właściwości reologicznych określa zakres przydatności danej mieszanki kauczukowej do przetwórstwa wtryskowego.

Tak ustalony model jest podstawą do dalszych działań.

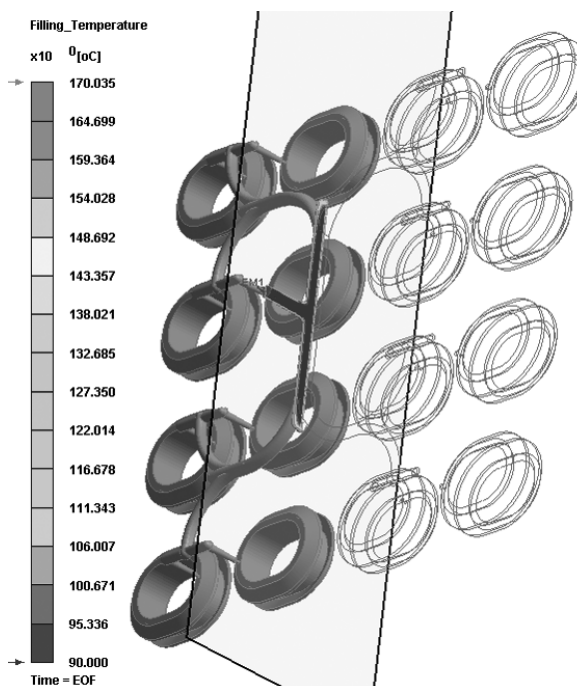
Metoda ta pozwala na znaczne zaoszczędzenie czasu i środków finansowych przeznaczonych na każdorazowe uzyskiwanie danych materiałowych za pomocą badań laboratoryjnych. Nie może ona w pełni zastępować metody laboratoryjnej, ale w praktyce inżynierskiej jest zupełnie wystarczająca.

W toku prowadzonych symulacji numerycznych w programie Moldex3D i z zastosowaniem wyżej opisanego modelu materiałowego otrzymano szereg wykresów. Jednym z nich jest rozkład wypełnienia w czasie (rys. 11). Na tym rysunku pokazano wygląd kanału zasilającego w wyniku przecięcia płaszczyzną wzdłużną YZ. Wysoce pożądanym jest, aby rozkład wypełnienia był jednakowy we wszystkich gniazdach, co zapewnia równomierny poziom obciążenia formy.

W elastomerach sieciujących, takich jak guma, może niekiedy dojść do degradacji wtryskiwanej mie-



Rys. 11. Rozkład czasu wypełnienia
 Fig. 11. The Time distribution of filling



Rys. 12. Rozkład temperatury wypełnienia
 Fig. 12. The temperature distribution of filling

szanki. Zjawisko to zachodzi głównie wskutek przekroczenia maksymalnej dopuszczalnej temperatury wtrysku i lawinowym wyzwoleniu mechanizmów destrukcji mieszanki. Temperatura degradacji uzależniona jest również od szybkości ścinania. Dlatego dla tych wyrobów konieczne jest wykonanie analizy sprawdzającej rozkład temperatury wypełnienia. Dla opisywanej mieszanki CR temperaturę degradacji ustalono na ok. 230°C. Rys. 12 przedstawia rozkład temperatury wy-

pełnień. Również i w tym wypadku rozkłady te powinny być we wszystkich gniazdach formy jednakowe, co zapewni równomierny przebieg sieciowania, tym samym pozwoli uzyskać jednorodne właściwości wyrobu gumowego, takie jak twardość i elastyczność. Pokazany przekrój (rys. 12) przedstawia rozkład temperatury w kanale zasilającym. Zwykle stan wulkanizacji badany jest w górnym zakresie wlewka stożkowego, z uwagi na fakt najwolniejszego przebiegu reakcji sieciowania. Na podstawie wyglądu tej części można ocenić również wielkość występującego skurczu.

4. Podsumowanie

Pozyskanie odpowiedniego modelu materiałowego w warunkach laboratoryjnych jest czasochłonne i wiąże się z koniecznością stosowania skomplikowanej i bardzo kosztownej aparatury. Zaproponowana metoda pozwala na stworzenie właściwego modelu materiałowego znacznie tańszym sposobem. Jest ona mniej dokładna, ale w praktyce inżynierskiej zupełnie wystarczająca.

Numeryczne symulacje wypełnienia form wtryskowych, szczególnie wielogniazdowych, mają na celu uzyskanie równomierności wypełnień uwzględniając czas, temperaturę i ciśnienie we wszystkich gniazdach. Osiągnięcie tego celu powoduje zmniejszenie poziomu obciążeń formy ciśnieniem wewnętrznym i siłą zwarcia oraz wpływa bezpośrednio na zmniejszenie możliwości odkształceń newralgicznych elementów formy. Te powstające odkształcenia skutkują pojawianiem się wypływek, co związane jest z koniecznością ich usuwania.

Ważnym zagadnieniem prowadzonej symulacji wtrysku jest przygotowanie modelu dyskretnego stosownie dla danego programu symulacyjnego. Zaleca się dla początkowych cykli symulacji generować model dyskretny o mniejszej liczbie węzłów, co wydatnie przyspieszy proces poszukiwań odpowiedniego materiału. Czas tych poszukiwań uzależniony jest od odpowiedniej mocy obliczeniowej komputera oraz liczby elementów siatki, wg zasady: im większa liczba elementów, tym dłuższy cykl obliczeniowy. Jeśli występują małe promienie zaokrągleń, wówczas konieczne jest rozpoczynanie sekwencyjne dyskretyzacji kolejno od najmniejszych promieni, na płaskich powierzchniach (o ile takie występują) kończąc.

Zaproponowana metoda pozwala na badanie różnych materiałów, nie tylko materiałów elastomero- wych. Badanie to można prowadzić nawet na jednej formie. Aby uzyskać najmniejszy błąd obliczeń zaleca się prowadzić rozważania dla form wielogniazdowych. Zebrane w ten sposób doświadczenie oraz utworzona baza materiałowa może posłużyć w przyszłości do znacznie szybszego i bardziej efektywnego projektowanie nowych form.

Dzięki symulacji numerycznej, sprawdzającej poprawność wypełnienia gniazd, unika się kosztownego testowania formy oraz związanej z tym konieczności

poprawiania jej konstrukcji, co znacząco skraca czas i zmniejsza koszty jej wykonania.

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

Literatura

1. *Moldex3D – nowy produkt do symulacji wtrysku tworzyw sztucznych. GMSys-tem. Mechanik nr 4/2006*
2. *Symulacja wtrysku tworzyw sztucznych. GMSys-tem. Tworzywa P3 06*
3. *Praca zbiorowa Red. Rodzynkiewicz-Rudzińska J.: Guma poradnik inżyniera i technika. WNT Warszawa 1973*
4. *Smorawiński A.: Wtrysk elastomerów. Plastech, Warszawa 2001*
5. *Pękala M., Radkowski S.: Gumowe elementy sprężyste. PWN, Warszawa 1989*
6. *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. <http://www.elevier.com/locate/tea>. *Thermochimica Acta* 357-358 (2000) 30-312*
7. *Malkin A.: Rheology Fundamentals. ChemTec Canada 1994*
8. *Wilczyński K.: Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych. WNT, Warszawa 2001*
9. *Cadmould Rubber. User's Manuals. Simcon*
10. *Łokieć A.: Symulacje procesu wtrysku w oparciu o program Cadmould. www.mesco.com.pl*
11. *Kwiecień J.: Siła zamykania formy – trudności związane z określeniem potrzebnej wartości, 2007 <http://doradztwotechniczne.webpark.pl/sila.htm>*
12. *Johannaber F.: Wtryskarki. Poradnik użytkownika. Plastech 2000*
13. *De K. Sadhan., J. R. White, 2001/2003, Rubber Technologist's Handbook Rapra Technology Limited, UK. Przekład: Poradnik technologa gumy. Instytut Przemysłu Gumowego STOMIL Piastów 2003*
14. *Kallien L.: Optimalization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts with 3D Simulation. Sigma Engineering GmbH, Aachen*
15. *Koorevar A.: Simulation technology. The Sampre 2002 Conference in Paris*
16. *Koorevar A.: Fast, Accurate, Reliable 3D Reactive RTM Simulation. <http://www.polyworx.com>*
17. *Wilkinson R. i inni.: Dziesięć podstawowych problemów występujących w technologii wtrysku. DuPont*
18. *Zawistowski H., Zięba S.: Ustawianie procesu wtrysku. Plastech 2003*
19. *Układy doprowadzające tworzywo, zimno- i goręcokanałowe. <http://www.narzedziownie.pl>*
20. <http://www.matweb.com>
21. <http://www.alpha-technologies.com>
22. <http://www.eng.uc.edu/rgbeaucag/Classes/Analysis/Chapter3.pdf>
23. <http://uni.leartik.com>