

MAKROSKOPOWY MODEL GŁADZENIA CYLINDRÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH JAKO NARZĘDZIE OPTYMALIZUJĄCE WYSOKOŚĆ OSEŁEK GŁADZARSKICH W TECHNOLOGII NAPRAW

W artykule przedstawiono założenia makroskopowego modelu matematycznego gładzenia uwzględniające zarówno kinematykę narzędzia jak również charakterystyczny dla tego procesu rozkład nacisków jednostkowych występujących w oddziaływaniu osełek gładzących na powierzchnię obrabianego cylindra. Na bazie opisanych złożań został opracowany działający i przetestowany program komputerowy, który w sposób numeryczny modeluje ten proces technologiczny. W pamięci komputera są tworzone cyfrowe mapy jakościowe dotyczące powierzchni zarówno cylindra i osełek gładzących. Mapy te można oceniać analitycznie jak również poddać wizualizacji. W artykule zamieszczono wyniki obliczeń optymalizujących wysokość osełek gładzarskich dla procesu gładzenia konkretnej tulei cylindrowej wraz z analizą otrzymanych wyników. Opisany program komputerowy umożliwi oszczędność czasu oraz środków finansowych w czasie dedykowanych badań optymalizujących parametry tego procesu.

WSTĘP

Makro i mikrogeometria powierzchni tulei po gładzeniu zależy także od parametrów i warunków technologicznych obróbki, których dobór odbywa się zwykle doświadczalnie. Obecny rozwój technik komputerowych oraz wzrost mocy obliczeniowej samych komputerów umożliwia przeprowadzenie symulacji procesu gładzenia [1, 4, 5]. Symulacja komputerowa procesu gładzenia w połączeniu z trafnie dobraną metodą oceny gładzonej powierzchni może w stosunkowo krótkim czasie wskazać wartości parametrów geometrycznych i technologicznych, które umożliwią po tym procesie uzyskanie najlepszych walorów użytkowych wyrobu. Symulacja komputerowa procesów technologicznych pozwala zaoszczędzić czas i środki finansowe, które musiałyby być przeznaczone na prace doświadczalne.

1. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O OBRÓBCE GŁADZENIEM

Przez gładzenie mogą być wykańczane otwory o średnicy (3÷1000) mm; największa długość obrabianego otworu może dochodzić do 15 m [2, 3]. Dokładność geometryczna otrzymywana w procesie gładzenia wynika z wzajemnej koordynacji ruchów obrotowych i posuwisto-zwrotnych narzędzia i przedmiotu. Głowica z osełkami ściernymi układa się samoczynnie wg uprzednio obrabianej powierzchni, nie można tu więc otrzymać dokładnej współosiowości w stosunku do obrobionych już innych powierzchni (wyjątek stanowią układy ze sztywno zamocowanym narzędziem).

Nadatek na obróbkę wynosi od 0,01 mm do 0,2 mm. Prędkość skrawania jest dobierana z zakresu od 0,25 m/s do 1 m/s, nacisk osełek narzędzia regulowany – do 0,25 MPa, wysokość Ra chropowatość powierzchni po gładzeniu (0,63÷0,16) μm, a nawet 0,02 μm, dokładność wymiarowa w klasach 8,7 i 6 (osiągalna klasa 5, a nawet 4) [1, 2, 3]. Rodzaj materiału ściernego osełek dobiera się w zależności od materiału obrabianego. Przy gładzeniu żeliwa i stopów nieżelaznych stosuje się oselki z węgla krzemu, a przy

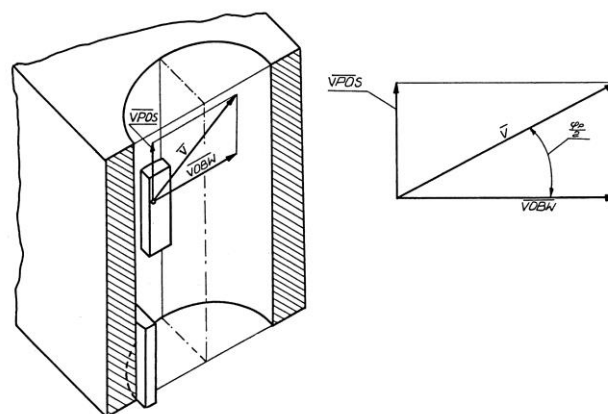
gładzeniu stali z elektrokorundem. Ziarna osełek mają przeważnie wielkość (20÷28) μm. Twardość osełek zawiera się w zakresie od F do M, spoiwo jest najczęściej ceramiczne, rzadziej bakelitowe. Gładzenie dokonuje się często w dwóch zabiegach: wstępnym i ostatecznym.

2. KINEMATYKA PROCESU GŁADZENIA

W procesie gładzenia wewnętrznych powierzchni cylindrów można wyróżnić następujące ruchy robocze:

- jednostajny ruch obrotowy z prędkością obrotową N [Obr/min.] i obwodową $VOBW = \pi \cdot D_0 \cdot N / 60$ [m/s], gdzie: D_0 – średnica otworu [m],
- prostoliniowy ruch posuwisto-zwrotny z częstością skoków K [Hz] i ze średnią prędkością liniową $VPOS = 2 \cdot SKOK / K$ [m/s], gdzie: $SKOK$ – skok głowicy gładzarskiej [m]. Wartość wypadkowej prędkości gładzenia (Rys.1.) możemy obliczyć ze wzoru :

$$|\bar{V}| = \sqrt{VOBW^2 + VPOS^2} \quad (1)$$



Rys. 1. Kinematyka ruchu osełek w procesie gładzenia

Kierunkowość struktury powierzchni po gładzeniu określa się kątem $\varphi_p/2$ mierzonym pomiędzy styczną w danym punkcie do toru ruchu ziarna, a płaszczyzną prostopadłą do osi ruchu obrotowego. Złożenie ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego musi być takie, aby ziarna ściernie oselek w czasie kolejnych cykli pracy nie poruszały się po swoich śladach. Można to osiągnąć gdy długość skoku głowicy gładzarskiej nie będzie całkowitą wielokrotnością skoku linii śrubowej toru ruchu oselek. Poniżej wyliczona wartość PT nie powinna być większa niż podziałka obwodowa rozłożenia oselek pomniejszona o szerokość oselki tj.

$$PT \leq \Pi * D0 / (2 * N0) - B0 \quad (2)$$

gdzie: $N0$ – liczba oselek w głowicy [-],
 $B0$ – szerokość oselki [m],
 $D0$ – średnica obrabianego otworu [m],

Wzór (2) ma słuszość gdy wszystkie oselki mają jednakową szerokość i są równomiernie rozłożone na obwodzie głowicy gładzarskiej. W innych przypadkach zależność tę należy odpowiednio zmodyfikować.

3. DYNAMIKA PROCESU GŁADZENIA

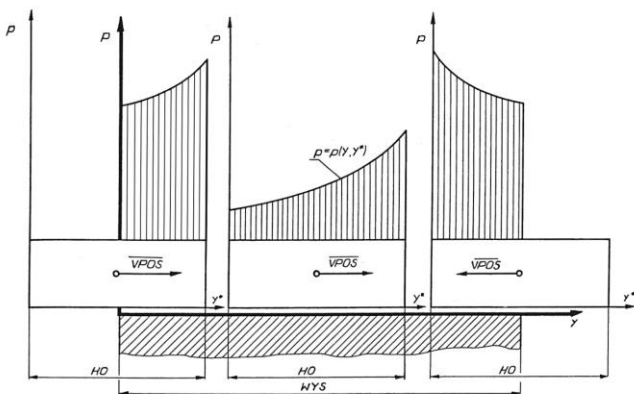
Zasadniczymi zjawiskami zachodzącymi podczas gładzenia są:

- zmiana rozkładu nacisków jednostkowych na powierzchniach oselek w zależności od chwilowego położenia oselek na gładzi cylindrowej,
- skrawanie powierzchni cylindra,
- zużywanie się oselek.

W danej chwili jednostkowy nacisk oselki na powierzchnie obrabianą jest funkcją zarówno współrzędnej y w układzie współrzędnych związanych z obrabianą częścią (cylindrem) jak i współrzędnej y^* w ruchomym układzie współrzędnych związanych z głowicą gładzarską [1].

$$p = p(y, y^*) \quad (3)$$

Przebiegi nacisków jednostkowych w tych układach współrzędnych przedstawia (Rys. 2). Dodatkowym parametrem mającym wpływ na charakter rozłożenia nacisków jednostkowych na powierzchni oselki jest zwrot wektora prędkości ruchu postępowo-zwrotnego \overline{VPOS} . Objętość usuniętego materiału w czasie procesu gładzenia z powierzchni obrabianego cylindra jest proporcjonalna do wartości nacisków jakie przenoszą oselki. Zgodnie z [1] należy stwierdzić, że podwyższenie nacisku wywieranego przez oselki na gładź cylindrową zwiększa intensywność skrawania. Powodowane jest to tym, że wraz ze wzrostem nacisku oselki wzrasta głębokość wcinania się ziaren skrawających w materiał obrabiany.



Rys. 2. Zależności nacisku jednostkowego na powierzchni oselki od

względnej położenia oselki na gładzi cylindrowej i od zwrotu wektora prędkości \overline{VPOS} [4]

Przebieg zużywania się oselek podczas gładzenia ma podobny charakter jak intensywność skrawania powierzchni cylindra. Procesy te różnią się jednak między sobą nasileniem. Nasilenie to zależy od własności skrawających oselek i skrawalności materiału cylindra, sposobu przeprowadzenia procesu, zadanego nacisku oselek i kinematyki procesu. Dla oselek gładzących nie tyle ważna jest intensywność zużycia ich powierzchni co jej równomierność. Ta zaś jest uzależniona od sumarycznej ilości nacisków przenoszonych przez każdy element (ziarno) oselki. Ideałem byłoby gdyby każde ziarno oselki po skończonym procesie gładzenia przeniosło sumarycznie to samo obciążenie.

4. ZAŁOŻENIA I BUDOWA MODELU MATEMATYCZNEGO PROCESU GŁADZENIA

Budując model matematyczny gładzenia zwrócono uwagę na możliwości obliczeniowe komputera, na którym model ten ma być zrealizowany. Chodzi tutaj w szczególności o takie parametry jak dostępna ilość pamięci operacyjnej i szybkość wykonywania operacji zmiennoprzecinkowych.

Ze względu na brak w literaturze fachowej z tego zakresu modelu określającego proces gładzenia funkcjami matematycznymi, opisany poniżej model będziemy tworzyć metodą iteracyjną. Praktyczna efektywność tej metody w dużym stopniu zależy od założeń wstępnych, na których opierać się będzie budowa modelu matematycznego procesu gładzenia oraz od stopnia optymalizacji samego algorytmu i kodu oprogramowania.

5. PODZIAŁ OBIEKTÓW RZECZYWISTYCH NA ELEMENTY DYSKRETNE

W procesie gładzenia jako główne obiekty rzeczywiste można wyróżnić:

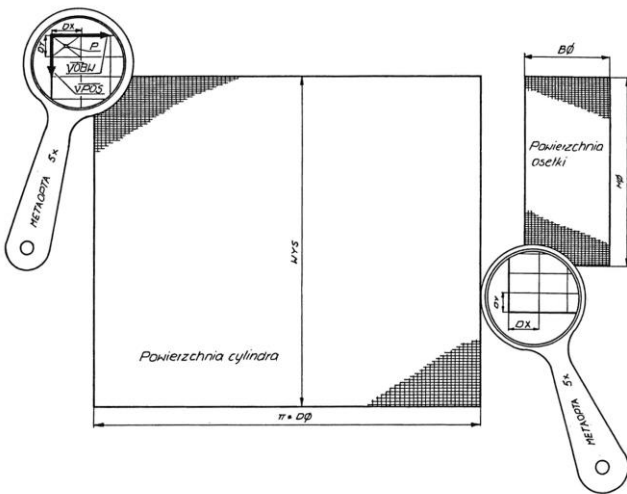
- głowicę gładzarską,
- oselki ściernie,
- obrabiany cylinder.

W naszych rozważaniach głowicę gładzarską traktujemy jako element, który każdej oselce ścierniej nadaje określoną siłę docisku. Dwa kolejne elementy tj. oselki ściernie i obrabiany cylinder zredukowano do powierzchni płaskich. Opisując jak przebiega proces skrawania cylindra i zużycia oselek należałoby opisać zachowanie się na tych powierzchniach każdego punktu. Wiadomo, że jest to praktycznie niemożliwe i niecelowe. Z tego względu wprowadzony zostanie podział tych powierzchni na elementy dyskretne o wymiarach DX (w kierunku obwodowym) i DY (w kierunku posuwowym). Reprezentantem takiego elementarnego obszaru jest punkt P leżący na przecięciu się przekątnych tego prostokąta (Rys. 3). Teoretycznie jeżeli DX i DY będzie dążyć do zera to można otrzymać powierzchnie wyżej wymienionych obiektów jako zbiór punktów materialnych.

Długości odcinków podziałowych DX i DY dobierane są według niżej zamieszczonych zasad:

1. Odcinki podziałowe DX i DY na powierzchni oselek mają być identyczne ze swoimi odpowiednikami na powierzchni cylindra,
2. Odcinki te powinny być jak najkrótsze, jednak liczba elementów podziałowych na powierzchni cylindra i oselek nie może spowodować przekroczenia pojemności pamięci operacyjnej systemu komputerowego,

3. Prostokąt o wymiarach DX i DY ma być podobny do prostokąta zbudowanego na wektorach prędkości obwodowej \overline{VOBW} i poosiowej \overline{VPOS} ośledek (Rys.3)



Rys. 3. Dobór odcinków podziałowych na powierzchniach ośledek i cylindra

Zasady te są wymogiem do późniejszego efektywnego działania oprogramowania symulującego proces gładzenia.

Przesunięcie ośledek po powierzchni cylindra o taką samą liczbę odcinków podziałowych DX i DY w kierunkach odpowiednio obwodowym i poosiowym wyznacza na powierzchni cylindra tor, który jest styczny do rzeczywistego wektora prędkości z jaką poruszają się ośledek względem gładzi cylindrowej.

6. ROZKŁAD NACISKÓW JEDNOSTKOWYCH NA POWIERZCHNIACH OŚLEDEK

Intensywność skrawania w trakcie procesu gładzenia gładzi cylindrowej determinują siły rozpierające ośledek i względny przesuw stykających się powierzchni. Powierzchniowy kontakt ośledek z cylindrem powoduje, że każdy element dPi o wymiarach DX i DY dociskany jest do gładzi cylindrowej siłą, która jest ułamkiem całkowitej siły rozpierającej jedną ośledek. Łącząc taką każdą elementarną siłę z elementem powierzchni dPi na który oddziałujemy mamy zdefiniowaną wielkość nacisku jednostkowego. Charakterystyczne dla procesu gładzenia jest to, że naciski te podczas trwającego procesu nie rozkładają się na całej powierzchni ośledek równomiernie. Narastanie nacisków jednostkowych na długości przekroju wzdłuż-

nego ośledek jest zgodne ze zwrotem wektora prędkości \overline{VPOS} ruchu postępowo-zwrotnego (Rys. 2).

Numeryczna symulacja procesu gładzenia zmusza nas do opisu rozkładu nacisków jednostkowych na powierzchniach ośledek ściśle określonymi funkcjami. Funkcje te muszą spełniać określone wymagania, które wynikają z dotychczasowej wiedzy o zjawiskach zachodzących w trakcie trwania tego procesu:

- powinny to być wypukłe i monotoniczne funkcje dwóch zmiennych $p = p(x^*, y^*)$,
- zmiana zwrotu wektora \overline{VPOS} powinna powodować zmianę monotoniczności tych funkcji,
- wartości tych funkcji dla przyjętego obszaru dziedziny D powinny być proporcjonalne do nacisków jednostkowych jakie panują w rzeczywistości na danej powierzchni ośledek,

- zmiana wielkości obszaru styku powierzchni ośledek i cylindra (wybiegi, zmiana wymiarów ośledek) nie może spowodować zmiany wartości całkowitej siły docisku

$$\iint_D p(x^*, y^*) dx^* dy^* = V = const \quad (4)$$

gdzie:

D - obszar ośledek, który jest w kontakcie z powierzchnią cylindra,
 $p(x^*, y^*)$ - funkcja opisująca rozłożenie nacisków jednostkowych w układzie współrzędnych $X^*O^*Y^*P$ związanym z ośledek,
 V - wielkość obrazująca całkowitą siłę docisku ośledek do gładzi cylindrowej.

Graficzną interpretację powyższych wymagań przedstawia Rys. 4. W oparciu o wyżej wymienione wymagania dla numerycznego przedstawienia rozkładu nacisków jednostkowych na powierzchniach ośledek przyjmujemy dwie funkcje określone w przestrzennym układzie współrzędnych XOYP. Funkcje te to:

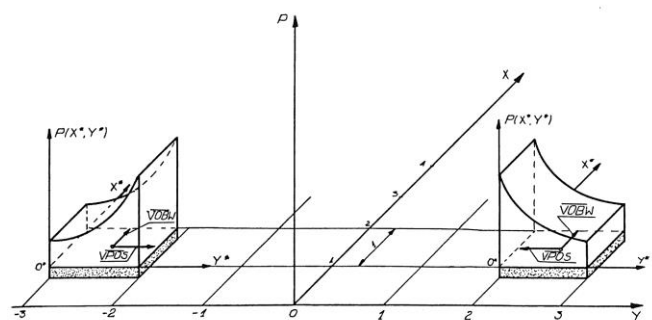
$$P = \frac{-SKALA * POLE}{Y} ; \quad Y \in \langle -3, -2 \rangle \quad (5)$$

$$P = \frac{SKALA * POLE}{Y} ; \quad Y \in \langle 2, 3 \rangle \quad (6)$$

POLE - współczynnik zapewniający stałą sumaryczną wartość wskaźnika nacisków jednostkowych panujących w danej chwili na powierzchni ośledek,

SKALA - współczynnik zależny od wzajemnego położenia ośledek i cylindra,

Funkcja (5) modeluje rozkład nacisków jednostkowych na powierzchni ośledek w czasie gdy zwrot wektora \overline{VPOS} jest zgodny ze zwrotem wektora \overline{OY} (Rys. 5.I, Rys. 5.III). W przypadku gdy wektory \overline{VPOS} i \overline{OY} mają zwroty przeciwne naciski jednostkowe na powierzchniach ośledek modeluje funkcja (6) (Rys. 5.II; Rys. 5.IV; Rys. 5.V; Rys. 5.VI). W tym miejscu należy zaznaczyć, że wektory \overline{OY} i $\overline{O^*Y^*}$ mają zawsze zwroty zgodne jednak określają one odrębne układy współrzędnych prostokątnych.



Rys. 4. Graficzna interpretacja funkcji modelujących na powierzchniach ośledek przebiegi zmienności nacisków jednostkowych

Układ $X^*O^*Y^*P(X^*, Y^*)$ jest sztywno związany z poruszającą się ośledek. Jest on wykorzystywany do numerycznego określania współrzędnych elementów na powierzchni ośledek. Współrzędne te

wyrażają się liczbami całkowitymi, dodatnimi. Natomiast układ XOYP jest układem algebraicznym służącym do określania funkcji 5 i 6 opisanych odpowiednio ich wyrażeniami. Graficzną interpretację tych funkcji przedstawia Rys. 4.

Na przebieg zmienności funkcji P wartość argumentu X nie wywiera żadnego wpływu. Ważna jednak jest długość przedziału jego wartości. Dla celów symulacji numerycznych przyjmujemy długość tego przedziału równą 1 (Rys. 3).

Współczynnik SKALA ≥ 1 odpowiednio koreluje wartości funkcji P w przypadkach gdy obszar D styku oselki z cylindrem ulega zmianie (wybiegi) (Rys. 5). Współczynnik POLE > 0 zależy jedynie od liczby elementów dPi na powierzchni oselki. Algorytmy wyznaczania wartości tych współczynników znajdziemy w [4].

7. SKRÓCONY OPIS BUDOWY I DZIAŁANIA PROGRAMU KOMPUTEROWEGO OPTY8615 MODELUJĄCEGO PROCES GŁADZENIA CYLINDRÓW SILNIKOWYCH

Na bazie założeń przytoczonych powyżej został opracowany program komputerowy OPTYMAPA pierwotnie w języku FORTRAN77 na maszynie R-32U, a obecnie OPTY8615 w języku GNU Fortran z wykorzystaniem środowiska programistycznego EDI 3.1 autorstwa dr hab. inż Wojciecha Sobieskiego - pracownika nauko-

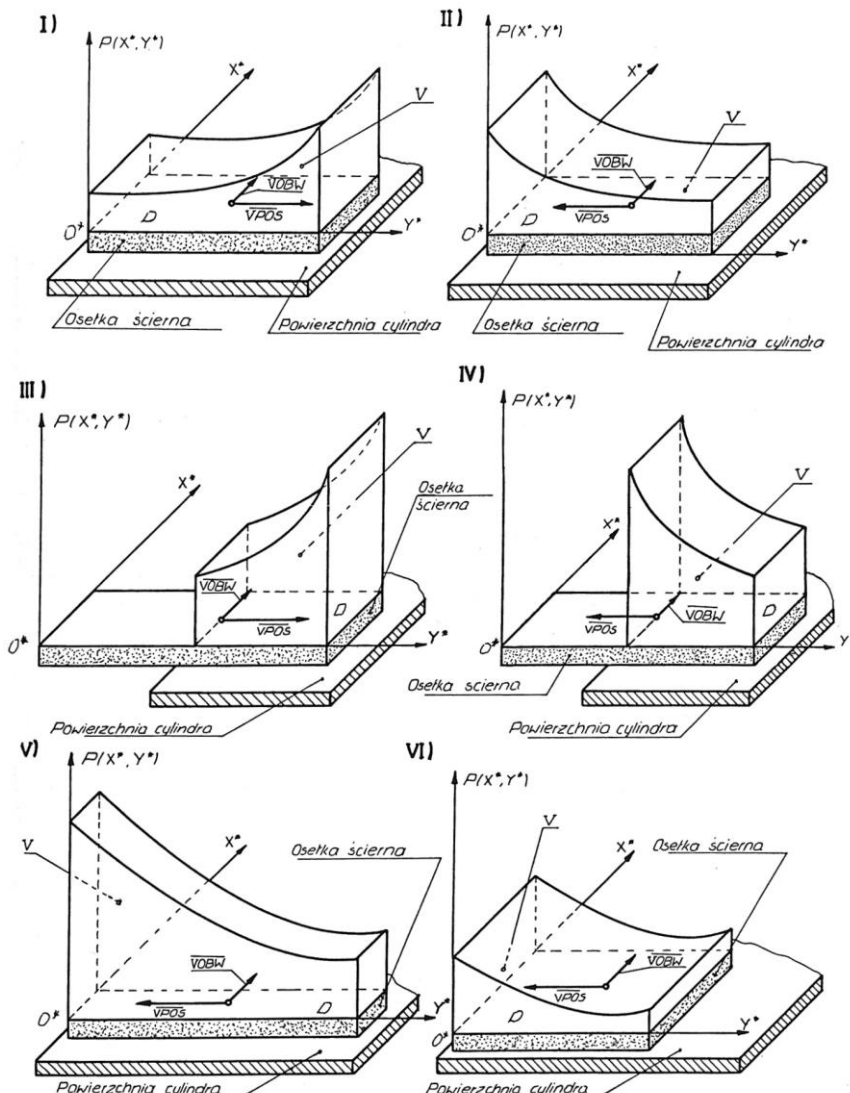
wego Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Program wymaga następujących danych wejściowych:

- LICZBA OSELEK N0 [-]
- ŚREDNICA TULEI CYLINDROWEJ D0 [mm]
- WYSOKOŚĆ TULEI CYLINDROWEJ WYS [mm]
- SKOK GŁOWICY GŁADZARSKIEJEJ SKOK [mm]
- PRĘDKOŚĆ OBWODOWA GŁOWICY VOBW [m/s]
- PRĘDKOŚĆ SKOKOWA GŁOWICY VPOS [m/s]
- WSPÓŁCZYNNIK WPŁYWU OSEŁKI WAGA [-]
- SZEROKOŚĆ OSEŁKI B0 [mm]
- KĄT USTAWIENIA 1-EJ OSEŁKI KATY(1) [deg]
- KĄT USTAWIENIA 2-EJ OSEŁKI KATY(2) [deg]
- :
- KĄT USTAWIENIA N0-EJ OSEŁKI KATY(N0) [deg]

Budując model matematyczny procesu gładzenia złożyliśmy, że wszystkie oselki w głowicy gładzarskiej będą posiadały te same wymiary, a głowica gładzarska wykona jeden podwójny skok.

Po wczytaniu danych wejściowych następuje sprawdzenie ich poprawności i spójności. Po pozytywnym zweryfikowaniu danych wejściowych następuje dobór wartości odcinków podziałowych DX i DY powierzchni cylindra i oselek gładzarskich w kierunkach odpo-



Rys. 5. Graficzna interpretacja przebiegów zmienności funkcji opisujących rozkład nacisków jednostkowych na powierzchniach oselek ściernych

wiednio obwodowym i poosiowym. Zasady tego doboru zostały opisane w rozdziale 5 niniejszego artykułu. Doświadczenie pokazuje, że odcinki podziałowe $DX < 0,2$ mm i $DY < 0,1$ mm nie zwiększają precyzji obliczeń numerycznych, a znacznie wydłużają ich czas maszynowy. Na podstawie obliczonych wartości odcinków podziałowych DX i DY zostają wyznaczone w pamięci komputera metodą dynamicznej deklaracji tablic obszary odpowiadające odpowiednio powierzchni obrabianego cylindra oraz obrabiających go oselek. Wszystkie wartości elementów tych tablic przyjmują początkowe wartości równe zero. Następnie program przechodzi do tworzenia numerycznych map powierzchni obrabianego cylindra jak również map intensywności gładzenia przez oselki gładzarskie.

Pierwsza oselka gładzarska zostaje ustawiona względem obrabianego cylindra w pozycji startowej. Na wirtualnej powierzchni oselki w pamięci komputera zostają naliczone naciski jednostkowe. Do tego celu są wykorzystywane funkcje (5) i (6) opisane w rozdziale 6 niniejszego artykułu. Funkcje te obliczają dla każdego elementu oselki dPi wskaźnik nacisków jednostkowych, którego wartość przekazywana jest do tablicy odpowiadającej za obraz oselki roboczej. Z tablicy roboczej wartość tego wskaźnika jest dodawana do odpowiednich komórek wyżej wymienionych tablic odpowiadających za obraz oselki i obrabianego cylindra. Komórki te wyznaczone są przez obszary dPi oselki i cylindra, które w danej chwili stykają się ze sobą. Następnie oselka zostaje przemieszczona względem powierzchni cylindra o długość jednego elementu DX i DY odpowiednio w kierunku obwodowym i poosiowym. Następuje ponowne wyznaczenie wartości wskaźnika nacisków jednostkowych na oselce roboczej oraz dodanie ich do odpowiednich komórek w tablicach odpowiadających za obraz oselki i cylindra. Proces ten powtarzany jest cyklicznie do momentu osiągnięcia przez oselkę zwrotnego dolnego położenia. Wówczas następuje zmiana zwrotu

wektora $VPOS$. Oselka w ten sam sposób zaczyna skokowo przesuwac się w kierunku górnego zwrotnego położenia. Obliczanie wskaźnika nacisków jednostkowych przebiega analogicznie do wcześniej opisanego. Po osiągnięciu przez oselkę górnego zwrotnego położenia w tablicy odpowiadającej za obraz cylindra powstaje numeryczna wizja jakości procesu gładzenia po wykonaniu przez jedną oselkę podwójnego skoku. Chcąc uzyskać obraz powierzchni cylindra po przejściu wszystkich oselki należy wyżej opisany proces obliczeniowy powtórzyć dla każdej oselki, uwzględniając ich położenia startowe. Naliczenie liczby przejść (kinematyka narzędzia) obszarów dPi oselki po powierzchni cylindra odbywa się w sposób dyskretny. Mianowicie w momencie kiedy do określonej komórki komputera odpowiadającej konkretnemu elementowi dPi na powierzchni cylindra bądź oselki zostanie dodana nowo obliczana wartość wskaźnika nacisków jednostkowych powiększeniu ulega również wartość umownego wskaźnika liczby przejść. Nazwa umowny wskaźnik liczby przejść wynika stąd, iż nie istnieje on w pamięci komputera w postaci jawnej.

Po wykonaniu przez program opisanych wyżej operacji dla wszystkich oselki otrzymujemy w pamięci komputera numeryczny obraz obrabianego cylindra jak również intensywności pracy narzędzia jakimi są oselki gładzarskie rozmieszczone na obwodzie głowicy gładzarskiej. W ten sposób otrzymujemy w pamięci komputera obrazy zamodelowanych powierzchni obrabianego cylindra i oselki dla jednej konkretnej ich długości. Aby otrzymać obrazy numeryczne współpracujących powierzchni dla innych długości oselki należy opisany proces powtórzyć tyle razy ile wariantów długości oselki zamierzamy badać.

8. OCENA WSKAŹNIKOWA MODELOWANYCH POWIERZCHNI

Modelowane powierzchnie obrabianego cylindra i oselki w pamięci komputera są dwuwymiarowymi tablicami CYL i $OSEROB$ o wymiarach odpowiednio $IWYS \times IOBW$ oraz $IHO \times IBO$, gdzie:

- $IWYS$ - jest liczbą naturalną określającą wysokość obrabianego cylindra w odcinkach podziałowych DY ,
- $IOBW$ - jest liczbą naturalną określającą obwód obrabianego cylindra w odcinkach podziałowych DX ,
- IHO - jest liczbą naturalną określającą wysokość oselki gładzarskiej w odcinkach podziałowych DY ,
- IBO - jest liczbą naturalną określającą szerokość oselki gładzarskiej w odcinkach podziałowych DX .

Po zasymulowaniu przez oprogramowanie jednego podwójnego skoku głowicy gładzarskiej tablice CYL i $OSEROB$ są wypełnione liczbami rzeczywistymi obrazującymi intensywność gładzenia powierzchni cylindra i intensywność zużywania się oselki gładzarskich. Każda liczba w tych tablicach jest przypisana do rzeczywistego jednego elementu dPi o wymiarach $DX \times DY$ na powierzchni obrabianego cylindra jak również oselki gładzarskiej.

W celu oceny intensywności procesu gładzenia na modelowanych powierzchniach obrabianego cylindra i oselki gładzarskiej zdefiniujemy cztery wskaźniki, które później wykorzystamy do wybrania optymalnej długości oselki gładzarskich. Modelowaną powierzchnię oselki gładzarskiej będziemy oceniali wartością wskaźnika $KRYT1$ [%], modelowaną powierzchnię cylindra będziemy oceniali wartością wskaźnika $KRYT2$ [%]. Na bazie tych dwóch wskaźników tworzymy jeszcze dwa dodatkowe wskaźniki ocen modelowanego procesu gładzenia. Będą to $KRYT3$ [%] wskaźnik uwzględniający dobrany doświadczalnie współczynnik wpływu oselki i $KRYT3FF$ [%] (FF - od angielskiego "fifty-fifty") - wskaźnik, który ocenia łącznie modelowane powierzchnie z taką samą wagą (po 50%). Wzory do obliczania tych wskaźników są podane poniżej.

$$KRYT1 = \frac{\delta os}{Xos} * 100\% \quad (7)$$

gdzie:

δos - odchylenie standardowe wartości elementów tablicy $OSEROB$ od wartości średniej arytmetycznej wyliczonej ze wszystkich elementów tej tablicy

\bar{Xos} - wartość średniej arytmetycznej wyliczonej ze wszystkich elementów tablicy $OSEROB$,

$$KRYT2 = \frac{\delta cyl}{Xcyl} * 100\% \quad (8)$$

gdzie:

δcyl - odchylenie standardowe wartości elementów tablicy CYL od wartości średniej arytmetycznej wyliczonej ze wszystkich elementów tej tablicy

\bar{Xos} - wartość średniej arytmetycznej wyliczonej ze wszystkich elementów tablicy $OSEROB$,

$$KRYT3 = \frac{WAGA * KRYT1 + (1 - WAGA) * KRYT2}{2} \quad (9)$$

gdzie:

$WAGA$ - współczynnik wpływu oselki dobierany doświadczalnie z przedziału $<0,1 ; 0,9>$,

$KRYT1$ - wskaźnik oceny modelowanej powierzchni oselki gładzarskiej określony wzorem (7).

$KRYT2$ - wskaźnik oceny modelowanej powierzchni cylindra określony wzorem (8).

$$KRYT3FF = \frac{KRYT1 + KRYT2}{2} \quad (10)$$

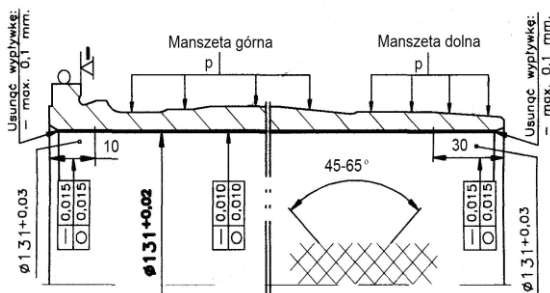
gdzie:

KRYT1 - wskaźnik oceny modelowanej powierzchni oselki gładzarskiej określony wzorem (7).

KRYT2 - wskaźnik oceny modelowanej powierzchni cylindra określony wzorem (8).

9. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ MODELUJĄCYCH PROCES GŁADZENIA WRAZ Z PROCEDURĄ DOKONUJĄCĄ WYBORÓW OPTYMALNYCH DŁUGOŚCI OSELEK GŁADZARSKICH

W oparciu o opisany wcześniej model z wykorzystaniem programu OPTY8615 przeprowadzono dla tulei silnikowej, którą przedstawia Rys.6, proces obliczeniowy modelowania procesu gładzenia wraz z poszukiwaniem optymalnej długości oselek gładzarskich.



Rys. 6. Główne wymagania technologiczne gładzenia analizowanej tulei cylindrowej mokrej

Obliczenia przeprowadzono w oparciu o dane wejściowe przedstawione w Tab.1.

Tab. 1. Dane wejściowe do programu OPTY8615

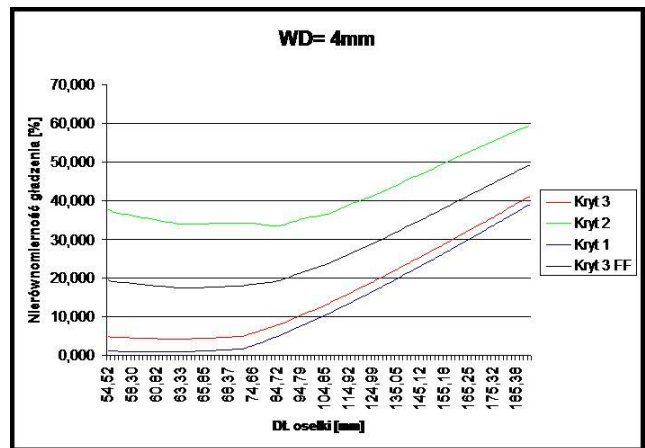
Nazwa danej wejściowej		Wartość
- LICZBA OSELEK	N0	10
- SREDNICA TULEI CYLINDROWEJ	D0	131,00 mm
- WYSOKOSC TULEI CYLINDROWEJ	WYS	272,80 mm
- SKOK GŁOWICY GŁADZARSKIEJ	SKOK	222,80
- PREDKOSC OBWODOWA GŁOWICY	VOBW	0,967 m/s
- PREDKOSC SKOKOWA GŁOWICY	VPOS	0,500 m/s
- WSPOLCZYNNIK WPLYWU OSELKI	WAGA	0,900
- SZEROKOSC OSELKI	BO	5,00 mm
- KAT USTAWIENIA 1-EJ OSELKI	KATY(1)	0,000 deg
- KAT USTAWIENIA 2-EJ OSELKI	KATY(2)	36,000 deg
- KAT USTAWIENIA 3-EJ OSELKI	KATY(3)	72,000 deg
- KAT USTAWIENIA 4-EJ OSELKI	KATY(4)	108,000 deg
- KAT USTAWIENIA 5-EJ OSELKI	KATY(5)	144,000 deg
- KAT USTAWIENIA 6-EJ OSELKI	KATY(6)	180,000 deg
- KAT USTAWIENIA 7-EJ OSELKI	KATY(7)	216,000 deg
- KAT USTAWIENIA 8-EJ OSELKI	KATY(8)	252,000 deg
- KAT USTAWIENIA 9-EJ OSELKI	KATY(9)	288,000 deg
- KAT USTAWIENIA 10-EJ OSELKI	KATY(10)	324,000 deg

W wyniku procesu obliczeniowego zostały dobrane odcinki podziałowe powierzchni oselek i cylindra w kierunku obwodowym DX=0,811 mm oraz w kierunku poosiowym DY=0,419 mm. Program wykonał 10 338 wariantów obliczeń symulacyjnych. Zakres długości oselek zmieniał się od 52,43 mm do 770,05 mm. Wybieg dolny oselek gładzarskich zmieniał się w granicach od 2,00 mm do 245,00 mm, zaś wybieg górny od 0,84 mm do 537,69 mm. Wartości wskaźników oceniających zmieniały się odpowiednio:

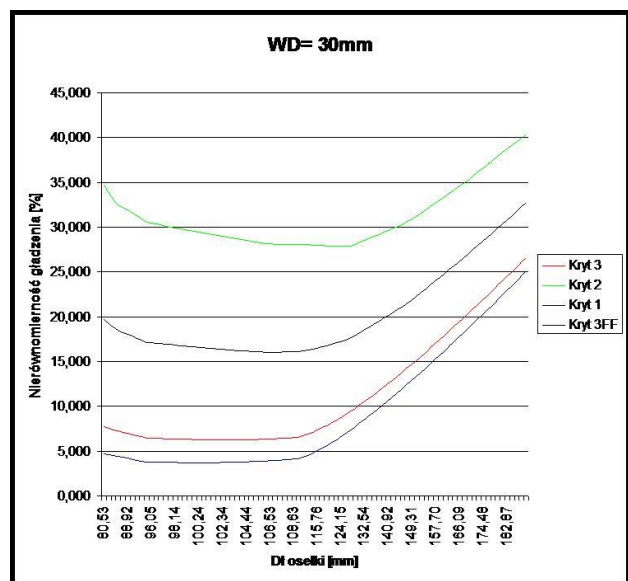
- KRYT1 od 0,68 do 104,96 [%]
- KRYT2 od 0,55 do 71,09 [%]
- KRYT3 od 3,97 do 94,99 [%]
- KRYT 3 FF od 16,04 do 75,52 [%]

Część wyników obliczeń otrzymanych z programu OPTY8615 została przedstawiona w w Tab.2. W tabeli tej pojawiają się dodatkowo takie wielkości jak Wybieg dolny oselki zadany i Wybieg dolny oselki obliczony. Wielkości te nieznacznie różnią się pomiędzy sobą. Wynika to z faktu przedstawiania w programie wielkości wymiarów liniowych w całkowitych krotnościach wartości dobranych przez program odcinków podziałowych DX i DY. W przypadku wysokości cylindra i wysokości oselek gładzarskich jest to wartość odcinka DY (kierunek poosiowy). Dodatkowo w Tab 2. zostały umieszczone wartości takich parametrów jak WS_WD i WS_WG. Są to odpowiednio współczynniki wybiegu dolnego i górnego. Pozycja literatury [6] porusza ten temat bardziej wnikliwie.

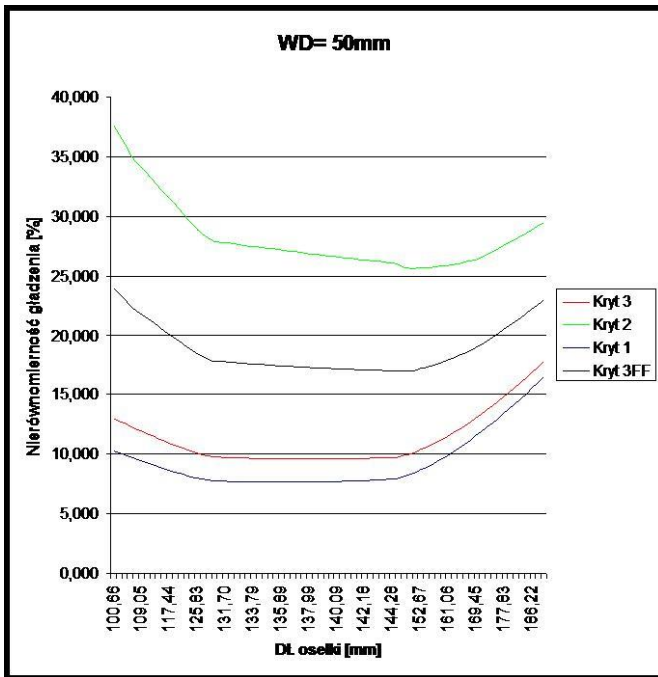
Otrzymane z programu wyniki obliczeń wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 i KRYT3 FF zostały przedstawione w sposób analityczny na wykresach Rys.7, Rys.8, Rys.9, Rys.10, Rys.11, Rys.12 oraz w sposób poglądowy wskaźnik KRYT3 FF na Rys. 13., wskaźnik KRYT2 na Rys. 14



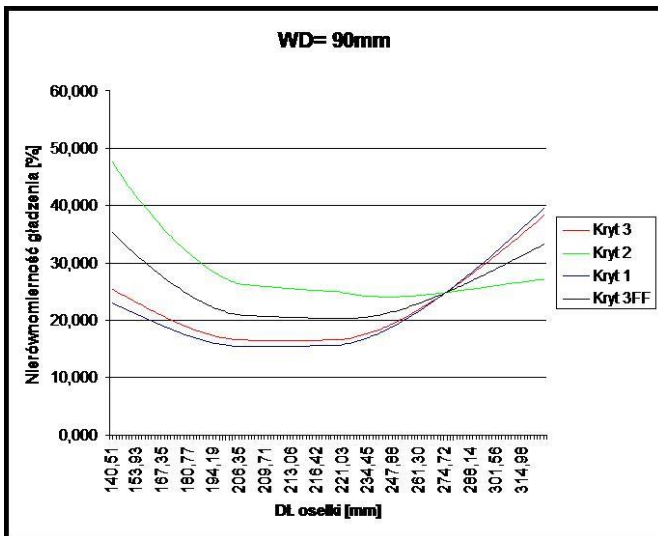
Rys. 7. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 4 mm (WD=4 mm) otrzymanych z programu OPTY8615



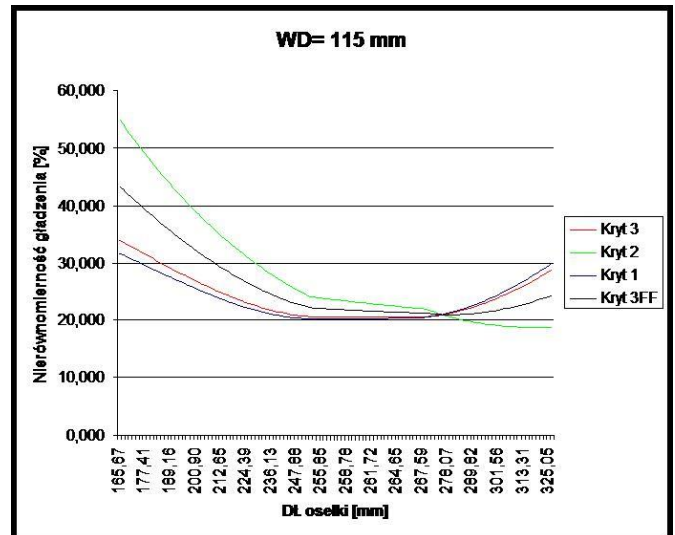
Rys. 8. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 30 mm (WD=30 mm) otrzymanych z programu OPTY8615



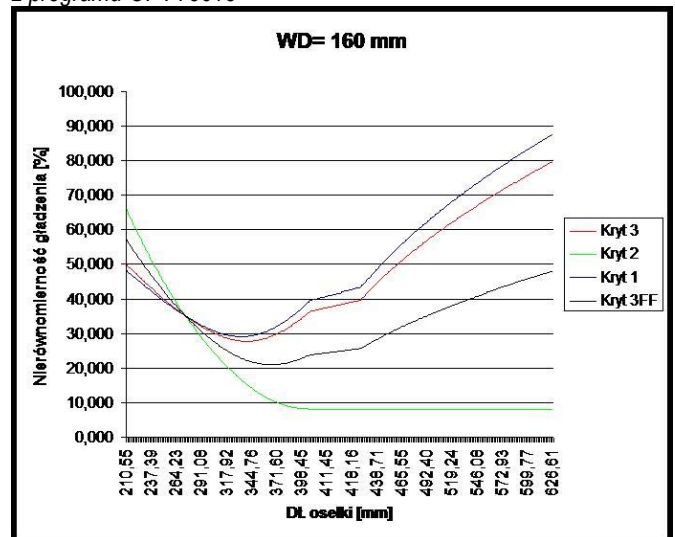
Rys. 9. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 50 mm (WD=50 mm) otrzymanych z programu OPTY8615



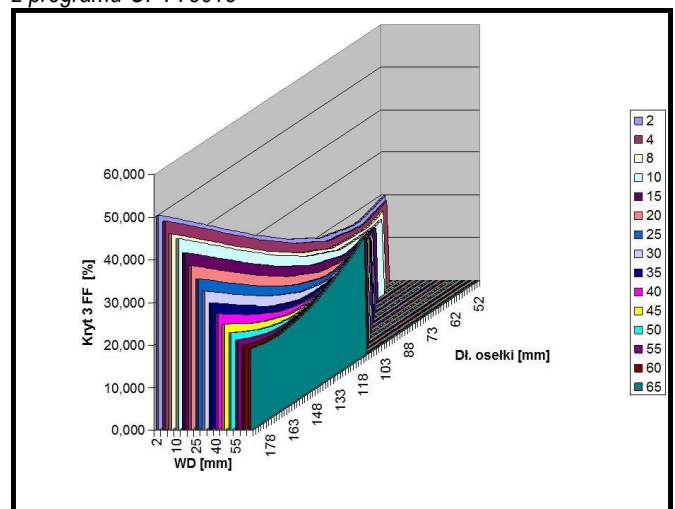
Rys. 10. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 90 mm (WD=90 mm) otrzymanych z programu OPTY8615



Rys. 11. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 115 mm (WD=115 mm) otrzymanych z programu OPTY8615



Rys. 12. Zestawienie wartości wskaźników KRYT1, KRYT2, KRYT3 oraz KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegu dolnego oselek równego 160 mm (WD=160 mm) otrzymanych z programu OPTY8615

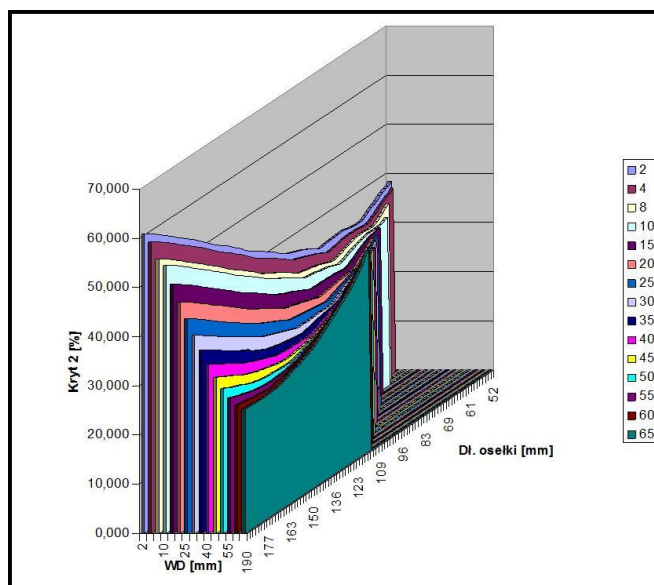


Rys. 13. Kompleksowe zestawienie wartości wskaźnika KRYT3 FF w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegów dolnych oselek od 2mm do 65 mm otrzymanych z programu OPTY8615

9.1. Procedura dokonująca wyboru optymalnych długości oselek gładzarskich

Analizując wykresy wskaźników przedstawione na Rys.7, Rys.8, Rys.9, Rys.10, Rys.11, Rys.12.. bardzo trudno jest dokonać jednoznacznego wyboru optymalnej długości oselek gładzarskich dla badanego cylindra. W tym celu należy posłużyć się metodami trochę bardziej złożonymi. Należy dążyć do jak najbardziej równomiernego gładzenia powierzchni cylindra, ale nie może się to odbywać kosztem nierównomiernego zużywania się powierzchni oselek gładzarskich. Mając na uwadze powyższe stwierdzenia wybór optymalnej długości oselek gładzarskich w programie OPTY8615 dokonuje się w następujący sposób:

- otrzymane tabelaryczne wyniki obliczeń symulacyjnych należy posortować narastająco według kryterium KRYT3 FF,
- z tego zbioru należy wybrać te zestawy parametrów, dla których wartość wskaźnika KRYT3 FF nie różni się o więcej niż 1+0,05 [%] od wartości minimalnej tego wskaźnika ze wszystkich przeliczonych wariantów. Fragment tak przygotowanego zbioru parametrów przedstawia Tab.2. Cały podzbiór interesujących nas wariantów parametrów dla cylindra przedstawionego na Rys. 13 zawiera 299 pozycji
- z tego podzbioru wybieramy te warianty parametrów, dla których wartość wskaźnika KRYT2 przyjmuje najmniejsze i mało różniące się między sobą wartości. Dla cylindra przedstawionego na Rys. 14 optymalne wymiary długości oselek gładzarskich zaznaczone są kolorem zielonym w Tab.3. Długości te zawierają się w przedziale malejącym od 150,99 mm do 145,96 mm. Ważną uwagą jest fakt, że wybiegi dolne dla tych wybranych długości oselek gładzarskich są takie same i wynoszą 50 mm. Graficznie możemy więc te wymiary oselek gładzarskich wyznaczyć z wykresu na Rys.9 jako argumenty, dla których krzywa KRYT2 osiąga wartości minimalne.



Rys. 14. Kompleksowe zestawienie wartości wskaźnika KRYT2 w funkcji długości oselek gładzarskich dla wybiegów dolnych oselek od 2mm do 65 mm otrzymanych z programu OPTY8615

PODSUMOWANIE

Na bazie opisanych założeń został zaprojektowany, zakodowany oraz przetestowany program komputerowy, który tworzy wirtualne mapy cyfrowe ilości przejść i nacisków jednostkowych na powierzchniach oselek i obrabianego cylindra po wykonaniu przez głowicę gładzarską jednego podwójnego skoku. Mapy te są oceniane wg określonych kryteriów i mogą stanowić wsad do programów graficznych, które w prosty sposób mogą dokonać ich wizualizacji. Opisany program na podstawie zamodelowanych kilku tysięcy map powierzchni obrabianego cylindra sugeruje wybór optymalnej długości oselek gładzarskich do przeprowadzenia tego procesu.

Zgodnie z [5] można stwierdzić, że wykorzystanie tego i podobnego oprogramowania może prowadzić do lepszego doboru dedykowanych parametrów gładzenia, które do dnia dzisiejszego dobierane są metodami empirycznymi.

Tab. 2. Część wyników obliczeń otrzymanych dla cylindra (Rys 6) z programu OPTY8615 posortowanych według KRYT3 FF

LP	DŁ. OSEŁKI	W_DOLNY OSEŁKI zadany	W_DOLNY OSEŁKI obliczony	W_GÓRNY OSEŁKI obliczony	WS_WD	WS_WG	KRYT1	KRYT2	KRYT3	KRYT3 FF
-	mm	mm	mm	mm	-	-	%	%	%	%
30	106,95	30	29,749	27,26	0,2782	0,2549	3,968	28,113	6,382	16,041
31	106,53	30	29,749	26,84	0,2793	0,2519	3,936	28,145	6,357	16,041
29	107,37	30	29,749	27,68	0,2771	0,2578	4,001	28,093	6,411	16,047
28	106,11	30	29,749	26,42	0,2804	0,2490	3,907	28,191	6,335	16,049
1153	107,79	30	29,749	28,10	0,2760	0,2607	4,037	28,082	6,442	16,060
1152	105,69	30	29,749	26,00	0,2815	0,2460	3,879	28,252	6,316	16,066
27	108,21	30	29,749	28,52	0,2749	0,2636	4,075	28,077	6,475	16,076
85	105,27	30	29,749	25,58	0,2826	0,2430	3,854	28,325	6,301	16,09
1151	108,63	30	29,749	28,94	0,2739	0,2664	4,114	28,075	6,510	16,095
84	109,05	30	29,749	29,36	0,2728	0,2692	4,156	28,073	6,547	16,115
1150	85,98	20	19,693	16,36	0,2290	0,1903	1,924	30,308	4,762	16,116
83	86,40	20	19,693	16,78	0,2279	0,1942	1,944	30,291	4,779	16,118
26	104,85	30	29,749	25,17	0,2837	0,2401	3,830	28,408	6,288	16,119
1149	85,56	20	19,693	15,94	0,2302	0,1863	1,907	30,340	4,750	16,124
81	86,82	20	19,693	17,20	0,2268	0,1981	1,967	30,283	4,799	16,125
80	87,24	20	19,693	17,62	0,2257	0,2020	1,993	30,281	4,822	16,137
1148	85,14	20	19,693	15,52	0,2313	0,1823	1,893	30,391	4,743	16,142
79	87,66	20	19,693	18,03	0,2247	0,2057	2,022	30,281	4,848	16,152
25	104,44	30	29,749	24,75	0,2848	0,2370	3,809	28,498	6,278	16,154
1147	88,08	20	19,693	18,45	0,2236	0,2095	2,055	30,278	20,007	16,167
1210	104,02	25	24,721	29,36	0,2377	0,2823	3,769	28,577	6,250	16,173
1209	84,72	20	19,693	15,10	0,2324	0,1782	1,882	30,466	4,741	16,174

Tab. 3. Wybór optymalnych wymiarów oselek gładzarskich dla cylindra (Rys 6) metodą tabelaryczną

LP	DŁ. OSEŁKI	W_DOLNY OSEŁKI zadany	W_DOLNY OSEŁKI obliczony	W_GÓRNY OSEŁKI obliczony	WS_WD	WS_WG	KRYT1	KRYT2	KRYT3	KRYT3 FF
-	mm	mm	mm	mm	-	-	%	%	%	%
624	150,99	50	49,861	51,17	0,3302	0,3389	8,507	25,635	10,220	17,071
811	149,31	50	49,861	49,49	0,3339	0,3315	8,326	25,640	10,058	16,983
815	147,64	50	49,861	47,81	0,3377	0,3238	8,166	25,736	9,923	16,951
636	145,96	50	49,861	46,14	0,3416	0,3161	8,027	25,902	9,815	16,965
714	145,96	45	44,833	51,17	0,3072	0,3506	8,138	26,008	9,925	17,073
812	144,28	45	44,833	49,49	0,3107	0,3430	7,896	26,070	9,713	16,983
722	144,28	50	49,861	44,46	0,3456	0,3082	7,910	26,085	9,727	16,998
645	143,86	50	49,861	44,04	0,3466	0,3061	7,884	26,133	9,709	17,009
545	142,60	45	44,833	47,81	0,3144	0,3353	7,672	26,143	9,519	16,908
720	143,44	50	49,861	43,62	0,3476	0,3041	7,859	26,181	9,692	17,02
751	140,92	45	44,833	46,14	0,3181	0,3274	7,469	26,227	9,344	16,848
718	143,02	50	49,861	43,20	0,3486	0,3021	7,836	26,230	9,676	17,033
716	142,60	50	49,861	42,78	0,3497	0,3000	7,815	26,279	9,661	17,047
827	139,25	45	44,833	44,46	0,3220	0,3193	7,287	26,320	9,190	16,804
625	142,18	50	49,861	42,36	0,3507	0,2979	7,794	26,329	9,648	17,062
623	141,76	50	49,861	41,94	0,3517	0,2959	7,775	26,380	9,636	17,078
753	137,57	45	44,833	42,78	0,3259	0,3110	7,127	26,420	9,056	16,774
538	141,34	50	49,861	41,52	0,3528	0,2938	7,758	26,431	9,625	17,095
615	140,92	50	49,861	41,10	0,3538	0,2917	7,741	26,484	9,616	17,113
836	135,89	45	44,833	41,10	0,3299	0,3025	6,990	26,526	8,943	16,758
1289	140,51	50	49,861	40,68	0,3549	0,2895	7,727	26,536	9,608	17,132
754	135,47	45	44,833	40,68	0,3309	0,3003	6,959	26,554	8,919	16,757

BIBLIOGRAFIA

1. Najerman.M.S: Precyzyjna obróbka detali z aluminem i abrazywnymi bruskami. Maszynostrojenije. Moskwa 1971.
2. Praca zbiorowa: Poradnik warsztatowca-mechanika, WNT Warszawa 1981.
3. Górski E.: Obróbka gładkościowa, WNT Warszawa 1963.
4. Buczek A., Domański J.: Numeryczna optymalizacja wymiarów oselek w głowicy do gładzenia cylindrów z uwzględnieniem ilości przejść i nacisków jednostkowych. Politechnika Rzeszowska 1986.
5. Hang X., Wang X., Wang D., Yao Z., Xi L., Wang X.: Methodology to improve the cylindricity of engine cylinder bore by honing. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, Vol. 139, 031008-1 ÷ 031008-10, 2017.
6. Żebrowski H., Rozdział XI Szlifowanie i inne obróbki ściernic, 525-688, [W] Poradnik inżyniera, Obróbka skrawaniem Tom 1, Górski E. (Koordynator). Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.

Macroscopic model for honing motor cylinders exhaust as a tool optimizing height smooth gasket in repair technology

The paper presents the assumptions of the macroscopic mathematical model of honing, taking into account both the kinematics of the tool and the characteristic for this process the distribution of unit pressures occurring in the interaction of sharpening stones on the surface of the honing stones on

the surface of the workpiece are characteristic for this process. On the basis of these assemblies an active and tested computer program has been developed, which numerically model this technological process. In the computer memory are created digital quality maps of the surface of the machined cylinder. On the basis of the described assemblies, a working and tested computer program has been developed that numerically models this technological process. Digital quality maps are created in the computer's memory regarding the surface of both the cylinder and the smoothing stones. These maps can be assessed analytically as well as subjected to visualization. The article presents the results of calculations that optimize the height of smooth ground for the process of honing a specific cylinder liner with the analysis of the results obtained. The described computer program saves time and funds during dedicated research that optimizes the parameters of this process

Autorzy:

dr hab. inż. **Jacek Michalski**, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska, im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, 35-959 Rzeszów, Al Powstańców Warszawy 8, adres e-mail: jmichals@prz.eu.pl

mgr inż. **Jacek Domański** – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Rzeszowskiej (1986r.) adres e-mail: jacek.andrzej.domanski@gmail.com

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.142

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15