

ZASTOSOWANIE METODY NAJWIĘKSZEGO SPADKU W OPTYMALIZACJI PROCESU WTRYSKIWANIA

AN APPLICATION OF THE METHOD OF STEEPEST DESCENT IN THE OPTIMIZATION OF INJECTION MOLDING PROCESS

Praca przedstawia eksperymentalne podejście do problemu optymalizacji procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych. W badaniach optymalizacyjnych wykorzystano programy statyczne dwuwartościowe-frakcyjne oraz metodę największego spadku, łącznie stanowiące sekwencyjną procedurę badań doświadczalnych. W uzyskanym rozwiązaniu uwzględniono pięć czynników badanych oraz jeden czynnik wynikowy jakim był skurcz wtórny wyprasek. W artykule przedyskutowano wyniki poszczególnych etapów badań optymalizacyjnych.

Słowa kluczowe: Planowanie eksperymentów, jakość, optymalizacja, metoda powierzchni odpowiedzi.

This paper presents an experimental approach to optimization of the injection molding process. The performed researches were based on designed experiments such as: the 2^{n-p} fractional and composite design as well as the method of steepest descent. There were five independent and one response variable involved in the optimization process. Results of the particularly experimental stages were discussed. An attention was paid to practical aspects of research.

Keywords: design of experiments, quality, optimization, response surface methodology

1. Wprowadzenie

W artykułach i opracowaniach dotyczących jakości poświęca się dużo miejsca technikom planowania eksperymentów (DOE - design of experiments) [1, 2, 3, 4]. Procedury doświadczalne wykorzystuje się głównie we wczesnych etapach projektowania produktu. W praktyce istnieje wiele czynników wpływających na kluczowe właściwości produktu. Zadaniem personelu odpowiedzialnego za jakość jest ustalenie, które z czynników badanych należy uwzględnić w dalszych etapach doskonalenia produktu, a które z nich należy pominąć. Z drugiej strony bez żadnej wstępnej wiedzy trudno jest stwierdzić ważkość poszczególnych czynników. W takich sytuacjach jedynym sposobem do zdobycia tego typu informacji jest wykorzystanie technik eksperymentalnych. Gdy powyższy problem zostanie rozwiązany, natychmiast pojawia się inny. Chociaż wyznaczono właściwy zbiór czynników badanych, zwykle trudno jest cokolwiek stwierdzić na temat optymalnych warunków, w których ma być realizowany proces technologiczny. W takim przypadku należy zastosować jedną z technik eksperymentalnych umożliwiającą wyznaczenie takich warunków prowadzenia procesu, dla których jakość produktu będzie uważana jako zadawalająca.

W artykule przedstawiono wybrane techniki eksperymentalne zgrupowane pod wspólną nazwą Metody Powierzchni Odpowiedzi (RSM - Response Surface Methodology), pozwalające na rozwiązywanie problemów zaakcentowanych we wstępie. Jako przykład ich zastosowania rozważono proces optymalizacji procesu wtryskiwania termoplastów.

2. Metoda powierzchni odpowiedzi

Metoda Powierzchni Odpowiedzi [1, 3, 5] jest zbiorem statystycznych i analitycznych technik obliczeniowych użytecznych w trakcie prowadzenia prac rozwojowych nad produktem, jak również w fazie jego doskonalenia. W praktyce metodę powierzchni odpowiedzi stosuje się w sposób sekwencyjny. W pierwszym etapie spośród ogółu czynników badanych należy wyznaczyć te, które w istotny sposób wpływają na wartość powierzchni odpowiedzi. To

z kolei bezpośrednio prowadzi do zagadnień planowania eksperymentu. Wykonanie eksperymentu, a następnie interpretacja jego wyników pozwala na ocenę wpływu poszczególnych czynników badanych na wartość powierzchni odpowiedzi. Tą fazę badań eksperymentalnych zwykle nazywa się fazą zerową metody powierzchni odpowiedzi, natomiast eksperymenty wykonywane w jej trakcie określa się mianem eksperymentów przeglądowych.

Gdy znaczenie poszczególnych czynników badanych zostanie ustalone, przechodzi się do kolejnej fazy badań. W tym etapie zadaniem eksperymentatora jest stwierdzenie, czy aktualne wartości zmiennych niezależnych (wartości nominalne) odpowiadają ekstremum powierzchni odpowiedzi. Jeżeli aktualne wartości czynników badanych nie odpowiadają optimum funkcji odpowiedzi, konieczne jest podjęcie dodatkowych działań w celu przesunięcia procesu w kierunku sąsiedztwa punktu optymalnego. Podczas tej fazy doskonalenia procesu technologicznego zwykle stosowana jest metoda największego spadku. Ta technika optymalizacyjna w dużym stopniu wykorzystuje plany eksperymentalne frakcyjne, dwuwartościowe. Celem stosowania tego typu eksperymentów jest określenie lokalnych tendencji zmian powierzchni odpowiedzi opisywanych przy użyciu wielomianów pierwszego stopnia.

Jeżeli proces jest bliski optimum - wykonywana jest druga, a zarazem końcowa faza optymalizacji doświadczalnej. Jej celem jest uzyskanie możliwie jak najbardziej dokładnego opisu procesu w otoczeniu punktu odpowiadającego ekstremum. Obszar przestrzeni czynnikowej objęty eksperymentem musi być wystarczająco wąski by uzyskać dokładną aproksymację funkcji odpowiedzi. Z uwagi na to, że procedura optymalizacji osiągnęła sąsiedztwo optimum należy się spodziewać wystąpienia efektu krzywizny. Przyjmując powyższe założenia, w wielu przypadkach wystarczająco dobrym przybliżeniem funkcji odpowiedzi jest wielomian drugiego stopnia. Adekwatny model procesu umożliwia następnie określenie optymalnych warunków prowadzenia procesu ze względu na przyjęte kryterium jakości.

3. Optymalizacja procesu wtryskiwania termoplastów

Proces wtryskiwania termoplastów jest ze swej natury bardzo złożony. Istnieje wiele czynników, które istotnie wpływają na jego właściwości [6, 7]. Co więcej, ich znaczenie jest w przybliżeniu jednakowe w zależności od tego jaki rodzaj zmiennej wynikowej brany jest pod uwagę. Dlatego też, nie jest łatwo zdecydować, który z czynników badanych mógłby zostać uwzględniony podczas optymalizacji procesu wtryskiwania. W celu rozwiązania postawionego problemu zastosowano metodę powierzchni odpowiedzi. Jako charakterystykę jakości procesu wtryskiwania wybrano skurcz wtórny wyprasek. Analiza literatury [5] pozwoliła założyć, że zmienne niezależne takie jak: temperatura formy, temperatura tworzywa, czas wtrysku, czas chłodzenia oraz ciśnienie docisku powinny zostać uwzględnione w trakcie prowadzenia procesu optymalizacji. Wszystkie powyższe czynniki badane wraz z przedziałami ich zmienności zostały zestawione w tabeli 1.

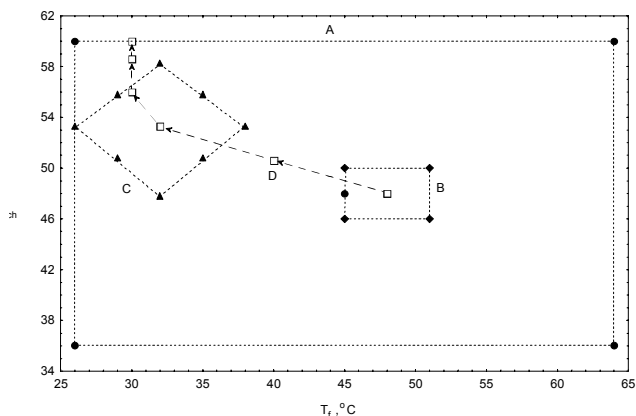
Tabla 1. Zakres zmienności zmiennych niezależnych

Zmienne niezależne		Zakres zmienności		Jednostka
		Min	Max	
Temperatura formy	T_f	26	64	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura tworzywa	T_t	240	265	$^{\circ}\text{C}$
Czas wtrysku	t_w	1,25	1,75	s
Czas chłodzenia	t_{ch}	36	60	s
Ciśnienie docisku	p_d	8	12	MPa

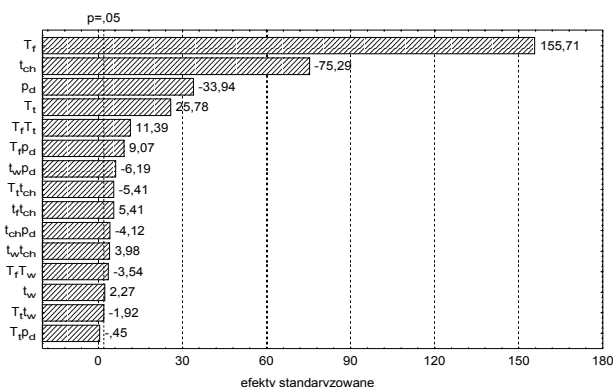
Poszczególne fazy optymalizacji doświadczalnej procesu wtryskiwania przedstawiono na rysunku 1. W pierwszym etapie procedury optymalizacji zamierzano oszacować wpływ czynników badanych na zmienną wynikową. W tym celu zastosowano plan eksperymentalny typu 2^{5-1}_p , jako program badań przeglądowych. Duża rozdzielczość planu umożliwiła odseparowanie efektów głównych od interakcji dwuczynnikowych. Na rys. 2 przedstawiono wyniki eksperymentu przeglądowego. Jest łatwo zauważyć, że najbardziej znaczącym czynnikiem badanym jest temperatura formy. Interakcje dwuczynnikowe pomiędzy poszczególnymi zmiennymi mogą zostać zignorowane w kolejnych etapach optymalizacji. Pierwsza faza badań udowodniła, że efekt zmian poszczególnych

czynników badanych na wartość skurczu wtórnego jest statystycznie istotny, stąd też żaden czynnik nie może być pominięty w dalszych etapach badań.

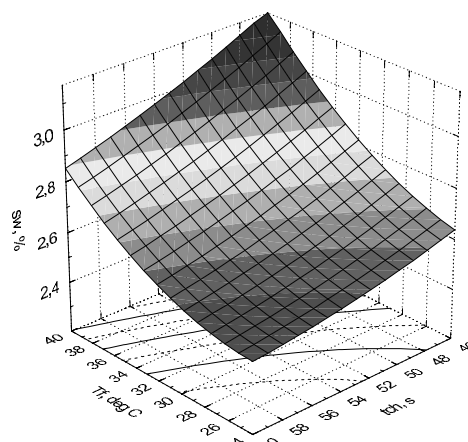
W kolejnym etapie badań do poszukiwania sąsiedztwa punktu odpowiadającego minimum skurczu wtórnego zastosowano metodę największego spadku. W tym celu, w sposób arbitralny wybrano punkt, od którego rozpoczęto procedurę optymalizacji. Punkt ten jednocześnie stanowił centrum planu eksperymentalnego zgodnego z planem doświadczalnym typu 2^{5-3}_{III} (rys. 1, region "B"). Eksperyment ten posłużył do określenia równania prostej wzdłuż której powierzchnia odpowiedzi (tu: skurcz wtórny wyprasek) minimalizuje swoją wartość. Po obliczeniu współczynników kierunkowych prostej możliwe było wyznaczenie zbioru punktów leżących wzdłuż ścieżki określającej największą zmianę czynnika wynikowego (rys. 1 ścieżka poszukiwań ekstremum „D”). Tym sposobem wyznaczone zostało położenie sąsiedztwa punktu ekstremalnego (tu: minimum skurczu wtórnego).



Rys. 1. Przedziały zmienności temperatury formy i czasu chłodzenia wyprasek w poszczególnych etapach prac eksperymentalnych; (●) etap 1 – plan dwuwartościowy 2^{5-1}_p , (◆) etap 2 – plan dwuwartościowy 2^{5-3}_{III} (▲) etap 3 – plan kompozycyjny, (□) ścieżka poszukiwań ekstremum.



Rys. 2. Model skurczu wtórnego - wynik analizy Pareto efektów standaryzowanych



Rys. 3. Zależność skurczu wyprasek w funkcji temperatury formy i czasu chłodzenia wyprasek w otoczeniu minimum powierzchni odpowiedzi

W ostatnim etapie procedury optymalizacji (rys. 1, obszar „C” – sąsiedztwo ekstremum) powierzchnię odpowiedzi lokalnie aproksymowano za pomocą wielomianu drugiego stopnia. W tym celu wykorzystano plan eksperymentalny, kompozycyjny. Jądro planu stanowił program dwuwartościowy, wieloczynnikowy typu: 2^{5-1}_{IV} . Dysponując adekwatnym przybliżeniem wielomianowym i stosując metody analityczne wyznaczono położenie punktu ekstremum. Rys. 3 przedstawia wykres funkcji odpowiedzi wokół otoczenia minimum skurczu wtórnego.

4. Wnioski

Skomplikowana natura procesu wtryskiwania termoplastów wymaga uwzględnienia dużej liczby zmiennych niezależnych. Im więcej czynników badanych zostanie użytych w trakcie badań eksperymentalnych, tym bardziej dokładny będzie model procesu. Z jednej strony zwiększenie ilości zmiennych niezależnych prowadzi do bardzo dużej liczby układów doświadczalnych. Z drugiej natomiast strony odrzucenie kluczowych zmiennych niezależnych może doprowadzić do zubożenia opisu procesu przez model empiryczny. Techniki eksperymentalne pozwalają określić, które ze zmiennych niezależnych są istotne z punktu widzenia prowa-

dzonych badań, a które należy pominąć. Metody statystyczne (np. analiza wariancji) umożliwiają następnie zweryfikowanie wyników doświadczeń.

Wyniki doświadczeń zaprezentowanych w tym artykule pokazują, że metoda największego spadku jest bardzo efektywną techniką doświadczalną. Zastosowanie tylko dwóch etapów procedury badań pozwoliło na osiągnięcie punktu ekstremum. Skurcz wtórny wyprasek został zmniejszony, aż do 50% swojej początkowej wartości.

W wielu praktycznych przypadkach optymalne warunki prowadzenia procesu określa się na podstawie doświadczenia ekspertów. Wiedza ekspercka jest głównie nabywana poprzez praktykę i najczęściej nie ma nic wspólnego z metodyką prowadzenia badań eksperymentalnych. Operator nadzorujący proces technologiczny musi zwykle wykonać dużą liczbę prób, które w jego ocenie prowadzą do zadawalających rozwiązań. Postępując tak nie ma się wcale pewności, że określone w ten sposób warunki prowadzenia procesu będą optymalne. Zastosowanie technik eksperymentalnych umożliwi w dokładny i co więcej – wiarygodny sposób wyznaczyć optymalne warunki prowadzenia procesu bez wykonywania zbyt wielu prób eksperymentalnych.

5. Literatura

- [1] Montgomery D.: *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons, N.Y., 1997
- [2] Płaska S.: *Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2000.
- [3] Hinkelmann K., Kempthorne O.: *Design and Analysis of Experiments: Introduction to Experimental Design*, John Wiley & Sons, N.Y., 1994.
- [4] Steinberg D.: *Robust Design: Experiments for Improving Quality*, Handbook of Statistics, Vol.13, Elsevier Science B.V, N.Y., 1996.
- [5] Draper N., Lin D.: *Response Surface Design*, Handbook of Statistics, Vol.13, Elsevier Science B.V, N.Y., 1996.
- [6] Płaska S., Bogucki M., Stączek P.: *Modelowy system nadzorowania pracy wtryskarek i sterowania produkcją*, raport z grantu KBN 1003/T08/98/15, Politechnika Lubelska, Lublin, 2002.
- [7] Smorawiński A.: *Technologia wtrysku*, WNT, Warszawa, 1989.

Mgr inż. Marcin Bogucki

Mgr inż. Paweł Stączek

Katedra Automatykacji

Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

tel. (081)5381267

automat@lctt.pol.lublin.pl
