

STANISŁAW PŁASKA

Politechnika Lubelska

Katedra Automatyki

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

e-mail:automat@lctt.pol.lublin.pl

Metoda wyboru strategii zapewniania jakości wyprasek wtryskowych

THE METHOD FOR SELECTING THE STRATEGY TO CONTROL THE QUALITY OF INJECTION MOLDINGS

Summary — Three methods based on Taguchi's loss function are presented to ensure good quality in moldings and the cost involved is estimated in relation to polymer type. Cost components are specified for each method. Practical manufacturing data are used to estimate the cost relation to process capacity (C_p) (Table 2, Fig. 1).

Key words: quality of molding, methods ensuring good quality in moldings, cost of method, Taguchi's loss function.

METODY ZAPEWNIANIA JAKOŚCI WYTWORÓW Z TWORZYW

W różnego rodzaju urządzeniach obserwuje się systematyczny wzrost udziału elementów z tworzyw. Jest to widoczne zwłaszcza w urządzeniach gospodarstwa domowego i w przemyśle samochodowym. Mimo wielu zalet, wytwory z tworzyw mają także wady. Należy do nich m.in. skurcz, który w przypadku niepowtarzalnej technologii procesu wtryskiwania może w istotny sposób pogorszyć jakość pracy urządzeń [1]. Dlatego też brak wnikliwie zaplanowanej jakości procesów przetwórczych i otrzymywanych w ich wyniku wytworów z tworzyw może prowadzić do powstawania bardzo istotnych kosztów (kosztów jakości), których potencjalnie można uniknąć. Doświadczenia wielu firm wykazują, że ok. 80% wad wszystkich wytworów (nie tylko z tworzyw) powstaje podczas projektowania, planowania i uruchamiania produkcji [2]. Koszty związane z usuwaniem wad wzrastają niewspółmiernie szybko w miarę oddalania się od miejsca, gdzie powstała wada, osiągając np. u klienta wartość przekraczającą kilkaset razy koszt usunięcia tej wady u źródła jej powstania. W tradycyjnych systemach zapewniania jakości ponad 80% wad usuwa się dopiero w fazie oceny jakości wynikowej wytworu u klienta. Ocenia się, że wśród wad usuwanych u klienta ok. 60% jest spowodowanych błędami w konstrukcji [2].

W praktyce stosuje się następujące metody zapewniania jakości:

- pełna 100-proc. inspekcja wytworów,
- sterowanie statystyczne procesami technologicznymi,

— sterowanie statystyczne procesami technologicznymi połączone ze 100-proc. inspekcją.

Pełną inspekcję wytworów prowadzi się najczęściej w odniesieniu do procesów, które nie są nadzorowane statystycznie. W takim przypadku zmiany charakterystyk jakości w sytuacji, gdy wtryskarki mają duże wskaźniki zdolności C_{pm} , przybierają rozproszenie o kształcie zbliżonym do rozkładu równomiernego i średniej przesuniętej w stosunku do wartości nominalnej. Rozkład taki powstaje jako wynik „rozmywania” rozkładu normalnego przez chwilowe zmiany wartości średniej. W przypadku małych wskaźników zdolności wtryskarek, rozproszenie może być opisane uciętym przez granice tolerancji rozkładem Gaussa. Wówczas pole tolerancji procesu obejmuje przedział nie większy niż czterokrotna wariancja, czemu odpowiada 4,55% niezgodności rozpatrywanych charakterystyk jakości ze specyfikacjami technicznymi, o ile nie występuje równocześnie przesunięcie średniej w stosunku do wartości nominalnej. Strategia akceptowalnego poziomu jakości (AQL), w której stosowano głównie działania inspekcyjne, dopuszczała 1—2% braków, co uzyskiwano dokonując właśnie 100-proc. inspekcji [2].

Istota sterowania statystycznego procesami technologicznymi polega na takim ich korygowaniu, aby można było uzyskać wskaźnik zdolności C_{pk} zbliżony do wskaźnika zdolności środków technicznych C_m (wtryskarek i systemów pomiarowych). Wymogiem minimalnym jest zazwyczaj osiągnięcie wskaźnika zdolności procesu $C_p = C_{pk} = 1$, czemu odpowiada 0,27% braków. Na kolejnych etapach doskonalenia procesu technologicznego dąży się do uzyskania wskaźnika $C_p = 1,33$, a nawet $C_p = 1,6$ [2]. Uzyskanie tak dużych wartości wskaźników zdol-

ności procesu jest możliwe wówczas, gdy charakterystyki jakości zostaną wycentrowane w stosunku do wartości celowej (nominalnej) procesu i wyeliminuje się tzw. zakłócenia przypisywane. Ponadto jest konieczne spełnienie podanego wcześniej wymogu, by wskaźniki zdolności środków technicznych były odpowiednio większe od wymaganej zdolności procesu technologicznego. Jeżeli środki techniczne nie mają zadowalającej zdolności, to poprawa procesu technologicznego oczywiście jest niemożliwa. Sterowanie statystyczne wymaga monitorowania tych cech procesu technologicznego, które najbardziej wpływają na zmiany położenia wymaganych charakterystyk jakości. W tym celu należy określić ważne czynniki technologiczne, ich dopuszczalną zmienność oraz stosować systemy informatyczne wyspecjalizowane do monitorowania wytypowanych wielkości.

Celem stosowania 100-proc. inspekcji w procesach sterowanych statystycznie jest wychwycenie poważniejszych zakłóceń i niedopuszczenie do przedostawania się wytworów wadliwych do odbiorców. Nie występuje wówczas dodatkowa poprawa jakości, lecz analiza pojawiających się sporadycznie znacznych zakłóceń staje się podstawą podejmowania dalszych działań doskonalących proces wytwarzania.

Każde z przedstawionych działań pociąga za sobą określone koszty. Zarówno koszty poszczególnych metod zapewniania jakości, jak i skutki przedostania się wadliwych elementów do dalszej produkcji powinny być przedmiotem wnikliwych analiz menedżerów produkcji [3]. Problem wadliwości wytworów z tworzyw został omówiony w pracy [4], natomiast cel niniejszego artykułu stanowi prezentacja analiz kosztów jakości zastosowanych do wyprasek z poliamidu.

TEORETYCZNE PODSTAWY ANALIZY KOSZTÓW JAKOŚCI WYTWORÓW Z TWORZYW

Ocena jakości wytworów za pomocą liczbowych wskaźników zdolności jest bardzo wygodna dla menedżerów i stosuje się je powszechnie także w odniesieniu do wytworów z tworzyw. Nie ilustruje ona jednak ewentualnych przyszłych strat na rynku handlowym, podczas gdy dla menedżerów, prócz doraźnych ocen produkcji, konieczne są metody oceny umożliwiające przewidywanie jakości przed wypuszczeniem wytworów na rynek. Potrzebom takim służy model oceny jakości wyrażony za pomocą funkcji strat, określający straty (wyrażone w jednostkach monetarnych) ponoszone przez klientów z tego powodu, że nie wszystkie charakterystyki jakości osiągają wartości celowe (nominalne).

Podstawą analizy jest zaproponowana przez G. Taguchi [5] funkcja strat $L(x)$ o postaci:

$$L(x) = k(x - T)^2 \quad (1)$$

gdzie: x — wartość rozpatrywanej charakterystyki jakości wytworu, T — cel procesu (wartość pożądana charakterystyki jakości, wartość nominalna), k — współczynnik (o wartości dodatniej).

Analiza strat według podanej zależności wymaga rozpatrzenia typów stosowanych tolerancji. Ograniczając się do symetrycznej tolerancji dwustronnej (bilateralnej) stosowanej często w odniesieniu do wytworów z tworzyw, funkcję strat można wyrazić w następujący sposób:

$$L(x) = k(x - \bar{x})^2 \quad (2)$$

gdzie: \bar{x} — wartość średnia rozpatrywanej charakterystyki jakości ($T = \bar{x}$ w przypadku symetrycznej tolerancji dwustronnej).

Gdy $x = \bar{x}$, straty $L(x)$ są równe zero. Jeżeli poszczególne charakterystyki jakości wytworu odchylają się od celu, to straty wzrastają [6]. Po przekroczeniu jednej z granic tolerancji — $\bar{x} + d$ lub $\bar{x} - d$ ($2d$ oznacza tolerancję, a $\bar{x} \pm d$ to granice tolerancji; w odniesieniu do symetrycznej tolerancji dwustronnej cel leży w środku granic tolerancji) — straty jakości są równe kosztom wytwarzania, które wynoszą np. A . Zgodnie z zależnością określającą funkcję strat otrzymuje się:

$$A = kd^2 \text{ lub } k = \frac{A}{d^2} \quad (3)$$

Jeżeli są mierzalne wszystkie charakterystyki jakości wytworów, znane są koszty A_i oraz średnie odchylenie kwadratowe tych charakterystyk od celu procesu, to można obliczyć łączne straty jakości wytworu. Wynoszą one:

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{d_i^2} \delta_i^2 \quad (4)$$

gdzie: δ_i^2 — odchylenie średniokwadratowe i -tej charakterystyki jakości od jej celu (wartości nominalnej):

$$\delta_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - T_i)^2 \quad (5)$$

gdzie: x_{ij} — wartość i -tej charakterystyki jakości j -tego wytworu; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n — liczba charakterystyk jakości; $j = 1, 2, 3, \dots, m$; m — liczba wytworów w partii; A_i — koszt związany z osiągnięciem i -tej charakterystyki jakości.

Ponieważ liczbowe wskaźniki zdolności są bardzo popularnymi i wygodnymi miarami ocen, interesujący jest ich związek z funkcją strat. Funkcję strat należy rozpatrywać w odniesieniu do całej partii wytworów. W sterowaniu jakością dąży się do osiągnięcia wskaźnika zdolności C_{pk} równego co najmniej jeden [2]. Przyjmując, że w bieżącym procesie straty związane z jedną z charakterystyk jakości wynoszą:

$$L_1 = k\delta_1^2 \quad (6)$$

to w procesie udoskonalonym straty powinny wynieść:

$$L_2 = k\delta_2^2 \quad (7)$$

przy czym:

$$\delta_1 > \delta_2 \quad (8)$$

Pomijając pewną możliwość zmiany współczynnika k , otrzymuje się więc:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\delta_1^2}{\delta_2^2} \quad (9)$$

Podstawiając do równania (9) odchylenia standardowe obliczone z wyrażenia na zdolność C_p , uzyskuje się wg [5] zależność o postaci:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{C_{p2}^2}{C_{p1}^2} \quad (10)$$

Zależność (10) pokazuje, że straty spowodowane przez odchylenia są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu wskaźników zdolności C_p . Jeżeli straty w pewnym okresie są znane, to można za pomocą wskaźnika określić straty po wprowadzeniu udoskonaleń procesu [6]. W odniesieniu do określonego rozproszenia charakterystyk jakości, wyrażonego przez ich rozkład, oraz w przypadku znanej funkcji strat można obliczyć wartości strat dotyczących każdej partii wytworów.

Zmiany strat jakości dotyczące jednej charakterystyki różnych partii takich samych wytworów o odmiennych zdolnościach C_p oraz wartości średniej charakterystyki jakości $\bar{x} = T$, wytwarzanych z taką samą tolerancją, można obliczyć bezpośrednio z zależności (3), (6) i (7) w następujący sposób:

$$\Delta L(C_p) = L_1 - L_2 = \frac{kd^2}{9} \left(\frac{1}{C_{pk1}^2} - \frac{1}{C_{pk2}^2} \right) = \frac{A}{9} \left(\frac{1}{C_{pk1}^2} - \frac{1}{C_{pk2}^2} \right) \quad (11)$$

Jeżeli rozproszenie charakterystyk jakości ma średnią \bar{x} , która nie jest równa wartości nominalnej procesu T , to funkcja strat wynosi:

$$L_m(x) = k\delta_m^2 \quad (12)$$

gdzie:

$$\delta_m^2 = \hat{\sigma}^2 + (\bar{x} - T)^2 \quad (13)$$

Dokonując korekty procesu, czyli likwidując odchylenie e pomiędzy średnią \bar{x} a wartością nominalną procesu T :

$$e = \bar{x} - T \quad (14)$$

uzyskuje się funkcję strat o postaci:

$$L_x(x) = k\hat{\sigma}^2 \quad (15)$$

Prowadzi to do zmniejszenia strat o:

$$\Delta L(\bar{e}) = L_m(x) - L_x(x) = k(\bar{x} - T)^2 \quad (16)$$

W przypadku ogólnym, poprawa jakości dwóch partii wytworów wynikająca ze zmiany rozproszenia rozpatrywanej charakterystyki jakości — wyrażonej przez wskaźniki zdolności C_p oraz zmiany położenia wartości średniej tej charakterystyki — jest określona przez funkcję strat o postaci:

$$\Delta L(C_p, \bar{e}) = \frac{A}{9} \left(\frac{1}{C_{p1}^2} - \frac{1}{C_{p2}^2} \right) + \frac{A}{d^2} [(\bar{x}_1 - T)^2 - (\bar{x}_2 - T)^2] \quad (17)$$

SKŁADNIKI KOSZTÓW RÓŻNYCH METOD ZAPEWNIANIA JAKOŚCI WYTWORÓW Z TWORZYW

Składniki kosztów 100-proc. inspekcji wytworów

Koszty 100-proc. inspekcji wytworów obejmują następujące składniki:

a) Koszty selekcji (KS).

b) Koszty związane z wykryciem wadliwego wytworu, przeznaczanego następnie do naprawy lub złomowania. Koszt wytworów wadliwych (o dwustronnej tolerancji symetrycznej) wyniesie: $KB(1 - P(\bar{x} - d < x < \bar{x} + d))$ gdzie: d — granica tolerancji rozpatrywanej charakterystyki jakości, KB — koszt jednego wytworu wadliwego, złomowanego (braku), $(1 - P(\bar{x} - d < x < \bar{x} + d))$ — składnik określający prawdopodobną liczbę braków.

c) Koszt wynikający ze zwrotu wytworów, które zostały uznane przez użytkowników za wadliwe mimo, że ich charakterystyki jakości leżą w polu tolerancji. Koszty te oblicza się z funkcji strat uzyskanej w odniesieniu do rozkładu charakterystyk jakości leżących w polu tolerancji [5]. Składnik ten wynosi

$$KZS = k(\delta_{AK})^2 \quad (18)$$

gdzie: $(\delta_{AK})^2$ — wariancja charakterystyk jakości zaakceptowanych przez użytkowników.

Składniki kosztów sterowania statystycznego

Koszty sterowania statystycznego dzielą się na:

d) Koszty nadzorowania procesu technologicznego przypadające na jeden wytwór (KN). Koszt ten zawiera np. koszt budowy systemu monitorowania oraz jego utrzymania i wynosi:

$$KN = \frac{\text{koszt systemu monitorowania (SN)}}{\text{liczba wyrobów wyprodukowanych w okresie amortyzacji (N)}} = \frac{SN}{N} \quad (19)$$

e) Koszty zwrotu wytworów uznanych przez klientów za wadliwe (KZN.) Koszty te są równe funkcji strat ($KZN = k\delta^2$).

Ponadto należy uwzględnić koszty wytworów wadliwych identyczne jak w punkcie b).

Składniki kosztów sterowania statystycznego połączone ze 100-proc. inspekcją

Składniki tych kosztów mogą być rozpatrywane w odniesieniu do dwu nieco odmiennych sytuacji:

— Selekcja jest prowadzona niezależnie — wówczas występują składniki: a), b), c) oraz d).

— Selekcja stanowi integralny element systemu nadzorowania; odpowiada to występowaniu składników: b), c) oraz d).

Wielkość δ_{AK}^2 występująca w składniku (d) kosztów można obliczyć z zależności:

$$\delta_{AK}^2 = \frac{1}{Q} \int_{\bar{x}-d}^{\bar{x}+d} (x-d)^2 f(x) dx \quad (20)$$

W przypadku rozproszenia charakterystyk jakości opisanych za pomocą rozkładu normalnego:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad -\infty < x < \infty \quad (21)$$

gdzie: μ oraz σ — odpowiednio średnia i odchylenie standardowe rozkładu normalnego.

Wielkość Q wynosi:

$$Q = \int_{\bar{x}-d}^{\bar{x}+d} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (22)$$

Przykłady obliczeń

W rozpatrywanym przez autora konkretnym przypadku produkcja charakteryzowała się następującymi danymi:

tolerancja $2d = 1,0$ mm, $A = 5$ zł, co daje $k=A/d^2 = 20$ zł/mm;

koszt selekcji (KS) = 0,01 zł/szt.,

koszt jednego wytworu (KB) = 5 zł/szt.

Koszt nadzorowania statystycznego obliczony wg równania (19), gdy SN = 30 000 zł oraz $N = 1\ 000\ 000$ sztuk wyniósł 0,03 zł/szt.:

Sumaryczny koszt 100-proc. inspekcji wyprasek oblicza się z zależności:

$$L_{KI(100\%)} = KS + KB(1-Q) + k(\delta_{AK})^2 \quad (23)$$

Sumaryczny koszt nadzorowania statystycznego procesu wtryskiwania wyprasek można obliczyć z zależności:

$$L_{KNS} = KN + KB(1-Q) + k\delta^2 \quad (24)$$

W przypadku nadzorowania statystycznego procesu wtryskiwania połączonego ze 100-proc. (dodatkową) inspekcją wyprasek otrzymuje się zależność określającą koszt zapewniania jakości o postaci:

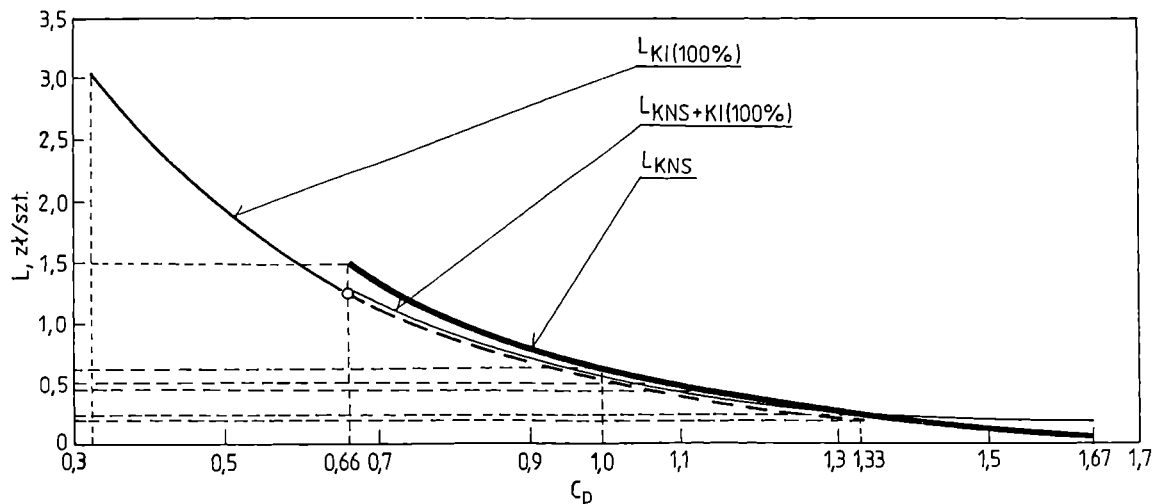
$$L_{KNS+KI(100\%)} = KS + KB(1-Q) + k\delta_{AK}^2 + KN \quad (25)$$

Otrzymane wyniki, w zależności od różnych zdolności procesu technologicznego C_p , zostały zestawione w tabeli 1 oraz przedstawione graficznie na rys.1.

Przebieg zależności $L_{KI(100\%)} = f(C_p)$ powyżej wskaźnika zdolności $C_{pk} = 1$ ma charakter wyłącznie pogładowy, ponieważ taka zdolność nie jest osiągalna w odniesieniu do tej techniki zapewnienia jakości. Przyczyną strat w tym przypadku jest zaobserwowane przeze mnie występowanie przesunięcia (niecentryczności) pomiędzy średnią rozpatrywanej charakterystyki jakości w partii wyprasek a jej wartością nominalną [4]. Wzajemne położenie krzywych ilustrujących (jak np. na rys. 1) koszty różnych strategii działań zapobiegających pogorszeniu jakości w zależności od osiąganego zdolności procesu wtryskiwania C_p wynika każdorazowo z konkretnych wartości liczbowych.

WNIOSKI

— Miarą umożliwiającą ocenę jakości wytworów na podstawie próbek testowych, polegającą na prognozowaniu liczby jednostek leżących poza polem tolerancji, jest liczbowy wskaźnik zdolności.



Rys. 1. Kształtowanie się kosztów zapewniania jakości wyprasek z poliamidu (L) w zależności od zdolności procesu C_p
Fig. 1. Cost of ensuring quality in polyamide (L) P10 moldings in relation to process ability C_p