

BADANIA I ANALIZA POWTARZALNOŚCI ROZKŁADU ODCHYLEK GEOMETRYCZNYCH W PROCESIE OBRÓBKI SKRAWANIEM

INVESTIGATIONS AND ANALYSIS OF REPEATABILITY OF GEOMETRIC DEVIATION DISTRIBUTION IN THE MACHINING PROCESS

W artykule przedstawiono analizę i wyniki badań powtarzalności charakterystyk statystycznych procesu obróbki skrawaniem. Omówiono podstawowe modele statystyczne procesów do których można dopasować badany proces. Badania powtarzalności oparto na monitorowaniu parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych w cyklach pomiędzy kolejnymi zmianami ostrzy skrawających. Analiza zagadnienia omawia procedurę wyznaczania charakterystyk statystycznych badanego procesu oraz powtarzalności podstawowych parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych. Jako podstawowe parametry rozkładu odchyłek przyjęto wartość średnią odchyłek wymiaru, odchyłek kształtu oraz odchylenia standardowe odchyłek wymiaru i odchyłek kształtu. Wyniki badań i wyznaczonych statystycznie akceptowalnych granic zmienności badanego procesu przedstawiono na wykresach.

Słowa kluczowe: model procesu, odchyłka geometryczna, rozkład odchyłek, powtarzalność rozkładu.

The paper presents an analysis and the results of investigations of the statistical characteristics of repeatability of the machining process. Basic statistical process models, to which the investigated process can be fitted, are discussed. The investigations of repeatability are based on monitoring of the parameters of geometrical deviation distribution in the cycles between the successive changes of cutting tool points. The paper discusses a procedure for determining the statistical characteristics of the process investigated and the repeatability of basic parameters of distribution of geometrical deviations. The mean value of dimension deviations and shape deviations, and standard deviations of dimension and shape deviations were assumed as the basic parameters of deviation distribution. The results of the investigations as well as the statistically determined acceptable variation limits of the process investigated are presented in graphs.

Keywords: process model, geometric deviation, deviation distribution, repeatability of distribution.

1. Wprowadzenie

Każdy proces technologiczny charakteryzują parametry technologiczne oraz parametry statystyczne. Parametry procesów podlegają wpływom szeregu czynników związanych lub towarzyszących danemu procesowi, przez co zmieniają w czasie ustalone wartości liczbowe.

Zmienność (niestabilność) wartości liczbowych parametrów procesu w czasie jest powodem występowania odchyłek geometrycznych obrobionych powierzchni o charakterze przypadkowym lub systematycznie zmiennym. W rezultacie, statystycznie, proces technologiczny można traktować jako proces stochastyczny a więc jako funkcję odchyłek geometrycznych których wartościom można przypisać określone prawdopodobieństwo ich wystąpienia [2]. Mamy wtedy do czynienia z rozkładem gęstości prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych.

Do podstawowych parametrów charakteryzujących rozkład gęstości prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych procesu należy zaliczyć [5]:

- statystyczną wartość średnią,
- oszacowania odchyłek standardowych zmiennej i średniej,
- zgodność statystycznej średniej ze średnią arytmetyczną granic tolerancji.

W zależności od wartości w/w parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych w czasie względem ustalonej tolerancji można mówić o modelach statystycznych procesów [1].

1. Introduction

Every manufacturing process is characterised by technological parameters and statistical parameters. Process parameters are affected by a number of factors intrinsic to or accompanying a process, thus changing their fixed numerical values in time.

Variation (instability) of the numerical values of process parameters is a cause of the occurrence of randomly or systematically varying geometric deviations in machined surfaces. As a result, statistically, the technological process can be treated as a stochastic process, i.e., as a function of geometric deviations, to the values of which a certain probability of occurrence can be ascribed [2]. In that case we are dealing with a distribution of the probability density of geometric deviations.

Among the basic parameters, by which the distribution of the probability density of geometric process deviations is characterized, the following ones should be numbered [5]:

- statistical mean value,
- estimations of standard deviations of variable and mean,
- consistency of the statistical mean with the arithmetic mean of tolerance limits.

Depending on the values of the above mentioned parameters of the geometric deviations distribution in time relative to fixed tolerance, we can talk of statistical models of processes [1].

2. Podstawowe modele statystyczne procesu

Proces technologiczny zapewniający rozkład prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych dla którego średnia wartość statystyczna \bar{u}_S odchyłki byłaby równa średniej arytmetycznej \bar{u}_A wartości granicznych USL i LSL wyznaczających przedział tolerancji T , a oszacowanie odchylenia standardowego $S_{(w)}$ miałyby stałą wartość rys. 1 można uważać za proces ustabilizowany.

Taki proces odpowiadałby ściśle *modelowi A* procesu [1], który charakteryzują następujące założenia:

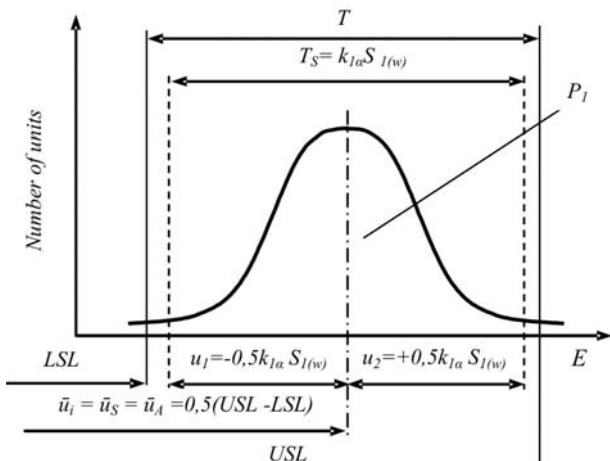
- chwilowy rozrzut wartości kontrolowanej cechy w czasie t jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach $S_{(w)}$ i \bar{u}_S ,
- oszacowanie odchylenia standardowego $S_{(w)}$ jest stałe w czasie,
- wartość średnia $\mu_i = \bar{u}_S$ będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej jest stała w czasie.

W praktyce utrzymanie wartości parametrów technologicznych procesu na ściśle określonym poziomie nie jest możliwe z uwagi na oddziaływanie szeregu czynników zakłócających. W rezultacie w procesie technologicznym zmieniają się nie tylko wartości odchyłek geometrycznych, ale również parametry statystyczne procesu t. j. odchylenie standardowe i związana z tym statystyczna tolerancja procesu T_S (szerokości przedziału rozrzutu odchyłek), oraz statystyczna wartość średnia. Proces taki określa się jako proces niestabilizowany.

Należy zaznaczyć, że statystyczna ocena procesu technologicznego na podstawie kontroli partii jednostek wyrobów może w istotny sposób różnić się od statystycznej oceny dokonywanej na podstawie kontroli frakcji o określonej liczebności wykonanych jednostek w czasie t_i . Charakterystykę rozkładu odchyłek uzyskiwaną na podstawie kontroli frakcji można porównać do przedstawionych na rys. 2.

Taki proces odpowiadałby *modelowi C* procesu [1] który charakteryzują następujące założenia:

- chwilowy rozkład wartości kontrolowanej cechy w czasie t_i jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach $S_{(w)}$ i \bar{u}_i ,



Rys. 1. Proces technologiczny ustabilizowany, stała statystyczna wartość średnia równa średniej arytmetycznej granic specyfikacji oraz stała wartość odchylenia standardowego

Fig. 1. Stable technological process, constant statistical mean value equal to arithmetic mean of specification limits and constant value of standard deviation

2. Basic statistical models of process

A technological process which assures a probability distribution of geometric deviations for which the mean statistical value \bar{u}_S would be equal to the arithmetic mean \bar{u}_A of the boundary values USL and LSL that determine the tolerance interval T , and the standard deviation estimator $S_{(w)}$ would have a constant value, Fig.1, can be considered a stabilized process.

Such a process would correspond strictly to *model A* of process [1], which is characterized by the following assumptions:

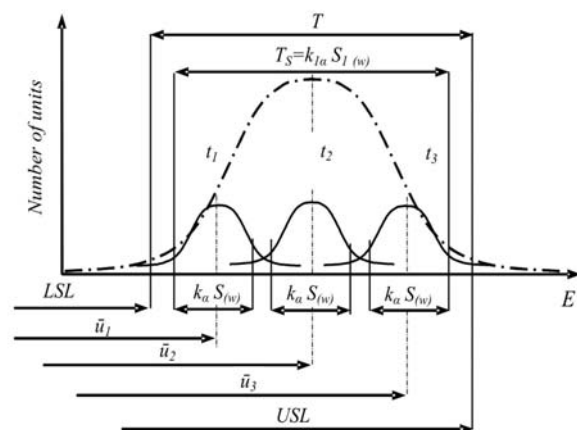
- instantaneous scatter of values of the controlled characteristic in time t is consistent with normal distribution with parameters $S_{(w)}$ and \bar{u}_S ,
- estimation of standard deviation $S_{(w)}$ is constant in time,
- mean value $\mu_i = \bar{u}_S$, being an estimation of an unknown correct value, is constant in time.

In practice, conservation of the values of the technological parameters of a process on a precise level is not feasible because of the action of a series of disturbance factors. As a result, in a technological process not only the values of geometric deviations change, but the statistical process parameters, i.e. standard deviation and the corresponding statistical process tolerance T_S (of the interval width of the scatter of deviations), and the statistical mean value do as well. Such a process is defined as an unstable process.

It should be pointed out that a statistical evaluation of a technological process on the basis of product sample inspection may differ significantly from a statistical process control conducted on the basis of a control of fractions of determined size in time t_i . A characteristic of deviation distribution obtained on the basis of fractions control can be compared to the results presented in Fig. 2.

Such a process would correspond to *model C* of process [1], characterized by the following assumptions:

- instantaneous distribution of values of the controlled characteristic in time t is consistent with normal distribution with parameters $S_{(w)}$ and \bar{u}_i ,
- estimation of standard deviation $S_{(w)}$ is constant in time for



Rys.2. Proces technologiczny o stałej wartości odchylenia standardowego i systematycznie zmiennej wartości średniej

Fig.2. Technological process with constant value of standard deviation and systematically varying mean value

- oszacowanie odchylenia standardowego $S_{(w)}$ jest stałe w czasie dla kolejno pobieranych serii,
- wartość średnia \bar{u}_i dla serii będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej zmienia się w czasie według ściśle określonej i znanej prawidłowości.

Jeżeli proces oparty na modelu C będzie powtarzalny w czasie t pomiędzy dwoma kolejnymi wymianami ostrza skrawającego lub po przeprowadzeniu korekcji ustawienia narzędzi to może odpowiadać modelowi A dla partii wykonanych jednostek wyrobów w czasie t .

W praktyce statystyczna ocena procesu w toku, teoretycznie zgodnego z modelem C, może zależeć od sposobu pobierania jednostek do badań. Jeżeli proces odpowiadający modelowi C będzie monitorowany w sposób ciągły, a wartość średnia i oszacowanie odchylenia standardowego będą wyznaczone dla kumulowanej liczby wykonywanych jednostek w takt ich przybywania, to w rezultacie charakterystyka procesu będzie odpowiadać przedstawionej na rys. 3.

Taki proces można określić, że odpowiada modelowi C-A procesu [5] który będą charakteryzować następujące założenia:

- chwilowy rozkład wartości kontrolowanej cechy w czasie t_i jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach $S_{(w)}$ i \bar{u}_i ,
- oszacowanie odchylenia standardowego $S_{(w)}$ jest zmienne w czasie,
- wartość średnia \bar{u}_i będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej zmienia się w czasie według ściśle określonej i znanej prawidłowości.

3. Badania statystycznej powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

W praktyce procesy technologiczne mogą być dopasowywane do szeregu statystycznych modeli procesów. W odniesieniu do procesów obróbki skrawaniem można mówić o modelach A, C i C-A. Prowadzone w tym zakresie badania wskazują, że proces obróbki skrawaniem może odpowiadać:

- modelowi A, jeżeli jego parametry statystyczne zostaną wyznaczone na podstawie kontroli serii jednostek wyrobów po ich wykonaniu,
- modelowi C, jeżeli jego parametry statystyczne będą wyznaczone w toku produkcji dla frakcji o ustalonej liczbie wykonanych jednostek wyrobów,
- modelowi C-A, jeżeli jego parametry statystyczne będą wyznaczone w toku produkcji dla kumulowanej liczby wykonanych jednostek wyrobów.

Teoretycznie tylko proces odpowiadający modelowi A można uznać za proces stabilny. Modele C i C-A nie wykazują cech stabilności statystycznej, ponieważ charakteryzują się trendem powodowanym naturalnym zużyciem ostrza skrawającego. W

the series picked sequentially,

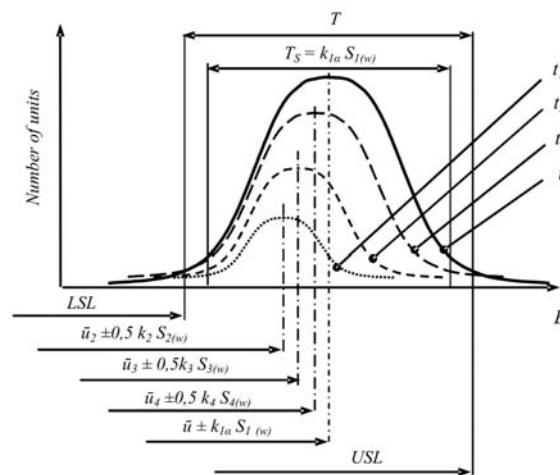
- mean value \bar{u}_i for the series, being an estimation of an unknown correct value, changes in time according to a precisely determined and known rule.

If a process based on the model C is repeatable in time t between two successive changes of cutting tool points or after conducting a correction of tool setting, then it may correspond to the model A for the batch of product units made in time t .

In practice, statistical evaluation of a process in progress, theoretically consistent with model C, may depend on the sampling method. If a process corresponding to model C is monitored continuously, and the mean value and the estimation of standard deviation is determined for a cumulative number of units manufactured as their number increases, then the characteristics of the process will correspond to the one presented in Fig. 3.

Such a process can be defined as corresponding to model C-A of process [5], characterized by the following assumptions:

- instantaneous distribution of values of the controlled characteristic in time t_i is consistent with normal distribution with parameters $S_{(w)}$ and \bar{u}_i ,
- estimation of standard deviation $S_{(w)}$ varies in time,
- mean value \bar{u}_i , being an estimation of an unknown correct value, changes in time according to a precisely determined and known rule.



Rys. 3. Proces technologiczny o zmiennej wartości odchylenia standardowego i systematycznie zmiennej wartości średniej

Fig. 3. Technological process with varying value of standard deviation and systematically varying mean value

3. Investigations of statistical repeatability of the distribution of geometric deviations

In practice, technological processes can be fitted to a series of statistical process models. In relation to machining processes, we can talk of A, C and C-A models. The investigations conducted along that line indicate that the machining process can correspond to:

- model A, if its statistical parameters are determined on the basis of control of a series of product units after their manufacture,
- model C, if its statistical parameters are determined in the process of manufacturing, for a fraction with a specified number of manufactured product units,
- model C-A, if its statistical parameters are determined in the process of manufacturing for a cumulative number of units manufactured.

Theoretically, only the process corresponding to model A can be regarded as a stable process. Models C and C-A do not have the properties of statistical stability, because they are characterized by a trend caused by the natural wear of cutting

praktyce, w odniesieniu do modeli statystycznych procesów charakteryzujących się trendem [4], istotną cechą jest powtarzalność charakterystyk statystycznych. W procesach charakteryzujących się powtarzalnością statystyczną, pomimo trendu, można z powodzeniem stosować statystyczną kontrolę jakości i powtarzalności opartą na kartach kontrolnych.

Modele statystyczne procesów opierają się na charakterystykach statystycznych wartości średniej oraz odchylenia standardowego kontrolowanej właściwości. Z tego względu, powtarzalność procesów obróbki skrawaniem może być oceniana na podstawie porównywania zmienności wartości średniej i odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych w określonym przedziale czasowym, lub na podstawie porównywania wartości współczynnika C_{pk} [3]. Porównywanie na podstawie wartości współczynnika C_{pk} w praktyce, nie zawsze może zapewnić wymaganą czułość badań.

Ocena powtarzalności procesu obróbki skrawaniem powinna uwzględniać zmienność charakterystyk wartości średniej i odchylenia standardowego odchyłek wymiaru oraz odchylenia standardowego odchyłek kształtu w cyklu pracy ostrza skrawającego względem teoretycznie wyznaczonych dopuszczalnych granic zmienności tych parametrów.

Oceni powtarzalności odchyłek geometrycznych poddano proces obróbki tokarskiej pierścienia łożyskowego o średnicy nominalnej $d_N = 89,54\text{mm}$ i tolerancji konstrukcyjnej $T = 0,15\text{mm}$. Proces obróbki był prowadzony na wielowrzecionowym automacie tokarskim *AAH-180* wyposażonym w uchwyty mocujące 3-szczękowe. Materiał wyjściowy stanowiła odkuwka matrycowa pierścienia ze stali *LH 15*. Parametry skrawania dobrano do obróbki wykańczającej: posuw $p = 0,25\text{ mm/1obr.}$, prędkość skrawania $V \approx 112\text{ m/min}$. Ostrze narzędzia skrawającego stanowiły płytki wymienne typu *SNMG 120412* firmy *Sandvik coromant* o promieniu wierzchołka $r_e = 1,2\text{ mm}$.

Badania oparto na monitorowaniu odchyłek wymiaru i kształtu oraz odchylenia standardowego odchyłek wymiaru i kształtu procesu w czasie trzech cykli pracy ostrza skrawającego. Poszczególne cykle oznaczono symbolami *PW1*, *PW2*, *PW3*. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4. Cykl pracy ostrza odpowiadał zalecanemu okresowi jego trwałości.

W celu porównania zmienności charakterystyk dla poszczególnych cykli, uzyskane wyniki przedstawiono na pojedynczych wykresach w postaci zgrupowanych charakterystyk wartości średnich odchyłek wymiarowych E_w , odchyłek kształtu E_k oraz zgrupowane charakterystyki odchylenia standardowego odchyłek wymiaru $S_{(E_w)}$ i kształtu $S_{(E_k)}$.

4. Analiza statystyczna powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

Wyznaczenie wartości liczbowej akceptowalnej zmienności procesu oparto na analizie wartości średniej odchyłek wymiaru i kształtu i porównaniu charakterystyk wartości średnich dla trzech cykli pracy ostrza. W tym celu wyznaczono w grupie charakterystyk punkt leżący na dowolnej charakterystyce, ale wyraźnie odbiegający od pozostałych. Dla badanego procesu przyjęto że punkt ten odpowiada numerowi 135 jednostki obrabianych powierzchni. Korzystając z wartości oszacowania odchylenia standardowego odpowiadającego temu numerowi jednostki, wyznaczono akceptowalną zmienność wartości średniej odchyłki wymiaru $\Delta \bar{E}_w$ i wartości średniej odchyłki kształtu $\Delta \bar{E}_k$ w oparciu o zależności:

tool point. In practice, in relation to statistical processes characterized by trend [4], a significant property is repeatability of statistical characteristics. In the processes characterized by statistical repeatability, notwithstanding the trend, statistical quality and repeatability control based on control charts can be used with success.

Statistical models of process are based on statistical characteristics of the mean value and the standard deviation of the property controlled. Because of that, the repeatability of machining processes can be evaluated on the basis of comparison of the variation of the mean value and the standard deviation of geometrical deviations in a certain time interval, or on the basis of comparison of the values of the C_{pk} coefficient [3]. Comparisons on the basis of the C_{pk} coefficient, in practice, cannot always assure the desired sensitivity of experiments.

The evaluation of the repeatability of the machining process should take into account variation of the characteristics of the mean value and standard deviation of dimension deviations and standard deviation of shape deviations in the working cycle of cutting tool point relative to the theoretically determined variation limits of these parameters.

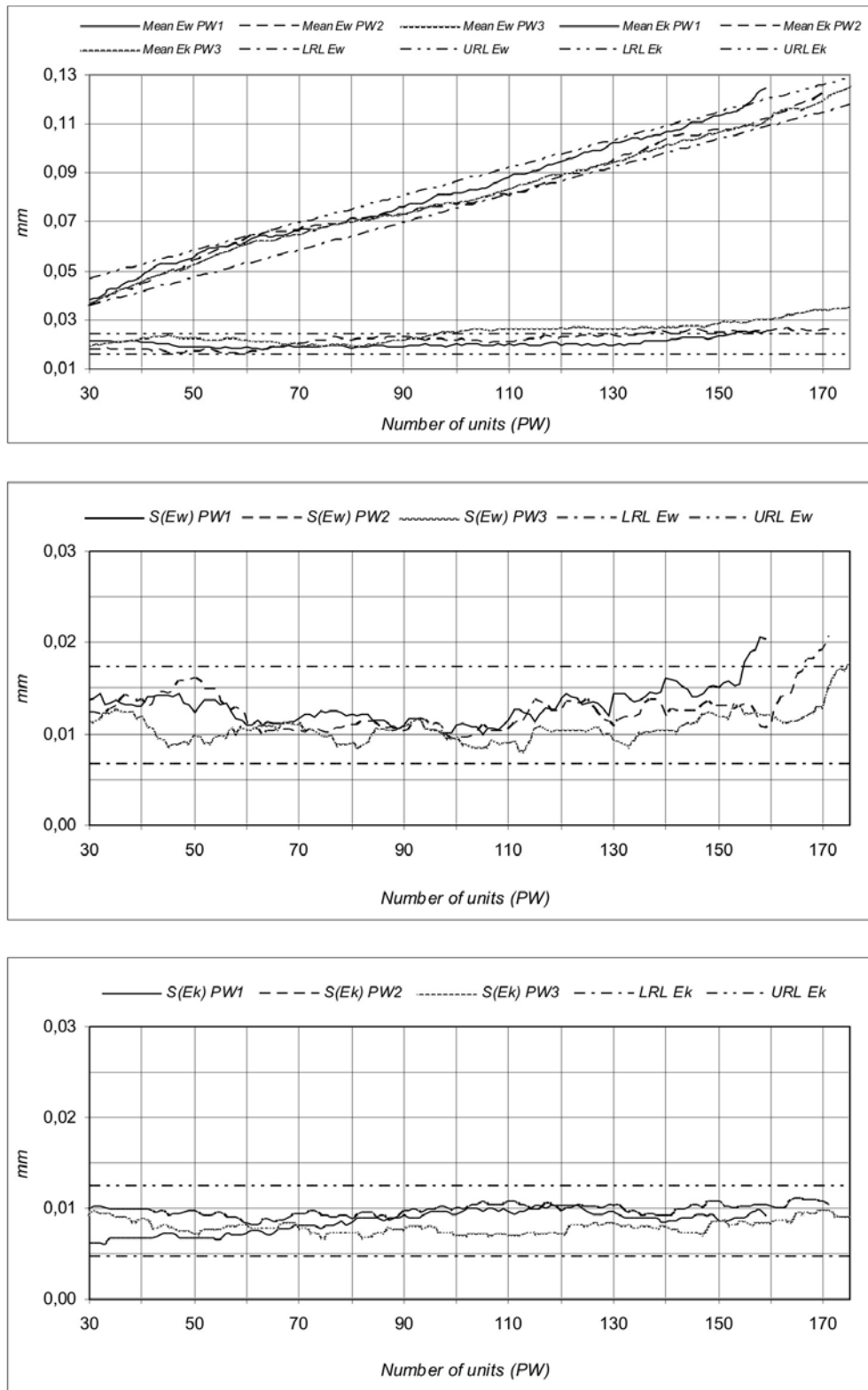
The evaluation of the repeatability of geometrical deviations was conducted on the process of turning of a bearing ring of nominal diameter $d_N = 89,54\text{mm}$ and structural tolerance $T = 0,15\text{mm}$. The machining process was conducted on an automatic multiple-spindle lathe *AAH-180* equipped with 3-jaw chucks. The stock was a die forging of a ring made of *LH 15* steel. The machining parameters were selected for finishing: feed $p = 0,25\text{ mm/rev}$, moving speed $V \approx 112\text{ m/min}$. Cutting tool points were *SNMG 120412 Sandvik coromant* inserts with the cutting nose radius $r_e = 1,2\text{ mm}$.

The investigations comprised monitoring the dimension and shape deviations as well as the standard deviation of the dimension and shape deviations of the process during three working cycles of the cutting tool point. The individual cycles were labelled as *PW1*, *PW2*, *PW3*. The results obtained are presented in Fig. 4. The working cycle of the cutting tool point corresponded to its recommended life-period.

To compare the variability of characteristics for individual cycles, the results obtained are presented in single graphs in the form of grouped characteristics of the values of mean dimension deviations E_w , shape deviations E_k and grouped characteristics of the standard deviation of dimension $S_{(E_w)}$ and shape $S_{(E_k)}$ deviations.

4. Statistical analysis of repeatability of geometric deviation distribution

The determination of the numerical value of the acceptable variation of the process was based on the analysis of the mean value of dimension and shape deviations and the comparison of characteristics of mean values for three working cycles of the cutting tool point. For that purpose, in a group of characteristics a point lying on an arbitrary characteristic, but distinctly diverging from others, was found. For the process investigated, it was assumed that that point was the point corresponding to unit number 135 of the machined areas. Using the estimation of the standard deviation value corresponding to that unit number, acceptable variation of mean value of dimension deviation $\Delta \bar{E}_w$ and mean value of shape deviation $\Delta \bar{E}_k$ was determined based on the formulas



Rys.4. Zestawienie wyników badań powtarzalności wartości średniej; a) odchyłek wymiaru E_w i kształtu E_k , b) odchylenia standardowego odchyłek wymiaru $S_{(E_w)}$ c) odchylenia standardowego odchyłek kształtu $S_{(E_k)}$ dla trzech cykli wymiany ostrza skrawającego w funkcji liczby obrobionych jednostek

Fig.4. Results of investigations of the repeatability of the mean value of a) the dimension E_w and shape E_k deviations, b) the standard deviation of dimension deviations $S_{(E_w)}$ c) the standard deviation of shape deviations $S_{(E_k)}$ for three working cycles of cutting tool point as a function of number of units machined

$$D\bar{E}_W = k_{0,02;29} \frac{S(E_W)}{\sqrt{30}}; \quad D\bar{E}_K = k_{0,02;29} \frac{S(E_K)}{\sqrt{30}} \quad (1)$$

$$D\bar{E}_W = k_{0,02;29} \frac{S(E_W)}{\sqrt{30}}; \quad D\bar{E}_K = k_{0,02;29} \frac{S(E_K)}{\sqrt{30}} \quad (1)$$

Wyniki obliczeń przedziałów zmienności wartości średnich odchyłek wymiaru i kształtu zestawiono w tabl. 1.

The results of the calculations of variation intervals of the mean values of dimension and shape deviations are presented in Table 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń przedziałów zmienności średnich wartości odchyłek wymiaru i kształtu
Table 1. Results of calculations of variation intervals of the mean values of dimension and shape deviations

Proces	n	E_W	$S(E_W)$	E_K	$S(E_K)$	$\bar{S}(E_W)$	$\bar{S}(E_K)$	ΔE_W	$\Delta \bar{E}_K$
PW1	135	0,099	0,014	0,015	0,009				
PW2	135	0,093	0,012	0,019	0,009				
PW3	135	0,093	0,010	0,022	0,008				
Średnia		0,095	0,012	0,019	0,009	0,0022	0,0016	0,0108	0,0078

W celu sprawdzenia czy charakterystyki odchyłek wymiaru pozyskane z trzech cykli pracy ostrza będą mieścić się w paśmie o szerokości równej dopuszczalnej zmienności wartości średniej odchyłek wymiaru $\Delta \bar{E}_W$, wybrano z grupy charakterystyk wartości średnich (rys. 4.) dwa punkty, możliwie odległe od siebie, leżące na dowolnej charakterystyce, yce ale o wyraźnym odchyleniu od pozostałych. Dla badanego procesu przyjęto, że punkty te będą odpowiadać numerom 46 i 102 jednostek obrabianych powierzchni. Odczytując odpowiadające tym punktom wartości odchyłek wymiarowych wyznaczono dopuszczalne pasmo zmienności wartości średniej odchyłek wymiaru. Jako dolną $LRL(E_W)$ i górną $URL(E_W)$ granicę zmienności przyjęto proste o równaniach:

To verify whether the characteristics of dimension deviations obtained from three working cycles of cutting tool point would lie within the range of the width equal to the acceptable variation of the mean value of dimension deviation $\Delta \bar{E}_W$, from the group of characteristics of mean values (Fig. 4.) two points were selected, as far apart from each other as possible, lying on an arbitrary characteristic but distinctly diverging from others. For the process investigated, it was assumed that the points would correspond to unit numbers 46 and 102 of the machined areas. By reading the values of dimension deviations corresponding to those points, the acceptable variation range of the mean value of dimension deviations was determined. As the lower $LRL(E_W)$ and the upper $URL(E_W)$ range limits, the lines described by the following equations were adopted:

$$LRL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left(\frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} \quad (2)$$

$$LRL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left(\frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} \quad (2)$$

$$URL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left(\frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} + D\bar{E}_w \quad (3)$$

$$URL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left(\frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} + D\bar{E}_w \quad (3)$$

Wyznaczone granice pasma zmienności odchyłek wymiaru $LRL(E_W)$ i $URL(E_W)$ naniesiono na wykresy wartości średnich odchyłek wymiaru rys. 4a.

The determined limits of the dimension deviation variation range, $LRL(E_W)$ and $URL(E_W)$, were plotted in the graphs of values of mean dimension deviations Fig. 4a.

W celu wyznaczenia pasma zmienności odchyłek kształtu przyjęto, że dolna granica zmienności $LRL(E_K)$ będzie wyznaczona przez prostą styczną do najniższego punktu w grupie charakterystyk odchyłek kształtu. Dla uzyskanych wyników, jako dolną granicę zmienności rys. 4a przyjęto punkt przez który przechodzi prosta o równaniu:

In order to determine the variation range of shape deviations, it was assumed that the lower range limit $LRL(E_K)$ would be determined by the tangent at the lowest point in the group of shape deviation characteristics. For the results obtained, the point through which the line given by the equation (4) passes was assumed as the lower range limit (Fig. 4a):

$$LRL(E_K) = 0,011 \quad (4)$$

$$LRL(E_K) = 0,011 \quad (4)$$

Jako górną granicę zmienności $URL(E_K)$ rys. 4a przyjęto punkt przez który przechodzi prosta o równaniu:

As the upper range limit $URL(E_K)$ (Fig.4a), the point through which the line given by the equation (5) passes was assumed:

$$URL(E_K) = 0,011 + DE_K = 0,019 \quad (5)$$

$$URL(E_K) = 0,011 + DE_K = 0,019 \quad (5)$$

Wyznaczone granice $LRL(E_K)$ i $URL(E_K)$ pasma zmienności wartości średniej odchyłek kształtu $\Delta \bar{E}_K$ naniesiono na wykres wartości średnich odchyłek kształtu rys. 4a.

The determined limits $LRL(E_K)$ and $URL(E_K)$ of the variation range of the mean value of shape deviations $\Delta \bar{E}_K$ were plotted in the graph of values of mean shape deviations Fig. 4a.

Tab. 2. Rozstęp odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych

Tab. 2. Range of standard deviation of geometrical deviations

	PW1	PW2	PW3
S(Ew)max	0,0162	0,0161	0,0127
S(Ew)min	0,0099	0,0093	0,0080
S(Ek)max	0,0104	0,0107	0,0097
S(Ek)min	0,0061	0,0081	0,0067

Powtarzalność charakterystyk odchylenia standardowego odchyłek wymiaru i kształtu dla procesu obróbki skrawaniem będzie reprezentować przedział dopuszczalnej zmienności wartości średnich odchylenia standardowego. Szerokość tego przedziału wyznaczono w oparciu o występujący w procesie obróbki rozstęp wartości odchyłek wymiaru i kształtu.

Granice przedziału zmienności odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych $E_{(w,k)}$ wyznaczono według poniższej procedury oddzielnie dla odchyłek wymiaru i kształtu:

$$\bar{S}_{(Ew,k)} = \frac{\sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)max} - \sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)min}}{3} \quad (6)$$

$$DE_{w,k} = \frac{\bar{S}_{(Ew,k)}}{\sqrt{29}} \quad (7)$$

$$LRLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} - DE_{w,k} \quad (8)$$

$$URLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} + DE_{w,k} \quad (9)$$

Niezbędne dane i podstawowe wyniki obliczeń dotyczące granic przedziału zmienności odchyłek standardowych odchyłek wymiaru i kształtu zestawiono w tabl. 2. i tabl. 3. Wyznaczone granice naniesiono na wykresy odchyłek standardowych odchyłek wymiaru i odchyłek kształtu rys. 4b i rys. 4c.

5. Ocena powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

Badania i analiza procesu obróbki skrawaniem wykazała, że powtarzalność wartości średniej odchyłek wymiaru mieści się w przedziale o szerokości $11\mu m$ a powtarzalność wartości średniej odchyłek kształtu w przedziale $8\mu m$ w odniesieniu do tolerancji $T=150\mu m$ rys. 4a. Zmienność wartości odchylenia standardowego odchyłek wymiarów i kształtów mieściła się w przedziale ok. $\pm 6\mu m$ względem wartości średniej.

Należy zwrócić uwagę, że charakterystyki odchyłek wymiaru w funkcji liczby obrobionych powierzchni dla procesu obróbki skrawaniem cechuje praktycznie stała zmienność (trend), która pod koniec okresu trwałości ostrza wchodzi w obszar nieliniowego intensywnego zużycia. Charakterystyki odchyłek kształtu w funkcji liczby odrobionych powierzchni dla procesu obróbki skrawaniem w odróżnieniu od odchyłek wymiarowych praktycznie nie wykazują trendu.

Zmienność wartości średniej odchyłek wymiaru jest charakterystyczną cechą procesu obróbki skrawaniem i wynika z naturalnego zużycia ostrza skrawającego. Zmienność wartości średniej odchyłek kształtu zależy od sztywności technologicznej obrabianego przedmiotu, rodzaju mocowania, wartości sił mocujących i skrawania.

Tab. 3. Wyznaczenie granic odchylenia standardowego

Tab. 3. Determination of standard deviation limits

	Śred. PW		$\Delta E_{w,k}$
S(Ew)max	0,0150		
S(Ew)min	0,0091		
S(Ew)śred.	0,0120	0,0054	$\pm 0,0054$
S(Ek)max	0,0103		
S(Ek)min	0,0069		
S(Ek)śred.	0,0086	0,0039	$\pm 0,0039$

The repeatability of the characteristics of the standard deviation of dimension and shape deviations for the machining process will be represented by the acceptable variation interval of standard deviation mean values. The width of that interval was determined on the basis of the range of values of dimension and shape deviations that occur in the machining process.

The variation interval limits of standard deviation of geometrical deviations $E_{(w,k)}$ were determined according to the procedure given below, separately for dimension and shape deviations:

$$\bar{S}_{(Ew,k)} = \frac{\sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)max} - \sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)min}}{3} \quad (6)$$

$$DE_{w,k} = \frac{\bar{S}_{(Ew,k)}}{\sqrt{29}} \quad (7)$$

$$LRLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} - DE_{w,k} \quad (8)$$

$$URLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} + DE_{w,k} \quad (9)$$

The necessary data and basic calculation results of variation interval limits of standard deviation of dimension and shape deviations are presented in Tables 2 and 3. The limits determined were plotted in the graphs of mean deviations of dimension deviations and shape deviations Fig. 4b and Fig. 4c.

5. Evaluation of the repeatability of geometric deviation distribution

The investigations and analysis of the machining process showed that the repeatability of the mean value of dimension deviations is contained in the interval of the width of $11\mu m$ and the repeatability of the mean value of shape deviations in the interval of $8\mu m$ relative to tolerance $T=150\mu m$ Fig. 4a. The variation of the standard deviation values of dimension and shape deviations was contained in the interval ca. $\pm 6\mu m$ relative to the mean value.

It should be indicated that the dimension deviation characteristics for the machining process, given as the function of the number of the areas machined, are characterized by a practically constant variation (trend), which, at the end of the life-period of the cutting tool point slightly increases. The characteristics of shape deviation for the machining process, given as the function of the number of surfaces machined, practically do not show a trend, in contradistinction to dimension deviations.

Variation of the mean value of dimension deviation is a characteristic property of machining and follows from the natural wear of the cutting tool point. Variation of the shape deviation mean value depends on the technological rigidity of the work-

Wartości oszacowania odchylenia standardowego odchyłek wymiaru wyraźnie wzrastają przekraczając wyznaczone granice zmienności pod koniec okresu trwałości ostrza skrawającego rys. 4b. Wartości oszacowania odchylenia standardowego odchyłek kształtu wykazują bardzo dobrą powtarzalność rys. 4c.

Uzyskane wyniki badań procesu obróbki skrawaniem pozwalają stwierdzić, że przy prawidłowo dobranych parametrach technologicznych, w procesie obróbki tokarskiej można uzyskać dobrą powtarzalność rozkładu odchyłek wymiarów i kształtów.

piece, the type of clamping mechanism, and the value of clamping and machining forces.

The estimation values of standard deviation of dimension deviations grow noticeably to cross the determined variation limits at the end of the cutting tool point life-period Fig. 4b. The estimation values of standard deviation of shape deviations show a very good repeatability Fig. 4c.

The results obtained from the investigations of the machining process make it possible to state that in the process of turning, at correctly selected technological parameters, it is possible to achieve a good repeatability of the distribution of dimension and shape deviations.

6. Literatura

- [1] Dietrich E.; Schulze A.. *Statistische Verfahren zur Qualifikation von Messmitteln, Maschinen und Prozessen. 3 Auflage*, Carl Hanser Verlag, 1998.
- [2] Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control* 3ed, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] Parchami A.; Mashinchi M.: *Fuzzy estimation for process capability indices*. Information Sciences 177, 2007.
- [4] Taheri S.M.: *Trends in fuzzy statistics*. Austrian Journal of Statistics 32 (3), 2003.
- [5] Kujan K.: *Badanie rozkładu odchyłek geometrycznych w procesach obróbki skrawaniem*. Przegląd Mechaniczny 5, 2007.

Dr inż. Krzysztof KUJAN

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin
Tel. 081 5384234
e-mail: k.kujan@pollub.pl
