

Tomasz JACHOWICZ¹⁾, Branislav DULEBA²⁾, Volodymyr KRASINSKYI³⁾

¹⁾ Katedra Procesów Polimerowych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, Nadbystrzycka 36; e-mail: t.jachowicz@pollub.pl

²⁾ Department of Technologies and Materials, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice, 040 01 Kosice, Slovakia, Masiarska 74; e-mail: branislav.duleba@tuke.sk

³⁾ Lviv Polytechnic National University, Department of Chemical Technology of Plastics, 79013 Lviv, Ukraine, 12 S. Bandera str.; e-mail: vkrasinsky82@gmail.com

Ocena technologiczności wyprasek wtryskowych na podstawie numerycznej symulacji wtryskiwania termoplastycznych tworzyw polimerowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawowe informacje charakteryzujące proces wtryskiwania tworzyw polimerowych oraz zagadnienia związane z symulacją komputerową i modelowaniem numerycznym zjawisk zachodzących podczas wtryskiwania. Omówiono wyniki numerycznej symulacji procesu wtryskiwania wyprasek o odmiennych cechach konstrukcyjnych, w celu oceny technologiczności ich konstrukcji, w zależności od wybranych czynników związanych z parametrami procesu wtryskiwania i dokładnością wymiarową wyrobu.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, wypraska wtryskowa, technologiczność wypraski, symulacja komputerowa, modelowanie numeryczne.

NUMERICAL SIMULATION OF INJECTION MOULDING PROCESS

Summary: Basic information characterized the polymer's injection molding process and questions connected with numerical simulation of the phenomena during injection molding realization have been introduced in the article. The results of the numeric simulation of the injection molding process of injection molding parts with different constructional features, in the aim of opinion about producibility of their construction were talked over, depending on chosen factors connected with the parameters of the injection molding process and the dimension exactitude of the product.

Keywords: injection molding, injection molded part, producibility of injection molding part, computer simulation, numerical modeling.

1. WPROWADZENIE

Wtryskiwanie jest dominującą metodą przetwórstwa tworzyw polimerowych, ze względu na stopień złożoności konstrukcji otrzymywanych wyprasek oraz zakres wykorzystywanych tworzyw. Cechą charakterystyczną wtryskiwania jest jego cykliczność. W cyklu wtryskiwania wyróżnia się następujące fazy: zamykania formy, wtrysku, docisku, uplastyczniania, otwierania formy oraz przerwy. Do wtryskiwania są stosowane przede wszystkim

tworzywa termoplastyczne, ale wykorzystuje się również tworzywa utwardzalne, elastome-ry oraz kompozyty [1, 2]. W procesie wtryskiwania otrzymuje się produkty o skomplikowanych kształtach, zróżnicowanej grubości ścianek oraz dużej rozpiętości masy. Podczas konstruowania wypraski istotne znaczenie ma wiele czynników, wśród których między innymi należy wymienić: grubość ścianek, pochylenie powierzchni, promień zaokrąglenia krawędzi, kształt i wymiary przekrojów poprzecznych, otworów, podcięć, żeber wzmacniających, któ-

re powinny być dobierane według odpowiednich zaleceń, zapewniających prawidłowe wypełnianie gniazda formy tworzywem, właściwe warunki ochładzania wypraski i pożądaną dokładność geometryczną. Zalecenia te ograniczają swobodę projektowania wypraski na etapie określania jej kształtu funkcjonalnego i wiążą się z pojęciem technologiczności wypraski, rozumianej jako zgodność konstrukcji projektowanego wyrobu z uwarunkowaniami określonego procesu jego wytwarzania, którym w tym przypadku jest wtryskiwanie [3, 4, 5].

Otrzymanie wypraski o wysokich walorach użytkowych wymaga prawidłowego doboru parametrów procesu, rodzaju tworzywa, narzędzia o odpowiedniej konstrukcji i maszyny przetwórczej o określonych możliwościach technologicznych. Prawidłowo zaprojektowana wypraska jest źródłem informacji, na podstawie których dobiera się rodzaj tworzywa, konstruuje formę wtryskową i określa parametry technologiczne wtryskiwania [4, 6, 7]. Ostateczne ustalenie warunków technologicznych procesu stanowi kompromis między oczekiwaną jak największą wydajnością wtryskiwania, a akceptowalnym poziomem jakości wykonania wypraski i jej cech użytkowych. Z uwagi na bardzo wysokie koszty wytwarzania form wtryskowych niezbędne jest zmniejszenie do minimum ryzyka wystąpienia błędów na każdym z etapów przygotowywania procesu produkcyjnego [3, 4, 6]. Dzięki symulacji komputerowej i analizie otrzymanych wyników już na etapie projektowania można wyeliminować wiele błędów konstrukcyjnych i technologicznych, dzięki temu znacząco obniżając koszty oraz skracając czas przygotowania produkcji [3, 8, 9].

2. PODSTAWY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO WTRYSKIWANIA

Wtryskiwanie tworzyw, z uwagi na złożoność zjawisk zachodzących podczas realizacji tej metody przetwórstwa, stało się obiektem wszechstronnej analizy przy wykorzystaniu

specjalistycznego oprogramowania inżynierskiego CAD/CAM/CAE [10, 11, 12, 13]. Modelowanie numeryczne zjawisk zachodzących w formie wtryskowej zachodzi przy założeniu, że przepływ tworzywa odbywa się w dwóch wymiarach, przy pominięciu wymiaru grubości. Założenie to uzasadnia się konstrukcją wyprasek, które zazwyczaj są elementami cienkościennymi, w związku z czym można pominąć przepływ tworzywa w kierunku grubości wypraski [14]. W efekcie równanie zachowania masy, ruchu i energii redukuje się do zagadnienia lokalnie dwuwymiarowego i upraszcza się do opisu fazy wtrysku oraz fazy docisku. W programie Cadmould 3D-F stosowane są dwa modele reologiczne: model Carreau oraz model potęgowy. Zależność lepkości tworzywa od temperatury jest opisana równaniem Williamsa–Landela–Ferry’ego (WLF), a zależność objętości właściwej tworzywa v od temperatury T oraz ciśnienia p jest określana na podstawie charakterystyki p - v - T [1, 12, 14].

Oprogramowanie CAE przeznaczone do modelowania numerycznego wtryskiwania umożliwia symulację zjawisk zachodzących podczas wypełniania gniazda formującego formy wtryskowej tworzywem i uzupełniania tworzywa w fazie docisku, jak również służy do wykonania późniejszej analizy ochładzania wypraski, skurczu przetwórczego, wypaczenia i deformacji gotowego wyrobu. Skurcz przetwórczy to zmniejszenie objętości i wymiarów wytworu z tworzywa w stosunku do objętości i odpowiednich wymiarów gniazda formującego narzędzia. Wypaczenie, zwane także odkształceniem przetwórczym, jest odstępstwem kształtu lub położenia elementów wypraski, większym od przyjętych dla tego wytworu odchyłek i tolerancji. Deformacja stanowi sumę skurczu i wypaczenia. Przygotowanie symulacji zjawisk zachodzących podczas wtryskiwania wymaga wprowadzenia ogólnych charakterystyk dotyczących kształtu i wymiarów wypraski, właściwości tworzywa przetwarzanego i warunków procesu [3, 11, 12, 13].

Symulacja płynięcia tworzywa i wypełniania gniazda formującego oraz wynikający

z niej opis numeryczny procesu wtryskiwania ułatwia optymalizację konstrukcji formy, ustalenie parametrów procesu i dobór wtryskarki o odpowiednich możliwościach technologicznych w celu uzyskania wypraski o odpowiedniej jakości. Analizie poddawane są czynniki wpływające na zachowanie się tworzywa w trakcie procesu, między innymi ciśnienie wtryskiwania, ciśnienie docisku, grubość ścianek wypraski, temperatura tworzywa i temperatura gniazda formującego formy wtryskowej [15, 16, 17].

Symulacja ochładzania wypraski wtryskowej ma na celu optymalizację konstrukcji formy, w której układ chłodzenia projektuje się w taki sposób, aby osiągnąć możliwie najbardziej równomierną intensywność ochładzania przy jednoczesnym zachowaniu jak najkrótszego czasu cyklu procesu wtryskiwania. Wyniki analizy ochładzania wypraski pozwalają na skrócenie czasu cyklu wtryskiwania i obniżenie kosztów wytwarzania bez straty jakości wytworu. Projektant formy ma możliwość przeanalizowania oraz szybkiej oceny różnych alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia, modelując położenie i wymiary kanałów chłodzących w odniesieniu do gniazda formującego, rodzaj medium chłodzącego, natężenie przepływu i wartość temperatury początkowej cieczy chłodzącej. Uzyskanie możliwie równomiernego stopnia odprowadzenia ciepła z gniazda formującego skutkuje wyraźnym zmniejszeniem wartości skurczu przetwórczego wypraski wtryskowej oraz poprawia jakość jej powierzchni, pozwalając w konsekwencji na otrzymanie produktu o wymaganych walorach użytkowych. Unika się przez to wysokich strat z powodu powstawania wyprasek wadliwych oraz konieczności występowania kosztowych dodatkowych operacji technologicznych, jakim musiałaby być poddawana gotowa wypraska już po zakończeniu procesu wtryskiwania [4, 8, 18].

Możliwość przeanalizowania skurczu przetwórczego oraz deformacji wypraski przy symulowanych różnych parametrach procesu wtryskiwania oraz modelowanie zróżnicowa-

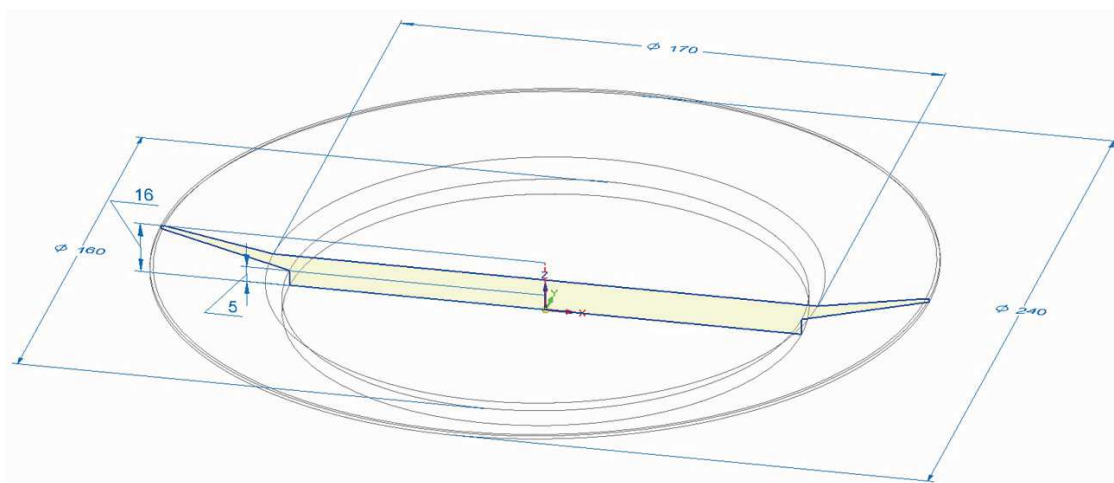
nych konstrukcyjnie układów chłodzenia formy umożliwia określenie położenia stref największego skurczu oraz deformacji. Dzięki temu w fazie projektowania można przeprowadzić optymalizację konstrukcji formy, dobierając zarówno rodzaj materiału wkładek formujących jak i korygując odpowiednie wielkości geometryczne w celu zminimalizowania negatywnego wpływu skurczu przetwórczego i wypaczenia wypraski [3, 4, 10, 19]. W oparciu o wyniki symulacji można spełnić wymagania o charakterze jakościowym i ekonomicznym, związane z otrzymaniem wypraski o wysokiej stabilności wymiarowej, dobrych właściwościach optycznych powierzchni oraz żądanej dokładności pasowania z innymi współpracującymi z nią częściami.

3. SYMULACJA NUMERYCZNA PROCESU WTRYSKIWANIA

Model wypraski

Symulację w programie Cadmould 3D-F rozpoczyna się od zaimportowania modelu bryłowego, który przedstawia gniazdo formujące formy wtryskowej. Istotne jest, że analizie numerycznej nie poddaje się modelu wypraski, której wymiary są zawsze mniejsze od gniazda formującego, lecz model przestrzenny obszaru zawartego pomiędzy stemplem a matrycą. Do uzyskania modelu 3D jest konieczne posłużenie się programem CAD do modelowania bryłowego, który pozwala na zapisanie pliku wyjściowego w jednym z formatów rozpoznawanych przez program Cadmould 3D-F (m.in. ANSYS, NASTRAN, IGES, STEP, STL) [14].

W celu analizy technologiczności wypraski do badań symulacyjnych został wybrany model wypraski w kształcie okrągłego, płytkiego talerza o średnicy 240 mm i wysokości 16 mm. W oparciu o model wstępny, którego wygląd został przedstawiony na rys. 1, zaproponowano trzy odmiany konstrukcyjne talerza. Pierwsza z nich (oznaczona jako T-1) miała wykonane w dnie wybranie, w celu zrównoważenia



Rys. 1. Wygląd i wymiary projektu wstępnego analizowanej wypraski wtryskowej

Fig. 1. Shape and the dimensions of the preliminary project of analyzed injection molding part

grubości ścian projektowanego wyrobu. Zachowanie w miarę równomiernej grubości ścian wypraski jest jednym z podstawowych zaleceń odnośnie technologiczności wyrobów wytwarzanych metodą wtryskiwania. Po wykonaniu symulacji dla modelu T-1 i analizie otrzymanych wyników wstępnych konieczne okazało się wprowadzenie w dnie talerza żeber wzmacniających, co znalazło odzwierciedlenie w modelach T-2 oraz T-3. Wprowadzone w konstrukcji talerza żebra miały na celu przeciwdziałanie nadmiernej deformacji wypraski. Wygląd poszczególnych wersji talerza został pokazany na rys. 2.

W tabeli 1 dla zostały przedstawione wielkości charakteryzujące model bryłowy wypraski, odniesione do poszczególnych typów talerza. Model gniazda formującego wykorzystany do przeprowadzenia symulacji proce-

Tab. 2. Zestawienie charakterystyk modeli MES poszczególnych wersji wypraski

Tab. 2. The presentation of MES model characteristic of the individual constructional types of analyzed injection molding part

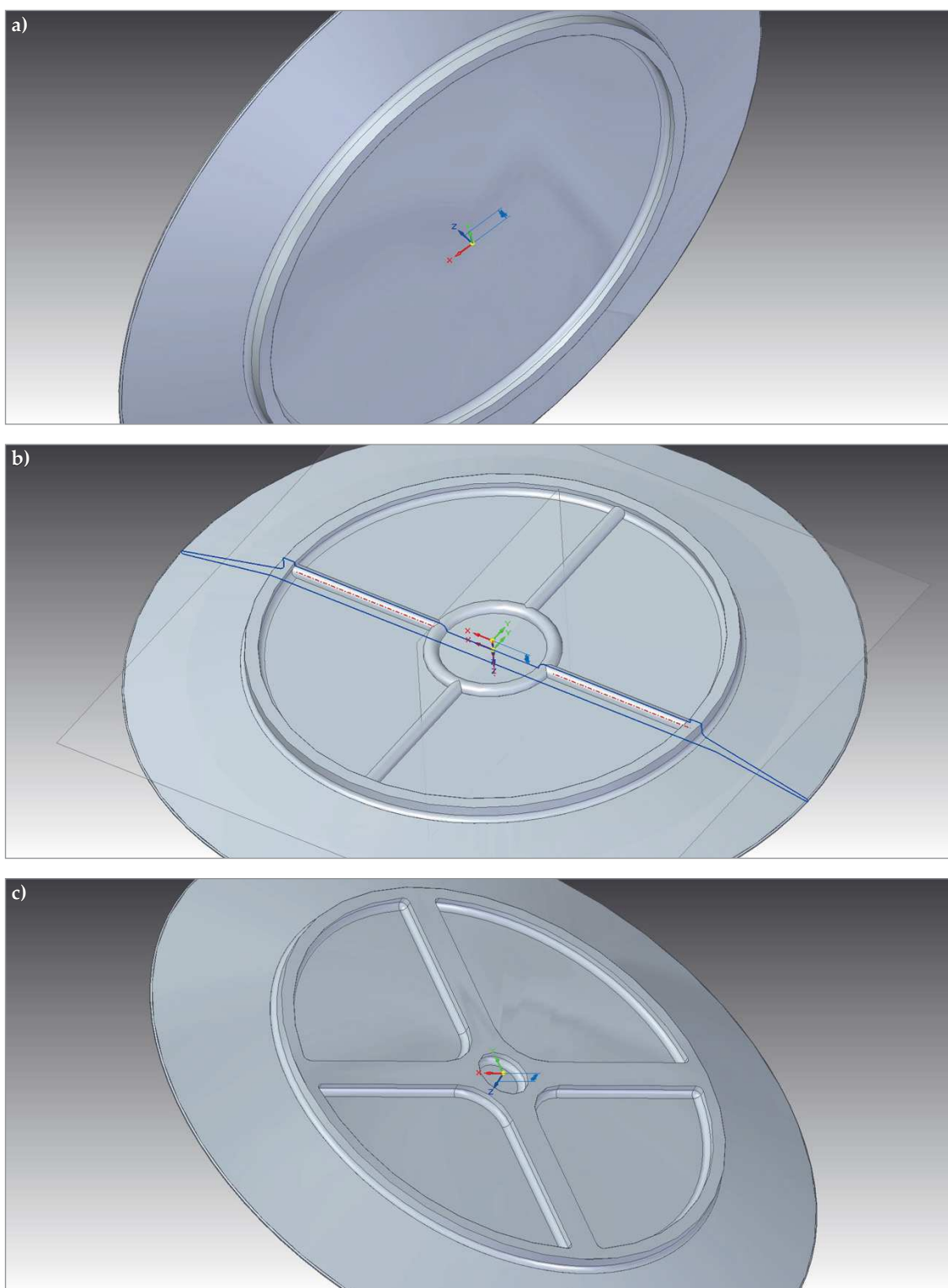
Model wypraski	T-1	T-2	T-3
Całkowita objętość elementów belkowych [mm ³]	648	648	648
Całkowita objętość elementów czworosiecznych [mm ³]	190361	190745	196635
Całkowita objętość wypraski [mm ³]	194946	198037	207097
Całkowita objętość układu wlewowego [mm ³]	647	647	647
Współczynnik dopasowania siatki MES	0,97656	0,96330	0,94964

su wtryskiwania został wykonany w programie Solid Edge ST5, a następnie wyeksporto-

Tab. 1. Zestawienie wielkości charakteryzujących poszczególne odmiany konstrukcyjne analizowanej wypraski

Tab. 1. The presentation of factors characterizing the individual constructional types of analyzed injection molding part

Model wypraski	Pole powierzchni [mm ²]	Objętość [mm ³]	Położenie centroidu [mm]	Masa [g]
T-1	95731	194946	X = 0,005 Y = 0,004 Z = 8,012	176,4
T-2	96591	198037	X = 0,009 Y = 0,000 Z = 7,931	179,2
T-3	97393	207097	X = 0,008 Y = 0,001 Z = 7,662	187,4



Rys. 2. Odmiany konstrukcyjne wypraski wtryskowej: a) T-1 – wykonanie wybrania w części walcowej podstawy wraz z zaokrągleniem krawędzi, b) T-2 – dodanie układu żeber wzmacniających, c) T-3 – dodanie innego układu żeber wzmacniających

Fig. 2. Constructional types of injection molding part: a) T-1 – preparing of cavity in the cylindrical base together with the curvature of the edges, b) addition of the arrangement of strengthening ribs, c) addition of the different arrangement of strengthening ribs

wany do rozpoznawalnego przez program Cadmould 3D-F formatu STL [14, 20].

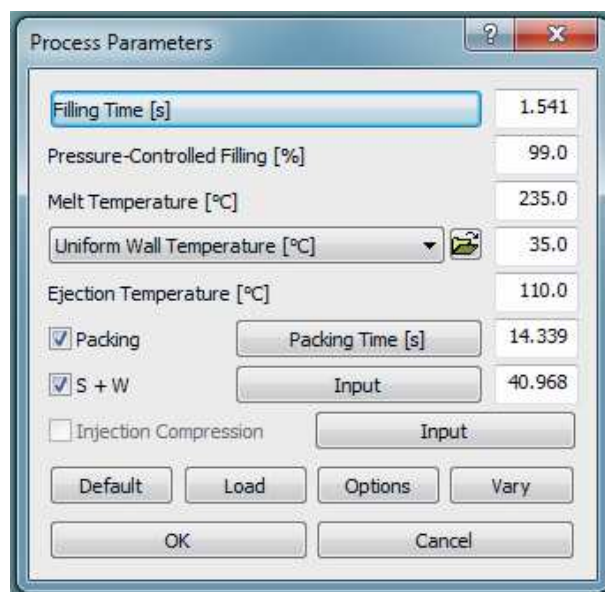
Dla poszczególnych typów talerza zastosowano ten sam model układu wlewowego – jednopunktowy, centralny, w dnie talerza, klasyczny dla tego typu wyprasek osiowosymetrycznych. W tabeli 2 zostały zamieszczone wielkości charakteryzujące wygenerowaną siatkę MES dla modeli analizowanej wypraski w jej poszczególnych odmianach konstrukcyjnych.

Warunki symulacji

Ocena technologiczności konstrukcji wypraski wtryskowej została przeprowadzona na podstawie analizy wybranych wielkości charakteryzujących proces wtryskiwania, a mianowicie parametrów procesu wtryskiwania, wśród których można wyróżnić: czas docisku i czas chłodzenia wypraski formie oraz na podstawie analizy wybranych wielkości charakteryzujących wypraskę po jej wykonaniu, takich jak prawdopodobieństwa wystąpienia zapadnięć powierzchni wypraski, skurczu przetworzonego, wypaczenia oraz deformacji wypraski. Analiza przebiegu procesu wtryskiwania i wynikająca z niej ocena technologiczności wypraski została wykonana dla wcześniej przedstawionych trzech typów konstrukcji wypraski.

W wykonanej symulacji procesu wtryskiwania występują parametry zmienne: trzy różne odmiany konstrukcji wypraski w kształcie talerza, oznaczone jako T-1, T-2, T-3 oraz parametry wtryskiwania, które uległy zmianie z powodu z odmienną konstrukcją wyprasek: ciśnienie wtrysku, czas fazy wtrysku, natężenie przepływu (uwarunkowane czasem wtryskiwania), czas docisku i czas chłodzenia wypraski w formie.

Parametry stałe podczas symulacji procesu wtryskiwania to temperatura formy: 35°C, temperatura wtrysku: 235°C, temperatura usunięcia wypraski z formy: 110°C, maksymalne ciśnienie docisku: 40 MPa, współczynnik przenikania ciepła materiału formy wtryskowej:



Rys. 3. Przykład okna ustawień parametrów procesu wtryskiwania w programie Cadmould 3D-F dla wypraski T-1

Fig. 3. The example of window with settings of injection molding parameters in the Cadmould 3D-F software for T-1 type of injection molding part

1000 W/mK, współczynnik przenikania ciepła otoczenia: 8 W/mK oraz temperatura otoczenia: 20°C.

Tab. 3. Wartości wybranych parametrów procesu wtryskiwania podczas symulacji wtryskiwania poszczególnych typów wypraski

Tab. 3. Values of selected injection molding parameters during injection molding simulation of the individual types of injection molding part

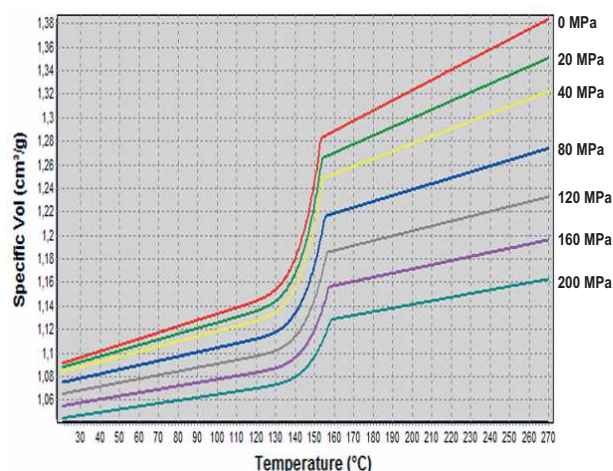
Model wypraski	Czas fazy wtrysku [s]	Natężenie przepływu [cm ³ /s]	Czas fazy docisku [s]	Czas chłodzenia [s]
T-1	1,54	127,008	14,572	41,636
T-2	1,561	127,280	11,061	31,603
T-3	1,647	126,135	32,965	94,185

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie wybranych parametrów procesu wtryskiwania dla poszczególnych typów analizowanych wyprasek wtryskowych, natomiast na rys. 3 zostało zamieszczone przykładowe okno progra-

mu Cadmould 3D-F, zawierające ustawienia głównych parametrów procesu wtryskiwania.

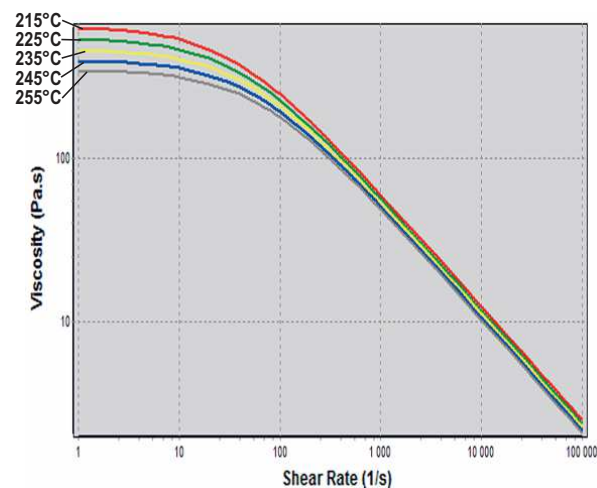
Materiał na wypraskę

Do symulacji procesu wtryskiwania został użyty polipropylen (PP) o nazwie handlowej BORMED RF830MO, którego producentem



Rys. 4. Zależność lepkości tworzywa BORMED RF830MO od szybkości ścinania [4]

Fig. 4. The dependence of the viscosity of polypropylene BORMED RF830MO from the shear rate [4]



Rys. 5. Wykres $p-v-T$ dla tworzywa BORMED RF830MO przedstawiający zależność objętości właściwej od temperatury i ciśnienia [4]

Fig. 5. The graph $p-v-T$ for the polypropylene BORMED RF830MO presenting the dependence of the specific volume from the temperature and pressure [4]

jest firma BOREALIS. Wybrane właściwości przetwórcze tworzywa wykorzystanego podczas symulacji, znajdujące się w bazie danych Cadmould Material Data Base, zostały przedstawione w tabeli 4 oraz na wykresach wyeksportowanych z programu Cadmould 3D-F, zamieszczonych na rys. 4 i rys. 5.

Tab. 4. Wybrane właściwości tworzywa BORMED RF830MO [4]

Tab. 4. Selected properties of the polypropylene BORMED RF830MO [4]

Typ tworzywa	Polipropylen	
Nazwa tworzywa	BORMED RF830MO	
Dostawca	BOREALIS	
Gęstość w temp. pokojowej	0,905	g/cm ³
Masowy wskaźnik szybkości płynięcia	20	g/10 min
Przewodność cieplna	0,159	W/(m·K)
Dyfuzyjność cieplna	0,0874	mm ² /s
Temperatura płynięcia	153	°C
Moduł Younga	1703,93	MPa
Liczba Poissona	0,35	–
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Temperatura wtrysku	235	°C
Temperatura formy	35	°C
Temperatura usunięcia wypraski	110	°C

Wyniki symulacji komputerowej

Program Cadmould 3D-F umożliwia przedstawianie wyników symulacji w kilku postaciach: w postaci wykresów, tabeli, map graficznych oraz animacji. Najczęściej zakres wyników symulacji przedstawia się w postaci graficznej poprzez mapę kolorów naniesionych na powierzchnię wypraski. Każdy kolor ma przypisaną inną wartość, przy czym kolor czerwony w skali reprezentuje najczęściej wartość największą, a niebieski reprezentuje najczęściej wartość najmniejszą. Zakres wartości liczbowych odniesiony do poszczególnych kolorów jest zamieszczony u góry obszaru roboczego okna Cadmould 3D-F. Rozkłady map kolorów na powierzchni wypraski generowane przez

Tab. 5. Wartości wybranych czynników charakteryzujących wypraskę i proces wtryskiwania otrzymanych podczas symulacji wtryskiwania poszczególnych typów wypraski

Tab. 5. Values of selected factors characterizing injection molding part and process of injection molding obtained during injection molding simulation for each type of injection molding part

Typ wypraski	T-1	T-2	T-3
Maksymalna temperatura tworzywa podczas fazy wtrysku [°C]	245,1	245,0	244,8
Maksymalne ciśnienie wtrysku [MPa]	54,9	55,1	52,2
Maksymalna prędkość ścinania [1/s]	118744	117381	114672
Zapadnięcia powierzchni [%]	38,6	64,4	1,6
Skurcz średni [%]	1,5	1,7	1,1
Maksymalna deformacja [mm]	1,957	2,402	1,395
Skurcz całkowity [%]	2,312	2,621	1,696
Maksymalne zniekształcenie [mm]	1,006	1,469	0,627
Siła zamykania formy w osi X [kN]	123,932	123,629	123,787
Siła zamykania formy w osi Y [kN]	123,668	123,536	123,624
Siła zamykania formy w osi Z [kN]	1762,550	1762,053	1762,958

program Cadmould mogą zostać zapisane jako pliki graficzne. Część wyników może być przedstawionych w formie wykresów. Po wykonaniu pełnej symulacji niektóre wyniki zapisywane są w plikach tekstowych. Wartości liczbowe z pliku tekstowego mogą być przeniesione do arkusza kalkulacyjnego, na przykład do programu Microsoft Excel, a na ich podstawie można generować potrzebne wykresy i zestawienia.

W przedstawionym artykule, z uwagi na założony cel analizy numerycznej, przedstawiono jedynie wybrane wyniki otrzymanych symulacji komputerowych, w celu ograniczenia objętości publikowanego materiału oraz zachowania przejrzystości i czytelności zamieszczonych danych.

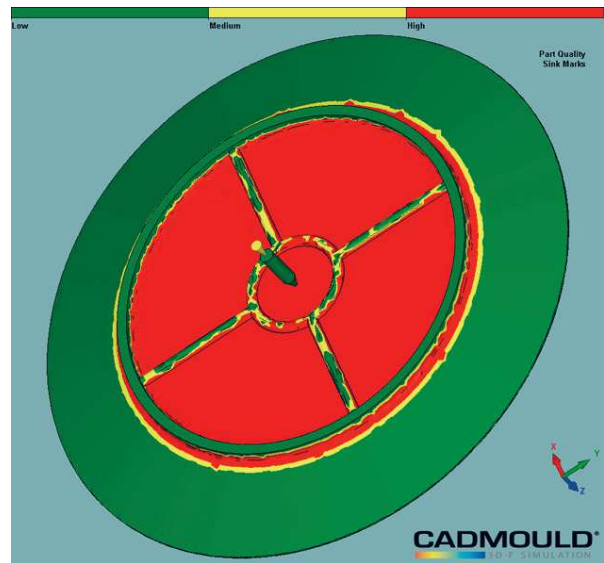
W tabeli 5 przedstawiono zestawienie wybranych wyników przeprowadzonych symulacji komputerowych dla poszczególnych trzech odmian konstrukcyjnych analizowanej wypraski, odniesionych do wypełniania gniazda formującego formy wtryskowej oraz do chłodzenia wypraski. Analizie zostały poddane między innymi maksymalna temperatura tworzywa podczas fazy wtrysku, maksymalne ciśnienie podczas fazy wtrysku i maksymalne naprężenia ścinające podczas fazy wtrysku,

a także czynniki charakteryzujące geometrię wypraski, a mianowicie skurcz średni oraz skurcz całkowity, a także maksymalne wartości wypaczenia (*warpage*) oraz deformacji (*deformation*). Sprawdzono także, czy zmiana konstrukcji wypraski wpływa na wartość siły zamykania formy wtryskowej, opisaną za pomocą wartości składowych w osiach X, Y i Z.

W wyprasce oznaczonej T-1 poprzez wykonanie wybrania w dnie talerza oraz zaokrąglenie krawędzi osiągnięto zrównoważenie grubości przekrojów poprzecznych wypraski oraz uproszczono drogę płynięcia tworzywa, dzięki czemu gniazdo formujące wypełniało się równomiernie, a czas fazy wtrysku był najkrótszy. Niestety, płaskie dno talerza o stosunkowo dużym polu powierzchni wykazywało tendencję do odkształcania się, co prowadziło do występowania zapadnięć na całej powierzchni dna talerza. Położenie obszarów zapadnięć powierzchni w modelu wypraski T-1 zostało pokazane na rys. 6. Prawdopodobieństwo wystąpienia tych obszarów zostało podzielone na trzy grupy: na czerwono są zaznaczone obszary, gdzie ryzyko powstania zapadnięć jest największe; kolorem żółtym oznaczono obszary wypraski, gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia zapadnięć powierzchni jest średnie,



Rys. 6. Graficzne przedstawienie obszarów wypraski z prawdopodobieństwem wystąpienia na nich zapadnięć powierzchni – w odniesieniu do wersji T-1 wypraski
 Fig. 6. The graphic presentation of sink marks on the injection molding part surface – for the T-1 constructional type



Rys. 7. Graficzne przedstawienie obszarów wypraski z prawdopodobieństwem wystąpienia na nich zapadnięć powierzchni – w odniesieniu do wersji T-2 wypraski
 Fig. 7. The graphic presentation of sink marks on the injection molding part surface – for the T-2 constructional type

a na zielono zaznaczono obszary, gdzie ryzyko powstania zapadnięcia powierzchni wypraski jest najmniejsze.

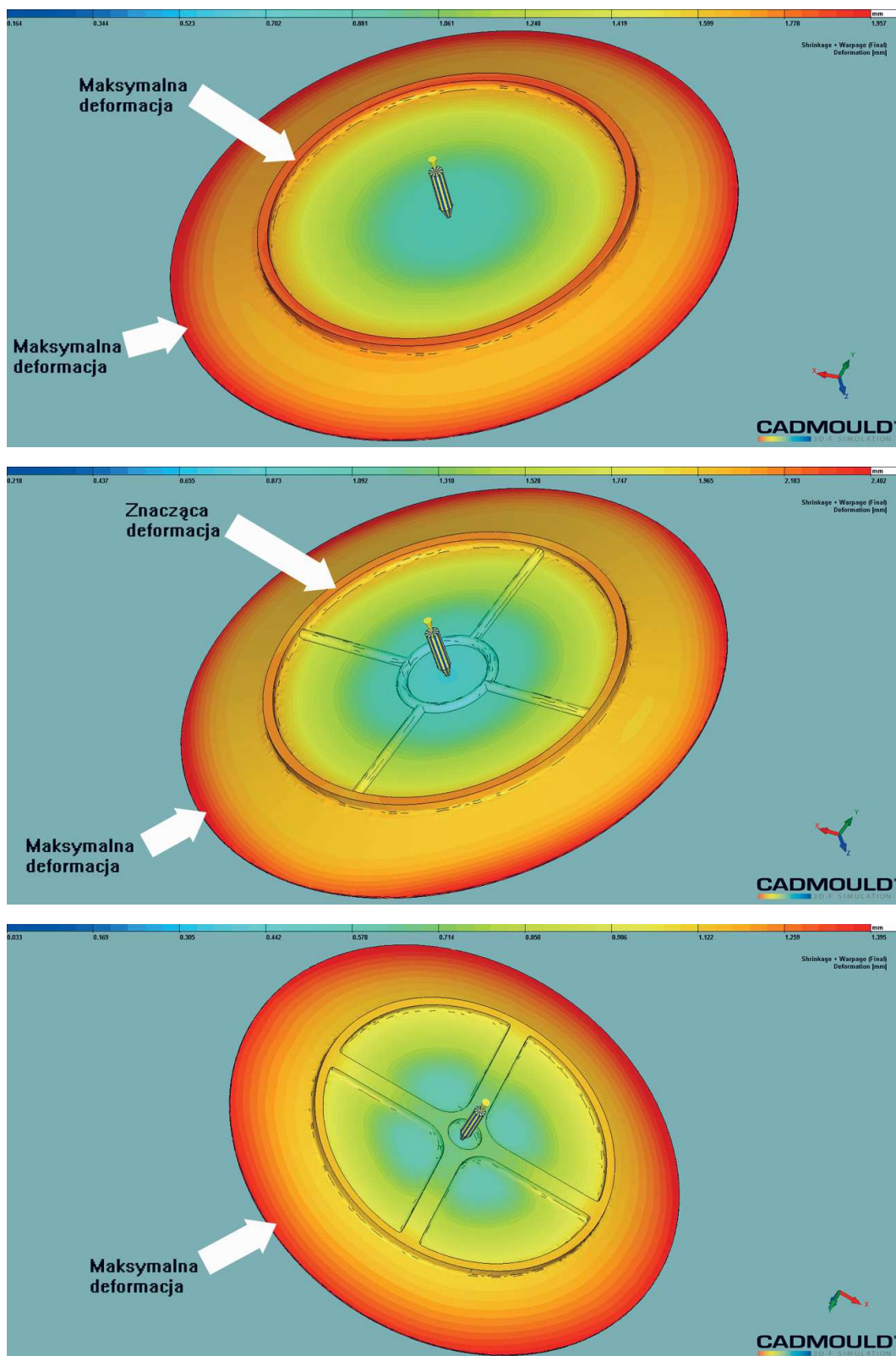
W celu usztywnienia dna talerza zaproponowano dwa rodzaje żeber usztywniających, występujących w wersjach wypraski oznaczonych odpowiednio T-2 i T-3. W przypadku żeber o niewielkich rozmiarach występujących w wersji T-2, osiągnięto wprawdzie dalsze skrócenie czasu fazy docisku oraz chłodzenia, ale skurcz i deformacja wypraski nie uległy poprawie, a pogorszyły się, osiągając wartości jeszcze wyższe, niż w pierwszej wersji. Żebra w wersji T-2 były za cienkie i nie spełniły planowanej roli. Położenie obszarów zapadnięć wypraski T-2 przedstawiono na rys. 7.

W wersji T-3 zaprojektowano żebra o większej grubości i szerokości. Miejsowy wzrost przekroju poprzecznego żeber spowodował nieznaczne zwiększenie się czasu fazy wtrysku w porównaniu z wersjami wypraski T-1 i T-2 oraz znaczące zwiększenie się czasu fazy docisku oraz chłodzenia, istotnie wpływające na pogorszenie wydajności wtryskiwania. Z pun-



Rys. 8. Graficzne przedstawienie obszarów wypraski z prawdopodobieństwem wystąpienia na nich zapadnięć powierzchni – w odniesieniu do wersji T-3 wypraski
 Fig. 8. The graphic presentation of sink marks on the injection molding part surface – for the T-3 constructional type

ktu widzenia cech geometrycznych wersja konstrukcyjna T-3 uzyskała najlepszy rezultat,



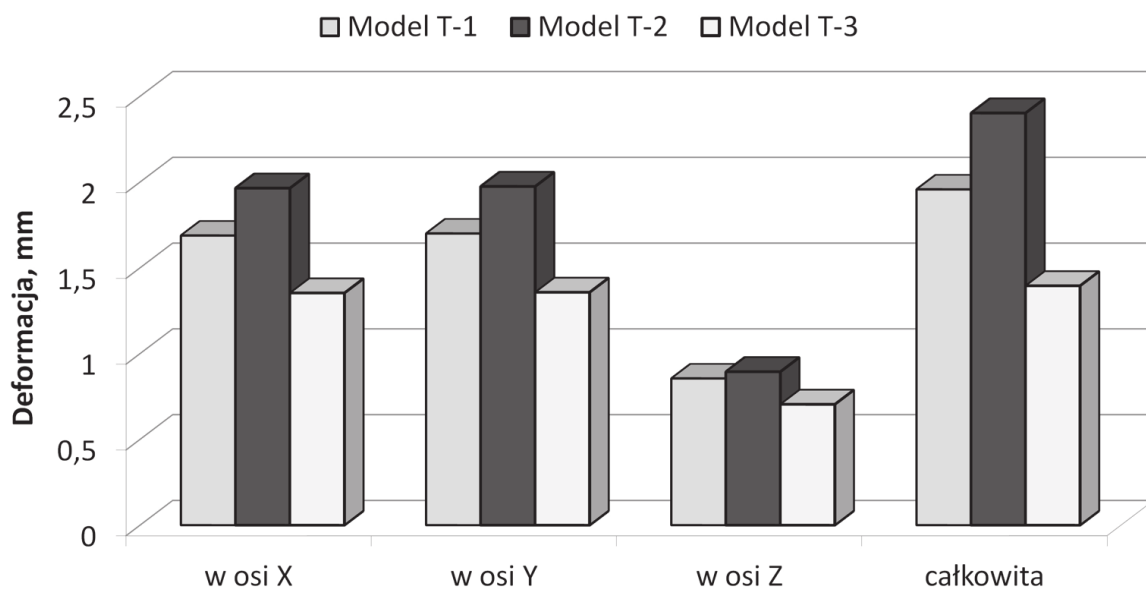
Rys. 9. Położenie obszarów o największej deformacji kształtu wypraski w poszczególnych odmianach konstrukcyjnych talerza

Fig. 9. The position of areas with the largest deformation of injection molding part for the individual constructional types of the plate

bowiem skurcz średni, skurcz całkowity, wypaczenie i deformacja miały najmniejsze wartości, nawet o kilkadziesiąt procent. Z analizy rozkładu mapy prawdopodobieństwa wystąpienia zapadnięć powierzchni wypraski T-3, przedstawionej na rys. 8, ten typ konstrukcji talerza należy uznać za najkorzystniejszy, bowiem w jego przypadku obszary zaznaczone na czerwono oraz na żółto zajmują mniejszą

zarówno na obrzeżu talerza jak i w obszarze jego podstawy, natomiast w odmianie T-3 wartość deformacji była najmniejsza i była zlokalizowana tylko na obrzeżu talerza.

Na wykresie zamieszczonym na rys. 10 zostało przedstawione zestawienie wartości deformacji wypraski, jednostkowe dla poszczególnych osi X, Y i Z oraz całkowite dla poszczególnych odmian konstrukcyjnych talerza.



Rys. 10. Wartość deformacji analizowanych odmian konstrukcyjnych wypraski – dla poszczególnych osi X, Y, Z oraz całkowite

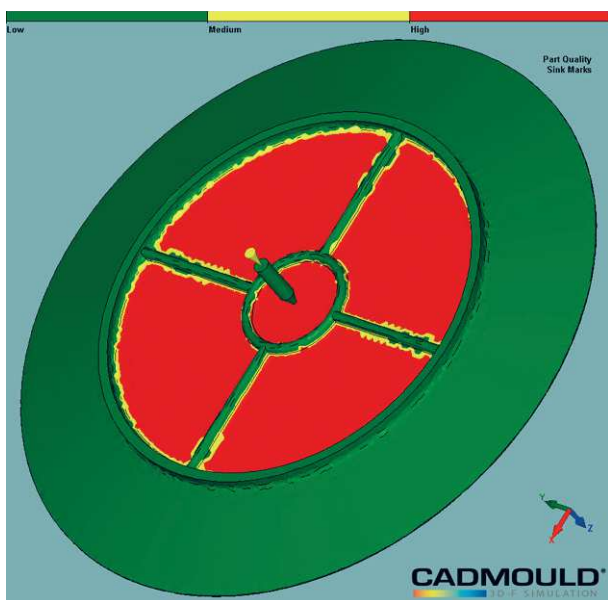
Fig. 10. The value of deformation of analyzed constructional types of injection molding part – for individual axis X, Y, Z and total

powierzchnię. Wprawdzie na górnej powierzchni talerza pojawiają zapadnięcia układające się dokładnie naprzeciw występujących w dnie żeber i można przypuszczać, że takie krzyżowe zagłębienie w dnie talerza nie wyglądałoby zbyt estetycznie, ale przyjęto, że podstawowym kryterium oceny zapadnięć powierzchni wypraski będą wartości liczbowe (im mniejsze, tym lepsze), a nie ich kształt.

Na rys. 9 zostały pokazane mapy graficzne ilustrujące obszary deformacji analizowanych wyprasek, z których wynika, że w wersjach konstrukcyjnych wyprasek T-1 oraz T-2 maksymalna wartość deformacji występowała

Z uwagi na najdłuższy czas pełnego cyklu wtryskiwania, którym charakteryzowała się wypraska w wersji T-3 (uznana za najlepszą z punktu widzenia jej dokładności wymiarowej), przeprowadzono dodatkowe symulacje dla wersji talerza T-2, która charakteryzowała się najkrótszym czasem pełnego cyklu. Celem tej analizy uzupełniającej był taki dobór czasu fazy docisku oraz chłodzenia dla modelu T-2, aby uzyskać dokładność wymiarową zbliżoną do wypraski T-3, ale przy czasie pełnego cyklu wyraźnie krótszym niż w przypadku tego modelu. Przy wydłużeniu fazy docisku z 11s do 20s (stanowiącego wtedy ok. 64% fazy docisku

wypraski T-3) oraz wydłużeniu fazy chłodzenia z 33s do 60s (stanowiącego wówczas ok. 64% fazy chłodzenia wypraski T-3) dla modelu wypraski T-2 otrzymano następujące, wybrane dla porównania, wyniki: maksymalna prędkość ścinania podczas fazy wtrysku $107772s^{-1}$, zapadnięcia powierzchni 14,7% (wyraźna zmiana w stosunku do 64,4% z wcześniejszej symulacji), skurcz średni 1,3%, maksymalna deformacja 1,651 mm, skurcz całkowity 2,089% i maksymalne zniekształcenie 0,664 mm. Inne wielkości, występujące w tabeli 5 nie uległy w symulacji dodatkowej znaczącym zmianom.



Rys. 11. Graficzne przedstawienie obszarów wypraski z prawdopodobieństwem wystąpienia na nich zapadnięć powierzchni będące wynikiem dodatkowej symulacji dla modelu T-2

Fig. 11. The graphic presentation of sink marks on the injection molding part surface as the result of additional simulation for the T-2 constructional type

Obszar wypraski T-2 objęty zapadnięciami powierzchni był kształtem zbliżony do tego z wcześniejszej symulacji, co zostało przedstawione na rys. 11, ale jego pole powierzchni i wartość wymiarów geometrycznych tych zapadnięć była mniejsza, co odzwierciedla wymienione wyżej zmniejszenie się wartości

skurczu, wypaczenia i deformacji. Można zatem przyjąć, że zmiana parametrów wtryskiwania dla modelu wypraski T-2 może stanowić rozwiązanie kompromisowe pomiędzy krótkim czasem cyklu, jaki osiągnięto dla modelu T-2, a najlepszą dokładnością wymiarową, otrzymaną w przypadku modelu T-3.

WNIOSKI

Program Cadmould 3D-F umożliwia szczegółową analizę zjawisk zachodzących podczas procesu wtryskiwania tworzyw polimerowych. Na podstawie wykonanych symulacji procesu wtryskiwania wypraski w kształcie talerza przeanalizowano technologiczność jej kilku odmian konstrukcyjnych, z punktu widzenia wybranych parametrów charakteryzujących przebieg procesu wytwarzania oraz wielkości charakteryzujących cechy geometryczne wypraski. Podstawowym kryterium była dokładność wymiarowa, jednakże zwrócono także uwagę na aspekt wydajności wytwarzania, której miarą był czas trwania analizowanych faz cyklu wtryskiwania. Wypraska w kształcie talerza należy do grupy wyprasek cienkościennych, które są szczególnie podatne na deformację i zniekształcenia, w związku z czym jest konieczne stosowanie żeber usztywniających lub nadawanie wyprasce odpowiednich proporcji kształtowo-wymiarowych, zgodnie z zaleceniami odnośnie technologiczności wyprasek wtryskowych. W poszczególnych rozwiązaniach konstrukcyjnych wypraski różnice między analizowanymi wielkościami niekiedy były znaczące, czego przykładem może być ponad dwukrotnie dłuższy czas fazy docisku i chłodzenia pomiędzy modelami T-1 oraz T-3, a także skurcz wtryskowy całkowity różniący się o około 35% pomiędzy modelami T-2 oraz T-3. Z punktu widzenia wydajności wytwarzania za bardziej technologiczną należałoby uznać wypraskę T-2, bowiem w jej przypadku otrzymano najkrótszy czas wykonania, jednakże miała ona gorszą dokładność wymiarową. Z kolei wersja T-3 charakteryzowała się bardzo dobrym zachowaniem kształtu

i wymiarów, co wiązało się ze znacząco dłuższym czasem cyklu wtryskiwania i negatywnie wpływało na wydajność procesu. Korzystając z możliwości oprogramowania przeanalizowano alternatywne rozwiązanie, w którym dla najbardziej ekonomicznego, ale najmniej dokładnego modelu wypraski T-2 w serii symulacji ustalono parametry procesu przetwórczego w taki sposób, aby poprawić cechy wymiarowe, ale jednocześnie uzyskać czas cyklu krótszy niż w modelu T-3. Osiągnięte w ten sposób wyniki stanowiły rozwiązanie o charakterze pośrednim, w którym należało dokonać wyboru między dokładnością i estetyką wyrobu, a czasem i nakładami na jego wykonanie.

Posługując się programami do symulacji procesu wtryskiwania należy pamiętać, że otrzymane rezultaty, chociaż wydatnie służą pomocą konstruktorom oraz technologom, nadal stanowią jedynie próbę przedstawienia procesu wtryskiwania, który zachodzi wewnątrz formy wtryskowej. Wyniki symulacji stanowią zbiór są wyłącznie wskazówkami, jaki kierunek prac konstrukcyjnych obrać i należy je skonfrontować z rzeczywistymi możliwościami produkcji oraz doświadczeniem konstruktorów. Niezbędne jest, aby pracownik obsługujący program do symulacji procesu wtryskiwania posiadał niezbędną wiedzę oraz praktykę z zakresu przetwórstwa tworzyw.

This paper is the result of the project implementation: Technological and design aspects of extrusion and injection molding of thermoplastic polymer composites and nanocomposites (PIRSES-GA-2010-269177) supported by The international project realized in range of Seventh Frame Programme of European Union (FP7), Marie Curie Actions, PEOPLE, International Research Staff Exchange Scheme (IRSES).

Literatura

1. Rosato D. V., Rosato D. V., Rosato M. G.: Injection Molding Handbook. Kluwer Academic Publisher, Norwell 2000.
2. Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
3. Beaumont J. P., Sherman R., Nagel R. F.: Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation. Carl Hanser Verlag, Munich 2002.
4. Kazmer D. O.: Injection Mold Design Engineering. Carl Hanser Verlag, Munich 2007.
5. Bociąga E.: Procesy determinujące przepływ tworzyw w formie wtryskowej i jego efektywność, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
6. Zawistowski H., Frenkler D.: Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych. Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych Plastech, Warszawa 2003.
7. Chen Z., Turng L. S.: A review of current developments in process and quality control for injection molding. *Advances in Polymer Technology* 2005, 24, 3, 165–182.
8. Zhou H.: Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control. John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2013.
9. Dulebová L., Gajdoš I.: Design of injection mould using CAE. *Výrobné inženýrstvo* 2009, 8, 2, 60-62.
10. Heneczowski M. Przykłady zastosowania symulacji wtryskiwania do korygowania konstrukcji wyprasek. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*, 2010, 4, 14-20.
11. Dulebová L., Greškovič F., Duleba B., Krasinskiy V., Optimization of injection molding manufacturing for automotive industry. *Transfer inovácií* 2012, 24, 200-204.
12. Jachowicz T., Garbacz T.: Modelowanie i symulacja zjawisk zachodzących w formie wtryskowej przy użyciu programu I-DEAS®. X Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 2006. Wydawnictwo Garmond, Warszawa 2006.
13. Duleba B., Greškovič F.: Application of CA systems at design and simulation of plastic molded parts. *International Journal of Advanced Engineering Technology* 2012, 3, 4, 1-7.
14. Cadmoul 3D-F. Instrukcja użytkownika, wersja 5. Simcon 2012 (wersja elektroniczna).
15. Modi D., Šimáček P., Advani S.: Influence of injection gate definition on the flow-front approxima-

- tion in numerical simulations of mold-filling processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2003, 42, 11, 1237–1248.
16. El Otmani R., Zinet M., Boutaous M., Benhadid H.: Numerical simulation and thermal analysis of the filling stage in the injection molding process: Role of the mold-polymer interface. *Journal of Applied Polymer Science* 2011, 121, 3, 1579–1592.
 17. Yu L., Koh C. G., Lee L. J., Koelling K. W., Madou M. J.: Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro-features. *Polymer Engineering & Science* 2002, 42, 5, 871–888.
 18. Ambroziak M.: Analiza systemu chłodzenia w programie Cadmould. TS Raport 2012, 64.
 19. Fen Liu F., Zeng S., Zhou H., Li J.: A study on the distinguishing responses of shrinkage and warpage to processing conditions in injection molding. *Journal of Applied Polymer Science* 2012, 125, 1, 731–744.
 20. Szymczak P.: Solid Edge. Synchronous Technology. Wydawnictwo CAMdivision, Wrocław 2012.