

JAN ZIOBRO^{1*)}, ADAM MARCINIEC²⁾

Zastosowanie narzędzi CAx w projektowaniu form wtryskowych^{**)}

Streszczenie — Artykuł ma charakter przekrojowy, omówiono w nim zastosowanie wzajemnie skorelowanych narzędzi CAx [wieloaspektowy termin opisujący zastosowanie ogółu technik inżynierskich i narzędzi komputerowego wspomaganie: projektowania (CAD), analiz (CAE), wytwarzania (CAE), itp.]. Zasadniczą część procesu konstruowania wykonano w parametrycznym programie Inventor. Sprawdzenie poprawności działania formy prowadzono w programie MSC.MARC. Realizację zdolności wypełnienia gniazda formy realizowano w programie Moldflow. Za pomocą tej aplikacji dokonano również oceny wpływu parametrów geometrycznych układu zasilania formy wtryskowej na ciśnienie i siłę zamknięcia. Ogół tych działań przeprowadzono z uwzględnieniem kryterium minimalizacji obciążenia formy. Biorąc pod uwagę wyniki analiz zbudowano ćwiartkowy model geometryczny formy w aplikacji Inventor. Zastosowana metoda analizy sprzężonej w programie MSC.MARC pozwoliła na dokonanie sprawdzenia formy pod względem występujących deformacji oraz związaną z tym możliwość rozszczelnienia układu. Wskazano źródła powstających wycieków oraz występujących niebezpieczeństw. Poprawność działania formy analizowano przede wszystkim pod względem możliwości zakleszczeń występujących w węźle słup-tuleja prowadząca. Na podstawie numerycznych analiz zaproponowano rozwiązanie konstrukcji węzła słup-tuleja, pozwalające na wyeliminowanie tego niepożądanego zjawiska. Wskazano również najbardziej korzystne pasowanie tego węzła oraz jego wymaganą czynną długość styku. Kompletny model geometryczny formy zbudowano w programie Inventor na podstawie modeli wynikających z przeprowadzonych badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: analizy numeryczne, MSC.MARC, Moldflow, formy wtryskowe, guma, układ przepływowy.

APPLICATION OF CAx TOOLS IN THE DESIGN OF INJECTION MOLDS

Summary — In this review paper, the application of correlated CAx tools — a multi-aspect terminology used to describe the application of general engineering techniques as well as the computer aid tools for design (CAD), analysis (CAE), production (CAE) *etc.* has been presented. The fundamental part of the construction process was performed with the aid of the parametrical program Inventor. The verification of the functionality of the form was performed with the MSC.MARC program. The optimal mold-filling capabilities were determined in the Moldflow program. This program was also used to evaluate the influence of geometric parameters of the gating system of the mold on injection pressure and clamp force. Most of these studies were done with special consideration the criterion of minimizing the load of the mold. On the basis of the results of the performed analysis, a quarter of the geometric model of the mold was built using Inventor applications. The applied analysis method together with the MSC.MARC program allowed for the testing of the molds in terms of deformation and also permeability resulting from it. The potential sources of flashes and dangers were also indicated. The effectiveness of mold activity was analyzed taking into consideration, first and foremost, the possibility of jams occurring in the leader pin-guide bushing. On the basis of numerical analysis a construction solution for the leader pin-guide bushing has been proposed which would eliminate this most undesired phenomenon. The most suitable position as well as the required active contact length of this kinematic pair was shown. The complete geometric model of the mold was constructed according to Inventor program on the basis of the models obtained from the performed simulation studies.

Keywords: numerical analysis, MSC.MARC, Moldflow, rubber, gating system, injection mold.

¹⁾ Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, ul. Mickiewicza 21, 38-500 Sanok.

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów.

*) Autor do korespondencji; e-mail: jziobro@pwsz-sanok.edu.pl

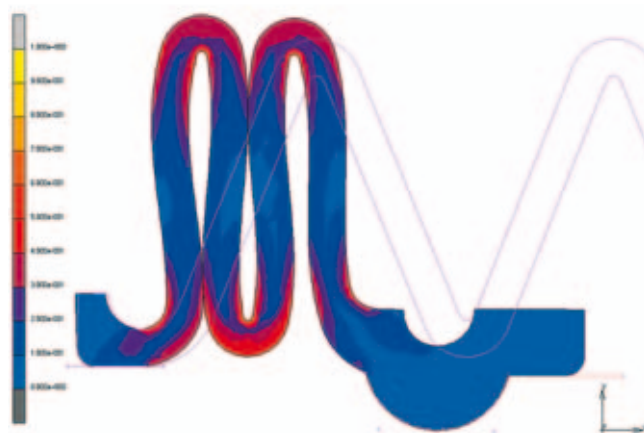
***) Artykuł stanowi rozszerzenie wystąpienia konferencyjnego: XIV Profesorskie Warsztaty Naukowe „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Krasiczyn 2009.

Zagadnienie projektowania form wtryskowych do tworzyw polimerowych jest zaliczane do jednego z trudniejszych zadań konstruktorskich, a projektowanie form do przetwórstwa elastomerów sieciujących (takich jak, np. guma) jest zdecydowanie najtrudniejsze. Tę większą złożoność powodują zjawiska występujące w tym procesie, m.in. sieciowanie i podwulkanizacja, a także agresywne środowisko wulkanizatu oraz zmienne w czasie warunki procesu [1, 2]. Warunki te określają przede wszystkim przebiegi ciśnienia i temperatury, obciążenia zewnętrzne, jak również tarcie i zjawiska kontaktowe [3]. Te wymienione powyżej czynniki są względem siebie zależne a o sukcesie w projektowaniu form wtryskowych decyduje znajomość ich wzajemnego oddziaływania oraz umiejętność efektywnego wykorzystania odpowiednich nowoczesnych narzędzi.

Właściwe na drodze projektowania form wtryskowych do wytwarzania gumowych osłon harmonijkowych (mieszek) jest uprzednio wykonanie numerycznych obliczeń sprawdzających konstrukcję takich wyprasek. Wspomniane osłony są bardzo ważnymi elementami pracującymi w trudnych warunkach zarówno pogodowych, jak i trakcyjnych. Ich uszkodzenie może powodować bardzo kosztowe w skutkach zatarcie przegubu napędowego. Mieszki muszą również wykazywać odporność na pęknięcie i na oddziaływanie znajdującego się w ich wnętrzu środka smarowego. W warunkach eksploatacji mieszki wykonuje ciągłe zmiany przemieszczeń, poddany jest również działaniu zmiennego momentu obrotowego. W ruchu obrotowym masa osłony wraz z wypełniającą ją od wewnątrz smarem są źródłem powstawania siły odśrodkowej. Ponadto osłony harmonijkowe muszą być odpowiednio szczelne, gdyż dostająca się woda zmieszana z pyłem i piaskiem mogłaby spowodować szybkie zatarcie przegubu napędowego. Sztywne zamocowanie oraz szczelność mieszka wraz ze współpracującymi czopami zapewnia się dzięki użyciu specjalnych metalowych opasek. Do oceny poprawności konstrukcji tak istotnych elementów muszą być zatem stosowane analizy numeryczne MES. Głównym celem prowadzonych symulacji była ocena zachowania się wypraski w złożonych stanach obciążeń (rozciągających, ściskających z jednoczesnym działaniem sił odśrodkowych) wywołanych ruchem obrotowym, z uwzględnieniem warunku bezpiecznego kontaktu na powierzchniach bocznych. Strefami szczególnie niebezpiecznymi są miejsca o małych promieniach zaokrągleń, w których wypraska może ulec popękaniu, oraz strefy sztywnego mocowania mieszka z czopami [4, 5].

OBSZARY ZASTOSOWANIA NOWOCZESNYCH NARZĘDZI CAx

Model geometryczny do analizy skonstruowano w programie Inventor i wyeksportowano do programu MSC.MARC. Narzędzie to jest polecane szczególnie do rozwiązywania zagadnień, gdzie nie zachodzi liniowa



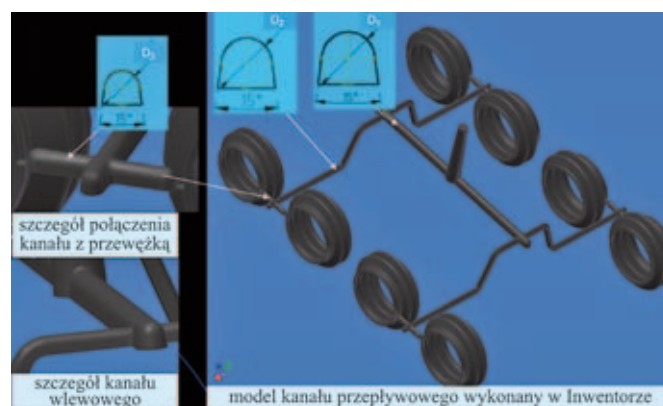
Rys. 1. Stan naprężeń ściskających w wyprasce
Fig. 1. Compressive stress conditions of mold

relacja naprężenie-odkształcenie. Omawianą aplikację stosuje się przede wszystkim do badania elementów cechujących się bardzo dużymi odkształceniami. W analizie wykorzystano dwuparametrowe równanie Mooney'a-Rivlin'a [4, 5]. Przykładowy efekt wpływu złożonego stanu obciążeń na naprężenie ściskające mieszka przedstawia rys. 1. Stan naprężeń w wyprasce osiąga wartości znacznie poniżej przyjętej dla tego przypadku dopuszczalnej granicy $\sigma_{dop} = 3$ MPa (wartość ustalona na podstawie wyników prób rozciągania).

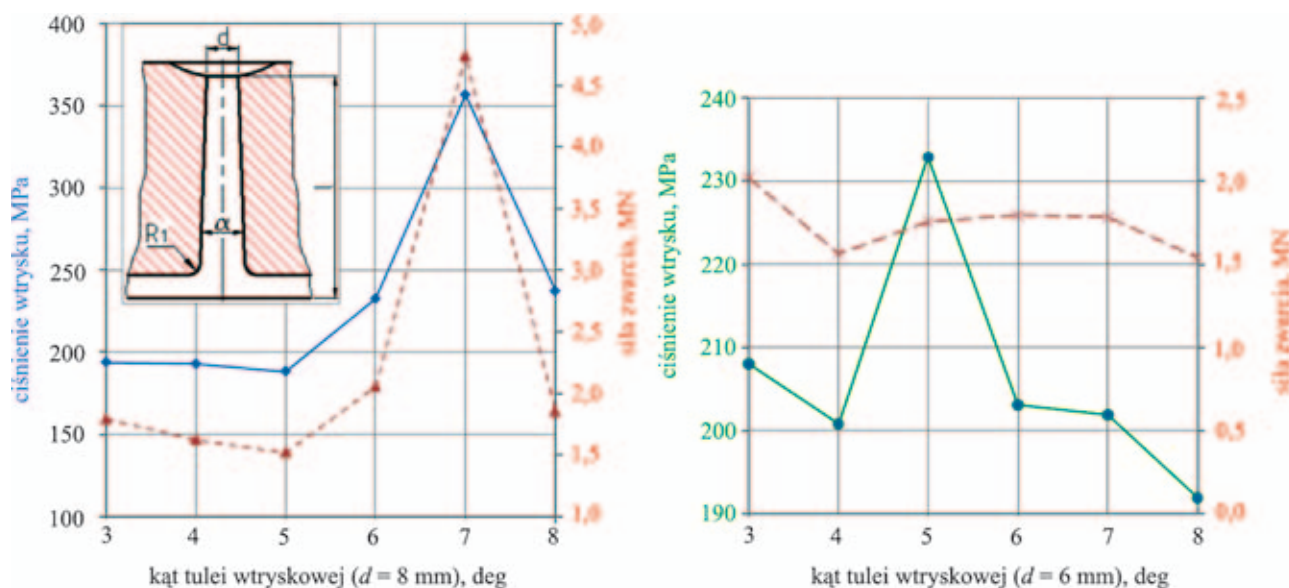
Decydującym czynnikiem gwarantującym uzyskanie wiarygodnych symulacji są właściwe dane dotyczące cech konkretnego materiału. System MSC.MARC umożliwia wykorzystanie doświadczalnych danych materiałowych do opisu rozpatrywanych zjawisk i stanów [5].

Spośród wielu znanych oprogramowań CAD wybrano parametryczny system Inventor, za pomocą którego zaprojektowano układ przepływowy formy wtryskowej (rys. 2). W tej aplikacji dokonano również eksportu pliku powłokowego stl o wysokim stopniu gęstości. Plik ten będzie podstawą dalszych analiz [2–4, 6].

Stosując aplikację Moldflow analizowano zdolność do wypełnienia tworzywem gniazd formujących uprzednio zaprojektowanego układu. W tym celu



Rys. 2. Model układu przepływowego formy wtryskowej
Fig. 2. Flow system model of the injection mold



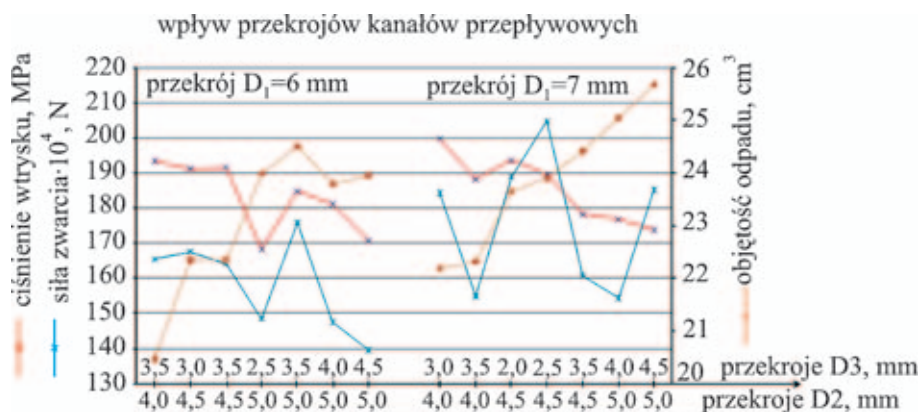
Rys. 3. Przebieg zmian ciśnienia wtrysku i siły zwarcia podzespołów formy w zależności od zmian średnicy i kąta tulei wtryskowej
Fig. 3. Profile of the injection pressure changes and mold clamping force of mold parts depending on the changes in diameter and angle of the injection pins

wcześniej przygotowano odpowiedni matematyczny model materiałowy [7]. Wymagane współczynniki modelu ustalono doświadczalnie wykorzystując metodę symulacji odwrotnej [6, 8]. W systemie Moldflow prowadzono również poszukiwania pod kątem najbardziej korzystnej budowy układu przepływowego, uwzględniającej kryterium minimalizacji obciążeń formy. Obszar poszukiwań obejmował wpływ takich cech, jak: budowa głównego kanału wlewowego/tuleja wtryskowa (o wymiarach d i α), stopniowanie przekrojów kanałów przepływowych (o wymiarach D_1 , D_2 , D_3), kształt geometryczny przewężki oraz występujące promienie zaokrągleń w układzie.

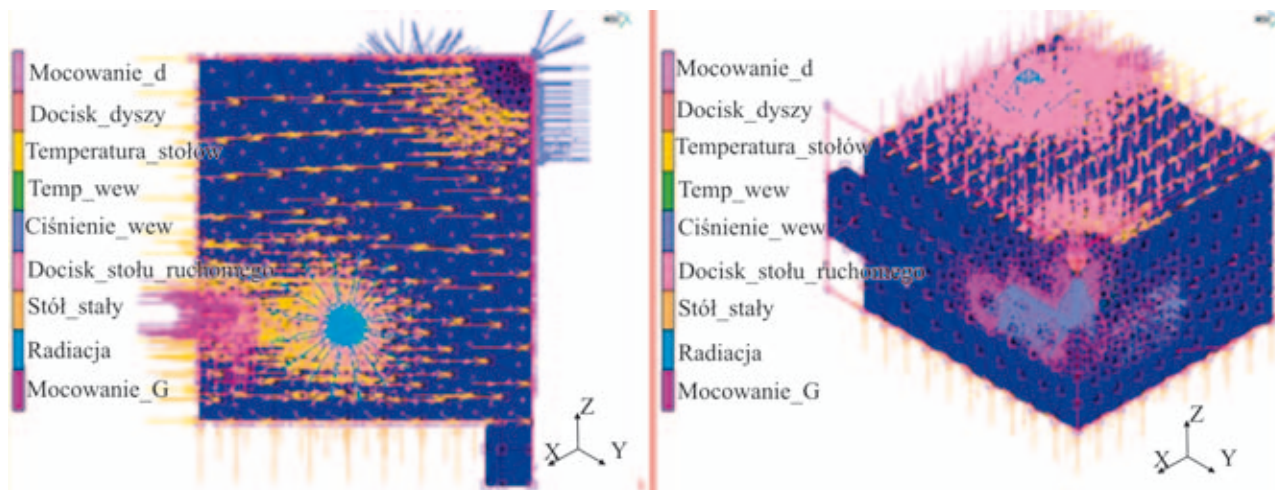
WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Przeprowadzone dla głównego kanału przepływowego symulacje numeryczne pozwoliły na określenie wpły-

wu zmiany jego średnicy i kąta na ciśnienie wtrysku i siłę zwarcia podzespołów formy. Wyniki badań dla wartości średnic $d = 8$ mm i $d = 6$ mm ilustruje rys. 3. Rysunek 4 przedstawia wpływ stopniowania przekrojów kanałów przepływowych na ciśnienie wtrysku i siłę zwarcia formy, uwzględniający warunek 100 % wypełnienia gniazd formujących i minimalizacji objętości układu przepływowego, której wielkość decyduje o ilości odpadu poprodukcyjnego. Minimalizacja tego odpadu na etapie projektowania formy bezpośrednio zmniejsza zużycie materiału oraz wydatnie ogranicza ilość utylizowanego tworzywa, a tym samym powoduje spadek kosztów produkcji. Uwzględniono również kryterium minimalizacji obciążenia formy ciśnieniem wtrysku i siłą zwarcia podzespołów formy [5, 9, 10]. Dobór odpowiednich przekrojów poprzecznych kanałów układu przepływowego należy do jednych z najtrudniejszych zagadnień występujących w procesie projektowania form do elastomerów.



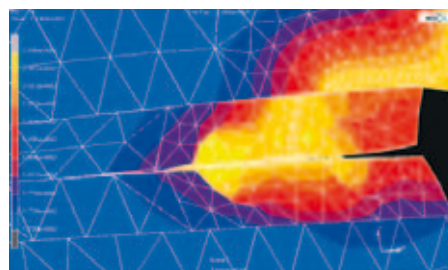
Rys. 4. Zmiana obciążeń formy oraz objętości odpadu w zależności od wymiarów przekrojów kanałów przepływowych
Fig. 4. Changes in the load of the mold and waste volume depending on the cross-sectional dimensions of the flow channel



Rys. 5. Prezentacja czynników zewnętrznych oddziałujących na formę
Fig. 5. External factors affecting the mold

Analizy wypełnienia gniazd formy, przeprowadzone w środowisku Moldflow dostarczyły wymaganych danych w postaci przebiegów czasowych temperatury, ciśnienia i siły zwarcia podzespołów formy [11, 12], wykorzystywanych następnie jako warunki wejściowe analizy MES mającej na celu sprawdzenie w programie MSC.MARC poprawności działania formy. Model geometryczny formy przygotowano w środowisku Inventor. Ze względu na ograniczoną moc obliczeniową komputera modelowano tylko 1/4 formy. W aplikacji MSC.MARC wykorzystano zasadę symetrii w obu wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, umożliwiającą symulację z takim samym efektem, jak w przypadku całej formy. Do przygotowania takiej analizy jest wymagane zdefiniowanie danych wejściowych i czynników oddziałujących na formę. Czynniki zewnętrzne oddziałujące na formę rdzeniową do elastomerów [5, 8, 9] to:

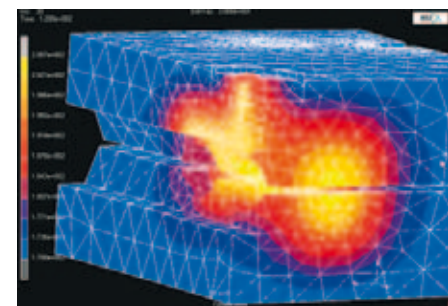
- temperatura stołów wtryskarki: dolnego i górnego (identyfikowane jako: *Temp_stołów*);
- utwierdzenie, będące miejscami mocowania formy śrubami do stołów maszyny (identyfikowane jako: *Mocowanie_d*, *Mocowanie_G*) [8, 12–14];
- obciążenie zewnętrzne, określane jako siła dociskająca: obydwa podzespoły formy – uniemożliwiające rozszczelnienie – (identyfikowane jako: *Docisk_stołu ruchomego*, *Stół stały*) oraz tuleję wtryskową poprzez dyszę wtryskową [8] – zapobiegające wyciekowi tworzywa ciekłego – (identyfikowane jako: *Docisk_dyszy*);
- ciśnienie wewnętrzne wywierane na ścianki kanałów przepływowych i gniazd formujących (identyfikowane, jako: *Ciśnienie_wew*);
- temperatura przepływającego wulkanizatu (identyfikowana jako: *Temp_wew*);
- promieniowanie ciepłe pomiędzy powierzchniami słup-tuleja prowadząca (identyfikowane jako: *Radiacja*) [5];
- tarcie typu *slip-stick* w węźle słup-tuleja prowadząca [4–6];



Rys. 6. Deformacja części gniazd formujących
Fig. 6. Deformation of parts of the mold cavity



Rys. 7. Deformacja węzła słup-tuleja prowadząca
Fig. 7. Deformation of the leader pin-guide bushing



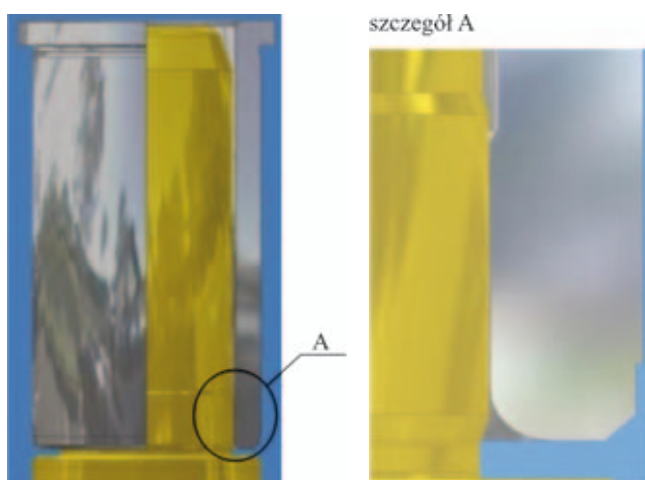
Rys. 8. Rozszczelnienie całkowite formy
Fig. 8. Complete rupturing of the mold

- właściwości materiału uwzględniające ich zmianę w funkcji temperatury i czasu [8].

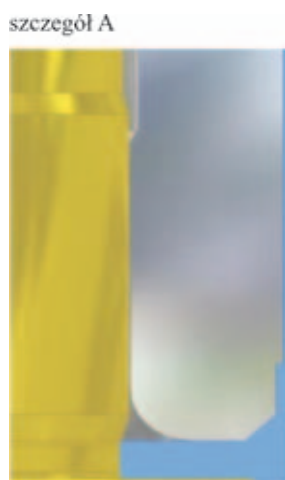
Widoki modelu (rys. 5) prezentują zidentyfikowane czynniki zewnętrzne pozwalające na określenie poprawności założonych warunków i wymaganych zależności.

W wyniku zastosowania analizy sprzężonej w systemie MSC.MARC można dokonać oceny formy pod względem występujących deformacji (rys. 6 i 7) i związanej z tym możliwości rozszczelnienia układu (rys. 8). Częściowe rozszczelnienie formy widoczne na rys. 6 jest głównym źródłem wypływek powstających w płaszczyźnie podziału formy.

Przypadek rozszczelnienia całkowitego (por. rys. 8) może zaistnieć w wyniku nadmiernego wzrostu ciśnienia wewnętrznego tworzywa w stosunku do wzajemnego docisku podzespołów: stałego i ruchomego formy.



Rys. 9. Konstrukcja węzła słup-tuleja prowadząca
Fig. 9. Construction of the leader pin-guide bushing



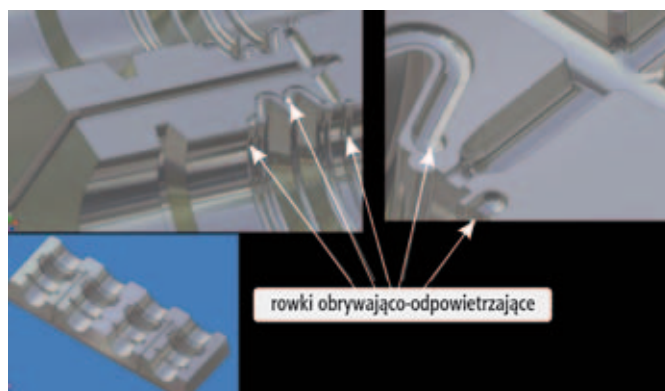
pasowanie
 $\varnothing 32H8^{(+0,04)}$
 $\varnothing 32e6^{(-0,05)}$
czynna długość pary stykowej < 12 mm

Rys. 10. Szczegół konstrukcji węzła słup-tuleja prowadząca
Fig. 10. Details of construction of the leader pin-guide bushing

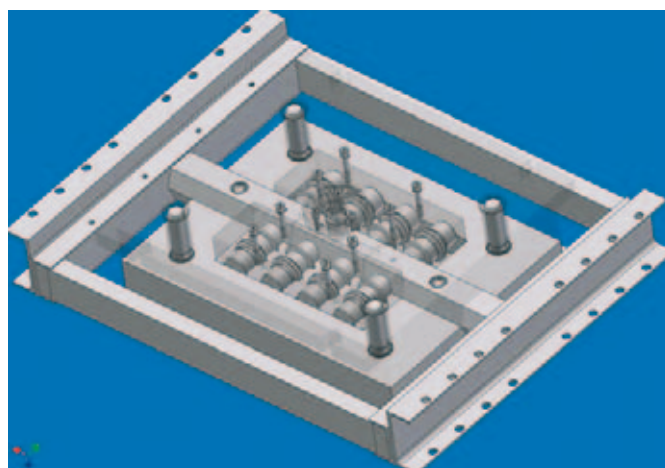
Stan taki jest najgroźniejszym zjawiskiem, gdyż powoduje niekontrolowane wylanie wulkanizatu w płaszczyźnie podziału formy i zalanie stołów wtryskarki, co może być powodem dużych uszkodzeń oraz oparzeń obsługi. Występujące deformacje w węzle słup-tuleja prowadząca (por. rys. 7) mogą być natomiast powodem zakleszczania się formy, co stanowi jeden z najbardziej niebezpiecznych czynników eksploatacyjnych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdza się, że najbardziej korzystne jest rozwiązanie zilustrowane na rys. 9 i 10.

Ze względu na wymienione powyżej problemy oraz zespół warunków eksploatacyjnych niezbędnych do poprawnego działania jest konieczne zaprojektowanie formy zapewniającej stabilność temperatury jej głów-

nych elementów oraz związaną z tym stabilność wymiarową jej najważniejszych węzłów gniazdo-rdzeń i słup-tuleja prowadząca. Proces otwierania formy i usuwania wyprasek z rdzeni powinien również spełniać kryterium łatwości przebiegu. Stabilność termiczną formy osiągnięto dzięki zastosowaniu akumulatora ciepła w postaci opraw o zwiększonej masie i umieszczonych w nich gniazd, w wyniku tego zwiększyła się także sztywność formy i zmniejszyła jej podatność na deformację. W górnych gniazdach zaprojektowano specjalne rowki obrywająco-odpowietrzające w odległości 0,5 mm od krawędzi gniazd, o przekroju kołowym i średnicy 2 mm (rys. 11). Rowki pełnią również funkcję niwelującą możliwe przecieki wulkanizatu w płaszczyźnie podziału formy. Również w górnych gniazdach formy zaprojektowano kanaliki układu przepływowego, w odniesieniu do którego uwzględniono wymienione wcześniej kryterium minimalizacji odpadu i obciążenia. Kształt przekroju układu przepływowego powinien spełniać kryterium minimalizacji wymiany cieplnej. To kryterium spełniają jedynie przekroje kołowe, co wiąże się z koniecznością wykonania kanalików w obu podzespołach formy. Bio-



Rys. 11. Widok górnego gniazda formy
Fig. 11. View of the upper mold cavity



Rys. 12. Widok kompletnej formy
Fig. 12. View of the whole mold

rać pod uwagę kryterium ekonomiczności i łatwości usuwania zwulkanizowanego tworzywa oraz oczyszczania z jego pozostałości, powszechnie stosuje się kształt trapezoidalny przekroju układu przepływowego wykonywany w podzespole stałym. Takie rozwiązanie znacznie upraszcza proces projektowania i wydatnie zmniejsza koszty wykonania formy. Dzięki zaprojektowaniu specjalnego „zamka” w gniazdach formy uzyskano powtarzalność pozycjonowania ramy z rdzeniami. Konstrukcję gniazda formy wykonaną w środowisku Inventor ilustruje rys. 11.

Proces swobodnego ściągania wyprasek z rdzeni zapewniono projektując specjalne oprzyrządowanie pneumatyczne nakładane od strony powierzchni czołowej rdzeni.

Model geometryczny, zaprojektowanej również w środowisku Inventor, kompletnej 8-gniazdowej formy zaprezentowano na rys. 12. Model ten zbudowano uwzględniając wyżej wspomniane warunki.

PODSUMOWANIE i WNIOSKI

W niniejszym artykule wskazano obszary zastosowania nowoczesnych wzajemnie skorelowanych aplikacji sprzyjających rozpoznaniu i rozwiązywaniu problemów występujących w formach wtryskowych do gumy. Zasadniczą część projektowania wykonywano w aplikacji Inventor. Zastosowany system MSC.MARC pozwolił na analizę wpływu wielu czynników zewnętrznych jednocześnie oddziałujących na formę. Głównym celem prowadzonych rozważań wykorzystujących te narzędzia było wyeliminowanie niepożądanego zjawiska zakleszczania się formy oraz zaproponowanie najbardziej korzystnego rozwiązania konstrukcji węzła słupek-tuleja prowadząca. Zastosowane narzędzie Moldflow umożliwiło wyłonienie najbardziej korzystnych parametrów układu przepływowego i spełnienie kryterium minimalizacji obciążeń projektowanej formy.

Jeszcze kilka lat temu niemożliwe było przeprowadzanie tego typu analiz. Dopiero pojawienie się nowych narzędzi i bardziej wydajnych komputerów pozwoliło na badanie i analizowanie tego złożonego zagadnienia a pracę konstruktora uczyniło o wiele efektywniejszą.

Wyniki przeprowadzonych rozważań pozwoliły na sformułowanie poniższych wniosków:

– Najkorzystniejszym pasowaniem jest pasowanie w węźle słupek-tuleja prowadząca $\text{Ø}32\text{H}8/e6$, przy długości czynnej styku słupa i tulei nieprzekraczającej 12 mm. W przeciwnym razie dojdzie do deformacji pary stykowej, uniemożliwiającej swobodne otwieranie formy. Daleszą konsekwencją będzie wylew tworzywa ciekłego w płaszczyźnie podziału, powstawanie dużych braków oraz konieczność naprawy formy.

– Prawidłowe wypełnienie gniazd zapewniają ustalone optymalne: stopniowanie przekrojów kanałów

przepływowych, budowa tulejki wtryskowej oraz rowki obrywająco-odpowietrzające.

– Najkorzystniejszy jest trapezoidalny kształt przekroju poprzecznego kanałów doprowadzających, wykonywany w podzespole stałym formy.

– W przypadku określonego zestawu przekrojów kanałów przepływowych o wymiarach: $D_1 = 6$ mm, $D_2 = 4$ mm, $D_3 = 3,5$ mm uzyskuje się najmniejszy odpad podlegający utylizacji a najmniejsze ciśnienie wtrysku, gdy wymiary przekrojów wynoszą: $D_1 = 7$ mm, $D_2 = 5$ mm, $D_3 = 4,5$ mm.

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

LITERATURA

1. White J. R., De K. S.: „Rubber Technologist's Handbook”, Rapra Technology Limited, UK 2001. Przekład: „Poradnik technologa gumy”, Instytut Przemysłu Gumowego STOMIL Piastów 2003, str. 286, 400.
2. Malkin A.: „Rheology Fundamentals”, ChemTec, Canada 1994, str. 62–114.
3. Kallien L.: „Optimization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts with 3D Simulation”, Sigma Engineering GmbH Aachen. http://www.sigmasoft.de/ftp/web/_data/Optimization_of_the_Injection_Moulding_Process_for_Thermoplastics.pdf
4. „MSC.MARC Introductory Course”, MSC.Software Corporation, USA 2004, str. 76–126.
5. „Experimental Elastomer Analysis”, MSC.Software Corporation, USA 2003, str. 41–239.
6. Marciniec A., Ziobro J.: *Acta Mech. Slovaca* 2008, **3-A**, 257.
7. Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001, str. 40–68.
8. Ziobro J.: „The FEM analysis of injection molds to elastomers”, International Scientific Conference PRO-TECH-MA '07, Oficyna Wydawnicza PRz, Rzeszów 2007, str. 235–241.
9. Smorawiński A.: „Wtrysk elastomerów”, Plastech, Warszawa 2001, str. 21–28, 94.
10. Wilkinson R., Poppe E. A., Leiging K., Schimer K.: „Dziesięć podstawowych problemów występujących w technologii wtrysku”, DuPont. http://www2.dupont.com/Poland_Country_Site/pl_PL/assets/downloads/DuPont_przetworstwo_tworzyw_1-10.pdf
11. Johannaber F.: „Wtryskarki. Poradnik użytkownika”, Plastech 2000, str. 20–66.
12. Zawistowski H., Zięba S.: „Ustawianie procesu wtrysku”, Plastech 2003, str. 17, 42–66.
13. Zawistowski H.: „Nowoczesne formy wtryskowe. Problemy konstrukcji i użytkowania”, Plastech, Warszawa 2001, str. 5–37, 73–84.
14. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT 2003. Reprint 1984 r., str. 143, 345.

Otrzymano 17 XI 2009 r.