

Wiesław FRĄCZ  
Politechnika Rzeszowska

## OPTYMALIZACJA SKURCZU WYPRASEK Z WYKORZYSTANIEM WYNIKÓW SYMULACJI 3D

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań i analiz było określenie optymalnych parametrów wtryskiwania i wielkości geometrycznych układu wlewowego formy wtryskowej, dla których uzyskuje się minimalną wartość skurczu wypraski. Optymalizację przeprowadzono za pomocą metody Taguchi. Geometrię układu wlewowego ustalono jako jeden ze zmiennych czynników, tak by zminimalizować jego wymiary. W celu wykonania optymalizacji należało przede wszystkim wykonać serie prób technologicznych procesu wtryskiwania przy różnych parametrach, według określonego planu technologicznego. Zamiast kosztownego eksperymentu dane do optymalizacji pozyskano za pomocą programu Moldflow Autodesk Insight, który umożliwia wykonanie symulacji wtryskiwania tworzywa do formy. Obliczenia wykonano, stosując trójwymiarowy model obliczeń (3D) w teorii elementów skończonych.

### Wstęp

Proces formowania wtryskowego jest procesem dobrze opanowanym pod względem technologicznym, jednakże zdarzają się wciąż przypadki występowania trudności technologicznych. Szczególnie dotyczy to tzw. wyprasek trudnych, do których należą wypraski grubościenne oraz o wąskich zakresach tolerancji wymiarów. Koła zębate, należące często do obu tych grup, mimo ich wytwarzania od wielu lat i posiadania dużej wiedzy w zakresie technologii wytwarzania, wciąż sprawiają kłopoty technologiczne. Ze względu na znaczne grubości ścian i często ich zróżnicowanie trudno jest uzyskać należytą dokładność wymiarową. Głównym czynnikiem decydującym o uzyskaniu właściwego wymiaru jest skurcz technologiczny. Utrzymanie jego wartości w wymaganym zakresie zależy od wielu parametrów, zarówno technologicznych procesu, jak i konstrukcyjnych formy wtryskowej. Do najważniejszych należą: prędkość wtrysku, temperatura stopu, temperatura formy wtryskowej, ciśnienie i czas docisku oraz geometria układu wlewowego i układu chłodzenia formy. Zmiana każdego z tych parametrów skutkuje zmianą skurczu technologicznego, a tym samym zmianą wymiarów geometrycznych wypraski.

Aby ustalić żądane parametry procesu wtryskiwania, należy wykonać wiele prób eksperymentalnych [1-3]. Stosując, na przykład w analizie, tylko 7 paramet-

trów, dla których ustalono trzy poziomy ich zmienności, należy wykonać aż  $3^7 = 2187$  eksperymentów. Od lat znane są plany doświadczalne, które pozwalają zminimalizować liczbę eksperymentów.

W prezentowanej w niniejszej pracy metodyce wykorzystano, zamiast kosztownego eksperymentu, wyniki symulacji komputerowych wykonanych w komercyjnym oprogramowaniu Autodesk Moldflow Plastic Insight. Symulacje komputerowe procesu wykonano w oparciu o model 3D. W symulacji 3D przepływu tworzywa, prowadzonej w oparciu o teorię Naviera-Stokesa, uwzględniono zjawiska bezwładności, grawitacji oraz rozbitcia strugi tworzywa w gnieździe, a także wymianę ciepła we wszystkich kierunkach. Stworzyło to możliwość uzyskania wyników na wysokim poziomie dokładności, lecz skutkowało długim czasem obliczeń.

Na poziomie projektowania formy wtryskowej konstruktor mierzy się z poprawnym określeniem wartości skurczu liniowego dla przetwarzanego tworzywa. Poprawna jego wartość pozwala uzyskać właściwe wymiary wypraski. Otrzymanie takich wymiarów wymaga zastosowania odpowiednich parametrów wtryskiwania, a także odpowiedniej geometrii układu wlewowego. Obydwie składowe wzięto pod uwagę, optymalizując proces formowania przedstawionej wypraski pod kątem wartości skurczu tworzywa. Zasadniczym celem przeprowadzonej optymalizacji było uzyskanie minimalnej wartości skurczu przy jednoczesnym zastosowaniu jak najmniejszych wymiarów układu wlewowego.

W celu optymalizacji skurczu wypraski zastosowano metodę Taguchi (odporną). Wartości danych wejściowych określano metodą planowania czynnikowego, zwykle stosowaną w planowaniu eksperymentów. Dobór niektórych czynników sterujących oraz liczby symulacji MES ustalono, korzystając m.in. z prac Fidana, Ozcelika, Kamaruddina i in. [4-7], gdzie stosowano od 3 do 6 niezależnych zmiennych, z których każda zmieniała się na trzech poziomach. W przedstawionej pracy do badań wykorzystano 7 czynników sterujących, zarówno geometrycznych, jak i technologicznych, z których każdy podlegał zmianom na 3 poziomach. Dzięki zastosowaniu planów ortogonalnych Taguchi, szeroko stosowanych w optymalizacji procesów technologicznych [8-9], zmniejszono wymaganą liczbę symulacji.

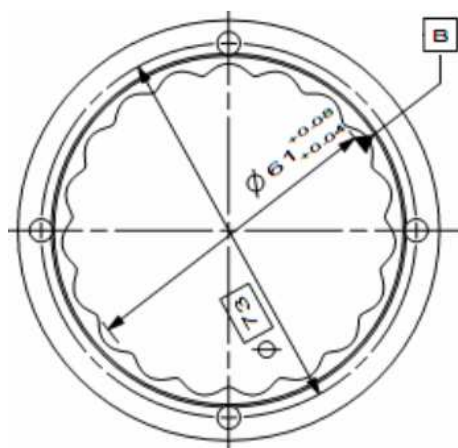
## Cel i przedmiot badań

Do analizy wykorzystano model komputerowy koła zębatego o uzębieniu wewnętrznym (rys. 1.). Wypraska należy do wyprasek grubościennych, dlatego też wykonano pełną analizę 3D MES. Model geometryczny wypraski zdykretyzowano za pomocą ponad 160 000 elementów skończonych typu czworosściennego (ang. tetra). Modelowi wypraski przypisano właściwości tworzywa Delrin 500.

Podstawowe dane modelu wypraski są następujące:

- objętość –  $30,3 \text{ cm}^3$ ,

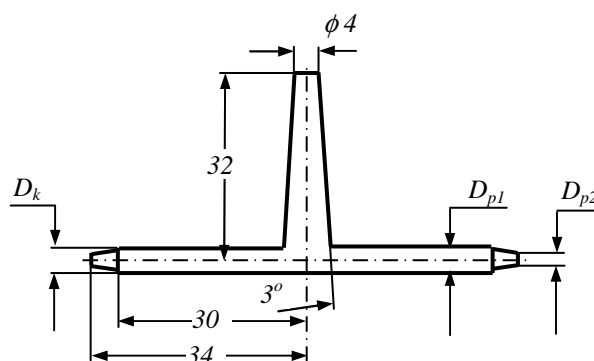
- powierzchnia rzutu wypraski na płaszczyznę podziałową formy – 28,9 cm<sup>2</sup>,
- masa wypraski – 31,8 g.



Rys. 1. Model geometryczny wypraski

Fig. 1. The moulded piece geometry

W celu wykonania symulacji zaprojektowano układ wlewowy (rys. 2.) oraz układ chłodzenia (rys. 3.). Optymalizacji poddano wymiary układu wlewowego dotyczące przekrojów, decydujące o kosztach materiałowych. Dla przyjętych przekrojów kołowych kanałów zmianom podlegały tylko średnice kanałów doprowadzających  $D_k$  oraz wymiary przewężek:  $D_{p1}$  – większa średnica przewężki,  $D_{p2}$  – mniejsza średnica przewężki (rys. 2.). Wymiary wlewu głównego pozostały niezmiennie dla wszystkich trzech analizowanych wariantów parametrów wejściowych. Przyjęto dwa punkty wtrysku, rozmieszczone co 180° na wewnętrznej średnicy koła, 1 mm powyżej wieńca zębatego. Założono niezmienną długość przewężki. Analizowane wartości zmiennych wielkości geometrycznych układu wlewowego oraz ich zakresy przedstawia tab. 1.

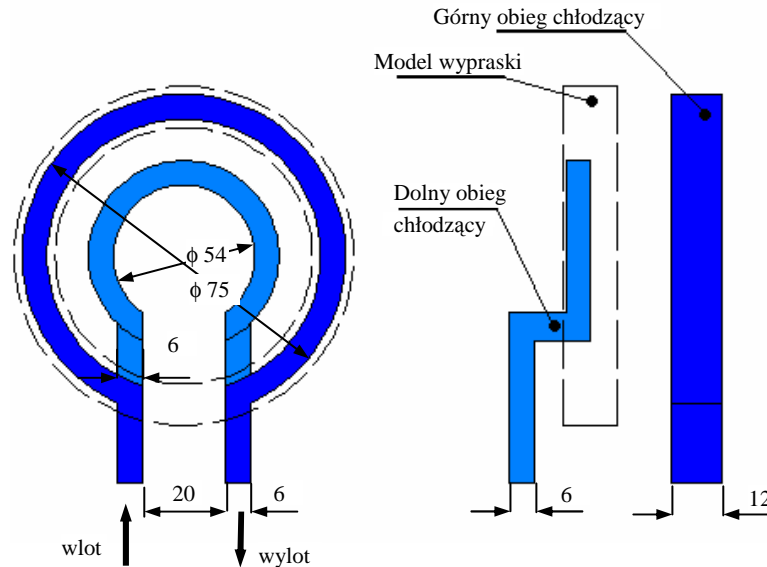


Rys. 2. Geometria układu wlewowego formy

Fig. 2. The runner system geometry

Kształt i niektóre wymiary układu chłodzenia zamieszczono na rys. 3. Dla obiegów chłodzących założono:

- temperaturę czynnika chłodzącego 323 K,
- natężenie przepływu czynnika w układzie: 1,55 litr/min.



Rys. 3. Geometria układu chłodzenia: górny obieg chłodzący – kanał o przekroju prostokątnym, dolny obieg chłodzący – kanał o przekroju kwadratowym

Fig. 3. The cooling system geometry: upper cooling circuit – rectangular section of cooling line, lower cooling circuit – square section

Model korpusu formy uwzględniał właściwości stali P20. W trakcie symulacji wtryskiwania wykonano sekwencje analiz „Cool-Fill-Pack-Warp”. W wyniku symulacji otrzymano rozkład skurczu objętościowego. Średnią wartość skurczu przyjęto jako wartość wynikową.

### Określenie i dobór wartości parametrów wejściowych

Do przeprowadzenia optymalizacji procesu wtryskiwania wybrano 7 czynników sterujących, których wartości ulegały zmianie na trzech poziomach. Czynnikiem tym przypisano w oznaczeniach kolejno litery: A – czas wtrysku, B – średnica kanału doprowadzającego, C – wymiary przewężki (średnica większa, średnica mniejsza), D – ciśnienie docisku, E – czas docisku, F – temperatura formy, G – temperatura tworzywa (tab. 1.).

Podczas doboru zakresu dla czynników sterujących przyjęto wstępnie, iż dla wszystkich spośród przyjętych poziomów zmienności musi być możliwe

wykonanie prawidłowej wypraski, czyli takiej, której skurcz liniowy nie przekracza określonej dla danego tworzywa wartości. W przypadku tworzywa Delrin 500 wartość skurczu liniowego nie powinna przekraczać 2%. Wyższe wartości świadczą, że przyjęte warunki procesu technologicznego nie są właściwe. Poziomy zmienności czynników sterujących podano w tab. 1

Tab.1. Poziomy zmienności czynników sterujących

Table 1. Variable factor levels

Czynnik sterujący	Poziom 1	Poziom 2	Poziom 3
A. Czas wtrysku, s	3	2,5	2
B. Średnica kanału doprowadzającego, mm	4	5	5,5
C. Wymiary przewężki (średnica większa $D_{p1}$ , średnica mniejsza $D_{p2}$ ), mm	3; 2	3,5; 2,5	4; 3
D. Ciśnienie docisku, MPa	80	85	90
E. Czas docisku, s	75	80	85
F. Temperatura formy, °C	50	52	54
G. Temperatura tworzywa, °C	180	182	184

## Ustalenie planu badań

W badaniach wykorzystano plan typu L27. Dla potrzeb metody Taguchi zbudowano tablicę ortogonalną (tab. 3.). W celu określenia jej wymiaru wyznaczono całkowitą liczbę stopni swobody. Oprócz założonych trzech poziomów zmienności dla każdego z czynników wejściowych, założono pomiędzy czynnikami A, C, E, G interakcje: AxC, AxG, CxE. Estymację liczby stopni swobody przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Określenie całkowitej liczby stopni swobody

Table 2. Determination of total DOF

Parametry	Stopnie swobody
Wartość ogólna	1
Parametry zmienne A, B, C, D, E, F, G	$7 \times (3 - 1) = 14$
Interakcje parametrów AxC, AxG, CxE	$3 \times (3 - 1)(3 - 1) = 12$
Całkowita liczba stopni swobody	$1 + 14 + 12 = 27$

Tablica ortogonalna sporządzona na podstawie tab. 2. zawiera 27 kombinacji parametrów podlegających optymalizacji oraz kolumny zawierające wyniki analizy skurczu.

Za pomocą symulacji przeprowadzonych w programie Moldflow Insight 2010, dla trzech poziomów czynników sterujących obliczono wartość skurczu

objętościowego, który, przy założonym skurczu izotropowym, jest powiązany ze skurczem liniowym zależnością:

$$S = 1 - \sqrt[3]{1 - S_v} \quad (1)$$

Przy takim założeniu ustalono przybliżoną wartość skurczu liniowego, którego wartości powszechnie są przedstawiane w literaturze technicznej.

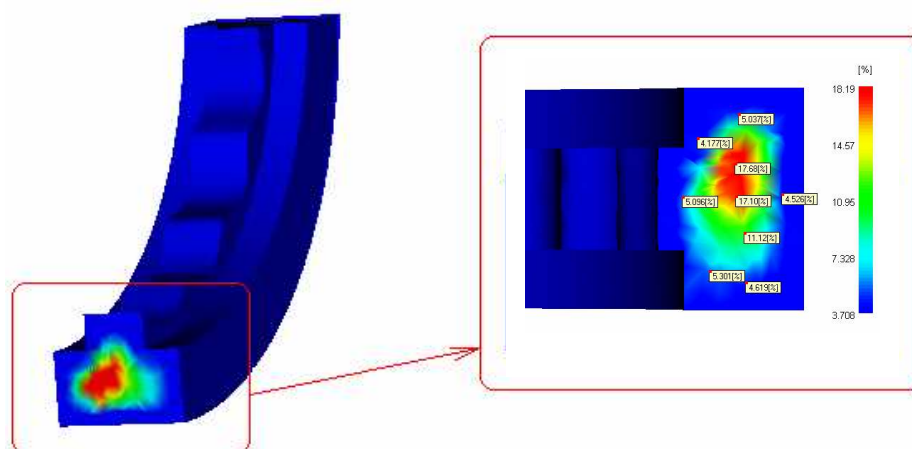
Tabela 3. Tablica ortogonalna  $L_{27}$  – wartości skurczu uzyskane w wyniku symulacji dla różnych konfiguracji czynników sterujących

Table 3. Shrinkage values as simulation results for different configurations of control factors in  $L_{27}$  orthogonal array

Lp.	A	B	C	D	E	F	G	Skurcz objętościowy, %	Skurcz liniowy, %
1	3	4	3; 2	80	75	50	180	6,027	2,009
2	3	4	3,5; 2,5	85	80	52	182	6,525	2,175
3	3	4	4; 3	90	85	54	184	6,342	2,114
4	3	5	3; 2	85	80	54	184	6,120	2,040
5	3	5	3,5; 2,5	90	85	50	180	5,904	1,968
6	3	5	4; 3	80	75	52	182	6,837	2,279
7	3	5,5	3; 2	90	85	52	182	6,129	2,043
8	3	5,5	3,5; 2,5	80	75	54	184	6,939	2,313
9	3	5,5	4; 3	85	80	50	180	6,474	2,158
10	2,5	4	3; 2	85	85	50	184	6,048	2,016
11	2,5	4	3,5; 2,5	90	75	52	180	6,219	2,073
12	2,5	4	4; 3	80	80	54	182	6,420	2,140
13	2,5	5	3; 2	90	75	54	182	6,414	2,138
14	2,5	5	3,5; 2,5	80	80	50	184	6,465	2,155
15	2,5	5	4; 3	85	85	52	180	6,705	2,235
16	2,5	5,5	3; 2	80	80	52	180	6,075	2,025
17	2,5	5,5	3,5; 2,5	85	85	54	182	6,612	2,204
18	2,5	5,5	4; 3	90	80	50	184	7,077	2,359
19	2	4	3; 2	90	75	50	182	6,648	2,216
20	2	4	3,5; 2,5	80	85	52	184	6,582	2,194
21	2	4	4; 3	85	75	54	180	6,270	2,090
22	2	5	3; 2	80	80	54	180	6,234	2,078
23	2	5	3,5; 2,5	85	75	50	182	6,375	2,125
24	2	5	4; 3	90	80	52	184	6,741	2,247
25	2	5,5	3; 2	85	75	52	184	6,540	2,180
26	2	5,5	3,5; 2,5	90	80	54	180	6,147	2,049
27	2	5,5	4; 3	80	85	50	182	6,852	2,284

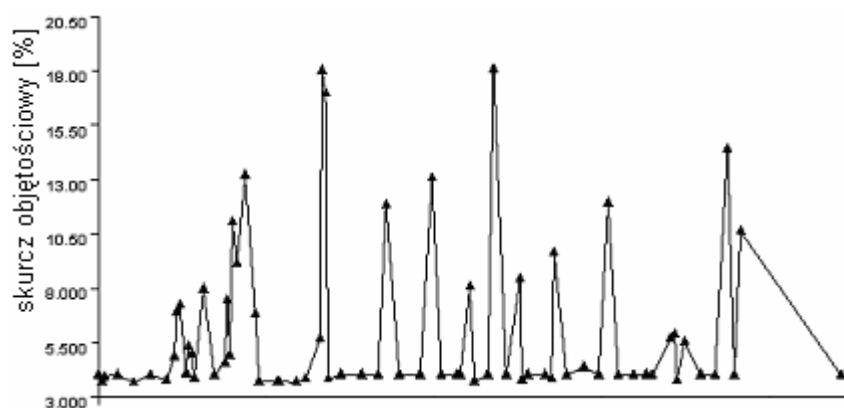
Ze względu na osiowo-symetryczny kształt wypraski wartości skurczu objętościowego ustalono, analizując jego rozkład w wybranym, reprezentatywnym przekroju (rys. 4.). Wartość skurczu objętościowego, obliczoną dla każdego z kilkunastu węzłów tego przekroju, uśredniano dla każdej spośród dwudziestu

siedmiu kombinacji czynników w symulacji, przyjmując średnią ważoną dla obszaru występowania danej jego wartości. Przykładowy rozkład wartości skurczu dla analizowanych węzłów w wybranym przekroju przedstawia rys. 5.



Rys. 4. Rozkład skurczu objętościowego w analizowanym przekroju poprzecznym wypraski

Fig. 4. The volumetric shrinkage distribution in analyzed cross section of moulded piece



Rys. 5. Przykładowe wartości skurczu objętościowego w węzłach leżących w przekroju – wg przypadkowej kolejności wskazywanych węzłów.

Fig. 5. Exemplary values of volumetric shrinkage in nodes being in section in random order of indicated nodes

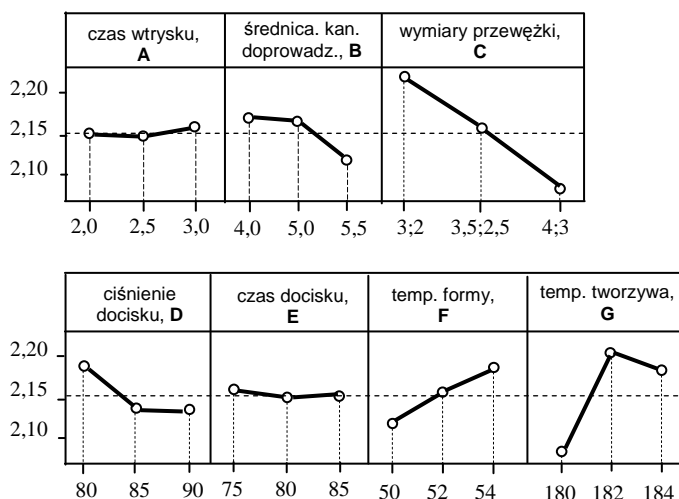
## Określenie optymalnych parametrów procesu

Po wskazaniu czynników wejściowych i obliczeniu wielkości wyjściowych wybrano kryterium opisujące rodzaj analizowanego problemu. Metoda Taguchi używa w tym celu tzw. wskaźnika S/N (ang. signal-to-noise ratio). Bierze on pod uwagę zarówno wartość średnią sygnału mierzonego, jak i jego odchylenie standardowe. Sposób obliczenia S/N zależy od badanego kryterium jakości. W analizowanym przypadku skurcz objętościowy powinien być jak najmniejszy, więc wybrano kryterium: „im mniejszy, tym lepszy”. Charakterystykę jakości oraz stosunek wartości sygnału do wartości szumu (S/N) obliczano z równania:

$$S/N = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2)$$

gdzie:  $y_i$  – średnia wartość skurczu w analizowanym przekroju.

Do wykonania analizy Taguchi wykorzystano program Minitab 14. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji uzyskano wykresy głównych czynników wpływu na wartość skurczu. Na ich podstawie można ustalić optymalną konfigurację czynników sterujących. Jest nią kombinacja czynników A2, B3, C3, D3, E2, F1, G1.



Rys. 6. Wykres głównych czynników wpływu na wartość skurczu wypraski koła zębatego

Fig. 6. Graph of influence of the main factors on the shrinkage value of gear moulded piece

Z powodu braku optymalnej kombinacji czynników sterujących w tablicy ortogonalnej przeprowadzono, w celu weryfikacji wyników obliczeń, dodatkową



symulację procesu dla optymalnych parametrów. Po wykonaniu obliczeń uzyskano wartość skurczu objętościowego równą 5,89, co stanowi najmniejszą jego wartość. Wynik potwierdza poprawność przeprowadzonych obliczeń.

### Analiza wyników

Z wykresów (rys. 6.) można odczytać, że największy wpływ na wartość skurczu mają wymiary geometryczne układu doprowadzającego, ciśnienie docisku oraz temperatura, zarówno tworzywa, jak i formy. Wraz ze zwiększaniem wymiarów układu doprowadzającego wartość skurczu maleje. Aby uzyskać najmniejszy skurcz, powinno się więc przyjąć największe wartości wymiarów układu doprowadzającego. Z drugiej jednak strony należy dążyć do oszczędności materiału, a co się z tym wiąże, wymiary te powinny być jak najmniejsze. Można również zauważyć, że w większym stopniu na wartość skurczu wpływają wymiary przewężki niż wymiary kanału doprowadzającego. Przewężka o maksymalnych z zakresu zmienności wymiarach posiada o wiele mniejszą objętość od kanału doprowadzającego o wymiarach nawet najmniejszych, zatem ilość zestalonego tworzywa w przewężce o maksymalnych wymiarach będzie o wiele mniejsza aniżeli w kanale doprowadzającym o minimalnej średnicy (4 mm). Dlatego też przy ustalaniu optymalnych parametrów, w celu oszczędności materiału, przy jednoczesnym uniknięciu znaczącego pogorszenia jakości wyrobu należy skupić się na wymiarach kanału doprowadzającego. Obserwując wpływ zmiany średnicy kanału doprowadzającego na wartość skurczu, można zauważyć, że istotny wpływ na ten parametr wyjściowy ma jedynie zmiana średnicy z 5,5 na 5 mm, natomiast dla średnicy 4 mm wartość skurczu jest niemalże taka sama jak dla średnicy 5 mm. Zatem na tej podstawie można wnioskować, że zastosowanie najmniejszej średnicy kanału doprowadzającego, przy jednoczesnym zastosowaniu największych wymiarów przewężki pozwoli uzyskać wypraskę o zadowalających właściwościach, przy jednoczesnej oszczędności materiału. Przy ostatecznym doborze wymiarów układu wlewowego należy wziąć pod uwagę, że z technologicznego punktu widzenia zaleca się, aby stosunek średnicy końcowej kanału doprowadzającego do średnicy początkowej przewężki był w przybliżeniu równy 0,75. Z tego względu wymiary przewężki przyjęto ze środka zakresu.

W celu optymalizacji pozostałe czynniki sterujące procesu wtryskiwania należy ustalić zgodnie z rys. 6., a więc przyjmować te wartości parametrów, dla których wartość skurczu liniowego jest najmniejsza.

Dla optymalnej kombinacji czynników sterujących (tab. 4.) przeprowadzono ponownie, jak poprzednio, symulację komputerową wtryskiwania. W jej wyniku otrzymano porównawczy rozkład skurczu objętościowego w analizowanym przekroju (rys. 7b).

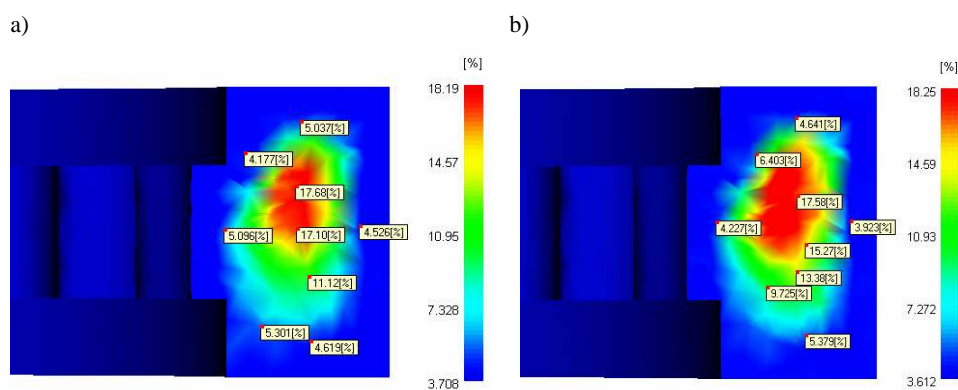
Średnia wartość skurczu objętościowego w przekroju poprzecznym wypraski przy zastosowaniu maksymalnych wymiarów układu wlewowego wynosi

6,057%, a więc niewiele mniej niż dla parametrów przyjętych po optymalizacji. Na rysunkach można dostrzec, że wartość maksymalnego skurczu, który oznaczono na rys. 7. kolorem czerwonym i który wynosi blisko 18%, jest mniejsza przy zadaniu większych wymiarów układu wlewowego. Wypraska wykonana przy założeniu parametrów zoptymalizowanych nie ustępuje wiele pod względem jakości, natomiast pod względem oszczędności materiału może konkurować z wypraską wykonaną przy użyciu układu wlewowego o większych wymiarach geometrycznych.

Tabela 4. Zestawienie optymalnych parametrów dla procesu wtryskiwania

Table 4. List of optimum parameters for injection moulding process

Czynnik sterujący	Wartość
Ciśnienie docisku, MPa	90
Czas wtrysku, s	2,5
Czas docisku, s	80
Temperatura formy, °C	50
Średnica kanału doprowadzającego, mm	4
Wymiary przewężki (średnica większa, średnica mniejsza), mm	3,5; 2,5
Temperatura tworzywa, °C	180
Skurcz objętościowy, %	6,219



Rys. 7. Rozkład skurczu objętościowego na przekroju wypraski dla kombinacji parametrów przed optymalizacją (a) oraz przy użyciu maksymalnych z zakresu wymiarów układu wlewowego i po optymalizacji (b)

Fig. 7. Volumetric shrinkage distribution on cross section of moulded piece for combination of parameters before (a) and after (b) optimization by using maximum dimensions of the runner system geometry

## Wnioski

Przeprowadzone symulacje znacznie zmniejszają koszt i czas optymalizacji procesu wtryskiwania. Dzięki optymalizacji uzyskano konfiguracje czynników sterujących, których wartości dobierano, kładąc nacisk na oszczędność materiału, przy jednoczesnym zachowaniu wartości skurczu liniowego na odpowiednim poziomie, pozwalającym uzyskać prawidłową wypraskę. Optymalne wartości czynników sterujących według ich oznaczeń, a także oznaczeń poszczególnych wariantów eksperymentów to: A2, B3, C3, D3, E2, F1, G1.

## Literatura

1. Taguchi G., A primer on the Taguchi method, Van Nostrand Reinhold, New York 1990.
2. Kukiłka L., Podstawy badań inżynierskich, PWN, Warszawa 2002.
3. Korzyński M., Metodyka eksperymentu, planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych, WNT, Warszawa 2006.
4. Ozcelik B., Sonat I., Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection moulding, *Materials and Design*, 30 (2009), 367-375.
5. Ozcelik B., Erzurumlu T., Comparison of the warpage optimization in the plastic injection moulding using ANOVA, Neural network model and genetic algorithm, *J. Mat. Proc. Technol.*, 171 (2006), 437-445.
6. Fidan I., Kraft R.P., Ruff L.E., Derby S.J., Designed experiments to investigate the solder joint quality output of a prototype automated surface mount replacement system, *Comp. Pack. Manufact. Technol. Part C: Manufacturing*, IEEE Transactions 21(3) (1998), 172-181.
7. Kamaruddin S., Khan Z.A., Wan K.S., The use of the Taguchi method in determining the optimum plastic injection moulding parameters for the production of a consumer product, *Journal Mechanical* December, 18 (2004), 98-110.
8. Wang W.H., Tarng Y.S., Design Optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *J. Mat. Proc. Technol.*, 84 (1998), 122-129.
9. Syrcos G.P., Die casting process Optimization using Taguchi methods, *J. Mat. Proc. Technol.*, 135 (2003), 68-74.

## INJECTION MOULDED PIECE SHRINKAGE OPTIMIZATION BY MEANS 3D SIMULATION RESULTS

### Abstract

Determining optimum injection moulding process and geometrical parameters of runner system influencing on shrinkage value of plastics was the main aim of the present research work. Optimizing procedure was carried out with the use of Taguchi method. The runner geometry was set as one of the variable factors in order to minimize its size. To optimize manufacturing process

the series of technological tests of injection process with different parameters were done, according to the definite technological plan. Instead of time-consuming and expensive experiments, the Autodesk Moldflow Insight 10.0 computer code was used to simulate injection moulding process. The calculations were done by implementing 3D model in the theory of finite element method.

*Złożono w redakcji w październiku 2011 r.*