

# Hob's optical and coordinating methods of measurement

## Optyczne i współrzędnościowe metody pomiaru frezów ślimakowych

ANDRZEJ PIOTROWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.8-9.17>

The article presents selected issues of measurement and identification of hobs using optical and coordinates metrology methods. The outline of the hob is an indicator of the tool class and has a decisive influence on the accuracy of the gears made with it. The conducted research is the basis for drawing conclusions about the principles and methods of measuring hobs.

**KEYWORDS:** CAD/CAE, metrology, hob's mathematical model, numerical analysis, CMM

Artykuł prezentuje wybrane zagadnienia pomiaru i identyfikacji frezów ślimakowych z użyciem metod metrologii optycznej i współrzędnościowej. Zarys frezu ślimakowego jest wyznacznikiem klasy narzędzia i ma decydujący wpływ na dokładność wykonywanych z jego użyciem kół zębatych. Przeprowadzone badania są podstawą do wnioskowania o zasadach i metodach pomiaru frezów ślimakowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** CAD/CAE, metrologia, model matematyczny frezu ślimakowego, analiza numeryczna, WMP

### Wprowadzenie

Mimo upływu lat oraz wprowadzania nowoczesnych konstrukcji elektrycznych pozbawionych skrzyni przekładniowych, koła zębate nadal są podstawowym elementem umożliwiającym przenoszenie dużych sił i momentów oraz zmianę prędkości obrotowej zwłaszcza w produkcji samochodów. Od dokładności kół zależy „kultura pracy” skrzyni biegów, czyli płynność oraz cichobieżność.

Koła zębate są produkowane na specjalizowanych frezarkach obwodniowych klasycznych lub współrzędnościowych z użyciem frezów ślimakowych. Są to konstrukcje monolityczne (aktualnie pełnowęglkowe) lub wyposażone w wymienne płytki skrawające (rys. 1a). Bardzo popularne są frezy listkowe (rys. 1b), czyli z wieloma zwojami i długie, co umożliwia „shifting” przedłużający okres trwałości narzędzia.

Mimo tych zabiegów frezy po określonym czasie – zależnym od parametrów obróbki i rodzaju skrawanych materiałów – tracą swoje właściwości. Największemu zużyciu podlegają krawędzie skrawające (wyszczerbienia, zmiana zarysu na skutek tarcia itp.). Dlatego frezy ślimakowe są poddawane procesowi ostrzenia [7] wykonywanemu przez wyspecjalizowane firmy – najczęściej producenta frezu. Producent jako jedyny dysponuje wszystkimi informacjami o parametrach technologicznych zastosowanych w procesie produkcji narzędzia – kształto-

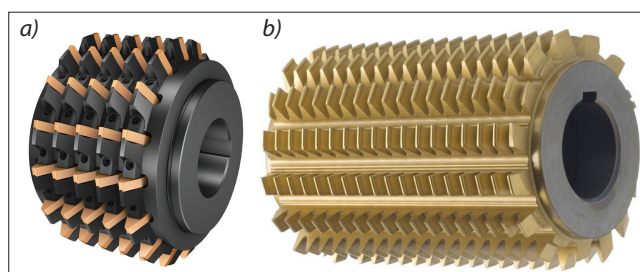


Fig. 1. Hobs: a) classic cutter with indexable inserts [13], b) monolithic flap cutter [12]

Rys. 1. Frezy ślimakowe: a) frez klasyczny z płytkami wymiennym [13], b) monolityczny frez listkowy [12]

wania jego powierzchni. Dzięki temu ma możliwość prawidłowego ukształtowania krawędzi skrawających podczas ostrzenia.

W trakcie kształtowania powierzchni frez ślimakowy jest wielokrotnie mierzony z użyciem klasycznych i współrzędnościowych metod pomiarowych. Wyniki pomiarów są parametrem umożliwiającym prawidłową korektę parametrów technologicznych – kąta i zarysu ściernic kształtujących powierzchnie frezów.

### Model matematyczny i geometria frezu ślimakowego

Geometria frezu ślimakowego jest bardzo skomplikowana. Prawidłowe ukształtowanie powierzchni narzędzia wymaga przeprowadzenia wielu złożonych obliczeń. W trakcie produkcji powstają zębate listwy, które w procesie skrawania tworzą przekładnię technologiczną z wykonywanym kołem zębatym. Ewolwentowy zarys obrabianego koła zębatego jest obwiednią kolejnych położenia prostoliniowych krawędzi skrawających listwy zębatej. Listwa zębata znajduje się w miejscu przecięcia powierzchni przyłożenia z powierzchnią natarcia. Ze względu na śrubowy charakter narzędzia jest ona skręcona i pochylona pod kątem zgodnym z kątem wzniosu linii śrubowej [1, 6, 7]. W konstrukcjach klasycznych (monolitycznych) wyróżnia się zataczaną powierzchnię przyłożenia oraz prostoliniową powierzchnię natarcia. We frezach składanych płytki skrawające mają ścinową powierzchnię przyłożenia. Ze względu na problemy z budową gniazd i prawidłowym osadzeniem w nich płytek skrawających w przypadku narzędzi składanych, frezy monolityczne charakteryzują się wyższą, dochodzącą do klasy AAA, dokładnością.

\* Dr inż. Andrzej Piotrowski – [apiotr@itm.pcz.pl](mailto:apiotr@itm.pcz.pl), 0000-0001-6382-200X – Politechnika Częstochowska, Częstochowa, Polska

Elementem determinującym dokładność frezu ślimakowego jest jego krawędź skrawająca. Powierzchnia natarcia i powierzchnie przyłożenia pełnią jedynie role pomocnicze. Krawędzie skrawające frezu ślimakowego powstają w wyniku przecięcia się powierzchni natarcia i bocznych powierzchni przyłożenia ostrza frezu (wyróżnia się prawą i lewą krawędź skrawającą). Zgodnie z opracowanym modelem matematycznym współrzędne punktów krawędzi skrawającej muszą spełniać równania tych powierzchni, ponieważ należą jednocześnie do nich obu. Warunek ten jest stały i niezmienny. Oznacza to, że dotyczy dowolnego typu narzędzi, frezów monolitycznych i składanych. W zależności od zastosowanej ściernicy oraz technologii powierzchnia natarcia frezu ślimakowego może być powierzchnią płaską, śrubową prostokreślną lub śrubową stożkopochodną. Oznacza to, że opracowany model obliczeniowy musi uwzględniać wszystkie te rodzaje powierzchni. Równanie krawędzi skrawającej opisano układem równań [6]:

$$\bar{r}_k = \bar{r}_p(u_p, v_p, \phi_p) \vee \bar{r}_k = \bar{r}_n(u_n, v_n, \phi_n) \quad (1)$$

W równaniu (1) występowało sześć parametrów. Z tego względu dla wyznaczenia punktów krawędzi skrawającej, dla kolejnych wartości jednego z parametrów wyznaczano wartości pozostałych pięciu parametrów (indeksy dolne: k – krawędź skrawająca, p – powierzchnia przyłożenia, n – powierzchnia natarcia). Matematycznie oznaczało to, że problem sprowadza się do ułożenia układu pięciu równań nieliniowych wiążących te parametry (2–6). Trzy z nich to warunki przecięcia się powierzchni natarcia i powierzchni przyłożenia wzdłuż krawędzi skrawającej (2–4), pozostałe dwa to warunki obwiedni (5–6):

$$f_1 = \bar{r}[1] - \bar{r}[1] \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{p}{\bar{r}}[2] - \frac{n}{\bar{r}}[2] \quad (3)$$

$$f_3 = \frac{p}{\bar{r}}[3] - \frac{n}{\bar{r}}[3] \quad (4)$$

$$f_4 = f_p \quad (5)$$

$$f_5 = f_n \quad (6)$$

Zależności (2–6) były podstawą budowy uniwersalnego matematycznego modelu frezu ślimakowego i opracowanego na jego bazie programu obliczeniowego [6]. W przypadku prostokreślnej powierzchni natarcia nie występuje warunek obwiedni, czyli układ równań upraszcza się. W cyklu obliczeń dla zadanych wartości jednego z parametrów wyznaczano z tych równań wartości pozostałych parametrów, które po podstawieniu do równania (1) pozwalały określić współrzędne punktów krawędzi skrawającej ostrza frezu ślimakowego.

W celu określenia odchyłek krawędzi skrawającej od prostej wykonano rzut tej krawędzi na płaszczyznę styczną do powierzchni natarcia ostrza frezu na średnicy podziałowej. W opracowanym modelu matematycznym uwzględniono także fakt zużycia frezu w trakcie eksploatacji, wprowadzając kąt obrotu  $\xi$

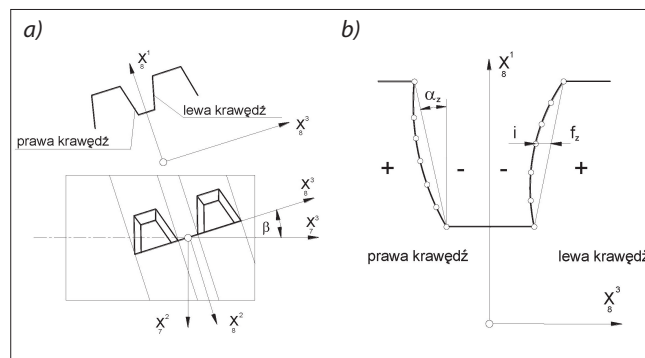


Fig. 2. Position of the coordinate system (a); scheme for determining the angle and deviations of the cutter's profile (b) [6]

Rys. 2. Położenie układu współrzędnych (a); schemat określania kąta i odchyłek zarysu ostrza frezu (b) [6]

powierzchni natarcia względem układu współrzędnych frezu (układu krawędzi skrawającej). Opisano to równaniem:

$$\bar{r}_7 = [3, -\xi] \bar{r}_k \quad (7)$$

Po kolejnych przekształceniach, wprowadzeniu obrotu o kąt wzniosu linii śrubowej powierzchni natarcia oraz uwzględnieniu, że oś obrotu pokrywa się z osią układu współrzędnych (rys. 2a) otrzymano równanie:

$$x_8^3 = -x_7^2 \sin \beta + x_7^3 \cos \beta \quad (8)$$

Mając współrzędne punktów w danej płaszczyźnie, można określić współczynnik kierunkowy prostej przechodzącej przez skrajne punkty zarysu (9) (rys. 2b).

$$tg \alpha_z = \left| \frac{x_8^3[n] - x_8^3[1]}{x_8^1[n] - x_8^1[1]} \right| \quad (9)$$

W nawiasach kwadratowych podano numery skrajnych punktów zarysu (ostatniego i pierwszego) oraz odchyłki od tej prostej w kolejnych punktach zarysu.

$$o[i] = \left( \left( x_8^1[i] - x_8^1[1] \right) tg \alpha_z - k_k \left( x_8^3[i] - x_8^3[1] \right) \right) \cos \alpha_z \quad (10)$$

gdzie:  $o$  – odchyłki zarysu od prostej,  $i$  – numer kolejnego punktu zarysu,  $k_k = 1$  – krawędź lewa,  $k_k = -1$  – krawędź prawa.

Wykorzystując opracowany model matematyczny umożliwiającą analizę wpływu powierzchni narzędzia na zarys krawędzi skrawającej, zaproponowano zmianę technologii produkcji frezów ślimakowych. Jej efektem było podwyższenie dokładności narzędzi. W analizie numerycznej frezy produkowane w klasie B można było otrzymać w klasie A lub AA.

Ważnym elementem procesu opracowywania modelu matematycznego oraz produkcyjnego były pomiary weryfikacyjne frezów ślimakowych. Od ich wyników zależał sposób kształtowania (obciągania) ściernic wykorzystywanych do ostatecznego ukształtowania powierzchni przyłożenia i natarcia. Należy zaznaczyć, że raz ukształtowane w procesie produkcyjnym

boczne powierzchnie przyłożenia nie podlegają zmianom w trakcie życia narzędzia. W procesie ostrzenia kształtowana jest tylko powierzchnia natarcia. O prawidłowym jej ukształtowaniu decydują identyfikacja i pomiar frezu. W praktyce produkcyjnej i warsztatowej wykorzystuje się metody klasyczne, zwłaszcza optyczne i współrzędnościowe. Ponadto istnieją specjalizowane maszyny pomiarowe do frezów ślimakowych [6, 7]. Problemem jest ich bardzo ograniczona dostępność. Dlatego stosuje się uniwersalne maszyny współrzędnościowe ze specjalnym oprogramowaniem do pomiaru frezów ślimakowych [15].

### Optyczne metody pomiaru frezów ślimakowych

Ze względu na cenę oraz uniwersalność w praktyce warsztatowej używany jest powszechnie mikroskop warsztatowy. To urządzenie optyczne umożliwiające bezstykowy pomiar frezów ślimakowych. Klasyczne konstrukcje wykorzystujące okular mikroskopowy do analizy zarysu frezu ślimakowego zostały zastąpione przez urządzenia cyfrowe podłączone do komputera (rys. 4a) [4]. Obraz zbierany przez kamerę o wysokiej rozdzielczości jest wyświetlany na ekranie monitora (rys. 3). Frez ślimakowy mocowany w pryzmie lub w kłach jest umieszczony na stole, który umożliwia jego przesuw w osiach X i Y (rys. 4b). Liniąły pozwalają na bezpośredni odczyt wartości przesunięć przez system komputerowy. Oprogramowanie MetLogic M3 v2 (rys. 3) umożliwia przeprowadzanie analiz metrologicznych na podstawie współrzędnościowych metod pomiarowych [3].

Pomiar rozpoczęto od budowy układu współrzędnych. Zarys frezu był konstruowany automatycznie na podstawie zebranej chmury punktów i aproksymowany do elementu skojarzonego – w tym przypadku do linii prostych lub łuków (rys. 3). Drugą metodą było stworzenie elementów geometrycznych przez ręczne wskazanie punktów definiujących ich położenie w przestrzeni. Korzystając z funkcji programu [3], można określić zależności geometryczne między elementami, kąty, długości, maksymalne odchyłki zarysu od linii prostej, stan krawędzi skrawającej itp. Program umożliwia też budowę modeli 3D. Do oświetlenia mierzonych detali wykorzystuje się światło przechodzące i odbite o różnym natężeniu.



Fig. 3. Main screen of the MetLogic M3 v2 program – view of the tooth head of the cutter rack

Rys. 3. Główny ekran programu MetLogic M3 v2 – widok głowy zęba zębátky frezu

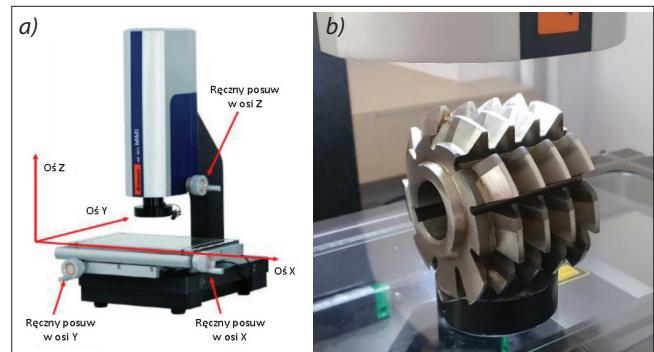


Fig. 4. Garant MM1-200 workshop microscope (a); hob on the table of the MM1-200 microscope (b)

Rys. 4. Mikroskop warsztatowy Garant MM1-200 (a); frez ślimakowy na stole mikroskopu MM1-200 (b)

W pomiarach wykorzystano mikroskop warsztatowy Garanat MM1-200 (rys. 4a) z oprogramowaniem MetLogic M3 v2 [3, 4]. Urządzenie jest wyposażone w: inkrementalny układ pomiarowy, 84-krotne powiększenie optyczne, przesuw w osi  $X=200$  mm,  $Y=100$  mm,  $Z=100$  mm oraz kamerę o rozdzielczości 1,3 MPx. Odchylenie od pomiaru długości  $E_{UXY,MPE}$  według norm [8] dla współczynnika powiększenia wynosi 0,5. Dokładność pomiaru:  $2,9 + L/100$  [mm]. Detal był oświetlany zestawem 56 diod o barwie białej, w układzie centrycznym.

Pomiarom weryfikującym poddano klasyczny, pięcizwojny, monolityczny frez ślimakowy FWP NFMc 4.5/20, o kącie pochylenia linii śrubowej  $3^{\circ}23'$ , klasy B (rys. 4b). Podstawowe wymiary nominalne zostały odczytane z tabliczki znamionowej frezu, a pozostałe obliczono z użyciem autorskiego programu do obliczeń, zgodnie z wymaganiami producenta frezów FWP [6]. Program do obliczeń zakładał możliwość modyfikacji klasy frezu, ręcznego lub automatycznego wprowadzania wielkości charakterystycznych i modyfikacji zarysu [11]. Następnie wykonano pomiary narzędzia, a ich wyniki porównano z wymiarami nominalnymi (tablica). Analiza tablicy wskazuje na dużą dokładność pomiarów i ich zgodność z wartościami nominalnymi.

TABLE I. Results of measurements on the Garant MM1-200 microscope

TABLICA I. Wyniki pomiarów na mikroskopie Garant MM1-200

Lp.	Mierzona wielkość	Pomiar	Wymiar nominalny*
1	Długość całkowita [mm]	$D_a$	90
2	Średnica [mm]	$D$	90
3	Podziałka nominalna [mm]	$P_{nom}$	14,18
4	Szerokość zęba na średnicy podziałkowej (średnia) [mm]	$B_z$	6,681
5	Kąt pochylenia linii śrubowej [°]	$\gamma$	$3^{\circ}25'$
6	Skok linii śrubowej rowków [mm]	$S_r$	4200
7	Wysokość całkowita zęba (średnia) [mm]	$H_z$	11,506
8	Wysokość głowy zęba (średnia) [mm]	$H_g$	5,635
9	Promień zaokrąglenia u głowy i stopy (średnia) [mm]	$r_1$	0,527

\* Wymiary nominalne obliczone w autorskim programie do obliczeń [6]

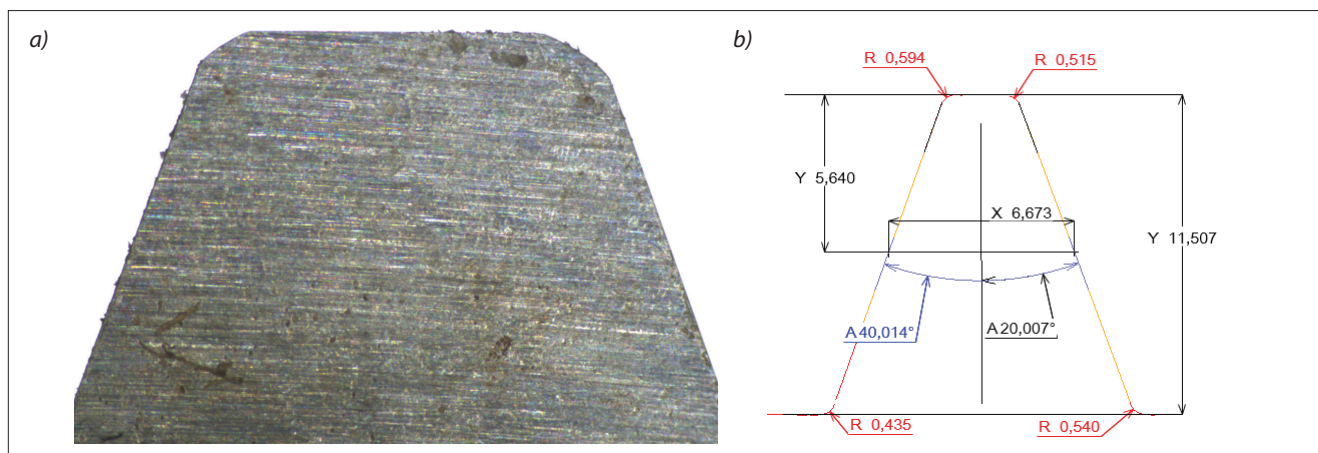


Fig. 5. View of the tooth head (a); measurement results (b)  
Rys. 5. Widok głowy zęba (a); wyniki pomiarów (b)

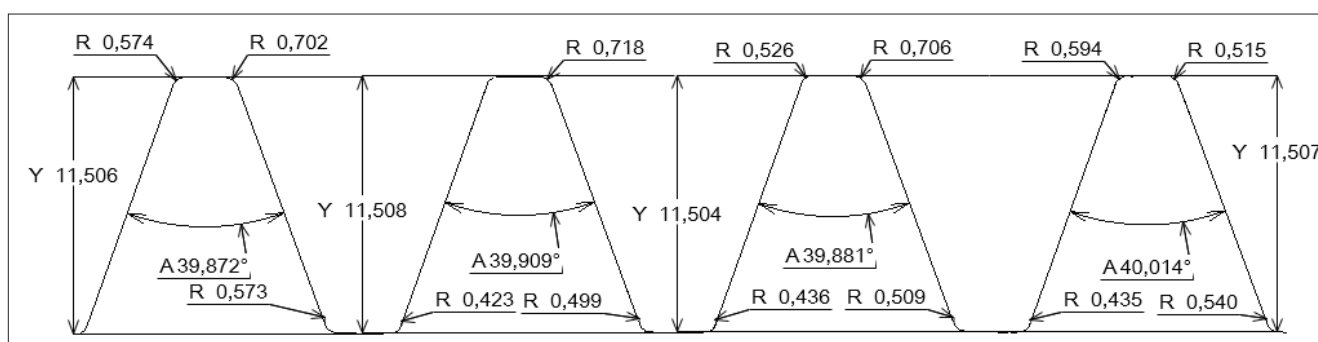


Fig. 6. Cumulative measurement results for a single rack  
Rys. 6. Zbiorcze wyniki pomiarów dla pojedynczej zębatki

Największe różnice zaobserwowano dla promieni głów i stóp zębów zębatki. Zgodnie z programem do obliczeń ich wielkość powinna wynosić 0,9 mm, jednak pomiary wykazały 0,53 mm. Wynika to prawdopodobnie ze świadomej decyzji producenta o zmianie tej wartości, ponieważ wyniki pomiarów są zgodne dla wszystkich zębów zębatki (rys. 5 i 6).

Cechą charakterystyczną nowoczesnych pomiarów optycznych jest możliwość analizy pojedynczych elementów (rys. 5) – w tym przypadku zęba zębatki, oraz budowania modelu mierzonego detalu i zbiorczej analizy wyników pomiarów (rys. 6). Umożliwia to przeprowadzenie inżynierii odwrotnej.

Na podstawie pomiarów tworzy się przestrzenną geometrię detalu (w formacie *.dxf*), która jest eksportowana do programu CAD/CAM i odtwarzana w rzeczywistości. Dodatkową zaletą jest możliwość analizy stanu krawędzi skrawających, a nawet obserwacja śladów obróbkowych pozostawionych przez ściernicę ostatecznie kształtującą powierzchnię frezu (rys. 5a).

### Pomiary na współrzędnościowych maszynach pomiarowych

Metrologia współrzędnościowa polega na zbieraniu chmury punktów położenia środka kulki pomiarowej w przestrzennym, prostokątnym układzie współrzędnych. Zebrane współrzędne są następnie porównywane z elementem skojarzonym (prostą, okręgiem, walcem itp.), czyli z wyidealizowanym modelem

matematycznym mierzonej wielkości geometrycznej. Pomiar rozpoczyna się od zdefiniowania modelu matematycznego, a następnie określenia odchyłek rzeczywistych wymiarów uzyskanych w trakcie pomiaru z modelem. W przypadku frezów ślimakowych problemem jest budowa matematycznego modelu narzędzia. Zadanie komplikuje się w przypadku pomiaru frezów poddanych ostrzeniu, ponieważ nie dysponujemy wiedzą o parametrach niezbędnych do jego wygenerowania, czyli o kształcie ściernicy ostatecznie kształtującej powierzchnię natarcia.

Do pomiarów wybrano frez ślimakowy FWP NFMc 7/20, o kącie pochylenia linii śrubowej  $4^{\circ}29'$ , klasy B (rys. 7).

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe stały się podstawowym wyposażeniem laboratoriów metrologicznych. Zwłaszcza najprostsze modele, umożliwiające pomiar podstawowych cech detali. Są one wyposażone w stykowe lub mierzące (skanujące) głowice pomiarowe. Bardzo często nie są wyposażone w stoły obrotowe, predystynowane do pomiaru elementów z powtarzającym się na obwodzie koła zarysem (frezów ślimakowych). Z tego powodu na tym etapie badań przeprowadzono próbę pomiaru frezu ślimakowego na klasycznej portalowej WMP Zeiss Eclipse 700 CNC wyposażonej w głowicę pomiarową stykową ST3, bez stołu obrotowego, z uniwersalnym oprogramowaniem Zeiss Calypso [14]. Jest to typowa konfiguracja w zakładach sporadycznie wykonujących ostrzenie frezów ślimakowych [7].

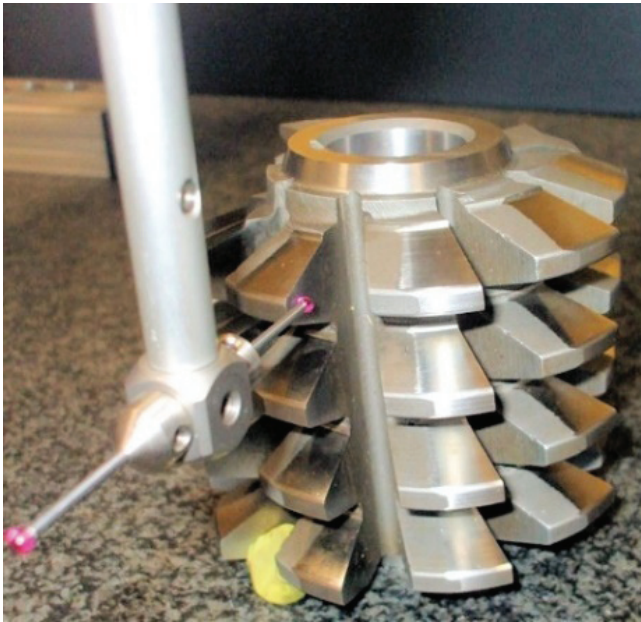


Fig. 7. Measurement of rake surface on CMM Zeiss Eclipse 700 with ST3 measuring head

Rys. 7. Pomiar powierzchni natarcia na WMP Zeiss Eclipse 700 z głowicą pomiarową ST3

Frez został zamocowany na stole w pozycji prostopadłej do jego płaszczyzny. Układ trzpieni pracował w płaszczyźnie równoległej do osi  $X$  (rys. 7). Mimo wybrania do badań dużego modułu frezu, pomiar powierzchni natarcia był możliwy tylko na pojedynczym zębie (brak stołu obrotowego). Dostęp do pozostałych zębów był niemożliwy ze względu na ich wielkość oraz duży kąt wzniosu linii śrubowej zębów. Mimo wielu prób stylus zahaczał o sąsiednie zęby. Rozwiązaniem tego problemu była ręczna modyfikacja trajektorii najazdów lub bardzo żmudne ręczne obracanie frezu po każdym pomiarze.

Analizując wyniki pomiarów, stwierdzono, że powierzchnia natarcia ma charakterystyczny, brzuszkowaty kształt. Był on wynikiem korygowania powierzchni natarcia ściernicą o zarysie prostoliniowym w przekroju osiowym, czyli w wyniku obróbki otrzymano powierzchnię stożkopochodną. Proces korekcji (ostrzenia) bardzo negatywnie wpłynął na dokład-

ność modelu matematycznego wykorzystywanego w pomiarach.

Ze względu na brak prawidłowego modelu 3D frezu (rysunku przestrzennego) nie udało się bezpośrednio zmierzyć powierzchni przyłożenia. Trudności te praktycznie uniemożliwiają dokonanie pełnej analizy frezu na tego typu maszynie. Podjęto jednak próbę takiego pomiaru. Kilkakrotnie zmierzono powierzchnię natarcia pojedynczego zęba w paru miejscach. Na tej podstawie skonstruowano przybliżoną powierzchnię płaską, którą następnie przesunięto równoległe do powierzchni natarcia, przecinając wirtualnie zarys zęba. Ustawiono ją w odległości 0,5 mm od krawędzi skrawającej i rozpoczęto pomiar profilu bocznego powierzchni przyłożenia. Wyniki nie były jednak prawidłowe. Prawy i lewy zarys profilu bardzo się różniły. Wynikało to z zastosowanej korekcji oraz aproksymacyjnego charakteru wyznaczonej powierzchni pomiarowej.

Kolejna próba polegała na wyznaczeniu odcinka znajdującego się na powierzchni natarcia, równoległe do krawędzi skrawającej (prawej lub lewej) w odległości 1 mm od niej. Tak skonstruowany odcinek był następnie przesuwany równoległe do powierzchni przyłożenia na głębokość 1 mm. W efekcie znajdował się 1 mm od krawędzi skrawającej. W kolejnym kroku odcinek został przesunięty w górę i w efekcie leżał, teoretycznie, na powierzchni przyłożenia. Na podstawie tak skonstruowanego odcinka wykonano pomiar lewego i prawego profilu frezu. Otrzymane wyniki były w tym przypadku prawidłowe. Kąty prawej i lewej flanki były zgodne z normatywami dla tego frezu. Po wykonaniu kilku pomiarów metodę uznano za poprawną i możliwą do zastosowania na klasycznej, niewyposażonej w stół obrotowy WMP.

Ostania była próba bezpośredniego pomiaru zarysu krawędzi skrawającej. Zdając sobie sprawę z problemu niepewności pomiarowej wynikającej z niemożliwości prawidłowego zdefiniowania wektora najazdu do mierzonej prostej, skonstruowano prostą tworzącą element skojarzony będący wirtualną krawędzią skrawającą. Najechano końcówką pomiarową na początek krawędzi (wierzchołek zęba). W celu zwiększenia

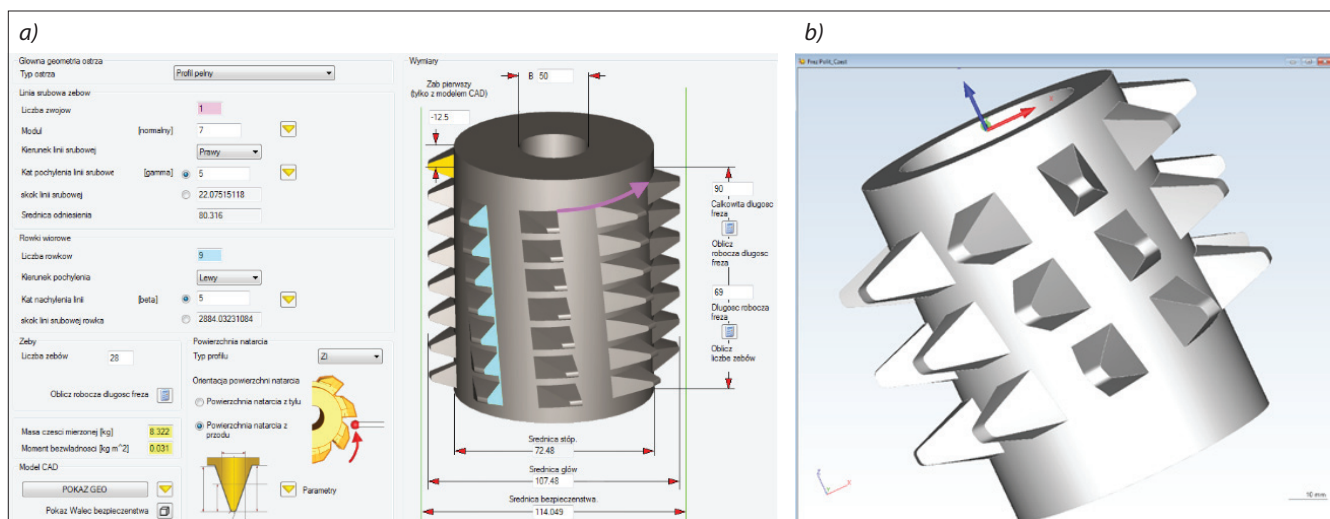


Fig. 8. Zeiss GearPro HOB – entering cutter parameters (a), generated model of hob cutter (b)

Rys. 8. Zeiss GearPro HOB – wprowadzanie parametrów frezu (a), wygenerowany model frezu ślimakowego (b)

dokładności pozycjonowania posłużono się lupą o powiększeniu 5×. W ten sam sposób zdefiniowano punkt leżący na końcu krawędzi (wręb). Oba punkty połączono prostą, tworząc odcinek pomiarowy. Pomiar potwierdził poprawność metody pomiarowej. Otrzymane wyniki były prawidłowe.

Trzeci etap badań został wykonany w Centrum Pomiarowym firmy Zeiss z wykorzystaniem WMP Zeiss WMM 850, pasywnej głowicy skanującej Zeiss VAST XXT i stołu obrotowego Zeiss RT 05-300 oraz specjalizowanego oprogramowania Zeiss GearPro HOB przeznaczanego do pomiaru frezów ślimakowych. Program ten jest nakładką (modułem) na aplikację Zeiss Gear Pro, stosowaną pierwotnie do pomiaru kół zębatach [15]. Teoretycznie możliwe jest wykorzystanie głowicy stykowej, jednak czas pomiaru i jego komplikacja (wektory najazdu) wzrastają wielokrotnie.

Pomiar rozpoczęto od budowy matematycznego modelu frezu ślimakowego pełniącego rolę elementu skojarzonego. Niezbędne było wprowadzenie, zgodnie z normami, bardzo dużej liczby parametrów narzędzia [2, 9, 15] (rys. 8a). Wymagane wielkości są identyfikowane przez użytkownika (liczba zębów, liczba rowków, tolerancje, obszary skanowania itp.), odczytywane z tabliczki znamionowej lub mierzone wstępnie przy pomocy mikrometru. Po wpisaniu parametrów frezu program obliczył pozostałe wielkości geometryczne, wykorzystując wbudowane zależności matematyczne [15]. Niestety budowa modelu (rys. 8b), wraz ze wzorami stanowią tajemnicę handlową firmy Zeiss.

Pomiar powierzchni natarcia był identyczny jak w przypadku pozostałych metod. Po zetknięciu końcówki pomiarowej z powierzchnią natarcia przesuwała się ona w kierunku dna rowka wiórowego. Ponadto następował obrót stołu, umożliwiając kompensację kąta wzniosu linii śrubowej. Pomiar był powtarzany dla kolejnych zębów, a jego wynik został zaprezentowany w postaci wykresu (rys. 9). Jego analiza wykazała brzuszkowaty (wypukły) kształt powierzchni natarcia, potwierdzając tezę o korygowaniu jej zarysu ściernicą prostokreślną w przekroju osiowym. Kształt powierzchni i jej położenie były praktycznie identyczne dla wszystkich zębów objętych pomiarem.

Zamocowanie frezu na stole obrotowym umożliwiło wykonanie zautomatyzowanego pomiaru. Pomiar

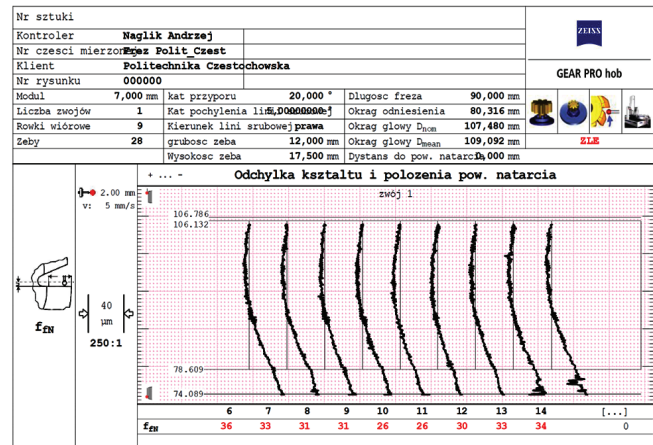


Fig. 9. The result of measuring the shape and position of the rake surface

Rys. 9. Wynik pomiaru kształtu i położenia powierzchni natarcia

grubości zęba na walcu odniesienia (rys. 10) polegał na rejestracji momentu spadku kulki pomiarowej stykającej się z powierzchnią natarcia w chwili dojazdu do krawędzi skrawającej. Z wykorzystaniem matematycznej kompensacji promienia kulki oraz modelu 3D frezu program był w stanie obliczyć szerokość zęba na średnicy podziałowej. Co ciekawe metoda szukania krawędzi skrawającej była identyczna jak w przypadku klasycznych analogowych metod pomiaru frezów ślimakowych na dedykowanych maszynach [6].

Wykorzystując nominalne wymiary frezu sprawdzono, że pomiar został wykonany prawidłowo tylko dla pierwszego zęba zarysu frezu ślimakowego. Pomiar kolejnych zębów wykazywał coraz większe odchyłki, aż do momentu utraty styku z mierzonym detalem. Ich przyczyną był błędny model frezu ślimakowego. Ostrzenie frezu spowodowało dwie fundamentalne zmiany. Pierwszą z nich była brzuszkowatość powierzchni natarcia (błąd akceptowalny, pod warunkiem poprawnego ukształtowania powierzchni natarcia i przyłożenia, przyczyniający się do poprawy dokładności narzędzia [6]), a drugą – zmianą kąta wzniosu linii śrubowej zębataki. Pomiar kąta wykazał, że zamiast nominalnej wartości 4°29' wynosi on 5°30'. Najprawdopodobniej szlifierz nieprawidłowo zidentyfikował frez, użył nieprawidłowego wzorca lub błędnie prowadził palec wodzący w rowkach wzorca. W efekcie, poruszając się po zadanej, zgodnej z nominalnymi

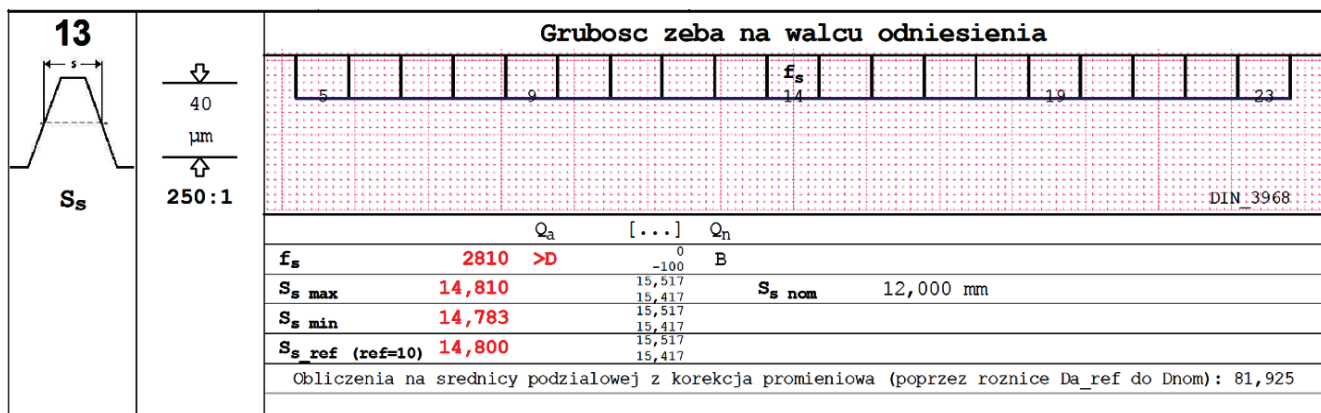


Fig. 10. The result of the tooth thickness measurement on the reference cylinder

Rys. 10. Wynik pomiaru grubości zęba na walcu odniesienia

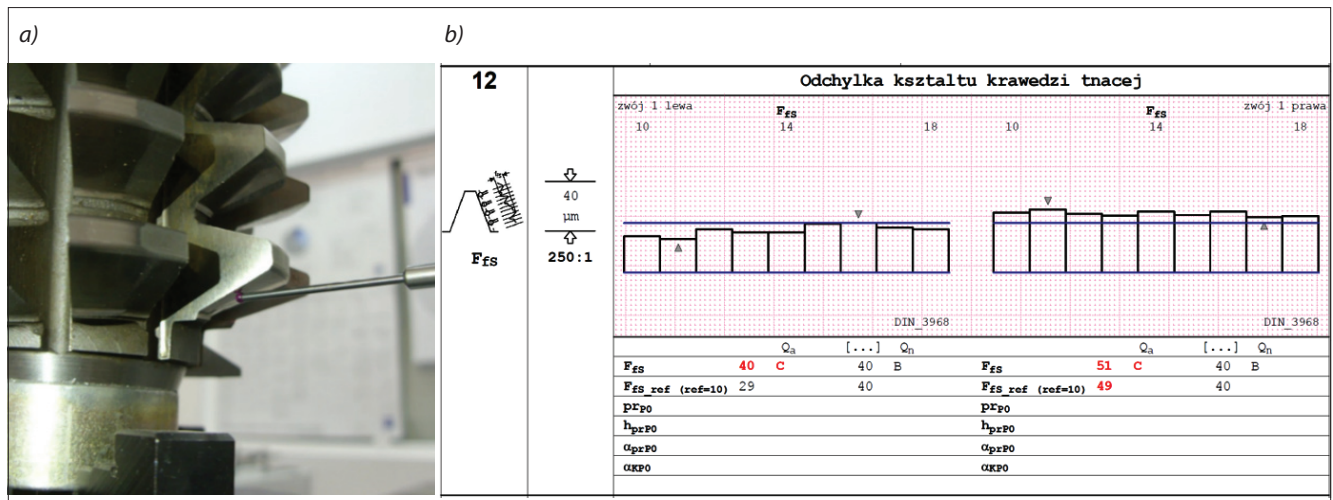


Fig. 11. Measurement (a); the result of measuring the deviation of the shape of the cutting edge (b)  
Rys. 11. Pomiar (a); wynik pomiaru odchyłki kształtu krawędzi tnącej (b)

wartościami trajektorii ruchu, końcówka pomiarowa traciła kontakt z powierzchnią narzędzia.

W celu wyeliminowania tego problemu posłużono się metodą prób i błędów. Złożenie obu błędów spowodowało, że ustawienie w parametrach programu rzeczywistej (zmierzonej) wartości kąta wzniosu linii śrubowej nadal uniemożliwiało przeprowadzenie pomiaru. Dopiero wprowadzenie kąta 5° pozwoliło na względnie prawidłowy pomiar zębatki na całej jej długości.

W celu wyeliminowania ewentualnych błędów programu przeprowadzono pomiary weryfikacyjne frezów fabrycznie nowych (FWP NFMc 4,5/20 B oraz frezu listkowego SHNYDER 2/20 S-08Y6 AAA) z nominalnymi wymiarami, bez korekcji. Wyniki pomiarów potwierdziły poprawność opracowanego przez firmę Zeiss modelu matematycznego. Pomiar przebiegał w całkowicie zautomatyzowany sposób, praktycznie bez ingerencji metrologa.

## Podsumowanie i wnioski

Zastąpienie klasycznych mikroskopów warsztatowych przez konstrukcje wyposażone w kamerę oraz wyspecjalizowane oprogramowanie otworzyło nowe możliwości przed metrologami. Dostępne stało się przeprowadzenie analiz geometrycznych oraz pomiarów detali o skomplikowanym zarysie. Nowoczesne urządzenia są połączeniem mikroskopów z projektorami. Możliwość wczytania modeli wygenerowanych w aplikacjach CAD pozwala na weryfikowanie kształtu i wymiarów detali. Analiza przeprowadzonych badań pozwoliła na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków:

- Możliwy jest pomiar frezów ślimakowych. Program pomiarowy pozwala na weryfikację wielu parametrów narzędzia, analizę kształtu zarysu frezu oraz stanu krawędzi skrawających w sposób nieosiągalny dla mikroskopów klasycznych. Umożliwia przeprowadzenie inżynierii odwrotnej oraz identyfikacji narzędzia.
- Dokładność i powtarzalność pomiarowa były bardzo wysokie. Były jednak zależne od ciągłego ręcznego manipulowania ostrością i oświetleniem.

- Użyty w pomiarach mikroskop był wyposażony w stałogniskowy obiektyw o bardzo dużym 84-krotnym powiększeniu. Nastęczało to wiele problemów. Na ekranie były widoczne wszelkie, nawet najmniejsze zanieczyszczenia powierzchni (włoski, drobiny kurzu itp.). Program komputerowy analizujący obraz przyjmował te obiekty jako element geometrii lub przerywał tworzenie np. linii, biorąc zanieczyszczenia jako kolejny obiekt. Kamera rejestrowała bardzo niewielki obszar detalu, zmuszając operatora do ręcznego przesuwania stołu i kolejnych żmudnych definicji elementów geometrycznych.

- Mikroskop optyczny do pomiaru frezów ślimakowych powinien być wyposażony w obiektyw o zmiennej ogniskowej (powiększeniu optycznym) i autofokus (automatyczne ustawianie ostrości) oraz numeryczne sterowanie przesuwem stołu. W efekcie pomiar byłby dużo wygodniejszy i szybszy z zachowaniem tej samej dokładności i powtarzalności.

- Ogromną zaletą jest możliwość automatyzacji pomiarów. Doświadczony metrolog tworzy wzorcowy plan pomiarowy uwzględniający pomiar elementów narzędzia, weryfikuje go, a następnie nagrywa specjalny film. Kolejne pomiary mogą być prowadzone przez innego pracownika, który jest „prowadzony za rękę”. Jego zadaniem jest wykonywanie kolejnych poleceń wyświetlanych na ekranie.

- Mikroskopy optyczne są bardzo dobrą alternatywą dla maszyn współrzędnościowych w zakładach sporadycznie wykonujących ostrzenie frezów ślimakowych.

WMP są najbardziej uniwersalnymi urządzeniami pomiarowymi. Analizując proces pomiarowy, stwierdzono, że jest możliwy pomiar frezu ślimakowego na klasycznej maszynie bez stołu obrotowego. Jest jednak bardzo skomplikowany i obciążony ryzykiem błędów wynikających ze skomplikowanej geometrii narzędzia. Nawet najprostszy pomiar powierzchni natarcia nastęcza wielu problemów (wznios linii śrubowej rowków). Analiza zarysu krawędzi skrawającej jest obciążona bardzo dużą niepewnością pomiarową. Ułatwieniem byłby przestrzenny model frezu, jednak w przypadku zakładów jest on bardzo trudny do

opracowania. Dlatego tego typu pomiar powinien być przeprowadzany w ostateczności, przy braku innych możliwości pomiarowych i tylko dla frezów w klasach dokładności do A.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe wyposażone w indeksowany stół obrotowy i specjalizowane oprogramowanie zastąpiły dedykowane pomiarom frezów analogowe urządzenia pomiarowe. Program Zeiss GearPro HOB umożliwia wygenerowanie wielu raportów kontrolnych pozwalających na weryfikację wymiarów, ponad 30 parametrów oraz dokładności frezu ślimakowego.

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że najważniejszym elementem prawidłowego pomiaru frezów ślimakowych jest matematyczny model narzędzia. Od jego dokładności zależy poprawne tworzenie trajektorii ruchu końcówek pomiarowych oraz pomiar odchyłek od elementu skojarzonego. Budowa modelu jest bardzo trudna i możliwa tylko przy wsparciu producenta frezów. Metody kształtowania powierzchni narzędzia, zastosowane ściernice, ich zarys i kąt ustawienia decydują o zarysie narzędzia. Nawet proces ostrzenia, co udowodniono w trakcie badań, zaburza wygenerowany model matematyczny. Wpływa stąd bardzo ważny postulat, aby producent frezów lub zakład ostrzący narzędzia dodawał informację o zarysie ściernic użytych do ostatecznego ukształtowania powierzchni natarcia.

## LITERATURA

- [1] Cichosz P. „Narzędzia skrawające”. Warszawa: Wydawnictwo WNT (2006, 2013).
- [2] DIN 3968: Tolerances for Single-start Hobs for Involute Spur Gears.
- [3] „Instrukcja oprogramowania Metlogic M2 v3”. Niemcy: Garant (2014–2022).
- [4] “Operating instructions MM1-200/MM1-300/MM1-200 CNC/MM1-300 CNC”. Niemcy: Garant (2022).
- [5] Katalog maszyn pomiarowych Zeiss. Niemcy: Zeiss (2022).
- [6] Piotrowski A. „Podwyższenie dokładności frezów ślimakowych modułowych”. Częstochowa: Politechnika Częstochowska (2002).
- [7] Piotrowski A. „Wpływ ostrzenia na dokładność frezów ślimakowych modułowych”. *Mechanik*. 7 (2015): 681–694.
- [8] PN-EN ISO 10360-7:2011: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 7: CMM wyposażone w zespoły głowicy pomiarowej rejestrującej obraz.
- [9] PN-ISO 4468:1999: Frezy ślimakowe jednokrotne do kół zębatach – Wymagania dokładności.
- [10] PN-ISO 54:2001: Przekładnie zębate walcowe ogólnego przeznaczenia oraz dla przemysłu ciężkiego – Moduły.
- [11] PN-M-57552:1982: Narzędzia do skrawania metali – Frezy ślimakowe do kół zębatach.
- [12] PWWU24: <https://www.pwwu24.de/pl/serwis-ostrenia/frezow/83>, 2023.
- [13] Sandvik Coromat: CoroMill 176, Szwecja 2023.
- [14] „ZEISS: Calypso. Instrukcja programu”. Niemcy: Zeiss (2022).
- [15] „ZEISS: Gear Pro Hob. Instrukcja programu”. Niemcy: Zeiss (2022). ■