

WPLYW OSTRZENIA NA DOKŁADNOŚĆ FREZÓW ŚLIMAKOWYCH MODUŁOWYCH

Streszczenie: Opisano problematykę ostrzenia frezów ślimakowych w warunkach warsztatowych. Wykonane badania, opracowany model matematyczny frezu ślimakowego oraz zaproponowana zmiana technologii kształtowania powierzchni natarcia pozwalają na podwyższenie dokładności frezów ślimakowych.

THE IMPACT OF SHARPENING ON ACCURACY OF HOBS

Abstract: The problems of workshop sharpening of hobs was described. The research, the developed hob mathematical model, the special computer software and the proposed amendment of forming technology of rake surface all allow to improve hobs accuracy.

Słowa kluczowe: frezy ślimakowe modułowe, ostrzenie, technologia kształtowania powierzchni natarcia

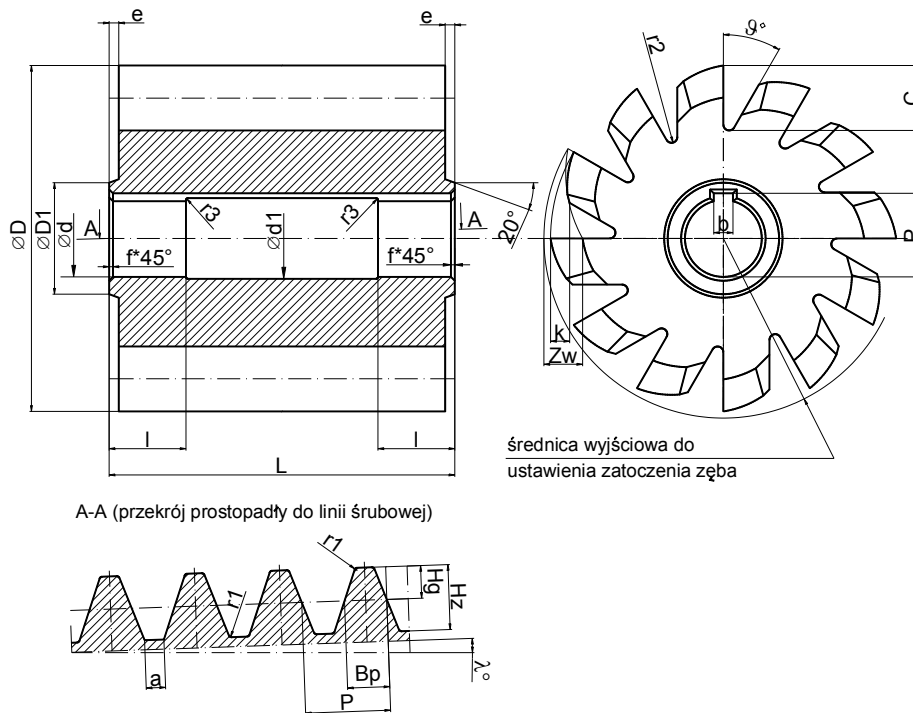
Keywords: Hobs, sharpening, technology of rake surface

1. WPROWADZENIE

Frezy ślimakowe należą do najbardziej złożonych geometrycznie narzędzi frezarskich [5]. Stosowane są do obróbki metodą obwiedniową kół zębatych, ślimacznic, wielowypustów czy też innych przedmiotów o zarysie foremnym, to znaczy takim, w którym pewien zarys cząstkowy powtarza się wielokrotnie na obwodzie przedmiotu [5,15,16]. Frezy ślimakowe modułowe monolityczne służą do wykonywania kół zębatych walcowych ewolwentowych, o zazębieniu cykloidalnym, stożkowych palloidalnych, ślimacznic, ślimaków, wielowypustów itp. [5, 7, 15, 16]. Koła zębate wykonane tymi narzędziami charakteryzują się wysoką dokładnością (klasy 5-6 przy zastosowaniu frezów ślimakowych klasy AAA lub AAAA) [5]. Frezy ślimakowe są stosowane we wszystkich typach obróbki: zgrubnej, kształtującej i wykończeniowej. Przy czym w zakresie dwóch pierwszych typów obróbki coraz częściej wykorzystuje się nowoczesne frezy ślimakowe składane z wymiennymi zębatkami i z wymiennymi płytkami z węglików spiekanych, które praktycznie wyeliminowały frezy monolityczne klasy C i D [15, 16]. Dla potrzeb przemysłu samochodowego produkowane są frezy ślimakowe modułowe monolityczne w zakresie modułów 1,5÷6 [mm] o przedłużonej długości i dużej liczbie zębów na obwodzie (frezy listkowe) [5]. Oddzielną grupę frezów, są bardzo drogie, produkowane jako narzędzia specjalne, stanowią frezy o modułach powyżej 20 [mm], które są wytwarzane dla potrzeb przemysłu hutniczego, budowlanego i zbrojeniowego [5, 15, 16].

2. KONSTRUKCJA FREZÓW ŚLIMAKOWYCH MODUŁOWYCH

Proces projektowania frezów ślimakowych pozwala na określenie odpowiednich wartości parametrów geometrycznych i konstrukcyjnych frezu. Jednak dopiero jego analiza geometryczna z uwzględnieniem jego parametrów technologicznych pozwala na dobór wartości tych parametrów ze względu na założoną dokładność tych narzędzi.



Rys. 1. Frez ślimakowy modułowy – konstrukcja [11, 19]

Teoretycznie poprawnie ukształtowany frez ślimakowy modułowy powinien mieć krawędzie skrawające położone na powierzchni śrubowej ewolwentowej [6, 11, 12, 19]. Jednakże takie ukształtowanie frezu powoduje bardzo duże trudności technologiczne. Miejscem geometrycznym krawędzi skrawających ostrzy jest powierzchnia działania frezu. Powierzchnia śrubowa ewolwentowa jest powierzchnią odniesienia, z której zarysem można porównywać zarys powierzchni działania frezu ślimakowego. Dla powierzchni śrubowej ewolwentowej charakterystyczny jest przekrój styczny do walca zasadniczego, który jest prostoliniowy. Elementem decydującym o dokładności frezów ślimakowych jest natomiast krawędź skrawająca, która jest krawędzią przecięcia się powierzchni przyłożenia i powierzchni natarcia ostrza. Oznacza to, że punkty leżące na krawędzi skrawającej należą jednocześnie do obu tych powierzchni i jednocześnie spełniają równania tych powierzchni, co można opisać układem równań [6, 11]:

$$f(u_p, v_p, \varphi_p) = 0 \quad (1)$$

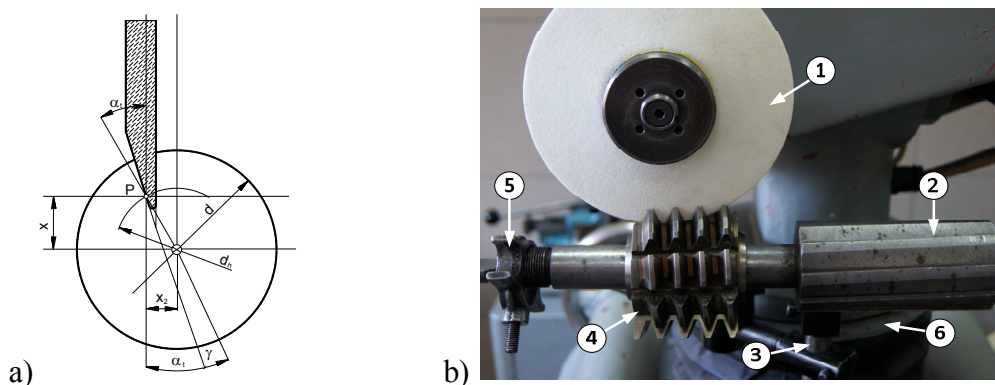
$$f(u_n, v_n, \varphi_n) = 0 \quad (2)$$

$$\bar{r}_k = \bar{r}_p(u_p, v_p, \varphi_p) \quad \vee \quad \bar{r}_k = \bar{r}_n(u_n, v_n, \varphi_n) \quad (3)$$

W przypadku ogólnym krawędź skrawająca nie jest krzywą płaską i opisana jest układem pięciu równań nieliniowych wiążącym sześć parametrów ze wzoru (1-3). Dwa pierwsze równania to warunki obwiedni wynikające z opisu kształtowania powierzchni natarcia i powierzchni przyłożenia metodą obwiedniową szlifowaniem, a kolejne (do wyboru) to warunki przecięcia się powierzchni natarcia i powierzchni przyłożenia wzdłuż krawędzi skrawającej. Powyższe założenia były podstawą opracowanego modelu matematycznego frezu ślimakowego umożliwiającego ocenę wpływu poszczególnych parametrów frezu na jego dokładność. Opracowano uniwersalny program komputerowy umożliwiający projektowanie, analizę geometryczną i badanie zmian dokładności frezów ślimakowych w trakcie eksploatacji (zmiana kąta natarcia i kąt zużycia) oraz wpływu zarysu powierzchni natarcia (płaskiej dla małych modułów oraz śrubowej prostokreślnej i śrubowej stożkopochodnej) na zarys krawędzi skrawającej [6, 11].

3. EKSPLOATACJA FREZÓW ŚLIMAKOWYCH MODUŁOWYCH

W trakcie pracy na frezarce obwiedniowej frez podlega zużyciu. Na proces zużycia ma wpływ wiele czynników, z których najważniejsze to: parametry skrawania, parametry geometryczne narzędzia (średnica, długość, moduł itp.) oraz stosowanie shiftingu (przesuwu osiowego frezu w trakcie obróbki). Shifting szczególnie pozytywnie wpływa na okres trwałości narzędzia i jest powszechny w przypadku frezów listkowych, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Największemu zużyciu podlegają wierzchołki zębów zębatego frezu ślimakowego. „Atakują” one materiał jako pierwsze, a prędkość skrawania, ze względu na umiejscowienie w pobliżu średnicy zewnętrznej narzędzia, jest największa. Ponadto wcinają się głęboko w materiał, co utrudnia smarowanie oraz prawidłowe chłodzenie w trakcie procesu skrawania. Dotyczy to praktycznie wszystkich rozmiarów frezów, ale jest szczególnie widoczne w przypadku narzędzi o dużych modułach (duża wysokość zębów). Krawędź skrawająca poddawana jest działaniu dużych sił skrawania i ulega uszkodzeniu. Powstają wykruszenia i starcia, szczególnie widoczne w górnej części zębatego [4, 9, 19].



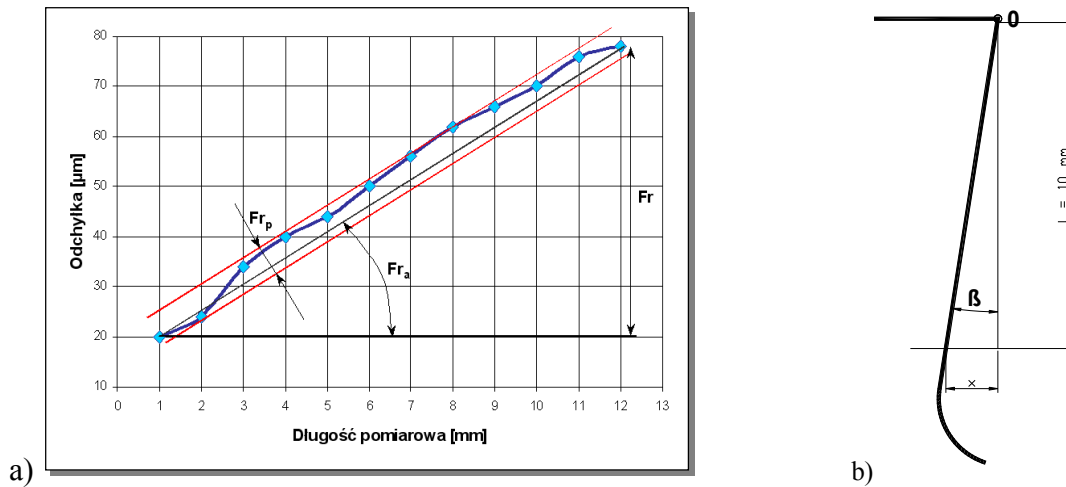
Rys. 2. a) Uogólniony przypadek ustawienia ściernicy w trakcie szlifowania powierzchni natarcia frezu ślimakowego [6, 11], b) Rzeczywiste ustawienie ściernicy podczas ostrzenia warsztatowego powierzchni natarcia frezu: 1. Ściernica talerzowa, 2. Wzornik, 3. Palec wodzący, 4. Frez ślimakowy, 5. Zabierak, 6. Podziałka do ustawiania kąta skreślenia ściernicy

Frezy ślimakowe modułowe monolityczne wykonywane są jako narzędzia zataczane (rys. 1 i 2b) [5, 19]. W przypadku frezów zataczanych w trakcie eksploatacji ostrzona (szlifowana) jest tylko powierzchnia natarcia [5, 8, 9, 19]. Powierzchnie przyłożenia ostrzy (ukształtowane fabrycznie) pozostają niezmienione do końca okresu eksploatacji narzędzia. Ostrzenie frezu ślimakowego może być realizowane na szlifierkach CNC z możliwością dowolnego kształtowania zarysu osiowego ściernicy tarczowej do szlifowania powierzchni natarcia ostrzy. Niemniej wciąż w jeszcze wielu przypadkach proces ostrzenia frezu ślimakowego polega na szlifowaniu powierzchni natarcia ściernicą talerzową [1] z zastosowaniem specjalnego wzornika, po którym porusza się palec wodzący dla realizacji względnego ruchu śrubowego ściernicy i frezu w procesie ostrzenia (rys. 2b). Ponieważ, zgodnie z normami [12, 14] powierzchnia natarcia frezu ślimakowego powinna być powierzchnią prostokreślną, ściernica talerzowa tarczowa musi być ostrzona po krzywej [6, 11]. Na obrzeżach kontrolnych frezu ślimakowego cechowane są jego podstawowe parametry geometryczne (moduł, klasa dokładności, kąt wzniosu linii śrubowej zwojów frezu), które są niewystarczające do wyznaczenia zarysu ściernicy do ostrzenia powierzchni natarcia frezu. Dlatego też użytkownik stosuje często dostępne w handlu uniwersalne (ostrzone po krzywej) ściernice do ostrzenia frezu [1, 8, 9]. Na ogół prowadzi to do nieprawidłowego kształtowania powierzchni natarcia. W związku z tym proponowana jest zmiana technologii ostrzenia [6, 11]. Zamiast używać ściernicy uniwersalnej ostrzonej po nieokreślonej krzywej, należy zastosować ściernicę talerzową o zarysie prostoliniowym w jej przekroju osiowym. Postulowana zmiana spowoduje zmianę zarysu powierzchni natarcia. Kształtując powierzchnię natarcia ściernicą o zarysie prostoliniowym, w jej przekroju osiowym otrzymamy powierzchnię śrubową stożkopochodną. Spowoduje to jednak podniesienie dokładności procesu ostrzenia oraz uproszczy jego technologię [6, 11].

4. BADANIE WPLYWU STOŻKOPOCHODNEJ POWIERZCHNI NATARCIA NA DOKŁADNOŚĆ KÓŁ ZĘBATYCH

W celu weryfikacji przedstawionego powyżej postulatu zmiany technologii ostrzenia przeprowadzono badania wpływu stożkopochodnej powierzchni natarcia na dokładność frezu ślimakowego i jej wpływ na wykonywane tak ukształtowanym narzędziem koła zębate na frezarce obwodniowej. Do badań wykorzystano trzy identyczne frezy ślimakowe modułowe klasy B firmy VIS S.A. o oznaczeniu: NFMc – 4,5/20°/B, $\lambda = 3^\circ 22'$, H = 4096 HSS i SW 180 [19]. Fabrycznie nowe narzędzia zostały pomierzone na maszynie pomiarowej do pomiaru frezów ślimakowych firmy Zeiss. Kontrolni poddano powierzchnię natarcia. Następnie (nowym frezem ślimakowym NFMc – 4,5/20°/B) wykonano koło zębate (nr 1) o zębach prostych w klasie 8, będące odniesieniem dla pozostałych kół zębatych. Zostało ono pomierzone na ewolwentomierzu Zeiss VG-450 oraz współrzędnościowej maszynie pomiarowej Prismo Navigator z oprogramowaniem Gear Pro firmy Zeiss [7, 20, 21]. Frezy poddawano kolejnym szlifowaniom ściernicą talerzową o zarysie prostoliniowym w jej przekroju osiowym w warunkach warsztatowych (warsztaty mechaniczne i małe zakłady) – uniwersalna szlifierka narzędziowa, ściernica tarczowa i wzornik z palcem wodzącym (rys. 2b). Ostrzono tylko powierzchnie natarcia frezów. Tak ukształtowanymi frezami wykonywano kolejne koła zębate. Nacięte koła były mierzone identycznie jak koło zębate nr 1 (evolwentomierz VG – 450 i WMP Zeiss). Wyniki pomiarów były porównywane, co umożliwiło określenie wpływu ostrzenia ściernicą, o zarysie prostoliniowym w jej przekroju osiowym, frezów ślimakowych modułowych w warunkach warsztatowych na dokładność kół zębatych. Pomiary służyły także do weryfikacji poprawności algorytmów obliczeń

i matematycznego modelu frezu ślimakowego w opracowanym w ITM programie do analizy zarysów frezów ślimakowych.



Rys. 3. a) Podział błędu prostoliniowości i promieniowego położenia powierzchni natarcia Fr na błąd kąta natarcia Fr_a i błąd prostoliniowości zarysu Fr_p powierzchni natarcia frezu [10],
b) Idea pomiaru kąta natarcia [6, 10]

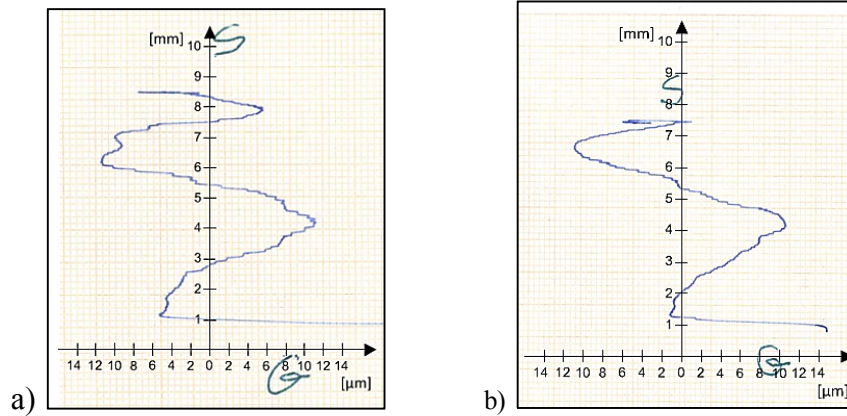
Pomiar prostoliniowości powierzchni natarcia, zarysu powierzchni działania frezu i kąta zużycia (ostrzenia) wykonano na klasycznej, analogowej maszynie pomiarowej firmy Zeiss do pomiarów frezów ślimakowych modułowych. W celu ograniczenia liczby pomiarów przy zachowaniu ich jednoznaczności pomiar prostoliniowości powierzchni natarcia i pomiary bocznych powierzchni krawędzi skrawającej (prawej i lewej) wykonano w ośmiu punktach (dwa ostrza rozstawione co 90°). Badanie zarysu powierzchni natarcia frezu ślimakowego modułowego polegało na ustawieniu końcówki pomiarowej przyrządu pomiarowego w odległości 0,5 mm od wierzchołka ostrza, wyzerowaniu przyrządu wskazującego i odczytywaniu kolejnych odchyłek po przesunięciu za każdym razem końcówki pomiarowej o 0,5 mm na długości 10 mm promieniowo w kierunku osi frezu. Umożliwiło to (rys. 3) analizę kształtu (zarysu) powierzchni natarcia oraz, przy założeniu prostoliniowości i prostopadłości osi przesuwu końcówki pomiarowej do osi frezu, błędu kąta natarcia ostrza frezu ślimakowego. Ogólny błąd prostoliniowości i promieniowego położenia powierzchni natarcia Fr podzielono na błąd kąta natarcia Fr_a i błąd prostoliniowości zarysu Fr_p (rys. 3a). W efekcie badano wpływ obu tych błędów na dokładność frezu ślimakowego.

Pomiary bicia na powierzchni kontrolnej (przeprowadzone po każdym ostrzeniu frezu), na średnicy zewnętrznej i na trzpieniu pomiarowym zostały wykonane za pomocą analogowego mikrometrycznego czujnika zegarowego (działka elementarna $1 \mu\text{m}$) na frezie zamocowanym w kłach przyrządu pomiarowego.

Dodatkowo, kąt natarcia frezu mierzono czujnikiem (rys. 3b). Zmierzone długość odcinka x na odcinku l i z tangensa obliczano wartość kąta β (rys. 3b).

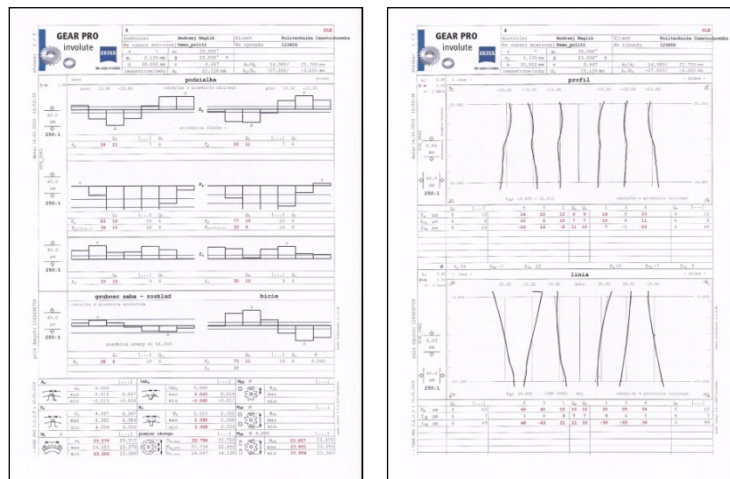
Pomiary zarysu zębów kół zębatych, wykonanych przy zastosowaniu szlifowanych po powierzchni natarcia frezów ślimakowych, przeprowadzono z użyciem dwóch przyrządów pomiarowych. Pomiar wstępny dla czterech zębów rozstawionych co 90° dla każdego z kół zębatych został wykonany na ewolwentomierzu VG-450 (rys. 4). Każdy z wytypowanych do pomiaru zębów miał mierzony bok lewy i prawy, a każdy pomiar zaczynał się od stopy zęba

i kończył na głowie zęba. Wykresy błędów ewolwenty służyły do porównawczej analizy błędów. Ze względu na stałe powiększenie wynoszące 1000 x i zakres pomiarowy $30 \mu\text{m}$ w przypadku dużych odchyłek od prostej występowało zjawisko wychodzenia czasem wykresu poza zakres pomiarowy przyrządu (w 10 klasie kół zębatych odchyłka wynosi $56 \mu\text{m}$) [14].



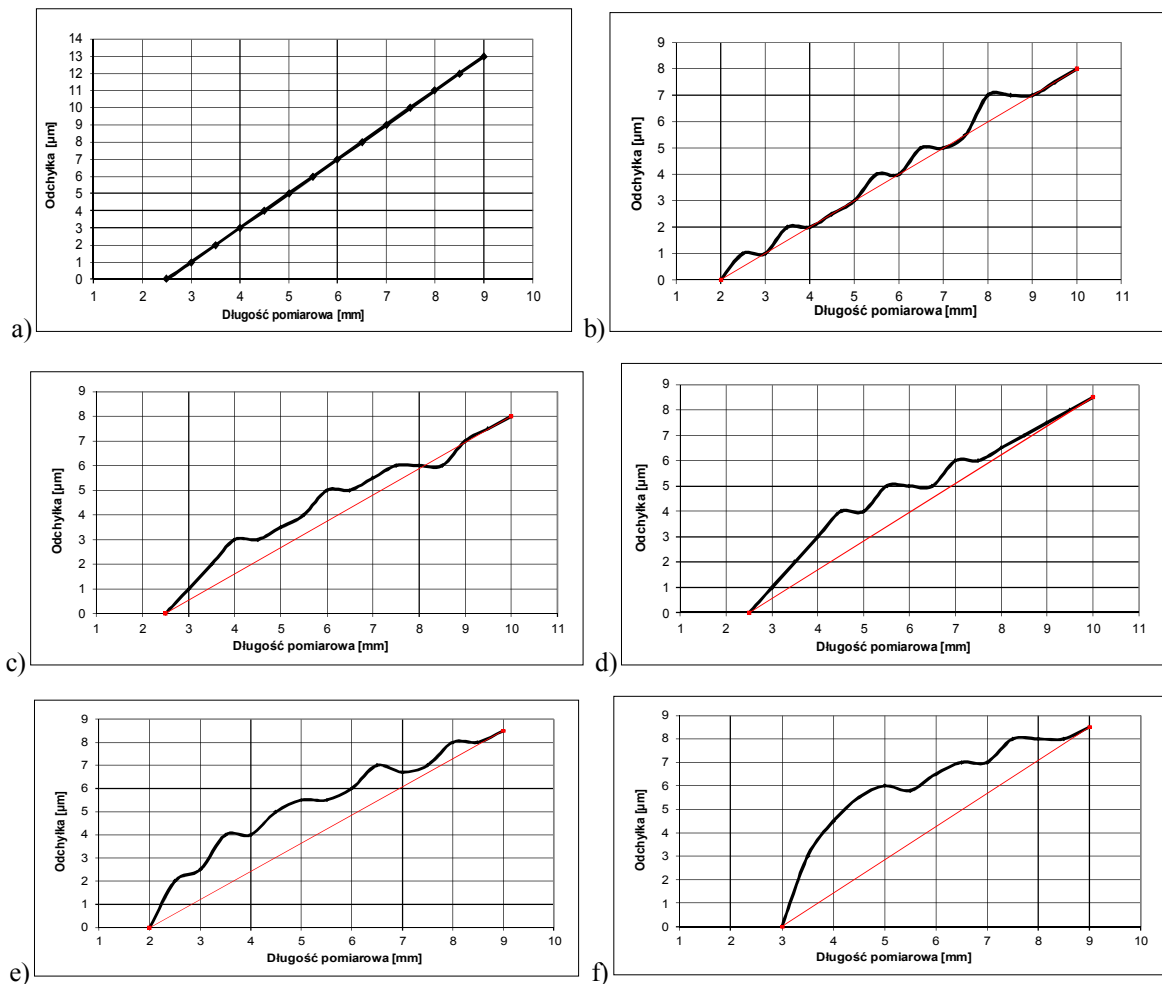
Rys. 4. Protokół pomiarowy pomiaru ewolwenty koła zębatego nr 1 (frez fabrycznie nowy) na analogowym ewolwentomierzu Zeiss VG-450 (zakres pomiarowy $30 \mu\text{m}$, powiększenie 1000 x). a) ząb nr 1 strona lewa, b) ząb nr 1 strona prawa (S – stopa zęba, G – głowa zęba)

Wykonano równoległe pomiary weryfikujące parametrów koła zębatego: ewolwenty, grubości zęba, podziałki, bicia i kąta linii zęba na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Prismo Navigator ($\pm 0,2 \mu\text{m} \pm L/500$) z aktywną głowicą pomiarową skanującą VAST Gold z kulistą końcówką pomiarową w płaszczyźnie czołowej koła zębatego i stołem obrotowym o osi prostopadłej do płaszczyzny stołu z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania Calypso z modułem Gear Pro (rys. 5) [20, 21].



Rys. 5. Protokół pomiarowy koła zębatego nr 1 obrobionego frezem fabrycznie nowym na współrzędnościowej maszynie pomiarowej z użyciem oprogramowania Calypso i modułu Gear Pro firmy Zeiss

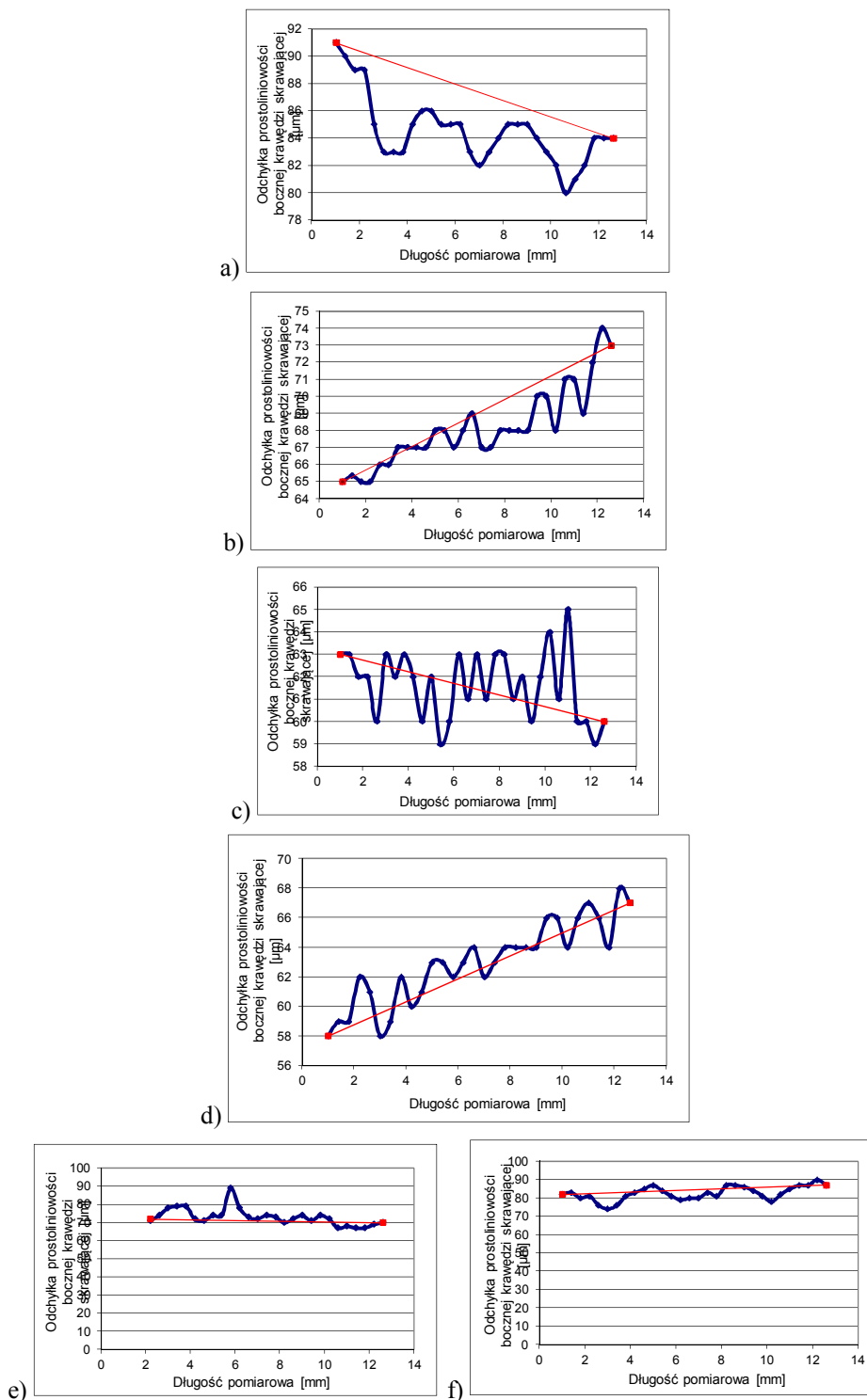
W pierwszej serii pomiarów sprawdzano frezy modułowe ślimakowe klasy B ukształtowane przez producenta (VIS S.A. w Warszawie) [19]. Były to frezy fabrycznie nowe, czyli powierzchnia natarcia i powierzchnia przyłożenia były szlifowane na specjalnych obrabiarkach narzędziowych, ściernice były ostrzone po odpowiednich krzywych, a proces obróbki był dzielony na etapy: szlifowanie zgrubne, półwykończeniowe, pomiar i szlifowanie wykończeniowe. Stosowano specjalnie dobrane tarcze ściernicze o małej ziarnistości i dużej średnicy. Frezy nie miały praktycznie błędów prostoliniowości powierzchni natarcia (dla klasy B) [12] (rys. 6a). Analiza wykresów prostoliniowości (rys. 6 b-f) powierzchni natarcia frezu ślimakowego kształtowanego ściernicą talerzową o zarysie prostoliniowym w jej przekroju osiowym jednoznacznie wskazuje, że powierzchnia natarcia staje się powierzchnią stożkopochodną. Każde kolejne ostrzenie zwiększa odchyłkę od linii prostej, wykazując charakterystyczną wypukłość. Ponadto widoczne są błędy powstałe w trakcie procesu ostrzenia (6b) wywołane ręcznym prowadzeniem palca wodzącego po wzorniku przy ostrzeniu frezu (nierównomierna i różna siła docisku).



Rys. 6. Wykresy prostoliniowości zarysu powierzchni natarcia frezu ślimakowego w trakcie kolejnych przestrzeni: a) frez wzorcowy (fabrycznie nowy), b) 2. ostrzenie, c) 4. ostrzenie, d) 6. ostrzenie, e) 8. ostrzenie f) 10. ostrzenie

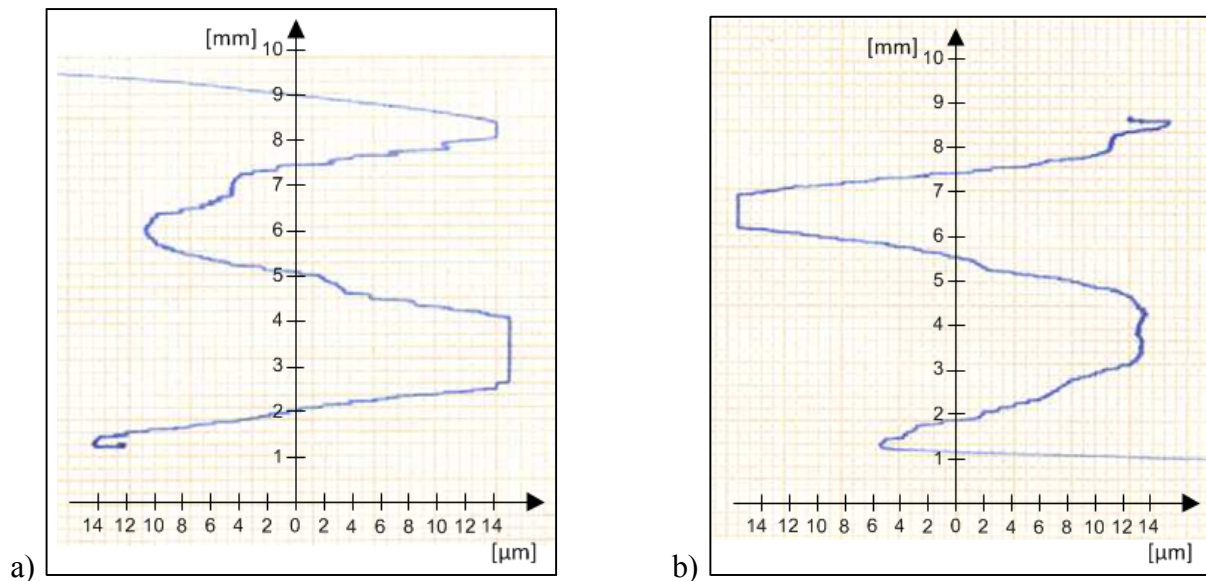
Pomiar zarysu zębów koła zębatego (ewolwenty) wykonany na ewolwentomierzu i współrzędnościowej maszynie pomiarowej wykazał maksymalne, zgodnie z normą [13],

odchyłki od zarysu teoretycznego (ponad 0,03 mm) (rys. 3a, 3b, 4). Związane to jest między innymi z faktem, że frezem klasy B wykonamy koło zębate klasy 8-9, a w skrajnych przypadkach tylko 10 [13]. Zależy to od warunków obróbki koła zębatego: posiadanego parku maszynowego, liczby przejść obróbkowych (1 – 7,9 mm; 2 – 1,8 mm; 3 – 0,2 mm), prędkości skrawania i posuwu.



Rys. 7. Wykresy zarysu osiowego powierzchni działania frezu ślimakowego
 a) frez wzorcowy (fabrycznie nowy), strona lewa, b) frez wzorcowy (fabrycznie nowy), strona
 prawa, c) 2. ostrzenie, strona lewa, d) 2. ostrzenie, strona prawa, e) 8. ostrzenie, strona lewa,
 f) 8. ostrzenie, strona prawa

Prostoliniowość zarysu osiowego powierzchni działania frezu nr 1 wykazywała znaczne odchyłki zarówno dla strony prawej, jak i lewej (rys. 7a, 7b). Na wykresie odchyłki prostoliniowości bocznej krawędzi skrawającej – strona lewa dla frezu po drugim ostrzeniu (rys. 7c) widoczne są znaczne skoki wartości odchyłek spowodowane dużą ziarnistością tarczy ścierniczej (ściernica o parametrach ziarnistości 46, co daje wielkość ziarna $600\ \mu\text{m}$ i twardość K) oraz błędem prowadzenia ściernicy (zbyt duży docisk) przez szlifierza, co spowodowało uszkodzenie – szczyrbatość krawędzi skrawającej ostrza po szlifowaniu. Miało to natychmiastowe odzwierciedlenie w dokładności frezowanego takim narzędziem koła zębatego. Szczyrbata krawędź skrawająca negatywnie wpływała na gładkość zarysu ewolwenty koła zębatego. Po analizie wykresów błędów szlifierz zmodyfikował procedurę ostrzenia. Poza dokładniejszym prowadzeniem palca wodzącego po wzorniku (mniejsza siła nacisku) wprowadzono dodatkowy zabieg ręcznego docierania powierzchni natarcia frezu. W efekcie podjętych działań poprawiła się gładkość zarysu ewolwenty (rys. 8a i 8b). Na wykresach zarysu ewolwenty widoczne są także ślady pracy poszczególnych ostrzy frezu ślimakowego, co wynika z posuwu i rozmieszczenia ostrzy na obwodzie frezu (kolejne ostrze obrabia ząb, kiedy cały frez już się przesunął) będące dowodem na występowanie graniastości (rys. 8a i b) [2, 3, 10, 18]. Poza przedstawionymi powyżej błędami nie stwierdzono negatywnego wpływu stożkopochodnej powierzchni natarcia na kształt ewolwenty zębów koła zębatego (rys. 4 i 8). Przy czym należy zaznaczyć, że forma powierzchni natarcia jest tylko jedną z dwóch składowych wpływających na kształt krawędzi skrawającej. Zmieniając kształt powierzchni natarcia na stożkopochodny, powinniśmy zmodyfikować formę powierzchni przyłożenia (niemożliwe w warunkach warsztatowych).



Rys. 8. Wykresy kształtu ewolwenty koła zębatego – ewolwentomierz Zeiss VG-450 (zakres pomiarowy $30\ \mu\text{m}$, powiększenie $1000\times$). a) 2. Ostrzenie, strona lewa, b) 10. Ostrzenie, strona lewa

Wyniki pomiarów powierzchni natarcia oraz odchyłek od prostoliniowości zarysu bocznych krawędzi skrawających w płaszczyźnie osiowej były punktem wyjścia do analizy poprawności opracowanego modelu matematycznego frezu ślimakowego oraz algorytmów działania programu „Obliczanie zarysów frezów ślimakowych” ver. 2.1 (rys. 9) [6, 11]. Porównując pomiary z wynikami obliczeń, wykazano, że stożkopochodna powierzchnia natarcia (przy jednoczesnej odpowiedniej modyfikacji powierzchni przyłożenia ostrzy frezu) pozwala na podwyższenie dokładności frezów. Obliczenia wykonano dla frezu ślimakowego klasy AA o module 4,5. Wyniki (rys. 9) obliczeń wykazują minimalne różnice w odchyłkach prostoliniowości zarysu powierzchni działania frezu w płaszczyźnie stycznej walca zasadniczego w przypadku zastosowania powierzchni natarcia śrubowej prostokreślnej (rys. 9a) od powierzchni natarcia śrubowej stożkopochodnej (rys. 9b). Maksymalna odchyłka wynosiła 0,1 μm , co ma pomijalnie mały wpływ na zarys ewolwenty koła zębatego obrobionego tym narzędziem. Wyniki modelowania potwierdzają tezę, że można stosować stożkopochodną powierzchnię natarcia przy jednoczesnej modyfikacji powierzchni przyłożenia, co zdecydowanie upraszcza technologię wykonania narzędzia oraz jego dalszą eksploatację (stosujemy ściernicę o zarysie prostokreślnym zamiast krzywoliniowym).

Analizując wykresy (rys. 6), zauważamy, że każde kolejne ostrzenie powierzchni frezu powodowało zmianę kąta natarcia. Pierwsze ostrzenie zmieniło kąt natarcia z 0° do $+4'$, a po dziesiątym kąt natarcia wynosił $+0^\circ56'$ (tab. 1). W związku z pojawieniem się tak typowego dla ręcznego szlifowania frezu błędu kąta natarcia ząb koła zębatego zmienił swój kształt – stał się węższy na wierzchołku. Przy małym błędzie (4 minuty) było to praktycznie niezauważalne, jednak każdy kolejny pomiar wykonany po ostrzeniu wykazał pogłębienie się tego zjawiska. Przy czym zmiana nie była jednostajna i zależała głównie od siły docisku palca wodzącego do wzorca i docisku ściernicy do szlifowanego zarysu.

Zmiana kąta natarcia frezu ślimakowego na dodatni (tab. 1) spowodowała wydłużenie się profilu ostrzy [2, 3, 17], a tym samym zmniejszenie kąta przyporu w nacinanym kole. Zęby koła nacinanego są grubsze u wierzchołka w stosunku do zębów o profilu teoretycznym (rys. 5). Tak nacięte koła zębate pracują z kołem o prawidłowych zębach hałaśliwie na skutek silnych uderzeń pogrubionych wierzchołków zębów wadliwie wykonanych w powierzchni boczne prawidłowo naciętych zębów [4, 11, 13, 14].

W przypadku zmiany kąta natarcia na ujemny wysokość profilu skróci się, a zatem zwiększy się kąt przyporu w nacinanym kole [2, 3, 17]. Zęby koła nacinanego będą cieńsze u wierzchołka w stosunku do zębów o profilu teoretycznym. Tak nacięte koła pracują z kołem o zębach prawidłowych również hałaśliwie [4, 11, 13, 14].

Wynika z tego, że bardziej niebezpiecznym zjawiskiem jest zmiana kąta natarcia frezu ślimakowego niż zmiana kształtu powierzchni natarcia. Wywiera ona bardzo niekorzystny wpływ na kształt zębów koła zębatego obrobionego tym narzędziem. Zmienia charakterystykę pracy przekładni zębatych, wpływając na ich hałaśliwość i przyspieszone zużywanie się bocznych powierzchni zębów kół zębatych [4, 11, 13, 14, 17].

Kolejnym niekorzystnym czynnikiem zaobserwowanym w trakcie analizy ostrzenia frezów ślimakowych w warunkach warsztatowych była nierównomierna, zmienna podziałka rowków wiórowych powodująca nierówne obciążenie ostrza i przyczyniająca się do skrócenia okresu trwałości ostrza frezu (przyspieszone tępienie krawędzi skrawających). Krawędzie tnące poszczególnych ostrzy frezu nie będą leżały na obwodzie tego samego koła, co spowoduje miejscowe zgrubienia i zwężenia profilu [4, 13, 14, 17].

a)

nr	1	2	3	4	5	6	7
fd-fe	0.0000	0.0012	0.0019	0.0019	0.0016	0.0009	0.0000

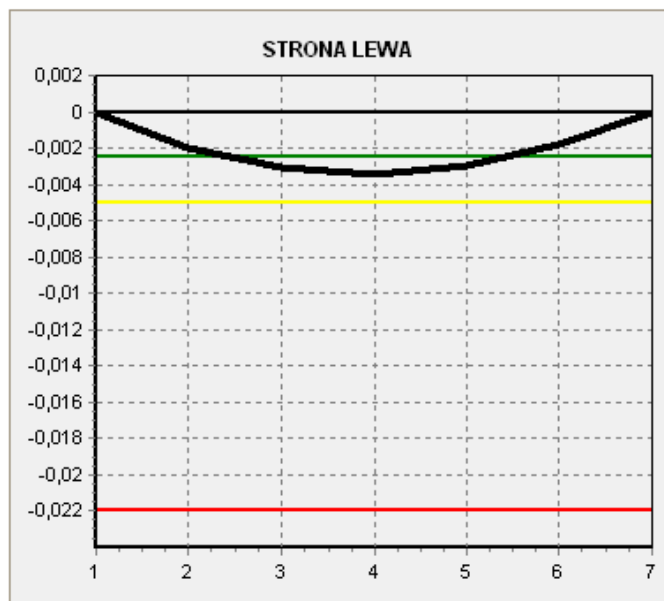
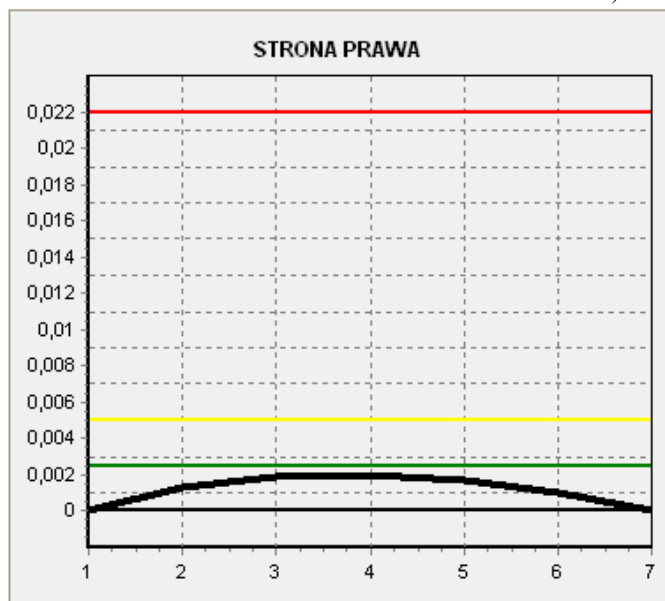
nr	1	2	3	4	5	6	7
fd-fe	0.0000	-0.0020	-0.0032	-0.0035	-0.0030	-0.0019	-0.0000

b)

nr	1	2	3	4	5	6	7
fd-fe	0.0000	0.0013	0.0019	0.0020	0.0017	0.0010	0.0000

nr	1	2	3	4	5	6	7
fd-fe	0.0000	-0.0020	-0.0031	-0.0034	-0.0030	-0.0018	0.0000

c)



Kolor czerwony - KLASA A, kolor żółty - KLASA AA, kolor zielony - KLASA AAA

Rys. 9. Błędy prostoliniowości zarysu osiowego powierzchni działania frezu ślimakowego w programie „Obliczanie zarysów frezów ślimakowych” ver. 2.1 [6, 11]: a) powierzchnia natarcia śrubowa prostokreślna, b) powierzchnia natarcia śrubowa stożkopochodna, c) wykres kształtu odchyłek

Tab. 1. Pomiary bicia i kąta przeostrzenia w kolejnych etapach procesu ostrzenia frezu

	Frez wzorcowy								4. przeostrzenie								10. przeostrzenie							
Bicie trzpienia pomiarowego [μm]	25								29								38							
Bicie powierzchni kontrolnej [μm]	15								17								19							
Bicie na średnicy zewnętrznej frezu [μm]	18	18	23	5	10	71	8	21	22	16	26	19	27	18	20	25	28	16	14	17	22	15	11	19
Kąt przeostrzenia (kąt natarcia)	0°								0°14'								0°56'							

7. PODSUMOWANIE

Ostrzenie narzędzi jest nieodłącznym elementem eksploatacji narzędzi skrawających monolitycznych lub z wlutowanymi płytkami skrawającymi. Forma powierzchni natarcia oraz powierzchni przyłożenia wpływa na dokładność obrabianego frezem ślimakowym koła zębatego. Interpretując uzyskane wyniki pomiarów, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Frezy ślimakowe monolityczne są ostrzone w trakcie eksploatacji. Ma to wpływ na ich trwałość i dokładność wykonywanych nimi kół zębatych.
2. Szlifując frez ślimakowy w warunkach warsztatowych, należy szlifować powierzchnie natarcia w co najmniej dwóch etapach:
 - a) zgrubnie, stosując ściernicę gruboziarnistą i duże parametry skrawania,
 - b) wykańczająco tarczą ścierną drobnoziarnistą i niskimi parametrami skrawania, co spowoduje polepszenie prostoliniowości krawędzi skrawającej i wpłynie na poprawę dokładności wykonywanych kół zębatych.
3. Należy docierać powierzchnie skrawające, co wyeliminuje szczyrzość krawędzi skrawających i będzie miało bezpośredni wpływ na gładkość zarysu ewolwenty koła zębatego.
4. Należy stosować ściernice tarczowe jednostronnie stożkowe ostrzone po prostej. Mimo wypukłości powierzchni natarcia frezu ślimakowego, jak wykazały pomiary, nie pogarsza się klasa koła zębatego i nie zmienia się kształt ewolwenty.
5. Powinny zostać wyeliminowane dostępne w handlu ściernice ostrzone po krzywej. Przecież producent frezu nie dostarcza żadnych informacji na temat kształtu ściernic użytych w procesie produkcji narzędzia. Dlatego stosowanie ściernic ostrzonych po krzywej „uniwersalnej” może doprowadzić do powstania dużo poważniejszych błędów kształtu powierzchni natarcia, i co za tym idzie krawędzi skrawającej, niż uzyskany w trakcie szlifowania błąd nieprostoliniowości powierzchni natarcia.
6. Dużo większy wpływ na dokładność frezu ślimakowego ma nieprawidłowy, różny od zera kąt natarcia niż wypukłość powierzchni natarcia. Potwierdzają to zarówno przeprowadzone pomiary, jak i symulacja komputerowa przeprowadzona w oparciu o opracowany model matematyczny i autorski program komputerowy [6, 11].

Podsumowując, szlifowanie frezów ślimakowych w warunkach warsztatowych na szlifierce wyposażonej we wzornik i palec wodzący prowadzony po wzorniku powinno zostać zaniechane. Mimo zmiany technologii polegającej na zastosowaniu ściernicy tarczowej o zarysie prostoliniowym w jej przekroju osiowym, co wyeliminowało ściernice ostrzone po zarysie krzywoliniowym w przekroju osiowym, błędy popełniane przez szlifierza w trakcie ostrzenia powierzchni natarcia frezu praktycznie dyskwalifikują tę metodę ostrzenia.

Frezy ślimakowe powinny być ostrzone przez wyspecjalizowane firmy lub producentów narzędzi z użyciem nowoczesnych wysokoobrotowych szlifierek CNC z zadaniem kątem ostrzenia i ciągłą kontrolą zarysu tarczy szlifierskiej. Stępiony frez należy wstępnie zmierzyć, a następnie w oparciu o wyniki pomiarów i aplikację komputerową obliczyć kształt zarysu ściernicy, wykonać szlifowanie i ostateczną weryfikację kształtu krawędzi skrawającej oraz kąta i prostoliniowości powierzchni natarcia. Dotyczy to zwłaszcza frezów listkowych, a także frezów klasy AA, AAA i AAAA, których naostrzenie w warunkach warsztatowych nie jest możliwe [5]. Wyniki badań wskazują, że dopuszczalne jest zastosowanie stożkopochodnej powierzchni natarcia, co uprości technologię szlifowania powierzchni natarcia frezu ślimakowego. W przypadku jednoczesnej modyfikacji zarysu powierzchni przyłożenia, co jest możliwe tylko u producenta, zostanie podniesiona dokładność frezów ślimakowych i w efekcie zamiast frezu klasy A lub AA można uzyskać frez o klasę wyższą.

LITERATURA

- [1] Diamos: *Katalog produktów 2011-2012. Ściernice diamentowe i borazonowe*, Kuźnica Raciborska, 2011.
- [2] Dimitriou V., Vidakis N., Antoniadis A.: *Advanced computer aided design simulation of gear hobbing by means of three-dimensional kinematics modelling*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, Vol. 129/ 911, October (2011), pp. 911-918.
- [3] Dimitriou V., Antoniadis A.: *CAD – based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 41, 2009, pp. 347-357.
- [4] Dzierżkowski A.: *Frezowanie obwiedniowe walcowych kół zębatych*, WNT, Warszawa, 1972.
- [5] Fette: *Katalog. Gear cutting and generating tools*, Nr 1329 (891 1 S).
- [6] Nieszporek T.: *Podstawy konstrukcji narzędzi skrawających do obróbki walcowych uzębień zewnętrznych*, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004, ISBN 83-7193-252-9.
- [7] Ochęduszko K.: *Koła zębate – wykonanie i montaż*, Tom I-III, WNT, Warszawa, 1976.
- [8] Oczó K.E.: *Innowacyjne procesy obróbki ścierną spojonym ścierniwem – część I-II*, „Mechanik” 8-9/2000, s. 529-539 i 10/2000, s. 639-648.
- [9] Oczó K., Porzycki J.: *Szlifowanie. Podstawy i technika*, WNT, Warszawa, 1986.
- [10] Piotrowski A., Nieszporek T.: *Graniastość powierzchni zęba koła walcowego przy frezowaniu obwiedniowym*, „Mechanik” R85 nr 7, s. 795-806, ISSN 0025-6552, Warszawa, 2012.
- [11] Piotrowski A.: *Podwyższanie dokładności frezów ślimakowych modułowych*, praca doktorska, Częstochowa, 2002.

- [12] PN – ISO 4468. *Frezy ślimakowe jednokrotne do kół zębatach. Wymagania dokładności.*
- [13] PN-ISO 1328-1:2000, PN-ISO 1328-2:2000 – *Przekładnie zębate walcowe drobnomodułowe – Dokładność wykonania – Nazwy, określenia i wartości odchyłek.*
- [14] PN-ISO 54:2001. *Przekładnie zębate walcowe ogólnego przeznaczenia oraz dla przemysłu ciężkiego – Moduły.*
- [15] Sandvik: *Frez ślimakowy CoroMill 176 z płytkami o pełnym zarysie.* Katalog 2014.
- [16] Sandvik: *Wielosegmentowy frez ślimakowy CoroMill 177.* Katalog 2014.
- [17] Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Ю.: *Проектирование металлорежущих инструментов*, ГНТИМЛ МАШГИЗ, Москва, 1962.
- [18] Stachurski Z., Salamon A.: *Dokładność odwzorowania modyfikowanego zarysu ostrza narzędzia obwodniowego na zębie koła obrabianego*, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, PN KBM nr 1/2000. Gliwice, 2000, s. 207-218.
- [19] VIS Kombinat Przemysłu Narzędziowego, *Frezy ślimakowe do kół zębatach*, WPM WEFAMA, Warszawa, 1976.
- [20] Zeiss: *GearPro Procedure*, Stuttgart 2013.
- [21] Zeiss: *Prismo Navigator*. Katalog, Warszawa, 2014.