

# STRESZCZENIE

Praca dotyczy doboru powierzchni odniesienia struktury geometrycznej. Przedstawiono także wpływ nieprawidłowego doboru powierzchni odniesienia na parametry stereometrii powierzchni (z normy ISO 25178).

Analizowano następujące rodzaje powierzchni: cylindry po gładzeniu płasko-wierzchołkowym, cylindry po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz wygniataniu kieszeni smarowych, płaszcze tłoków po toczeniu, powierzchnie walcowe zawierające szerokie wgłębienia smarowe oraz powierzchnie kuliste po zużyciu.

Zarys kształtu usuwano za pomocą następujących procedur: algorytm dopasowania cylindra za pomocą metody najmniejszych kwadratów, wielomiany stopni od 2-go do 12-go, filtr regresji Gaussa oraz filtry odporne na błędy  $n$ -tych stopni. Opracowano także procedurę doboru stopnia wielomianu w zależności od rodzaju badanej powierzchni. Zaproponowano również procedury wykrywania oraz usuwania ze struktury geometrycznej powierzchni (SGP) pojedynczych wierzchołków typu szpilki oraz zakłóceń wysokoczęstotliwościowych.

Porównano wyniki działania procedury usuwania zarysu kształtu za pomocą elementu strukturalnego o kształcie cylindrycznym zawartego w oprogramowaniu komercyjnym z opracowanym algorytmem dopasowania cylindra. Dla cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz cylindrów z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami smarowymi zastosowanie opracowanej metody dopasowania cylindra pozwoliło na poprawę usuwania zarysu kształtu względem procedury komercyjnej. Dla powierzchni cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym zaproponowano użycie wielomianów stopni 3-go i 4-go. Jeżeli powierzchnie cylindrów zawierały kieszenie smarowe wówczas zastosowanie 2-go i 3-go stopnia wielomianu było wystarczające, użycie 4-go (lub wyższego) stopnia wielomianu mogło powodować zniekształcenia kieszeni smarowych oraz błędne określanie wartości parametrów stereometrii powierzchni, szczególnie z grupy Sk.

Jeżeli powierzchnie walcowe zawierały szerokie wgłębienia zastosowanie wielomianu już 2-go stopnia mogło powodować błędy w doborze powierzchni odniesienia. Dla tego typu powierzchni zaproponowano stosowanie filtra odpornego na błędy 2-go lub 4-go stopnia. W niektórych przypadkach szerokie wgłębienia umiejscowione na brzegach lub rogach analizowanej powierzchni zostały zniekształcone po zastosowaniu filtra odpornego, dlatego też zaproponowano procedurę cyfrowego wypełnienia kieszeni smarowych.

Dla powierzchni o warstwowych własnościach funkcjonalnych zaproponowano procedurę doboru stopnia wielomianu polegającą na zwiększaniu jego stopnia oraz analizie zmian wartości parametru Sk.

Dla powierzchni płaszczy tłoków po toczeniu zastosowanie procedury dopasowania cylindra do usuwania zarysu kształtu pozwoliło na osiągnięcie zbliżonych wyników do otrzymanych po użyciu oprogramowania komercyjnego. Dla powierzchni płaszczy tłoków zalecono stosowanie wielomianów stopni 3-go lub 4-go, jeżeli jednak powierzchnia zawiera zakrzywienia, wówczas konieczne jest użycie wielomianów stopni od 6-go do 8-go.

Zastosowanie procedury usuwania zarysu kształtu za pomocą elementu strukturalnego w kształcie sfery pozwoliło na prawidłowy dobór powierzchni odniesienia, uzyskane rezultaty były zbliżone do wyników otrzymanych po zastosowaniu wielomianów stopni 2-go i 3-go. Jeżeli użyto zbyt wysokiego stopnia wielomianu (4-ty i wyższy) wówczas wartości parametrów maksymalnej wysokości oraz pola powierzchni otworów były zawyżane.

W pracy analizowano także wpływ szpilek na położenie powierzchni odniesienia. Zauważono, iż występowanie pojedynczych wierzchołków wpływało na pogorszenie działania algorytmu dopasowania cylindra oraz aproksymacji wielomianowej w usuwaniu zarysu kształtu SGP. Zastosowano dwie procedury wykrywania szpilek (algorytm z odchyleniem standardowym oraz algorytm z pochyleniem powierzchni) i porównano ich działanie z procedurą odcinania oraz morfologicznym filtrem zamykania. Zaproponowano stosowanie procedury z pochyleniem powierzchni, zalecając usuwanie pojedynczych wierzchołków przed doбором powierzchni odniesienia.

Badano także wpływ zakłóceń wysokoczęstotliwościowych na parametry stereometrii powierzchni. Analiza profilu, widmowej gęstości mocy oraz funkcji autokorelacji może pozwolić na określenie występowania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, zalecono także stosowanie filtra medianowego. Do usuwania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych zaproponowano filtry Gaussa oraz średniej ruchomej o długości fali odcięcia równej 0.01 mm.

**Słowa kluczowe:** powierzchnia odniesienia, struktura geometryczna powierzchni, cylindry, płaszcze tłoków, dopasowanie cylindra, aproksymacja wielomianowa, filtr odporny na błędy

## ABSTRACT

In this thesis selection of reference plane in surface topography measurements was presented. The influence of improper selection of reference plane on the surface topography parameters (from ISO 25178 standards) was also taken into consideration.

The following types of surfaces were analysed: cylinder liners after plateau-honing process, plateau-honed cylinder liners with additionally added oil pockets created by burnishing techniques, turned piston skirts and cylindrical surfaces containing deep and wide valleys. Spherical surfaces after wear process were also taken into consideration.

Form was removed by application of: algorithm of cylinder fitting based on the least square method, polynomials of the 2<sup>nd</sup> to 12<sup>th</sup> degrees, Gaussian Regression Filter (GRF) and Robust Gaussian Regression Filter (RGRF) of n-th degrees. The procedure of selection of polynomial degree for each type of surfaces was suggested. The methods of spikes and high-frequency noise detection and removal were also proposed.

The use of commercial procedure of form removal by cylindrical element and proposed algorithm of cylinder fitting were compared and differences were showed. For cylinder liners after plateau-honing and plateau-honed cylinder liners with additionally burnished oil pockets cylinder fitting by the least square method for areal form removal was recommended instead of application of cylinder fitting algorithm from commercial software. Application of the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> degree of polynomial for form removal of plateau-honed cylinder liners was suggested. If the cylinder liners contained oil pockets, the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> degree was sufficient; the use of 4<sup>th</sup> (or higher) degree of polynomial could cause the distortion of valleys and especially values of Sk parameters.

If the cylindrical surfaces contained deep and wide valleys, the application of 2<sup>nd</sup> degree of polynomial could also cause the false estimation of reference plane. For this type of surfaces it was recommended to use the RGRF of the 2<sup>nd</sup> and 4<sup>th</sup> degree. In some cases the deep and wide valleys located in the edges of measured surface were also distorted after application of RGRF; therefore the procedure of digital filling of valleys was proposed.

For stratified surfaces the procedure of a degree of the polynomial selection was proposed on the basis of this degree increasing and analyzing changes of the Sk parameter.

For turned piston skirt surfaces the results obtained by application of proposed algorithm of cylinder fitting were similar to those achieved after application of procedure from commercial software. However the use of algorithm based on the least square fitting method gave results similar to those after application of 6<sup>th</sup> degree of polynomial. It was recommended to use the 3<sup>rd</sup> or 4<sup>th</sup> degrees of the polynomials for form removal but if the surfaces contained the curvatures the degrees between 6<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> were proposed.

For spherical surfaces application of sphere algorithm from commercial software for form removal allowed to select the reference plane correctly; the results were similar to those after using of 2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup> degree of polynomial. If the degree of polynomial was too large (4<sup>th</sup> or higher) maximum depth and volume of hole increased.

The influence of spikes occurrence on the position of reference plane was studied. It was assumed that the individual peaks caused the poor performance of cylinder fitting procedure and polynomial approximation. Two algorithms for spikes detection were presented (procedures related to standard deviation and slope) and compared with surface thresholding method and application of morphological closing filter. The procedure based on the slope was proposed it was suggested to remove spikes before selection of reference plane.

The influence of high-frequency noise presence on the surface topography parameters was also studied. The analysis of the profiles, power spectrum density and autocorrelation function can give valuable information about high-frequency noise occurrence; median filter can be also applied. For high-frequency noise removal Gaussian and moving average filters with cut-off of 0.01 mm were recommended.

**Key words:** reference plane, surface topography, cylinders, piston skirts, cylinder fitting, polynomial approximation, robust filter