

# Czynniki determinujące jakość powierzchni po frezotoczeniu

MAŁGORZATA SŁOMION, ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI, MACIEJ MATUSZEWSKI, OLEG POLISHCHUK

W artykule przedstawiono technologię frezotoczenia. W szczególności scharakteryzowano uwarunkowania technologiczne determinujące jakość powierzchni po obróbce. Uwypuklono najważniejsze zalety i wady frezotoczenia.

## Wprowadzenie

Obróbka skrawaniem części osiowo-symetrycznych najczęściej następuje poprzez toczenie, a następnie, w przypadku zwiększonych wymagań związanych z dokładnością kształtowo-wymiarową, szlifowanie. Takie klasyczne ujęcie procesu technologicznego jest problematyczne do realizacji w sytuacji gdy elementy obrabiane są z materiałów, które przy toczeniu tworzą wióry ciągłe, są niewyważone, niesymetryczne, z nieciągłościami geometrycznymi. Czynniki te ogólnie pogarszają jakość obrobionej powierzchni oraz wpływają niekorzystnie na trwałość narzędzi. Alternatywą dla klasycznego sposobu kształtowania takich elementów osiowo-symetrycznych jest frezotoczenie, czyli inaczej frezowanie obrotowe. Podczas takiej obróbki zarówno przedmiot obrabiany jak i narzędzie skrawające wykonują ruch obrotowy [2, 3].

Ogólnie, do zalet tej obróbki należą, m.in.: dobra jakość obrobionej powierzchni; tworzenie krótkich wiórów, które ułatwiają zautomatyzowanie procesu; małe nagrzewanie się części obrabianej, duża wydajność obróbki, większa trwałość narzędzia i mniejsza energochłonność w porównaniu do toczenia, ekonomiczna obróbka dużych

i ciężkich przedmiotów. Jednak uzyskanie pożądanych efektów przy obróbce frezotoczeniem jest uwarunkowane znajomością wpływu wielu różnych czynników na ten proces. Ogólnie można je podzielić na kilka grup, związanych z:

- obrabiarką,
- warunkami procesu,
- narzędziem skrawającym.

Od tych czynników bezpośrednio zależy wydajność procesu, jakość powierzchni obrobionej, dokładność kształtowo-wymiarowa oraz forma powstającego wióra [1, 6, 7].

## Wpływ czynników technologicznych przy frezotoczeniu na jakość powierzchni

Frezowanie obrotowe stosuje się do obróbki wstępnej, jak i wykończeniowej. Zastosowanie odpowiednich narzędzi, obrabiarek oraz optymalnych para-

metrów obróbki może dać w rezultacie jakość powierzchni, która w wielu przypadkach eliminuje konieczność przeprowadzenia dalszej obróbki. Frezowanie obrotowe ma szerokie zastosowanie. Może być stosowane do obróbki zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni, powierzchni czołowych oraz zewnętrznych obrotowo-symetrycznych powierzchni kształtowych.

Podstawowymi parametrami technologicznymi, które określają ruch narzędzia i przedmiotu obrabianego są [1, 3]:

- prędkość skrawania –  $v_c$ , m/min,
- posuw obwodowy na jedno ostrze –  $f_z$ , mm/1,
- posuw osiowy (wzdłużny) –  $f_w$ , mm/obrót,
- posuw poprzeczny (promieniowy) –  $f_r$ , mm/obrót,
- styk wgłębny krawędzi skrawającej –  $a_p$ , mm,
- szerokość frezowania –  $B$ , mm.

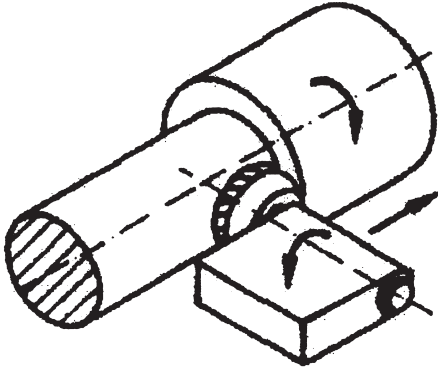
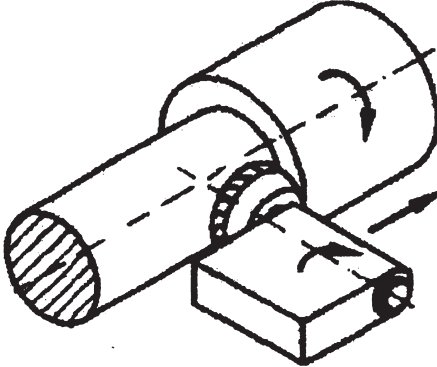
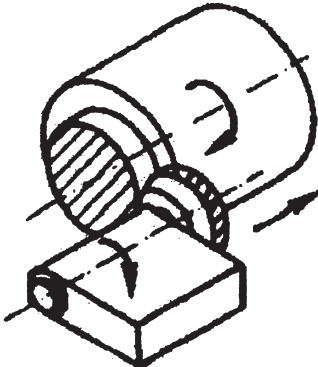
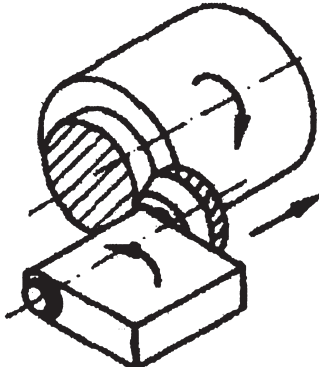
\* Mgr inż. Małgorzata SŁOMION, dr hab. inż. Maciej MATUSZEWSKI, matus@pbs.edu.pl – Politechnika Bydgoska, Wydział Zarządzania, mgr inż. Andrzej Wojciechowski – Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP, ODEKA Bydgoszcz, prof. Oleg Polishchuk – Narodowy Uniwersytet Techniczny, Chmielnicki, Ukraina.

Prędkość skrawania  $v_s$  jest to chwilowa prędkość ruchu głównego rozpatrywanego punktu krawędzi skrawającej w stosunku do przedmiotu obrabianego. Prędkość ta jest sumą geometryczną prędkości wszystkich ruchów składowych skrawania, tj. prędkości obwodowej narzędzia, prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego i posuwu wzdłużnego lub poprzecznego. Posuw obwodowy na jedno ostrze  $f_z$  odpowiada długości odcinka drogi ruchu posu-

równy jest dosuwowi narzędzia. Przy frezowaniu obrotowym czołowym jest to odległość między powierzchnią obrabianą a powierzchnią obrobioną mierzoną w kierunku prostopadłym do osi przedmiotu obrabianego. Przy frezowaniu obrotowym równoległościowym styk wgłębny krawędzi skrawającej jest odległością między dwoma kolejnymi położeniami krawędzi skrawającej, mierzoną w kierunku prostopadłym do szerokości warstwy skrawanej na jeden

wzajemnie ułożone są prostopadle i frezowanie obrotowe równoległościowe, czasami określane również jako frezotoczenie współosiowe lub walcowe, w którym osie narzędzia i przedmiotu są równoległe. Jako dodatkowe kryterium podziału frezowania obrotowego przyjmuje się wzajemne kierunki ruchu obrotowego przedmiotu obrabianego i narzędzia. Wówczas wyróżnia się frezowanie obrotowe przeciwbieżne, gdy kierunki ruchu obrotowego przedmiotu

Tabela 1. Podział frezotoczenia w zależności od usytuowania osi narzędzia i przedmiotu obrabianego oraz kierunku ich wzajemnego ruchu [4]

Frezotoczenie	Przeciwbieżne	Współbieżne
Ortogonalne		
Równoległościowe		

wowego przypadającej na obrót w ruchu głównym o kąt podziałki międzyostrzowej. Posuwem wzdłużnym nazywa się posuw w kierunku wzdłużnym  $f_w$  do osi przedmiotu obrabianego, który przypada na jeden obrót przedmiotu obrabianego. Posuw poprzeczny odpowiada przesunięciu frezu w głąb materiału obrabianego przypadającemu na jeden obrót przedmiotu obrabianego. Styk wgłębny krawędzi  $a_p$  skrawającej

obrót części obrabianej. Szerokością frezowania  $B$  nazywa się odcinek odpowiadający rzutowi styku frezu z częścią obrabianą [1, 5, 8].

Podstawowym kryterium podziału frezowania obrotowego jest wzajemne usytuowanie osi narzędzia i przedmiotu obrabianego. Wyróżnia się wówczas frezowanie obrotowe ortogonalne, przy którym osie narzędzia i przedmiotu

obrabanego i narzędzia są przeciwnie, oraz frezowanie obrotowe współbieżne, gdy te kierunki są zgodne (tab. 1) [4].

Podczas frezowania obrotowego równoległościowego przedmiot obrabiany, który jest zamocowany w uchwycie wrzeciona przedmiotowego obraca się wokół swojej osi tak, jak przy obróbce toczeniem. Narzędzie natomiast zamocowane jest we wrzecionie narzędzi-

wym, którego oś jest położona równoległe do osi przedmiotu obrabianego. Frez oprócz ruchu obrotowego, który w głównej mierze decyduje o prędkości skrawania, może wykonywać ruch posuwowy wzdłużny w kierunku równoległym do osi przedmiotu obrabianego lub ruch promieniowy prostopadle do osi przedmiotu obrabianego.

Frezowanie obrotowe równoległościowe powierzchni zewnętrznych może przebiegać z zewnętrznym stykiem narzędzia skrawającego i przedmiotu obrabianego lub ze stykiem wewnętrznym przy użyciu głowic z ostrzami skrawającymi skierowanymi do wewnątrz. Obróbka powierzchni wewnętrznych metodą frezowania obrotowego równoległościowego jest możliwa tylko ze stykiem wewnętrznym narzędzia z przedmiotem.

Frezowanie obrotowe równoległościowe może zaistnieć w dwóch odmianach:

- frezowanie obrotowe, przy którym w pierwszej fazie obróbki realizowany jest tylko posuw promieniowy, a w drugiej tylko posuw obwodowy – ruch obrotowy przedmiotu obrabianego (jest to tzw. wariant frezowania obrotowego na pełną głębokość naddatku obróbkowego),

- frezowanie obrotowe, przy którym w pierwszej i drugiej fazie występuje jednocześnie posuw promieniowy i obwodowy, natomiast w trzeciej – tylko posuw obwodowy.

W pierwszym przypadku, w fazie pierwszej, następuje wcinanie się ostrzy na żądaną głębokość skrawania. Obróbka na tym etapie podobna jest do frezowania walcowego obwodowego, a dobór parametrów skrawania może być dokonany wykorzystując o istniejące zalecenia dla tego sposobu. Dla pierwszej fazy charakterystyczne są następujące czynniki: zmienna długość styku punktu krawędzi skrawającej z obrabianym przedmiotem oraz charakter zmian pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (wzrost od zera do maksimum i ponowny spadek do zera), niezależnie od kierunków obrotów narzędzia i przedmiotu. W drugiej fazie, przy występującym posuwie obwodowym, zdjęcie naddatku obróbkowego nastę-

puje podczas jednego obrotu przedmiotu obrabianego. Występują przy tym stałe parametry geometryczne warstwy skrawanej, a przebieg zmian przekroju poprzecznego warstwy skrawanej jest podobny jak w fazie pierwszej. Frezowanie obrotowe walcowe powierzchni zewnętrznych ze stykiem zewnętrznym jest często zastępowane frezowaniem obrotowym ze stykiem wewnętrznym.

Frezowanie obrotowe powierzchni wewnętrznych dzieli się na: frezowanie obrotowe planetarne oraz frezowanie obrotowe obiegowe. W czasie frezowania obrotowego planetarnego obrabiany przedmiot wykonuje ruch posuwowy osiowy lub jest nieruchomy, natomiast frez walcowy wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi oraz ruch planetarny wewnątrz obrabianej powierzchni cylindrycznej. Przy frezowaniu obrotowym obiegowym frez wykonuje tylko i wyłącznie ruch obrotowy wokół własnej osi, a przedmiot obrabiany ruch obrotowy i posuwowy osiowy. Przy tym sposobie obróbki otrzymuje się kinematycznie lepsze warunki skrawania (większa liczba ostrzy jest jednocześnie w kontakcie z materiałem obrabianym), niż w czasie frezowania obrotowego walcowego [1, 5].

Jakość powierzchni określana wysokością mikronierówności obrabianych powierzchni związana jest z kształtem oraz wymiarami przekroju reszkowego warstwy skrawanej i zależy od własności materiału obrabianego, geometrii ostrza skrawającego, parametrów skrawania, warunków chłodzenia, zużycia ostrza oraz sztywności układu OUPN.

Proces frezowania obrotowego jest sposobem obróbki skrawaniem, pomimo wielu zalet posiada wadę, którą są uwarunkowane procesem odchyłki kształtu obrabianych powierzchni w kierunku obwodowym i wzdłużnym. W wyniku przerywanego procesu skrawania, przy frezowaniu obrotowym powstają odchyłki rzeczywistego zarysu powierzchni przedmiotu obrabianego od teoretycznego, który ma być uzyskany w wyniku obróbki. Na obwodzie powierzchni obrabianej powstają, w zależności od wartości parametrów procesu, ściecia o różnej wymiarach – uskoki (z ang. *Facet*, z niem. *Facette*). Powstające uskoki kształtują wielobok

równoboczny na obwodzie przedmiotu obrabianego. Odchyłka od zadanego zarysu koła (przy obróbce powierzchni cylindrycznych) na krawędzi granicznej między dwoma uskokami, określa kinematycznie uwarunkowane odchyłki okrągłości, względnie kinematyczną chropowatość.

Na uzyskaną jakość powierzchni wpływ ma względne usytuowanie osi narzędzia i przedmiotu obrabianego. Dla otrzymania powierzchni o dobrej jakości, trzeba zapewnić równoległe usytuowanie osi frezu i przedmiotu obrabianego. Przy frezowaniu obrotowym równoległościowym osie narzędzia i przedmiotu obrabianego są w każdym przypadku równoległe. Wzajemne położenie narzędzia i przedmiotu obrabianego przy frezowaniu obrotowym ortogonalnym odgrywa natomiast dużą rolę w procesie konstytuowania powierzchni. Jednym z decydujących parametrów jest rozstaw osi obrotu przedmiotu i narzędzia, który określany jest jako ekscentryczność lub mimośrodowość. Przy centrycznym ustawieniu frezu względem przedmiotu obrabianego wartość posuwu osiowego jest ograniczona długością pomocniczej krawędzi skrawającej. Charakterystyczne dla tego ustawienia jest to, że wszystkie punkty czołowej krawędzi skrawającej wchodzi w styk na obwodzie powierzchni obrabianej przedmiotu w tym samym czasie. W przypadku, kiedy posuw osiowy (wzdłużny) zostanie zwiększony do wartości przekraczającej długość czołowej krawędzi skrawającej na powierzchni części obrabianej pojawiają się mikroskopijne odchyłki kształtu w kierunku wzdłużnym. Dodatkowym ograniczeniem posuwu osiowego mogą być obciążenia krawędzi skrawającej, pojawiające się przy obróbce materiałów trudnoskrawalnych. Dobrą jakość powierzchni obrabianej uzyskuje się w tym wariantcie procesu przy dużych wartościach stosunku prędkości obrotowych narzędzia i przedmiotu. Zmiana rozstawu osi daje zasadnicze zmiany w procesie obróbki. Przy frezowaniu obrotowym z przestawionymi osiami frezu i przedmiotu obrabianego, punkty czołowej krawędzi skrawającej osiągają średnicę obróbki kolejno. Daje to w efekcie zwiększenie kąta styku krawędzi skrawającej z przedmiotem (kąta przylegania ostrza) i po-

zwala zwiększyć wartość posuwu wzdłużnego. Posuw wzdłużny może być zwiększony do wartości równej długości rzutu pomocniczej (czołowej) krawędzi skrawającej na kierunek wzdłużny przedmiotu obrabianego, przy której nie zachodzi utrata jego cylindryczności [1, 8].

Istotna różnica między obróbką z centrycznie i mimośrodowo ustawionym narzędziem wiąże się z wpływem zmian sił skrawania na powierzchnię przedmiotu obrabianego. Większe wartości kąta styku czołowej krawędzi skrawającej z przedmiotem obrabianym wpływają ujemnie na jakość obrobionej powierzchni, szczególnie wtedy, gdy w styku jest mała liczba ostrzy skrawających.

Dokładność ustawienia ostrzy skrawających ma znaczny wpływ na jakość powierzchni obrobionej. Jednym z założeń optymalnej konstrukcji narzędzia do obróbki precyzyjnej frezowaniem obrotowym jest założenie zastosowania mechanizmu pozwalającego na zmianę ustawienia wieloostrowych płytek skrawających w celu wyeliminowania błędów ich ustawienia w korpusie narzędzia. Pogorszenie jakości otrzymywanej powierzchni w wyniku wzrostu chropowatości lub falistości powierzchni jest spowodowane istnieniem bicia osiowego przy frezowaniu obrotowym czołowym i bicia promieniowego ostrzy skrawających przy frezowaniu obrotowym równoległościowym. Podczas frezowania obrotowego z równoległe ustawionymi narzędziem i przedmiotem obrabianym ważną rolę odgrywa dokładność ruchu obrotowego obwodowych krawędzi skrawających. Nawet mała wartość bicia promieniowego jednej z głównych krawędzi skrawających przyczynia się do wzrostu chropowatości powierzchni. Frez przeznaczony do uzyskania dobrej jakości powierzchni powinien być wykonany jako narzędzie jednoostrzowe lub w przypadku narzędzia wieloostrowego muszą być zastosowane wartości posuwu na ostrze takie, jak dla narzędzi jednoostrowych. W celu otrzymania jak najmniejszej chropowatości powierzchni, mierzonej w kierunku wzdłużnym przedmiotu obrabianego, przy obróbce frezowaniem obrotowym obwodowym z posuwem wzdłużnym istotne jest, aby główna krawędź skrawająca miała kąt przystawienia równy  $90^\circ$ . Zmniejsza się wówczas wpływ oddziaływania zarysu naroża ostrza na generowaną powierzchnię.

Przy ortogonalnej odmianie frezowania obrotowego powinna być zapewniona dokładność ruchu w płaszczyźnie wszystkich czołowych krawędzi skrawających frezu. Objętość skrawana przez główną krawędź skrawającą frezu stanowi duży udział w całkowitej objętości warstwy skrawanej. Jakość powierzchni obrobionej jest jednak uzależniona od pomocniczej (czołowej) krawędzi skrawającej, która skrawając resztę materiału wygładza powierzchnię części obrabianej. Sprawia to, że szczególnie duże wymagania stawiane są sztywności jednostki frezarskiej i konstrukcji narzędzia, które musi mieć nastawialne ostrza czołowe lub przeszlifowane ostrza od strony czołowej.

Jakość obrabianej powierzchni oraz przebieg procesu skrawania zależy bezpośrednio od liczby ostrzy jednocześnie skrawających materiał przedmiotu. Obróbka frezowaniem obrotowym z liczbą ostrzy czynnych mniejszą od jednośc





przebiega w bardzo trudnych warunkach ze względu na dużą dynamikę procesu. Jest ona szkodliwa dla obrabiarki i narzędzia, jak również wpływa na pogorszenie jakości powierzchni obrabianej. W takim przypadku często zdarzają się wykruszenia krawędzi skrawających. Znacznie lepsze warunki pracy występują, kiedy liczba ostrzy skrawających będących jednocześnie w kontakcie z przedmiotem obrabianym jest większa od jedności. Większa liczba ostrzy czynnych sprawia, że proces skrawania przebiega spokojnie, gdyż mniejsze są zmiany sił skrawania w czasie kontaktu ostrza z materiałem obrabianym.

Odchyłka kształtu powierzchni przedmiotu obrobionego frezowaniem obrotowym jest określona makrogeometrycznie przez kinematykę ruchu narzędzia i przedmiotu obrabianego. Na dokładność kształtu wpływ poza tym mają, m.in.: promień przedmiotu obrabianego i promień narzędzia. Ponieważ średnica powierzchni obrabianej wynika z przyjętego zadania obróbkowego, nie można jej wykorzystać w celu dokonania optymalizacji jakości powierzchni. Wpływ na jakość powierzchni obrabianego przedmiotu mają natomiast promień frezu, liczba ostrzy frezu i stosunek prędkości obrotowych narzędzia i części obrabianej.

Sterowanie parametrami jakości powierzchni przy frezowaniu obrotowym równoległościowym może być dokonane przy użyciu tzw. współczynnika trajektorii  $\mu$ , który wynika z ilorazu stosunku prędkości obrotowych frezu i przedmiotu obrabianego do stosunku promieni przedmiotu i narzędzia. Stanowi on miarę jakości powierzchni obrobionej [4].

Na uzyskaną jakość powierzchni wpływ ma również prędkość obrotowa narzędzia skrawającego i prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, które najczęściej rozpatrywane są wspólnie. Stosunek prędkości obrotowych narzędzia i przedmiotu obrabianego jest jednym z najważniejszych parametrów procesu. Decyduje on o jakości wytwarzanej powierzchni oraz ma wpływ na wydajność procesu i na trwałość narzędzia. Zwiększenie stosunku prędkości obrotowych prowadzi do zmniejszenia powierzchni.

Zastosowanie dodatkowych obrotów przedmiotu obrabianego prowadzi do zmniejszenia odchyłek kształtu powierzchni, ale powoduje wydłużenie czasu obróbki. Z tego powodu ten sposób poprawy jakości powierzchni stosowany jest wtedy, gdy optymalizacja innych parametrów procesu frezowania obrotowego nie przynosi pożądanych skutków.

### Podsumowanie

Uzyskanie pożądanej jakości powierzchni frezotoczeniem jest uwarunkowane znajomością wpływu na ten proces wielu różnych czynników. Wśród tych czynników bardzo ważne są czynniki technologiczne, determinujące warunki przebiegu procesu oraz czynniki związane z narzędziem skrawającym.

Podsumowując ogólnie charakterystykę frezowania obrotowego należy natomiast wymienić następujące główne zalety tego procesu:

- uwarunkowane kinematyką procesu obróbki powstawanie krótkich wiórów sprzyja automatyzowaniu obróbki,

- nieznaczny wzrost temperatury materiału przedmiotu podczas obróbki frezowaniem umożliwia realizację procesów bez użycia cieczy chłodząco-smarujących,

- krytyczne granice szybkościowego toczenia (maksymalne prędkości obrotowe wrzeciona głównego, wpływ sił odśrodkowych na uchwyt mocujący i zmniejszenie wartości sił mocowania) są wyeliminowane przez efekt dodawania się trzech składowych prędkości skrawania, co umożliwia stosowanie bardzo dużych prędkości skrawania,

- możliwość uzyskania dobrej jakości powierzchni obrobionej, małych odchyłek wymiarów i dużej dokładności kształtu, czynią szybkościowe frezowanie obrotowe technologią zastępczą dla rozposzechnionych dotąd sposobów obróbki dokładnej,

- możliwość zastosowania do ekonomicznej obróbki materiałów trudno skrawalnych,

- możliwość wydajnej obróbki przedmiotów dużych o nierównomiernie rozłożonej masie,

- możliwość zastosowania do całościowej obróbki, co pozwala uniknąć błędów powodowanych ponownym mocowaniem na kolejnych stanowiskach obróbkowych,

- znacznie większa wydajność skrawania w porównaniu z szybkościowym toczeniem, co powoduje znaczne skrócenie czasu wytwarzania.

Podstawowe wady tego sposobu obróbki to przede wszystkim:

- uwarunkowane kinematyką procesu obróbki odchyłki kształtu na powierzchni obrobionej w kierunku wzdłużnym i obwodowym przedmiotu obrabianego,
- złożony opis geometrii struktury geometrycznej powierzchni i występujących w obróbce sił.

Przewaga cech pozytywnych nad wadami frezotoczenia powoduje, że jest to sposób obróbki coraz częściej stosowany w różnych procesach wytwórczych.

### Literatura

[1] Cichosz P.: *Nowoczesne procesy obróbki skrawaniem*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2022.

[2] Feldshtein E.: *Wybrane zagadnienia obróbki skrawaniem*. Wydawnictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2013.

[3] Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.

[4] Merkel P.: *Schleifqualität in einem Schnitt. Hochgeschwindigkeits – Drehfräsen steigert Produktivität*. Industrie – Anzeiger No. 112, 1990, pp. 565-570.

[5] Oczóś K.: *Szybkościowe frezotoczenie*. Mechanik nr 1-2, 1990, s. 13-14

[6] Potrzebski M., Styp-Rekowski M., Świątek P.: *Frezotoczenie – hybrydowa obróbka skrawaniem*. *Obróbka Metalu* nr 1/2020, s. 44-50.

[7] Schulz H.: *High speed turn-milling – A new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces*. *Annals of CIRP*, vol. 39, Iss. 1/1990, pp. 107-109.

[8] Schulz H., Sahn D.: *Technologie des orthogonalen Hochgeschwindigkeitsdrehfräsen*. *WT – Production und Management* No. 85, 1995, pp. 78-82. ■