

Jerzy Szyrajew, Józef Stryczek

Katedra Obróbki Skrawaniem

Frezowanie celuloidu frezem palcowym

Praca zawiera wyniki badań nad frezowaniem celuloidu przeprowadzonych w laboratorium Katedry Mechanicznej Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej.

Bezpośrednim celem pracy jest ustalenie podstaw dla wyboru ekonomicznych warunków skrawania przy automatycznym ewentualnie półautomatycznym przeciwbieżnym frezowaniu kopiowym opraw okularowych z przezroczystego celuloidu.

W ramach pracy przeprowadzono analizę tępienia się ostrzy freza i wyciągnięto wnioski w odniesieniu do wyboru kryterium stępienia oraz optymalnej geometrii freza ze stali węglowej. Dokonano obserwacji tworzących się wiórów oraz przeprowadzono badania wpływu parametrów skrawania na gładkość powierzchni i na trwałość ostrzy freza. Opracowano wzór na okresową szybkość skrawania i podano zasadę doboru ekonomicznych warunków skrawania.

1. Wstęp

Celuloid dzięki swemu estetycznemu wyglądowi mimo zasadniczej wady, jaką jest jego łatwopalność, posiada i dzisiaj szereg zastosowań jako tworzywo do wyrobów galanteryjnych. W szczególności jest on często używany do wyrobu opraw okularowych. Wprawdzie w ostatnich latach ukazały się na rynku oprawy okularowe wykonywane metodą wtryskową z octanu celulozy lub stylonu, to jednak oprawy te mają głównie zastosowanie do okularów przeciwsłonecznych. Większość okularów noszonych przez krótko- i dalekowidzów wykonuje się w kraju nadal z płyt celuloidowych, przy czym kształt oprawy uzyskuje się z płyty przez wycinanie wykrojnikiem, a następnie frezowanie małym frezem palcowym na kopiarce posuwem ręcznym.

Chcąc wspomnianą operację przeprowadzić ekonomicznie, należy wybrać najodpowiedniejsze warunki skrawania w oparciu o dokładną znajomość procesu frezowania celuloidu. Jeśli wziąć dodatkowo pod uwagę,

że frezowanie opraw okularowych ze względu na wielkość produkcji powinno się odbywać na kopiarce automatycznej lub półautomatycznej, to znajomość tego procesu jako podstawy dla konstrukcji wspomnianej obrabiarki staje się jeszcze bardziej potrzebna. W literaturze technicznej niestety można znaleźć raczej bardzo skromne i wyrywkowe dane w odniesieniu do skrawania celuloиду. Podkreślić tutaj również należy, że skrawalność celuloиду, podobnie jak dla innych materiałów, jest różna w zależności od jego składu chemicznego. Na przykład wyraźnie różną skrawalność wykazuje celuloид przezroczysty w stosunku do celuloidu nieprzezroczystego (krytego), do którego przy wytwarzaniu dodaje się np. biel cynkową lub biel tytanową.

W pracy niniejszej przeprowadzono badania nad frezowaniem jednego z gatunków celuloidu galanteryjnego produkcji krajowej, używanego do wyrobu opraw okularowych. Ze względu na bezpośrednio praktyczne znaczenie badań dla ekonomizacji i automatyzacji operacji frezowania opraw okularowych postanowiono w ramach pracy ustalić nie tylko zależności pomiędzy parametrami skrawania i trwałością ostrza, ale również przeanalizować dokładnie geometrię narzędzia, zbadać wpływ parametrów skrawania na gładkość powierzchni oraz przeprowadzić obserwacje wiórów. Badania ograniczono na razie, jak wspomniano, do frezowania jednego gatunku celuloidu frezem palcowym ze stali węglowej bez chlōdzenia.

2. Charakterystyka celuloidu użytego do badań

Celuloид użyty do badań był celuloidem przezroczystym produkcji krajowej.

Zestaw produktów wyjściowych przy jego fabrykacji (bez uwzględnienia alkoholu etylowego) według danych wytwórni przedstawiał się następująco:

nitroceluloza o zawartości 11,09% N . . .	71,4%
kamfora	27 %
ftalan dwubutyłowy	1,5%
barwnik	0,1%

Celuloид dostarczono do badań w płytach polerowanych o grubości 4 mm oraz pozostałych wymiarach 1420 × 720 mm. Własności celuloidu badanego zestawiono w tablicy 1. Dla poszczególnych płyt użytych do badań stwierdzono następujące odstępstwa od podanych w tablicy wartości średnich: dla R_r około $\pm 2\%$, dla a_{10} około $\pm 5\%$, dla H_B około $\pm 4\%$.

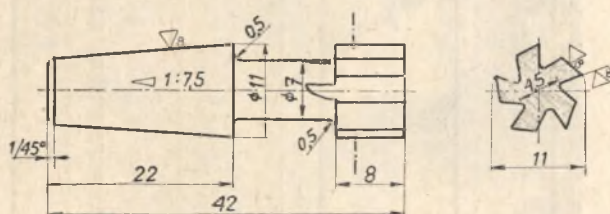
Tablica 1

Własności celuloidu użytego do badań

Ciężar właściwy G/cm ³	Zawartość ciał lotnych %	R_r kG/cm ²	a_{10} %	H_B 5/62,5/3 min kG/mm ²
1,357	2,5	340	16,5	6,5

3. Narzędzie zastosowane do badań

Do badań użyto frezów trzpieniowych z chwytem stożkowym mocowanych bezpośrednio w gnieździe wrzeciona. Wszystkie badania przeprowadzono stosując frezy ścinowe o pięciu prostych ostrzach (rys. 1). Średnicę freza nowego wynoszącą 11 mm przyjęto kierując się kształtem oprawy okularowej. Optymalną geometrię ostrzy freza ustalono na podstawie przeprowadzonych badań zamieszczonych w dalszej części pracy. Frezy sporządzono ze stali narzędziowej NE000110. Po mechanicznej obróbce zahartowano je z temperatury 770° w wodzie. Do właściwych badań użyto tylko tych frezów, które wykazały w okolicy ostrzy twardość nie mniejszą niż 64 H_{RC} .



Rys. 1. Frez palcowy użyty do badań

Frezy ostrzono w kłach na szlifierce narzędziowej, stosując ściernice garnkowe o wąskim obrzeżu i ziarnie 60. Celem uniknięcia odpuszczenia powierzchni stosowano podczas szlifowania obfite chłodzenie oraz głębokości szlifowania (dla jednego przejścia) nie większe niż 0,02 mm. Po szlifowaniu doglądano powierzchnie przyłożenia dodatkowo ośką korundową o ziarnie 400. Sprawdzanie wartości kątów natarcia i przyłożenia dla frezów używanych do badania wpływu tych kątów na trwałość ostrzy przeprowadzano na mikroskopie warsztatowym. Dla pozostałych badań nie przeprowadzano kontroli kątów na mikroskopie, ograniczając się jedynie do starannej kontroli ustawienia freza w czasie ostrzenia, co, jak stwierdzono, zapewniało uzyskanie żądanych kątów z błędem nie przekraczającym $\pm 1/2^\circ$.

4. Obrabiarka i sposób przeprowadzania skrawań

Z uwagi na brak frezarki o odpowiednio wysokich szybkościach obrotowych wrzeciona oraz odpowiednich posuwach badania przeprowadzono przy użyciu strugarki wzdłużnej po uprzednim przystosowaniu jej do tego celu (rys. 2). Dla uzyskania niezbędnej regulacji posuwów zastąpiono tutaj silnik elektryczny napędzający stół strugarki agregatem hydraulicznym typu Sturm, oznaczonym na rysunku literą A. Dzięki te-

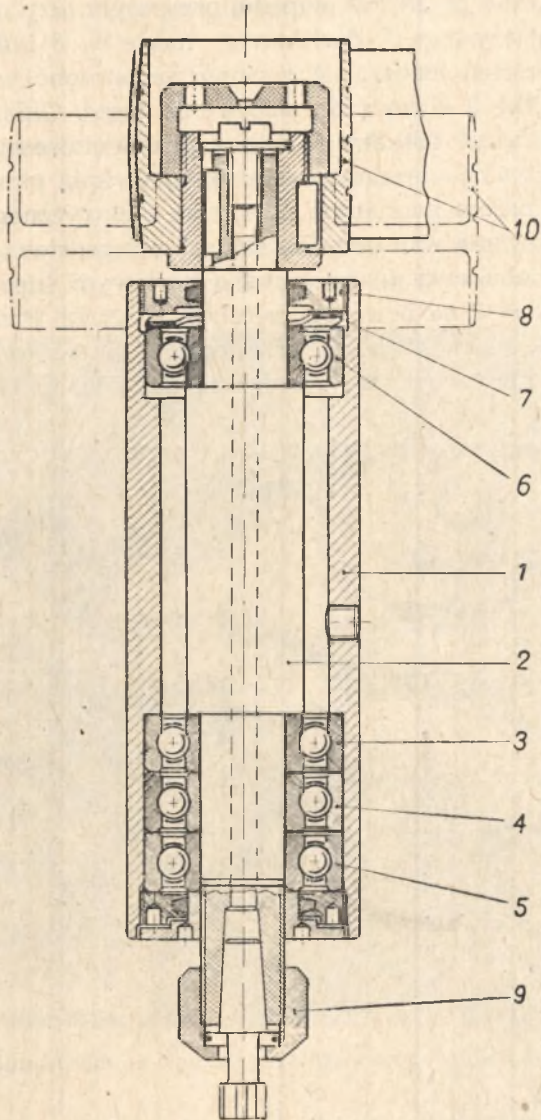


Rys. 2. Strugarka wzdłużna zastosowana do badań nad frezowaniem celuloidu

mu uzyskano bezstopniową regulację posuwów minutowych stołu w granicach od 0,15 do 8 m/min. Celem ułatwienia nastawiania żądanych posuwów sporządzono pomocnicze wykresy podające obroty silnika hydraulicznego wspomnianego agregatu w zależności od posuwu minutowego stołu.

Wrzeciono frezarskie zbudowano specjalnie, przystosowując je do pracy z dużymi szybkościami obrotowymi. Biorąc pod uwagę materiał freza oraz jego wymiary postanowiono badania przeprowadzić w zakresie szybkości skrawania nie przekraczających 260 m/min. Jako dolną

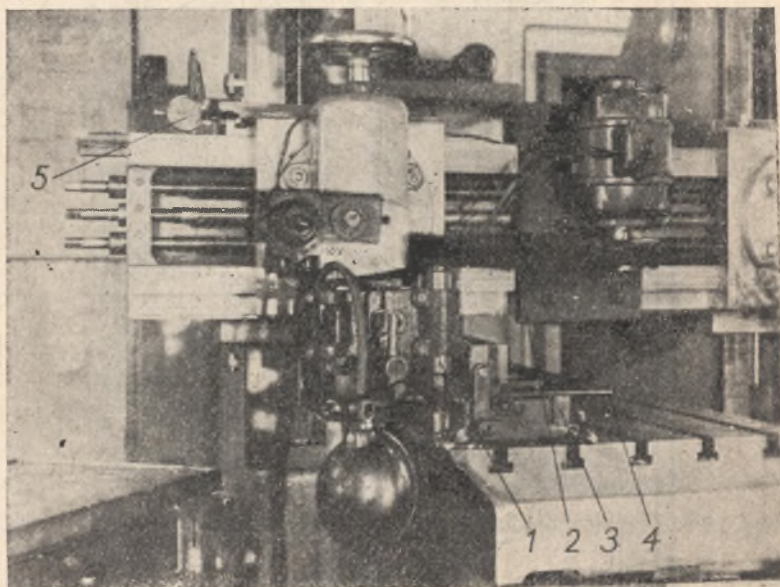
granicę szybkości przyjęto 80 m/min. Podanemu zakresowi szybkości przy założonej średnicy freza odpowiadają mniej więcej szybkości obrotowe wrzeciona od 2300 do 8000 obr/min. Przy takich prędkościach obrotowych



Rys. 3. Ułożyskowanie wrzeciona frezarskiego

wrzeciono frezarskie musi być odpowiednio ułożyskowane, w związku z czym przy jego konstruowaniu wzorowano się na wysokoobrotowych wrzecionach szlifierek do otworów.

Wrzeciono przedstawione na rysunku 3 zostało umieszczone od strony narzędzia na trzech łożyskach kulkowych 3, 4, 5, osadzonych jedno za drugim i skręconych na wrzecionie 2 oraz w obudowie 1. Podobne łożysko 6 wbudowano po stronie napędu, przy czym luzy usunięto za pomocą pierścienia sprężystego 7 dociskanego nakrętką 8 i działającego na zewnętrzny pierścień łożyska. Wrzeciono zaopatrzone w gniazdo stożkowe oraz w nakrętkę 9 służącą do mocowania freza. Gniazdo we wrzecionie wykonano starannie tak, aby jego bicie promieniowe nie przekraczało 5μ . Na końcu wrzeciona umieszczano wymienne koła pasowe 10, napędzane gumowanym pasem parcianym od silnika elektrycznego o mocy 0,8 kW. Sposób wbudowania wrzeciona na strugarce przedstawia rysunek 4. Wrzeciono wraz z obudową 1 zamocowano na lewym suporcie, silnik zaś na specjalnej płycie 2 na belce poprzecznej strugarki. Przez dobór wymienionych pięciu kół pasowych na wrzecionie i silniku uzyskiwano 14 szybkości obrotowych wrzeciona w zakresie od 2050 do 7900 obr/min.



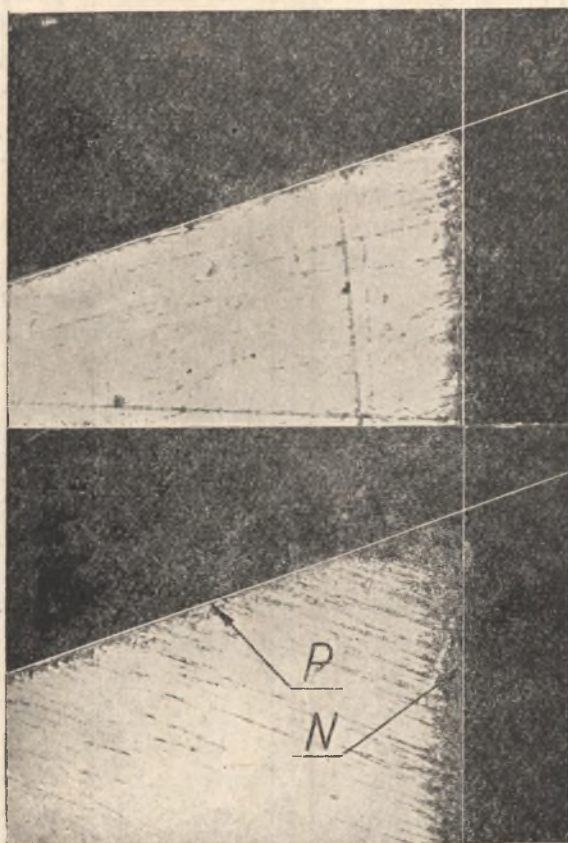
Rys. 4. Napęd wrzeciona frezarskiego oraz uchwyt do mocowania płyt celuloidowych

Celem usprawnienia badań skrawane płyty celuloidu mocowano w specjalnie zbudowanym uchwycie. Uchwyt ten pozwalający na mocowanie płyt o długości około 1500 mm i szerokości 700 mm został zamocowany na stole strugarki (rys. 4). Płyta skrawana 4 była mocowana w uchwycie 3 za pomocą 24 sprężystych docisków. Po przefrezowaniu płyty odmocowywano ją i przesuwno do wysuwających się z uchwytu

zderzaków, uzyskując dzięki temu niezmienną, nastawioną dla danych badań głębokość frezowania. Zmianę głębokości frezowania uzyskiwano przez przesunięcie suportu strugarki wraz z wrzecionem frezarskim. Wielkość przesunięcia odczytywano za pomocą czujnika 5, zamocowanego na belce strugarki.

5. Zmiany geometrii ostrzy przy frezowaniu celuloïdu i sposób przeprowadzania pomiarów

Ostrza freza przy skrawaniu celuloïdu głównie tępią się na powierzchniach przyłożenia, w małym zaś stopniu na powierzchniach natarcia.



Rys. 5. Przekrój ostrego i stępionego ostrza freza. Powiększenie $\times 100$

Rysunek 5 przedstawia w 100-krotnym powiększeniu przekrój nie stępionego ostrza freza o geometrii $\alpha = 20^\circ$ i $\gamma = 0^\circ$ oraz przekrój tego

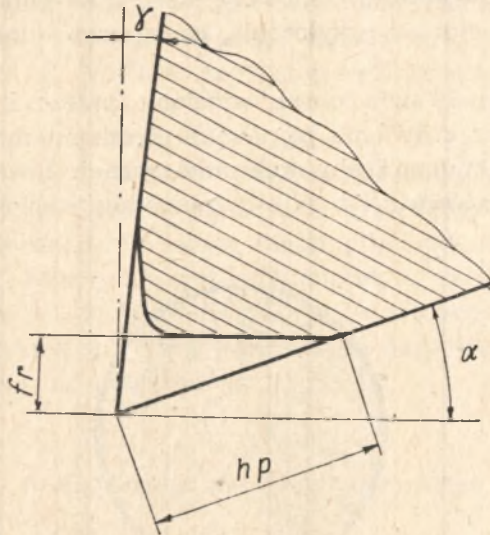
samego ostrza po stopieniu, otrzymany w wyniku frezowania celuloиду przez przeciąg 62 minut z szybkością skrawania $v = 117$ m/min, głębokością frezowania $g = 3$ mm i posuwem $p_z = 0,1$ mm/ostrze. Z rysunku widać, że stopienie ostrza freza objawia się tutaj, podobnie jak przy frezowaniu metali, w postaci paska startego materiału na powierzchni przyłożenia oznaczonej na rysunku literą P . Na powierzchni natarcia oznaczonej na rysunku literą N zachodzi również ścieranie, jednak znacznie mniej intensywne, a objawiające się i tutaj wycieraniem paska wzdłuż krawędzi tnącej. Szerokość tego paska mierzona od pierwotnego położenia krawędzi tnącej osiąga przy tej samej szerokości starcia na powierzchni przyłożenia wartość tym większą, im większy jest posuw i głębokość frezowania. Głębokość omawianego starcia nie jest równomierna w przekroju prostopadłym do krawędzi tnącej. Powierzchnia natarcia wyciera się najgłębiej w okolicy zaokrąglającej się w miarę pracy freza krawędzi tnącej, najmniej zaś na granicy starcia, co niewątpliwie ma związek z rozkładem działających na nią nacisków, które w okolicy ostrza są największe. W wyniku nierównomiernego ścierania się powierzchni natarcia następuje zmniejszanie się wartości kąta natarcia, dobrze widoczne na rysunku 5. W danym wypadku pierwotny kąt natarcia wynoszący 0° uległ na prostoliniowo wytartej części powierzchni natarcia zmniejszeniu do wartości około -10° .

W miarę pracy freza następuje zwiększenie się promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej, podobnie jak przy frezowaniu metali. Z rysunku 5 widać, że pierwotny promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wynoszący około 20μ po 62 minutach pracy zwiększył się do wartości około 40μ . Ścieranie się krawędzi tnącej, powodujące zwiększanie jej promienia zaokrąglenia oraz intensywne ścieranie się powierzchni przyłożenia w okolicy krawędzi tnącej, uzasadnić można koncentracją nacisków na tych powierzchniach. W szczególności zużywanie się ostrza wyłącznie na omawianych powierzchniach występuje na tych odcinkach drogi ostrza, na których na skutek istniejącego zaokrąglenia krawędzi tnącej i zmieniającej się od zera grubości warstwy skrawanej nie zachodzi właściwe skrawanie, a tylko tarcie i odkształcanie powierzchni skrawanej.

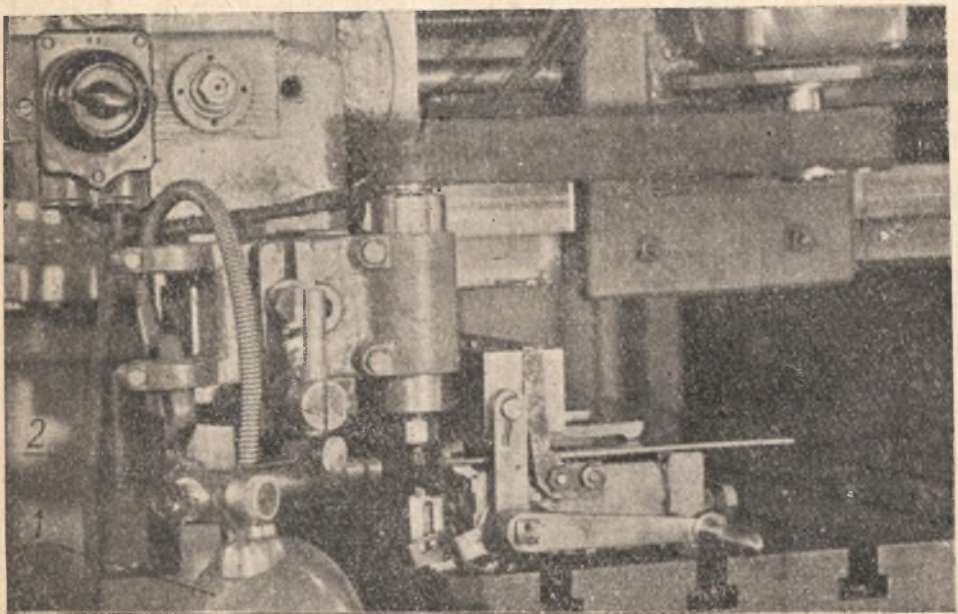
Z rysunku 5 oraz z podanego opisu zużywania się ostrzy przy frezowaniu celuloиду wynika, że największy ubytek materiału ostrza zachodzi od strony powierzchni przyłożenia. Szerokość starcia h_p , mierzona wzdłuż tej powierzchni jako odległość linii ograniczającej pole wytarte od pierwotnego położenia krawędzi tnącej, ulega w czasie pracy freza wyraźnym zmianom, w związku z czym nadaje się do przyjęcia jako parametr tępienia się ostrzy.

Drugim parametrem tępienia posiadającym bezpośrednie znaczenie technologiczne może być starcie promieniowe f_r (rys. 6).

Pomiary parametru h_p przeprowadzano za pomocą mikroskopu o powiększeniu 50-ciokrotnym, zaopatrzonego w okular mikrometryczny i za-



Rys. 6. Parametry tępienia się ostrzy freza

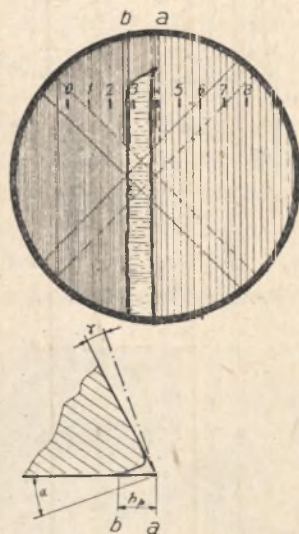


Rys. 7. Mikroskop zastosowany do pomiarów tępienia się ostrzy freza

mocowanego na stałe na suporcie niosącym wrzeciono frezarskie (rys. 7). Dzięki odpowiedniemu umieszczeniu oświetlacza 1 uzyskiwano w polu

widzenia mikroskopu 2 ciemny obraz powierzchni przyłożenia, posiadającej po naostrzeniu równoległe rysy wzdłużne. Miejsca wytarte na skutek rozproszenia światła występowały jako jasne pola ostro odcinające się od reszty powierzchni przyłożenia, co znacznie ułatwiało dokonywanie pomiarów.

Rysunek 8 przedstawia obraz widziany przez okular mikroskopu. Skośny krzyż wraz z dwiema pionowymi kreskami może przesuwac się poziomo pod działaniem śruby mikrometrycznej. Różnica odczytów na skali śruby w położeniu a i b daje bezpośrednio wartość mierzonego pa-



Rys. 8. Obraz widziany przez mikroskop przy pomiarze szerokości starcia na powierzchni przyłożenia

rametru h_p . Stwierdzono, że na skutek niedokładności nastawienia kresok okularu rozbieżność wyników pomiarów dokonywanych na tym samym ostrzu nie przekraczała 5μ . Zauważyć należy, że wspomniana dokładność nastawienia znacznie się tutaj polepsza wraz ze wzrostem kąta przyłożenia ostrzy, gdyż wówczas starte pola wyraźniej i bardziej ostro odgraniczają się od reszty powierzchni przyłożenia.

Pomiary wielkości stępienia freza przeprowadzano co określoną ilość przejść freza wzdłuż całej płyty celulojdu. Każdorazowo dokonywano pomiarów na wszystkich pięciu ostrzach freza, po czym wyliczano wartości średnie.

Za pomocą tego samego mikroskopu sprawdzano bicie freza bezpośrednio po jego zamocowaniu we wrzecionie oraz po stępieniu. Dla takich pomiarów mikroskop przemocowywano tak, aby jego oś zajęła po-

łożenie styczne do obwodu freza po jego prawej stronie, czyli po stronie widoczności powierzchni natarcia. Jako dopuszczalną wartość bicia freza mierzoną bezpośrednio po jego zamocowaniu przyjęto 20μ .

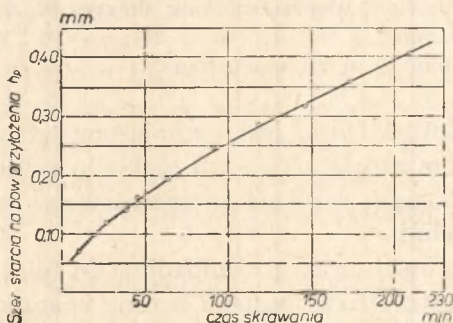
Za pomocą podobnie ustawionego mikroskopu mierzono stępienie promieniowe freza f_r . Wartość tego stępienia można również wyliczać z zależności:

$$f_r = h_p \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Stwierdzono dość dużą zgodność wyników uzyskanych za pomocą podanego wzoru z bezpośrednimi pomiarami przeprowadzonymi na frezie przy użyciu mikroskopu. W szczególności przy większych kątach przyłożenia rzędu 20° oraz większych stępieniach h_p rzędu $0,2 \text{ mm}$ różnice wartości wyliczonych tym wzorem dla poszczególnych ostrzy w stosunku do średnich wartości z pomiarów dokonanych bezpośrednio mikroskopem na danych ostrzach nie przekraczały $\pm 2\%$.

6. Kryterium stępienia ostrzy freza

Szerokość starcia h_p na powierzchni przyłożenia w pierwszym okresie skrawania przyrasta gwałtownie, następnie zaś przyrosty szerokości starcia stają się coraz to mniejsze. Rysunek 9 przedstawia wykres zmian parametru h_p w zależności od czasu pracy freza. Wykres ten został sporządzony na podstawie pomiarów dokonanych przy frezowaniu celuloïdu

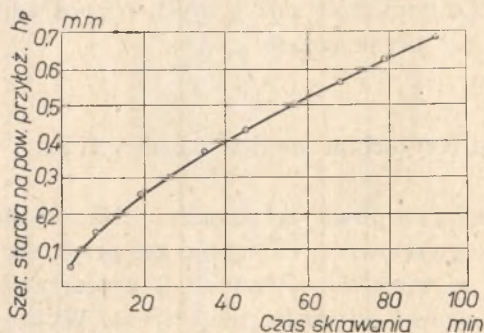


Rys. 9. Zależność szerokości starcia na powierzchni przyłożenia od czasu skrawania
Materiał skrawany: Celuloïd przezroczysty

przezroczystego frezem o konstrukcji przedstawionej na rysunku 1 oraz kątach $\gamma = 0^\circ$ i $\alpha = 20^\circ$. Szybkość skrawania wynosiła przy tym $v = 112 \text{ m/min}$, głębokość $g = 3 \text{ mm}$ oraz posuw $p_z = 0,1 \text{ mm/ostre}$.

Z rysunku 9 widać, że w zakresie zmian parametru h_p do około $0,4 \text{ mm}$ krzywa nie wykazuje przegięcia, a więc występowania okresu

intensywnego zużycia. Podobnie w czasie przeprowadzania badań przy użyciu celuloïdu nieprzeźroczystego nie stwierdzono również występowania przegięcia krzywej w zakresie zmian h_p do 0,7 mm (rys. 10). Ze względu na to, że krzywe zużycia, jak widać, w stosunkowo dużym zakresie stępień są wypukłe i odznaczają się malejącymi przyrostami zużycia w miarę czasu pracy freza, nie może być praktycznie mowy o wyborze jako kryterium stępnienia szerokości starcia o wartości optymalnej lub ekonomicznej¹. Wnioskować natomiast należy, że jako kryterium stępnienia powinno się wybierać możliwie największą szerokość starcia h_p , gdyż wówczas nie tylko wzrastać będzie okres trwałości ostrzy, ale również żywotność freza oraz zmniejszać się będą koszty związane z wymianą i eksploatacją narzędzia. Największe dopuszczalne stępnienie, do jakiego



Rys. 10. Zależność szerokości starcia na powierzchni przyłożenia od czasu skrawania

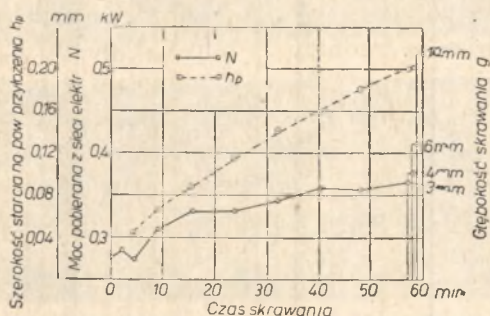
Materiał skrawany: celuloïd nieprzeźroczysty (kryty). Narzędzie: frez ze stali NE000110 o średnicy 10,5 mm i 5 ostrzach; $\alpha = 20^\circ$, $\gamma = 0^\circ$. Warunki skrawania: $v = 213$ m/min, $g = 3$ mm, $p_z = 0,1$ mm/ostrze

można doprowadzać ostrza freza, jest ograniczone wzrostem sił skrawania, niebezpieczeństwem zapalenia się lub rozkładu celuloïdu na powierzchni obrobionej, wielkością stępnienia promieniowego oraz pogorszeniem się gładkości powierzchni.

Wzrost siły posuwowej oraz prostopadłej do niej siły odporowej w miarę tępnienia się ostrzy freza posiada istotne znaczenie przy ręcznym frezowaniu kopiowym, gdy np. kopiał wraz z zamocowaną płytką celuloïdową jest dociskany i przesuwany ręcznie po rolce o odpowiedniej średnicy zamocowanej w osi freza. Przy tego rodzaju frezowaniu robotnik musi wywierać za pomocą kopiału nacisk na rolkę w takim kierunku i o takiej wielkości, aby osiągnąć żądany posuw oraz aby nie dopuścić do odepchnięcia przez frez kopiału od rolki. W miarę tępnienia

¹ Stępnieniu optymalnemu odpowiada maksymalna żywotność narzędzia, stępnieniu ekonomicznemu najniższy koszt operacji.

się ostrzy siła, jaką musi się wywierać na kopiał, wzrasta dochodząc wreszcie do takiej wartości, przy której dalsze wykonywanie pracy w sposób ciągły staje się zbyt męczące. Na podstawie licznych obserwacji poczynionych w jednym z większych śląskich zakładów produkujących oprawy okularowe stwierdzono, że momentowi, w którym robotnicy żądają wymiany frezów przy ręcznym frezowaniu płyt celuloïdowych o grubości 4 mm, z przeciętną głębokością frezowania 3 mm i przeciętnym posuwem na ostrze 0,1 mm, odpowiadają mniej więcej szerokości starcia h_p od 0,08 do 0,1 mm. Taką też wartość starcia można przyjmować dla podanych warunków jako kryterium stępienia przy frezowaniu ręcznym. Jeżeli spojrzeć na wykres (rys. 9), to łatwo zauważyć, że podanej wartości h_p odpowiada zaledwie początek normalnego zużycia ostrzy



Rys. 11. Zmiany zapotrzebowania mocy pobieranej z sieci oraz szerokości starcia na powierzchni przyłożenia w zależności od czasu pracy freza

freza. Nie mówiąc więc o innych ujemnych stronach frezowania ręcznego stwierdzić należy, że przy takim sposobie frezowania nie można również wykorzystać ekonomicznie narzędzia. Przy frezowaniu maszynowym ograniczenie wielkości starcia ze względu na wzrost sił staje się mniej ważne i można go pominąć przy rozważaniach nad wyborem kryterium stępienia.

Na rysunku 11 uwidoczniło wyniki pomiarów zapotrzebowania mocy pobieranej z sieci dla napędu wrzeciona przy frezowaniu płyt celuloïdowych o grubości 4 mm, z posuwem $p_z = 0,1$ mm/ostrze, głębokością $g = 3$ mm i szybkością skrawania $v = 127$ m/min. Na wykresie zaznaczono również zapotrzebowanie mocy przy frezowaniu frezem o stępieniu $h_p = 0,2$ mm oraz przy innych głębokościach frezowania. Widoczny na wykresie wzrost zapotrzebowania mocy w miarę tępienia się freza posiada drugorzędne znaczenie dla wyboru kryterium stępienia. Prowadzi on bowiem jedynie do zwiększenia kosztu energii, który jest i tak nieznaczny w stosunku do pełnego kosztu operacji.

Ze względu na łatwopalność celuloиду można by sądzić, że dopuszczalne stępienie freza jest ograniczone niebezpieczeństwem zapalenia pod wpływem wzrastającej temperatury na skutek rosnącej pracy tarcia w miarę tępienia się freza. W literaturze podawane są dość różne temperatury rozkładu i zapłonu celuloиду. Według badań Mischotte'a [1] temperatura rozkładu celuloиду wynosi około 160 — 175 °C, temperatura zapłonu zaś 188 — 194 °C. Według innych danych rozkład celuloиду może nastąpić przy długim nagrzewaniu nawet w temperaturze około 100 °C [1]. Jak już wspomniano uprzednio, w czasie badań doprowadzano stępienie frezów przy skrawaniu celuloиду przezroczystego do wartości $h_p = 0,4$ a nawet 0,6 mm, zaś przy skrawaniu celuloиду nieprzezroczystego do $h_p = 0,7$ mm. Przy tych dość dużych stępieniach ostrzy frezów i przy różnych warunkach skrawania stwierdzono tylko w jednym wypadku zapalenie się celuloиду. Nastąpiło ono w anormalnych warunkach przy frezowaniu frezem o średnicy 11 mm i stępieniu $h_p = 0,6$ mm oraz przy szybkości skrawania $v = 200$ m/min, posuwie $p_z = 0,2$ mm/ostrze i dużej głębokości frezowania $g = 10$ mm. Zapalenie się celuloidu nie zostało jednak spowodowane tarciem stępionych ostrzy freza, lecz bezpośrednią przyczyną zapalenia było ciepło wywiązujące się na skutek tarcia pomiędzy płytą frezowaną i stopionymi w niekształtną bryłę wiórami oblepiającymi trzonek freza.

Stapianie się wiórów połączone z dymieniem świadczącym o rozkładzie celuloidu występuje również i przy mniejszych stępieniach freza, w szczególności wówczas, gdy skrawanie odbywa się albo z bardzo małymi posuwami, albo też z dużymi głębokościami frezowania. Rysunek 12 przedstawia wióry uzyskane przy różnych warunkach skrawania oraz różnych stopniach stępienia freza. Wszystkie wióry uzyskano w czasie skrawania frezami o konstrukcji podanej na rysunku 1 oraz o kątach natarcia $\gamma = 0^\circ$ i kątach przyłożenia $\alpha = 20^\circ$.

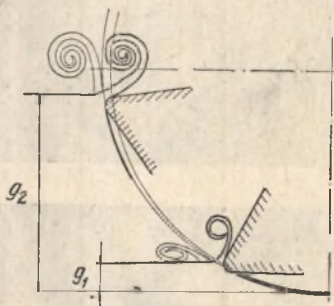
Fotografie zamieszczone w pierwszej kolumnie ilustrują wpływ stopnia stępienia ostrzy na kształt i rodzaj wiórów przy frezowaniu celuloidu ze stałą szybkością $v = 200$ m/min, stałą głębokością frezowania $g = 3$ mm i stałym posuwem $p_z = 0,1$ mm/ostrze. Przy ostrym frezie, gdy $h_p = 0$ mm każdy wiór jest oddzielony i lekko zwinięty. Zauważyć należy, że podobny wygląd posiadają wióry skrawane ostrym frezem również przy innych posuwach i głębokościach frezowania. Przy stępieniu $h_p = 0,1$ mm wióry nie łączą się nadal ze sobą i prawie się nie zwijają. W miarę dalszego zwiększania się stępienia wióry zaczynają łączyć się po dwa lub trzy a nawet więcej razem, przy czym stają się one znowu coraz to bardziej zwinięte. Przy stępieniu $h_p = 0,5$ mm i większych stępieniach wióry łączą się ze sobą po kilkanaście, zwijają się i w tym stanie ulegają dodatkowo sklejeniu. Łączenie się wiórów spowodowane



Rys. 12. Wpływ stopnia stępienia, posuwu oraz głębokości frezowania na kształt i rodzaj wiórów

- | | |
|--|---|
| 1) $h_p = 0$ mm $V = 200$ m/min
$g = 3$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze | 7) $p_z = 0,1$ mm/ostrze $g = 3$ mm
$V = 200$ m/min $h_p = 0,2$ mm |
| 2) $h_p = 0,1$ mm $V = 200$ m/min
$g = 3$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze | 8) $p_z = 0,2$ mm/ostrze $g = 3$ mm
$V = 200$ m/min $h_p = 0,2$ mm |
| 3) $h_p = 0,2$ mm $V = 200$ m/min
$g = 3$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze | 9) $g = 1$ mm $V = 200$ m/min
$h_p = 0,2$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze |
| 4) $h_p = 0,5$ mm $V = 200$ m/min
$g = 3$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze | 10) $g = 3$ mm $V = 200$ m/min
$h_p = 0,2$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze |
| 5) $p_z = 0,02$ mm/ostrze $g = 3$ mm
$V = 200$ m/min $h_p = 0,4$ mm | 11) $g = 6$ mm $V = 200$ m/min
$h_p = 0,2$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze |
| 6) $p_z = 0,05$ mm/ostrze $g = 3$ mm
$V = 200$ m/min $h_p = 0,2$ mm | 12) $g = 10$ mm $V = 200$ m/min
$h_p = 0,2$ mm $p_z = 0,1$ mm/ostrze |

jest tym, że stępione ostrze o większym promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej w momencie wyjścia ostrza z pracy nie może odciąć całkowicie wióra. Przy wyjściu ostrza z pracy następuje odgięcie całego wióra, który w dalszym ciągu jest połączony z powierzchnią obrabianą. Proces ten może prowadzić nie tylko do łączenia się kilku lub kilkunastu wiórów razem, ale również do powstawania całej taśmy łączącej poszczególne wióry. Taśmę taką przedstawia zamieszczone w drugiej kolumnie zdjęcie wiórów uzyskanych przy frezowaniu z małym posuwem $p_z = 0,05$ mm/ostrze.



Rys. 13. Wpływ głębokości frezowania na łatwość odginania się wiórów

Zdjęcia umieszczone w drugiej kolumnie uwidaczniają wpływ wielkości posuwu na kształt i rodzaj wiórów przy tej samej głębokości frezowania $g = 3$ mm. Przy dużym stępieniu $h_p = 0,4$ mm i bardzo małym posuwie $p_z = 0,02$ mm/ostrze wióry posiadają stosunkowo wysoką temperaturę, przyklejają się w rowkach freza, a następnie stapiają się w nieregularne bryły. Przy mniejszym stępieniu $h_p = 0,2$ mm w miarę wzrostu posuwu od 0,05 do 0,2 mm/ostrze wióry łączą się ze sobą w coraz to mniejszym stopniu. W szczególności korzystną formę posiadają wióry tworzące się przy posuwie $p_z = 0,2$ mm/ostrze. W tym wypadku wióry łączą się ze sobą najwyżej po dwa lub trzy razem, są mocno zwinięte bez śladu sklejenia i łatwo są odrzucane przez frez.

Trzecia kolumna zdjęć ilustruje wpływ głębokości frezowania na rodzaj tworzących się wiórów. Przy głębokości $g = 1$ mm, posuwie $p_z = 0,1$ mm/ostrze i stępieniu $h_p = 0,2$ mm wióry są rozwinięte i pierzaste oraz łączą się ze sobą najwyżej po kilka razem. W miarę wzrostu głębokości frezowania wióry zaczynają łączyć się ze sobą w coraz to większej ilości i stają się coraz to bardziej zwinięte. Wzrost tendencji do łączenia się wiórów w miarę zwiększania się głębokości frezowania, mimo początkowo zwiększającej się przy tym grubości warstwy skrawanej przy wyjściu ostrza z pracy, można łatwo wyjaśnić różnymi warunkami odginania wióra. Z rysunku 13 widać, że wiór może być znacznie łatwiej

odgięty od przedmiotu frezowanego przy dużej głębokości frezowania niż przy głębokości małej i tej samej średnicy freza. Przy głębokości frezowania $g = 6$ mm wióry po zwinięciu ulegają dodatkowo sklejeniu. Przy stosunkowo bardzo dużej głębokości frezowania $g = 10$ mm długie wióry nie łączą się ze sobą, zwijają się nieregularnie w rowkach wiórowych, pozostają w nich, a następnie stapiają się i odpływają na boki wzdłuż rowków freza w postaci bezkształtnej masy. Zauważyć należy, że opisane stapianie się wiórów występuje dopiero po pewnym czasie od chwili rozpoczęcia pracy stępionym frezem. Przyczyną więc stapiania się wiórów przy większych głębokościach frezowania jest podwyższona temperatura freza intensywnie nagrzewającego się w czasie pracy.

W czasie badań stwierdzono, że zmiany szybkości skrawania w granicach od 100 do 250 m/min nie wpływają prawie zupełnie na kształt i rodzaj wiórów.

Z podanego opisu rodzaju i kształtów wiórów w zależności od warunków skrawania i stopnia stępienia freza wynika, że przy wyborze kryterium stępienia należy również mieć na uwadze rodzaj tworzących się wiórów. W szczególności przy frezowaniu z małymi posuwami rzędu 0,05 mm/ostre nie można dopuszczać do stępień ostrzy freza większych niż około 0,1 mm ze względu na niebezpieczeństwo powstawania trudnych do usuwania wiórów w postaci taśmy. Podobnie dopuszczalne stępienie ostrzy freza nie może być zbyt duże przy frezowaniu z dużymi głębokościami frezem o małych wymiarach. W tym wypadku bowiem zachodzi niebezpieczeństwo dużego nagrzewania się freza, co pociąga za sobą stapianie się wiórów. Na przykład w wypadku frezowania z posuwem 0,1 mm/ostre frezem o średnicy 11 mm stwierdzono, że przy głębokościach frezowania 8 mm niebezpieczeństwo stapiania się wiórów występuje już przy stępieniu ostrzy freza $h_p > 0,2$ mm. Omawiane niebezpieczeństwo zwiększa się w szczególności wówczas, gdy przy dużych głębokościach frezowania stosuje się bardzo małe posuwy.

W warunkach nastawionej operacji frezowania kopiowego istotne dla wyboru kryterium stępienia może okazać się stępienie promieniowe freza f_r . W tym wypadku bowiem zamocowany we wrzecionie naostrzony frez powinien po nastawieniu kopiarki pracować do momentu przyjętego jako kryterium stępienia bez dalszych nastawień. W pasie tolerancji przedmiotu powinno się zatem zmieścić stępienie promieniowe freza oraz błędy nastawienia freza po jego wymianie jak również inne błędy obróbki. Jeśli na przykład przyjąć, że szerokość pasa tolerancji frezowanego przedmiotu wynosi 0,15 mm oraz że suma błędów nastawienia freza i innych błędów obróbki wynosi połowę tej wartości, to na stępienie promieniowe freza pozostaje $f_r = 0,075$ mm. Takiemu stępieniu przy fre-

zie o kątach $\gamma = 0^\circ$ i $\alpha = 20^\circ$ odpowiada obliczona ze wzoru (1) szerokość starcia na powierzchni przyłożenia $h_p = 0,22$ mm i taką wartość należałoby przyjąć jako kryterium stępienia.

Przy frezowaniu celuloиду może być również miarodajna dla wyboru kryterium stępienia gładkość powierzchni¹.

7. Optymalna geometria freza do kopiowego frezowania celuloиду

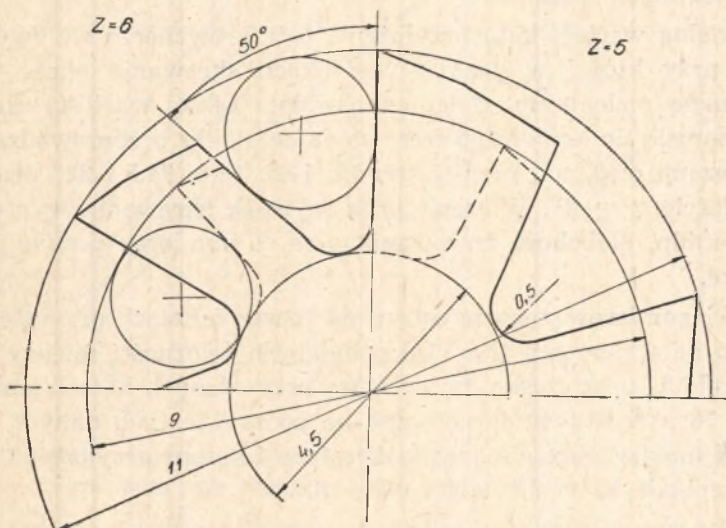
Przez optymalną geometrię narzędzia rozumie się taką geometrię, przy której narzędzie wykazuje maksymalną trwałość, dobrze formuje i odprowadza wióry oraz daje małe siły skrawania. Dla frezów przeznaczonych do maszynowego kopiowego frezowania celuloиду podstawowe znaczenie posiadają pierwsze dwa warunki, to jest maksymalna trwałość freza oraz odpowiedni kształt i wielkość rowków wiórowych. Ostatni warunek, a zatem zapewnienie małych sił skrawania może mieć większe znaczenie jedynie w odniesieniu do frezów przeznaczonych do ręcznego frezowania.

Przy frezowaniu kopiowym celuloиду można stosować stosunkowo duże posuwy na ostrze, co przy większych głębokościach frezowania daje znaczne objętości wiórów skrawanych przez poszczególne ostrza. Te wióry o dużych objętościach powinny się swobodnie zwiijać i mieścić w rowkach wiórowych. Wymiary i kształt rowków wiórowych freza należy oczywiście dobierać dla najgorszych warunków, w jakich frez ma pracować, a więc dla największej głębokości frezowania i największego posuwu. Doboru rowków wiórowych można dokonać na podstawie obserwacji skrawania we wspomnianych najgorszych warunkach przy różnych wymiarach i kształtach rowków. Takim też sposobem ustalono minimalny rowek dla freza ścinowego przeznaczonego do kopiowego frezowania opraw okularowych przy założeniu, że największa głębokość frezowania wynosi tutaj $g = 8$ mm przy posuwie $p_z = 0,1$ mm/ostrze. Wymiary oraz kształt rowka omawianego freza przedstawia rysunek 14. Średnicę nowego freza (11 mm) założono, jak już wspomniano uprzednio, ze względu na kształt przedmiotu frezowanego. Różnicę pomiędzy średnicą freza nowego i freza zaostzonego wynoszącą 2 mm przyjęto ze względu na nastawianie kopiarki.

Doboru wymiarów rowków wiórowych można by również dokonać w oparciu o znajomość wartości współczynnika podającego stosunek powierzchni koła, jakie można wpisać w minimalny niezbędny rowek wiórowy do powierzchni warstwy skrawanej przez jedno ostrze, wyli-

¹ Zobacz gładkość powierzchni przy frezowaniu celuloиду.

czanej jako iloczyn głębokości frezowania g i posuwu p_z . Wyjście z powierzchni koła wpisanego w rowek wiórowy, a nie z powierzchni przekroju rowka jest uzasadnione ze względu na to, że jak wynika z uprzednio podanego opisu wiórów oraz z rysunku 12, przy większych głębokościach frezowania i większych posuwach wióry formują się w postaci ciasno zwiniętych, a nawet częściowo sklejonych rolek o przekroju kołowym. Formę taką posiadają wióry w szczególności przy większych stępieniach ostrzy freza, a więc w warunkach sprzyjających ze względu na



Rys. 14. Kształt i wymiary rowków wiórowych freza

wzrost temperatury zakleszczaniu się wiórów w rowkach. Na podstawie przeprowadzonych prób przy różnych głębokościach frezowania i posuwach stwierdzono, że wióry dobrze formują się w rowkach freza i dobrze są z nich odprowadzane, gdy wartość wspomnianego współczynnika wynosi około 5. Podaną wartość należy jednak traktować jako wartość orientacyjną, gdyż systematycznych badań w celu wyznaczenia wartości omawianego współczynnika nie przeprowadzono. Na rysunku 14 wrysowano w rowki freza koła o powierzchniach odpowiadających takiej właśnie wartości współczynnika oraz założonej głębokości frezowania $g = 8$ mm i założonemu posuwowi $p_z = 0,1$ mm/ostrze.

Po założeniu średnicy i dobraniu kształtu i wielkości rowków wiórowych można przystąpić do ustalenia ilości ostrzy freza. Powinna ona być, w szczególności dla freza o ostrzach prostych, możliwie duża ze względu na równomierność sił przy frezowaniu. Równocześnie liczba ostrzy powinna być tak dobrana, aby ostrza nie były zbyt cienkie i aby

posiadały odpowiedni zapas na ostrzenie od strony powierzchni natarcia. Minimalną grubość zeszlifowanych ostrzy wobec małej ich wysokości można przyjmować o wartości od 0,5 do 1 mm. Na rysunku 14 wkreślono zarysy ostrzy ścinowych o kątach $\gamma = 0^\circ$ i $\alpha = 20^\circ$ dla freza o pięciu i sześciu ostrzach. Z porównania obu zarysów wynika, że odpowiedniejsza ilość ostrzy dla danego freza wynosi 5. Taką samą ilość ostrzy ustalono dla freza zataczanego, posiadającego nieco większą żywotność od freza ścinowego oraz wymagającego stosunkowo prostego ostrzenia tylko na powierzchniach natarcia.

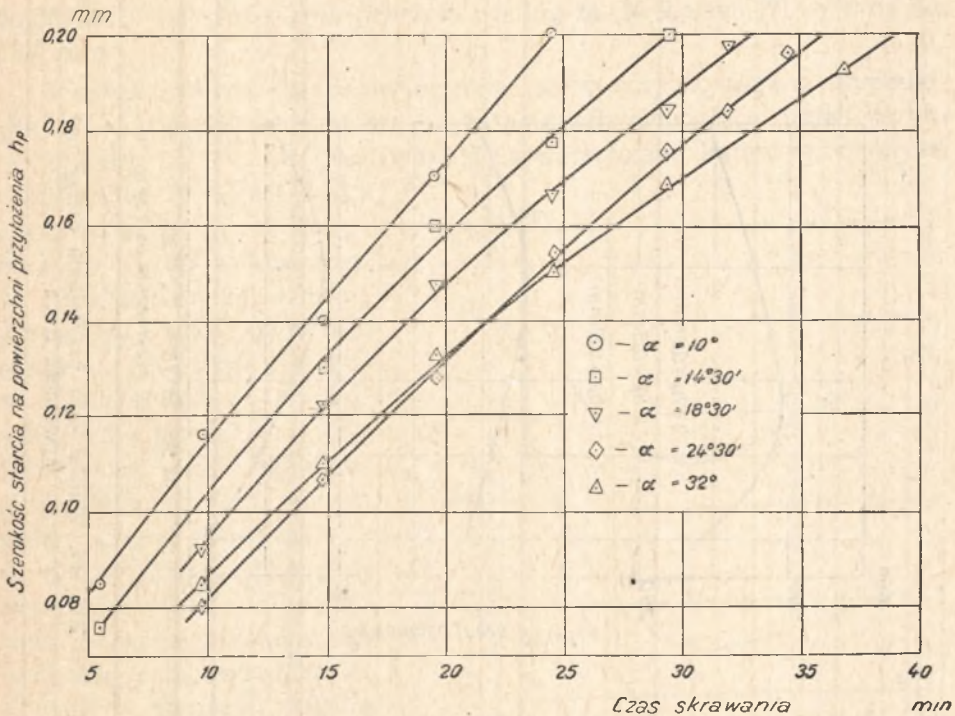
Optymalną wartość kąta przyłożenia ostrzy wyznacza się zwykle jako wartość, przy której w danych warunkach skrawania okres trwałości ostrzy osiąga maksimum. Celem znalezienia takiej wartości dla frezów przeznaczonych do kopiowego frezowania celulozoidu przeprowadzono skrawania frezami o kątach przyłożenia 10; 14,5; 18,5; 24,5 i 32° oraz stałym kącie natarcia $\gamma = 0^\circ$. W czasie prób szybkość skrawania wynosiła $v = 193$ m/min, głębokość frezowania $g = 3$ mm oraz posuw $p_z = 0,1$ mm/ostrze.

Wyniki pomiarów zużycia ostrzy na powierzchniach przyłożenia uwidoczniono na wykresach (rys. 15) podających zależności między parametrem starcia h_p oraz czasem pracy freza przy różnych kątach przyłożenia. Rysunek 16 przedstawia opracowane na podstawie tych danych wykresy zależności między okresem trwałości ostrzy i kątem przyłożenia dla kryteriów stępienia $h_p = 0,1, 0,15$ i $0,2$ mm.

Z wykresów tych można sądzić, że wartość optymalnego kąta przyłożenia określona wskaźnikiem trwałości ostrzy nie jest stała, lecz zwiększa się wraz z wartością szerokości starcia przyjmowanego jako kryterium stępienia. Przy kryterium $h_p = 0,1$ mm optymalny kąt przyłożenia wynosi około 27° , przy $h_p = 0,15$ mm około 29° , zaś przy $h_p = 0,2$ mm powyżej 30° ¹. Zauważyć tu należy, że optymalne wartości kątów przyłożenia mogą wypaść inne przy innych warunkach skrawania, a w szczególności przy innym posuwie i głębokości frezowania, podobnie jak to ma miejsce przy frezowaniu stali i żeliwa [7]. Z wykresów widać, że zmniejszenie kąta przyłożenia poniżej wartości optymalnej powoduje zmniejszenie trwałości ostrzy, które np. przy trzykrotnym zmniejszeniu kąta wynosi około 35 — 45% w zależności od zużycia przyjętego jako kryterium stępienia.

Przyjmowanie podanych wartości optymalnych kątów przyłożenia, mimo odpowiadających im największych okresów trwałości ostrzy, nie zawsze jest słuszne. Może się bowiem okazać, że optymalny kąt przyło-

¹ Dokładnej wartości kąta przy $h_p = 0,2$ mm nie wyznaczono ze względu na niemożność zaszlifowania na stosowanym frezie o pięciu ostrzach większych kątów przyłożenia od 36° .



Rys. 15. Zależność między szerokością starcia na powierzchni przyłożenia i czasem skrawania przy różnych kątach przyłożenia ostrzy freza

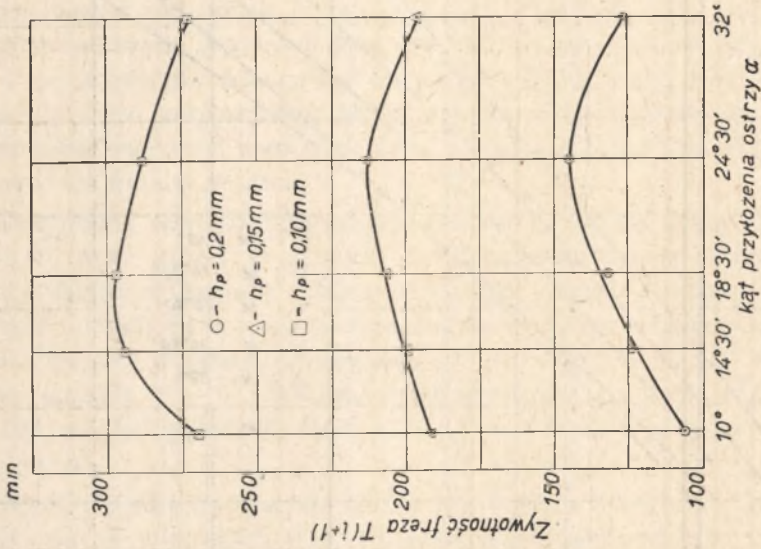
zenia, określony wskaźnikiem żywotności freza lub co ważniejsze wskaźnikiem kosztu operacji, posiada inną wartość. Mając to na uwadze oraz rozpatrując konkretne zagadnienie frezowania kopiowego celuloidowych opraw okularowych, przeprowadzono dla freza o ustalonej konstrukcji analizę jego żywotności oraz analizę kosztów narzędziowych przypadających na operację w zależności od kąta przyłożenia.

Rysunek 17 przedstawia wykresy wyników analizy żywotności freza ścinowego o kątach natarcia $\gamma = 0^\circ$. Wykresy zostały opracowane na podstawie krzywych widocznych na rysunku 15 przy założeniu, że promieniowy zapas na ostrzenie freza $Z_r = 1$ mm. Żywotność freza wyliczono z wzoru:

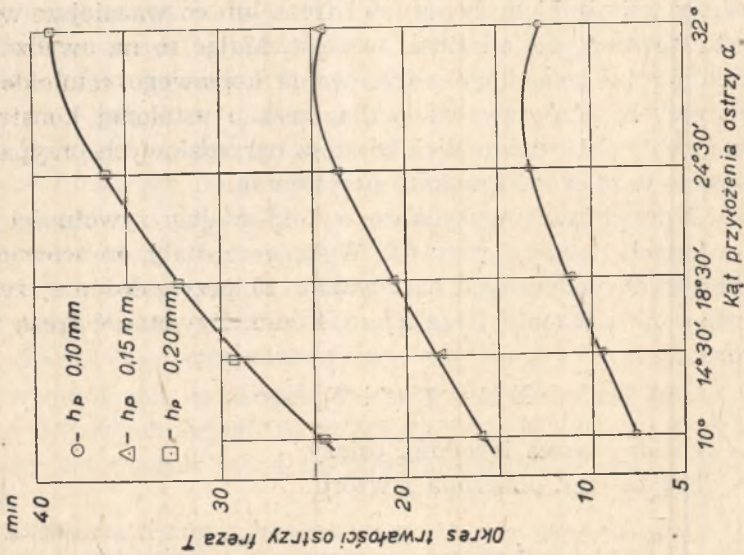
$$\Sigma T = T(i + 1), \quad (2)$$

gdzie: T — aktualny okres trwałości ostrzy
 i — ilość ostrzy obliczona z wzoru:

$$i = \frac{Z_r}{h_p \cdot \sin \alpha + \Delta}. \quad (3)$$



Rys. 17. Wpływ kąta przyłożenia ostrzy na żywotność freza



Rys. 16. Zależność okresu trwałości ostrzy od kąta przyłożenia przy różnych zużyciach ostrzy, przyjmowanych jako kryterium stopienia

Naddatek Δ na szlifowanie przyjęto według M. N. Łarina [7] o wartości 0,06 mm.

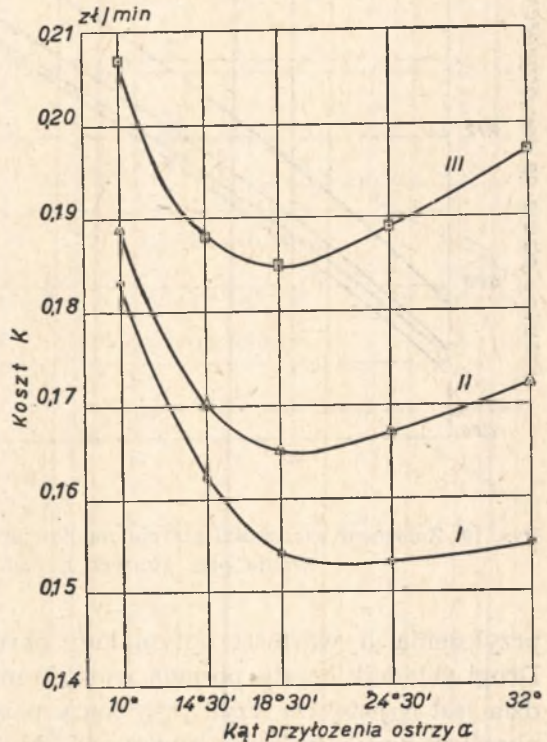
Z przytoczonych wykresów wynika, że w rozpatrywanym wypadku wartości optymalnych kątów przyłożenia odpowiadające największym żywotnościom freza nie pokrywają się z wartościami kątów określonymi wskaźnikiem trwałości ostrzy i wahają się w granicach od około 25° do 18° w zależności od dopuszczalnego zużycia przyjętego jako kryterium stępienia. Na uwagę zasługuje również fakt, że zmniejszenie kąta przyłożenia poniżej wartości optymalnej określonej wskaźnikiem żywotności freza prowadzi na skutek zwiększającej się przy tym ilości ostrzy do procentowo mniejszego spadku żywotności freza, niż miało to miejsce w wypadku trwałości ostrzy.

Najbardziej obiektywną wskazówkę co do wyboru optymalnego kąta przyłożenia może dać analiza wpływu kąta przyłożenia na koszt wymiany i użytkowania narzędzia, przypadający na jednostkę (minutę) czasu skrawania. Koszt ten można przedstawić wzorem:

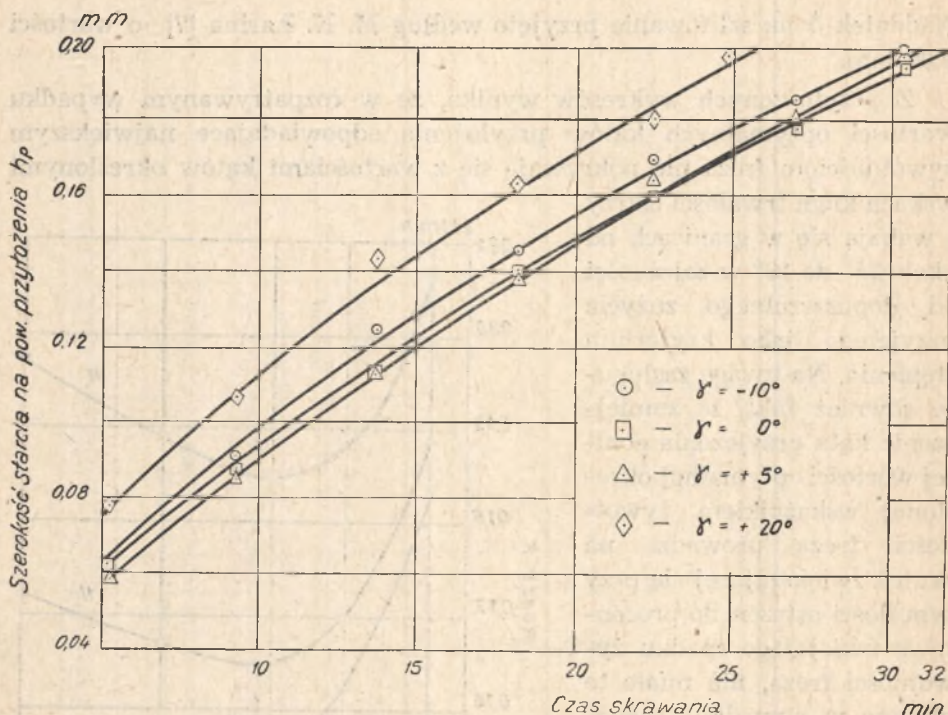
$$K = \frac{K_w + K_{sz}}{T} + \frac{K_{nn}}{T(i + 1)} \quad [\text{zł}/\text{min}], \quad (4)$$

gdzie: K_w — koszt wymiany stępionego narzędzia w zł,
 K_{sz} — koszt jednego ostrzenia narzędzia w zł,
 K_{nn} — koszt nowego naostrzonego narzędzia w zł,
 T — aktualny okres trwałości ostrzy w min.,
 i — ilość możliwych ostrzy.

Z przytoczonego wzoru widać, że pierwszy składnik kosztu osiąga swe minimum, gdy okres trwałości ostrzy jest największy, zatem przy kącie



Rys. 18. Wpływ kąta przyłożenia na koszt wymiany i użytkowania freza przypadający na jedną minutę czasu skrawania



Rys. 19. Zależność szerokości starcia na powierzchniach przyłożenia od czasu skrawania przy różnych kątach natarcia ostrzy

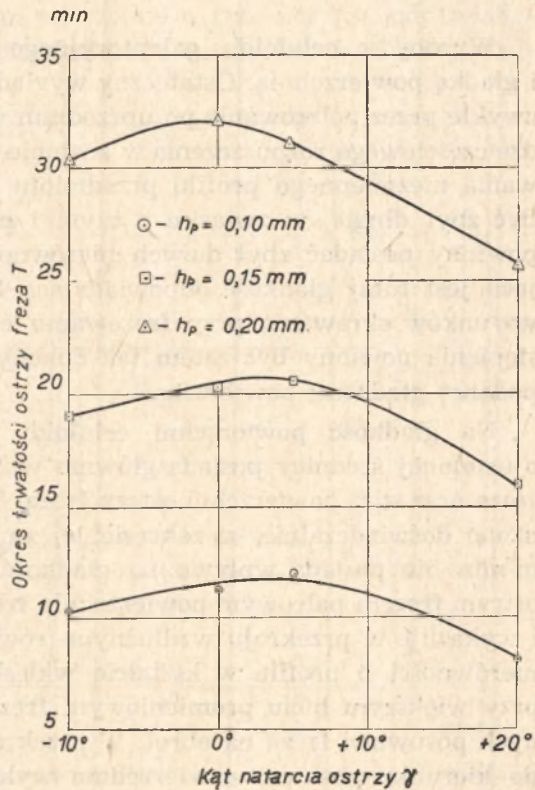
przyłożenia o wartości optymalnej określonej wskaźnikiem trwałości. Drugi składnik kosztu posiada wartość minimalną, gdy żywotność narzędzia jest największa, czyli przy kącie przyłożenia o wartości optymalnej, określonej wskaźnikiem żywotności. Można wnioskować, że optymalny kąt przyłożenia odpowiadający najmniejszej wartości sumy obu składników kosztu posiada wartość pośrednią między kątem określonym wskaźnikiem trwałości ostrzy a kątem określonym wskaźnikiem żywotności narzędzia. To, czy wartość optymalnego kąta przyłożenia określona wskaźnikiem minimum kosztu zbliżyć się będzie bardziej lub mniej do wartości kąta określonego wskaźnikiem żywotności narzędzia, zależy od wartości stosunku kosztu nowego narzędzia do sumy kosztów jego wymiany i ostrzenia, czyli od stosunku:

$$A = \frac{K_{nn}}{K_w + K_{sz}} \quad (5)$$

Im stosunek ten jest większy, tym bardziej wartość optymalnego kąta przyłożenia określona wskaźnikiem kosztów zbliżyć się będzie do wartości określonej wskaźnikiem żywotności narzędzia.

Rysunek 18 przedstawia wpływ kąta przyłożenia na koszt wymiany i użytkowania freza, przypadający na minutę czasu skrawania dla freza przeznaczonego do frezowania opraw okularowych. Na wykresie uwidoczono trzy krzywe kosztów, odpowiadające temu samemu kryterium stępienia $h_p = 0,2$ mm. Krzywe I, II i III odpowiadają kolejno wartościom $A = 17$, $A = 40$ i $A = 92$, czyli coraz to niższym kosztom wymiany i ostrzenia freza w stosunku do kosztu freza nowego. Z wykresów widać że dla danego freza przy kryterium stępienia $h_p = 0,2$ mm i przy zastosowanych warunkach skrawania celowe jest przyjęcie optymalnego kąta przyłożenia o przeciętnej wartości $\alpha = 20^\circ$. Taką też wartość optymalnego kąta przyłożenia przyjęto dla dalszych badań nad frezowaniem celuloidu.

Optymalną wartość kąta natarcia ostrzy można ustalić jako wartość, przy której okres trwałości ostrzy osiąga maksimum. Celem wyznaczenia takiej wartości dla freza przeznaczonego do kopiowego frezowania opraw okularowych przeprowadzono skrawania frezami o ustalonej uprzednio konstrukcji, posiadającymi stałe kąty przyłożenia wynoszące $\alpha = 20^\circ$ oraz zmienne kąty natarcia wynoszące $-10^\circ, 0^\circ, +5^\circ$ i $+20^\circ$. W czasie badań szybkość skrawania wynosiła $V = 190$ m/min, głębokość frezowania $g = 3$ mm oraz posuw $p_z = 0,1$ mm/ostrze. Wyniki pomiarów zużycia ostrzy na powierzchniach przyłożenia w zależności od czasu frezowania dla różnych kątów natarcia przedstawia rysunek 19. Na rysunku 20 uwidoczniiono opracowane na podstawie tych pomiarów wykresy podające zależność między okresem trwałości ostrzy i kątem natarcia dla kryterium stępienia $h_p = 0,1$ mm, $h_p = 0,15$ mm, i $h_p = 0,2$ mm. Z wykresów widać, że optymalny kąt natarcia



Rys. 20. Zależność okresu trwałości ostrzy od kąta natarcia przy różnych zużyciach ostrzy, przyjmowanych jako kryterium stępienia

waha się tutaj w granicach od 0 do 3°, w związku z czym dalsze badania nad frezowaniem celuloиду przeprowadzono frezami o kątach natarcia $\gamma = 0^\circ$.

8. Gładkość powierzchni przy frezowaniu celuloиду

Wyroby z celuloиду galanteryjnego powinny odznaczać się ładną i gładką powierzchnią. Ostateczny wygląd powierzchni uzyskuje się tutaj zwykle przez polerowanie po uprzednim wyrównaniu powierzchni w drodze częściowego rozpuszczenia w acetonie. Ze względu na warunek zachowania niezmiennego profilu przedmiotu działanie acetonu nie powinno być zbyt długie, w związku z czym i powierzchnie po frezowaniu nie powinny posiadać zbyt dużych nierówności. Okazuje się, że wystarczająca jest tutaj gładkość odpowiadająca klasie 5 ewentualnie 4. Wybór warunków skrawania przy frezowaniu celuloиду oraz wybór kryterium stopienia powinny być zatem tak dokonywane, aby zapewnić uzyskanie podanej gładkości powierzchni.

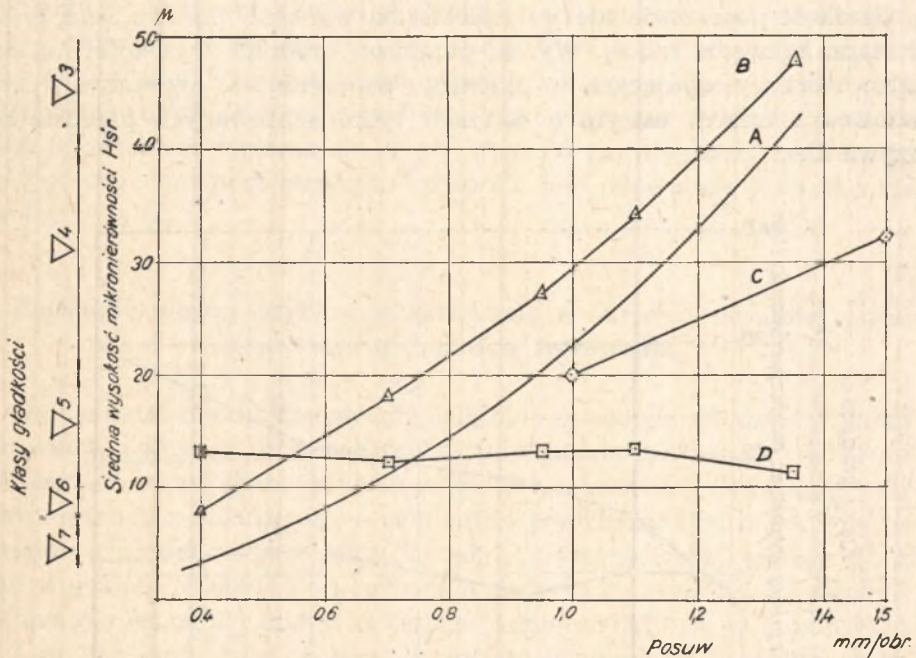
Na gładkość powierzchni celuloиду frezowanej frezem palcowym o ustalonej średnicy posiada głównie wpływ posuw i bicie promieniowe freza oraz stan powierzchni ostrzy freza. Szybkość skrawania, jak stwierdzono doświadczalnie, w zakresie jej zmian w granicach od 100 do 250 m/min nie posiada wpływu na gładkość powierzchni. Przy frezowaniu ostrym frezem palcowym powierzchnia frezowana odznacza się połyskiem i wykazuje w przekroju wzdłużnym (równoległym do kierunku posuwu) nierówności o profilu w kształcie wklęsłych łuków powtarzających się przy większym biciu promieniowym freza regularnie w odstępach równych posuwowi freza na obrót. W przekroju poprzecznym (prostopadłym do kierunku posuwu) powierzchnia wykazuje mikronierówności o nieregularnym profilu oraz o wysokościach zależnych od stanu powierzchni ostrzy freza.

Rysunek 21 przedstawia wyniki pomiarów gładkości powierzchni określonej średnią wysokością mikronierówności H_{sr} w zależności od posuwu freza na obrót p_o . Wykres opracowano na podstawie danych uzyskanych przy frezowaniu celuloиду przezroczystego ostrym pięciozębnym frezem o średnicy 11 mm i ustalonej uprzednio optymalnej geometrii. Pomiaru średniej wysokości mikronierówności przeprowadzono na podwójnym mikroskopie MIS — 11 W. Linnika. Na wykresie uwidoczono linie rozgraniczające klasy gładkości zgodnie z normą PN/M — 04251 oraz wykreślono krzywą A przedstawiającą teoretyczną zależność między wysokością mikronierówności a posuwem i średnią freza według wzoru;

$$H_{sr} = \frac{250 \cdot p_o^2}{d_{fr}} (\mu), \quad (6)$$

gdzie: p_o — posuw w mm/obrót,
 d_{fr} — średnica freza w mm.

Z wykresu widać, że przy ostrym frezie o średnicy 11 mm i dużym biciu promieniowym, wynoszącym 40μ (krzywa B) można uzyskać w zakresie posuwu od 0,5 do 1,5 mm/obr. powierzchnie o gładkościach, odpowiadających klasom od 5 do 3. Charakter zmian rzeczywistej wzdłużnej gład-



Rys. 21. Wpływ posuwu na średnią wysokość mikronierówności przy frezowaniu celuloиду frezem palcowym;

średnica freza $d_{fr} = 11$ mm. Warunki skrawania: $v = 120$ m/min, $g = 3$ mm

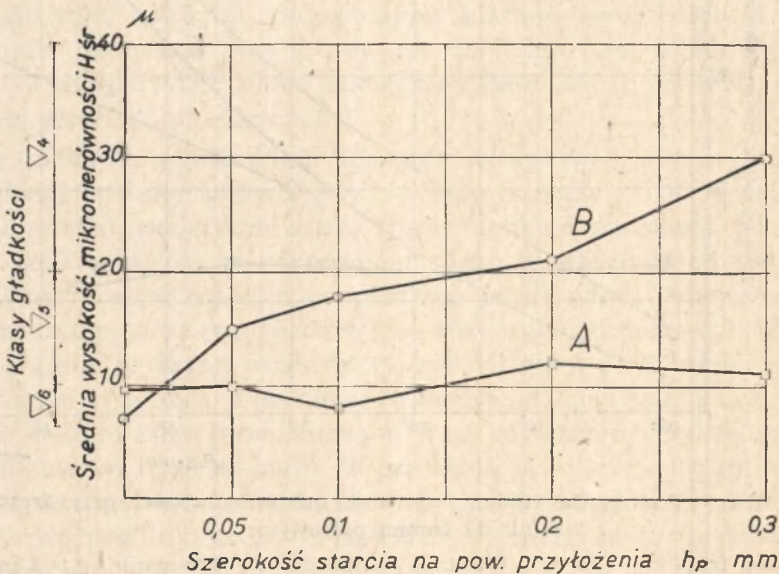
kości powierzchni w zależności od posuwu odpowiada w zasadzie krzywej teoretycznej. Otrzymane jednak w drodze pomiaru punkty krzywej B w stosunku do krzywej A są przesunięte w kierunku wyższych nierówności o 4 do 7μ . To dość równomierne przesunięcie powoduje, że procentowe odstępstwa pomiarowych wysokości mikronierówności w stosunku do teoretycznych są większe przy małych posuwach i mniejsze przy posuwach większych. W związku z tym wielkość rzeczywista H_{sr} jest proporcjonalna nie do p_o w potęgze drugiej, jak to wynika z wzoru teoretycznego (6), lecz do posuwu w potęgze niższej, wynoszącej około 1,5.

Zależność między rzeczywistą wysokością mikronierówności i posuwem, przedstawioną na wykresie krzywą B, można ująć wzorem:

$$H_{\text{sr}} = 30 p_0^{1,5} [\mu]. \quad (7)$$

Przy małym biciu promieniowym freza oraz przy odpowiednio dużych posuwach można uzyskać oczywiście niższe mikronierówności od mikronierówności wyliczonych wzorami (6) i (7). Wypadek taki przedstawia krzywa C uzyskana przy frezie o małym biciu promieniowym, wynoszącym 10μ .

Gładkość poprzeczna nie jest zależna od wielkości posuwu, lecz tylko od stanu krawędzi tnącej. Wyniki pomiarów średnich wysokości mikronierówności występujących w przekroju poprzecznym, uzyskanych przy frezowaniu frezem ostrym o ostrzach tylko szlifowanych przedstawia krzywa D.



Rys. 22. Wpływ zużycia ostrzy freza na gładkość powierzchni;
A — w przekroju wzdłużnym; B — w przekroju poprzecznym

Na wygląd i gładkość frezowanej powierzchni celuloиду duży wpływ posiada stopień stępienia ostrzy. Już przy niewielkim stępieniu rzędu $h_p = 0,05$ mm powierzchnia frezowana traci połysk, staje się matowa i jak gdyby porowata, prawdopodobnie na skutek wrywania drobnych cząstek celuloиду przez stępione ostrza freza.

Rysunek 22 przedstawia wyniki pomiarów gładkości powierzchni frezowanej frezem o różnym stopniu stępienia. Próby były przeprowadzane

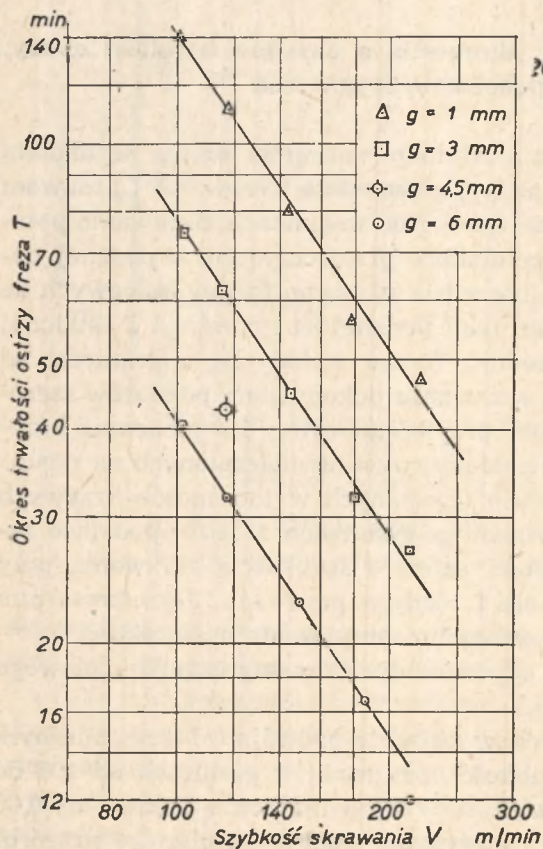
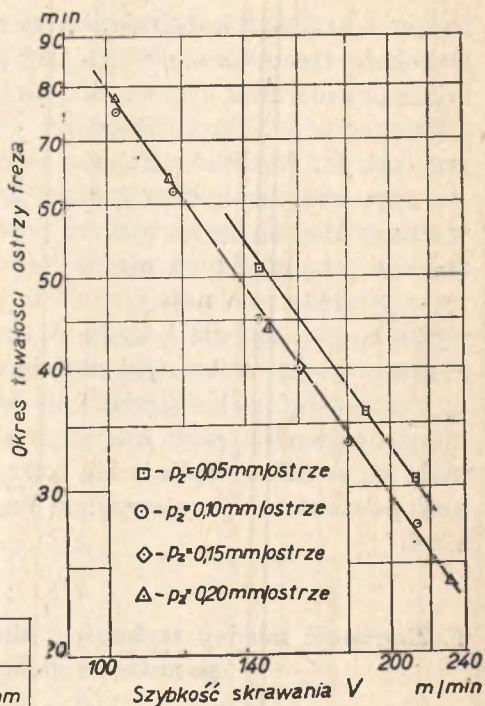
frezem o ustalonej konstrukcji przy szybkości skrawania $V = 249$ m/min, głębokości frezowania $g = 3$ mm oraz posuwie $p_o = 0,5$ mm/obr. Na wykresie podano dwie krzywe charakteryzujące zmiany gładkości wzdłużnej i poprzecznej. Mikronierówności w przekroju wzdłużnym, posiadające przy ostrym frezie charakterystyczny profil w kształcie powtarzających się regularnie wklęsłych łuków, w miarę tępienia się freza stają się, w szczególności przy mniejszych posuwach, coraz to bardziej nieregularne. Średnia wysokość tych nierówności maleje wraz ze wzrostem tępienia freza względnie co najwyżej utrzymuje się bez zmian, jak to w danym wypadku przedstawia krzywa A. Zmianę mikronierówności w przekroju poprzecznym w miarę tępienia się ostrzy freza o dogładzonych ostrzach od strony powierzchni przyłożenia przedstawia krzywa B. Jak widać tutaj, mikronierówności przy ostrym frezie odpowiadające 6 klasie gładkości stają się w miarę tępienia się ostrzy freza coraz to wyższe, tak że gładkość powierzchni przy tępieniu rzędu 0,2 mm odpowiada już tylko klasie 4.

9. Zależność między szybkością skrawania a okresem trwałości ostrzy, posuwem i głębokością frezowania

Celem ustalenia dla frezowania celuloиду zależności między szybkością skrawania a okresem trwałości ostrzy, głębokością frezowania i posuwem dokonano znacznej ilości skrawań w różnych warunkach. Skrawania przeprowadzono bez chłodzenia na celuloidzie przezroczystym o podanej poprzednio charakterystyce. Jako narzędzia używano frezów palcowych ze stali węglowej NE000110 o konstrukcji podanej na rysunku 1 i ustalonej optymalnej geometrii ostrzy. Średnice frezów wahały się w granicach od 10,2 do 10,5 mm. Przy każdym skrawaniu dokonywano pomiarów szerokości starcia h_p na powierzchniach przyłożenia ostrzy i wyznaczano krzywą tępienia się freza analogicznie do krzywych uwidoczonych na rysunkach 9, 10, 15 i 19. Na podstawie uzyskanych w ten sposób krzywych sporządzono wykresy przedstawione na rysunkach 23 i 24, podające zależności między okresem trwałości ostrzy i szybkością skrawania przy różnych głębokościach frezowania i różnych posuwach. Jako kryterium stępienia obierano starcie na powierzchni przyłożenia o szerokości $h_p = 0,2$ mm, przyjmując je jako odpowiednie dla maszynowego kopiowego frezowania opraw okularowych.

Z obu wykresów wykonanych w układzie podwójnie logarytmicznym widać, że w zakresie zmian szybkości skrawania w granicach od 100 do 220 m/min, głębokości frezowania od 1 do 6 mm oraz posuwu od 0,05 do 0,2 mm/ostrze, można przez otrzymane punkty pomiarowe przepro-

Rys. 23. Zależność między okresem trwałości ostrzy freza i szybkością skrawania przy różnych posuwach i stałej głębokości frezowania $g = 3 \text{ mm}$



Rys. 24. Zależność między okresem trwałości ostrzy freza i szybkością skrawania przy różnych głębokościach frezowania i stałym posuwie $p_z = 0,1 \text{ mm/strze}$

wadzić linie równoległe. Zależność więc między okresem trwałości T i szybkością skrawania v przy danym posuwie i głębokości frezowania można przedstawić równaniem:

$$T = \frac{C}{V^{1,45}} \quad (8)$$

lub

$$V = \frac{C'}{T^{0,7}} \quad (9)$$

Mała wartość wykładnika przy szybkości skrawania we wzorze (8) zbliżona do jedności świadczy o tym, że dominującym czynnikiem wpływającym na trwałość ostrza przy frezowaniu celuloиду jest jego ścierność.

Wpływ posuwu na trwałość ostrzy przy frezowaniu celuloиду jest nieznaczny. Na rysunku 23 widać, że punkty odpowiadające tym samym szybkościom skrawania oraz posuwom 0,1 i 0,2 mm/ostrze leżą na prostych pokrywających się, z czego wynika, że zmiana posuwu od 0,1 do 0,2 mm/ostrze nie posiada praktycznie wpływu na trwałość ostrzy. Przy posuwach mniejszych od 0,1 mm/ostrze wzrost posuwu powoduje nieznaczny spadek trwałości ostrzy. W zakresie tym zależność między trwałością ostrzy i posuwem można ująć wzorem:

$$T = \frac{C}{P_z^{0,18}} \quad (10)$$

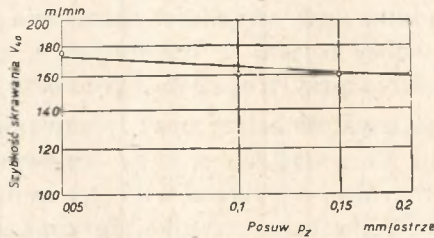
Ze względu na różny wpływ posuwu na trwałość ostrzy (a również i na okresową szybkość skrawania) w zależności od zakresu zmian posuwów należałoby we wzorze na okresową szybkość skrawania ustalić odpowiednio różne wartości wykładnika potęgowego przy posuwie. Nie chcąc komplikować wzoru oraz godząc się z niewielkim błędem w stosunku do wartości pomiarowych, omawianą zależność ujęto jednym wzorem dla całego zakresu zmian posuwu od 0,05 do 0,2 mm/ostrze. Wzór ten posiada postać:

$$V_T = \frac{C}{P_z^{0,06}} \quad (11)$$

i przedstawia go krzywa na rysunku 25, wykreślona dla okresu trwałości ostrzy $T = 40$ min i głębokości frezowania $g = 3$ mm.

Zmiana głębokości frezowania wpływa na okres trwałości ostrzy ewentualnie na okresową szybkość skrawania znacznie intensywniej niż zmiana posuwu. Wykres podany na rysunku 26 przedstawia zmiany okresu trwałości ostrzy w zależności od głębokości frezowania przy szybkości

skrawania $v = 118$ m/min oraz przy posuwie $p_z = 0,1$ mm/ostrze. Na wykresie uwidoczniono dodatkowo linię kreskowaną podającą zmiany okresu trwałości ostrzy w zależności od głębokości frezowania przy założeniu, że jedynym ¹ powodem zmian trwałości ostrzy jest zmiana długości łuku drogi ostrzy przy różnych głębokościach frezowania. Omawianą krzywą wykreślono wychodząc z dowolnie przyjętego okresu trwałości $T = 100$ minut przy głębokości frezowania 1 mm i przeliczając następnie okresy trwałości ostrzy odwrotnie proporcjonalnie do długości łuków dróg ostrzy przy różnych głębokościach frezowania. Widać, że w zakresie głębokości



Rys. 25. Zależność między okresową szybkością skrawania i posuwem; głębokość frezowania $g = 3$ mm; okres trwałości $T = 40$ min

frezowania od 1 do 3 mm obie krzywe posiadają zgodne pochylenia. W zakresie głębokości frezowania większych od 3 mm spadek rzeczywistego okresu trwałości ostrzy w miarę wzrostu głębokości jest bardziej intensywny, prawdopodobnie na skutek działania temperatury. Stosownie do wykresu (rys. 26) wpływ głębokości frezowania na trwałość ostrza można przedstawić wzorami:

$$T = \frac{C}{g^{0,53}} \quad (12)$$

dla zakresu głębokości frezowania od 1 do 3 mm

$$i \quad T = \frac{C}{g^{0,95}} \quad (12a)$$

dla zakresu głębokości frezowania od 3 do 6 mm.

Odpowiednio zależności między okresową szybkością skrawania i głębokością frezowania są następujące:

$$V_T = \frac{C'}{g^{0,37}} \quad (13)$$

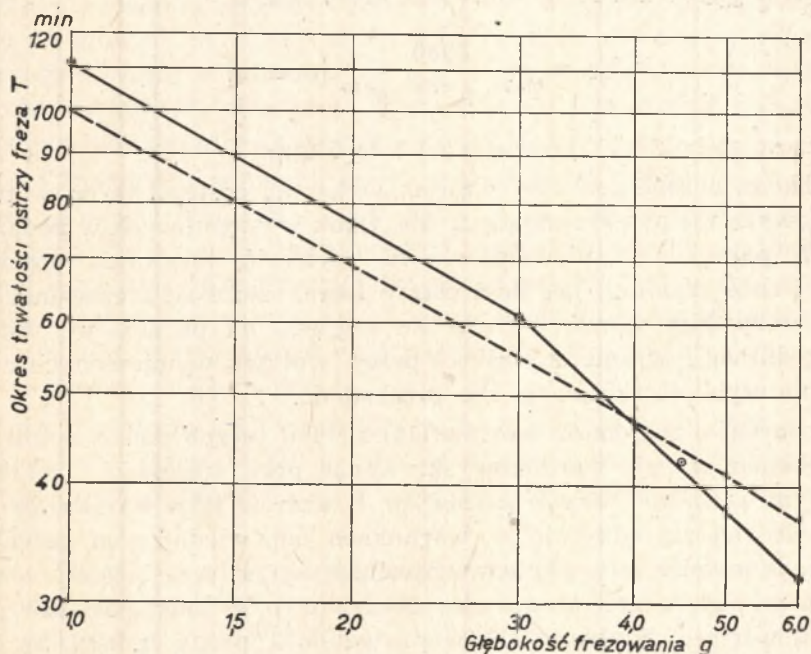
dla zakresu głębokości frezowania od 1 do 3 mm

¹ Można by również tutaj uzależnić okres trwałości od średniej grubości warstwy skrawanej, co jednak ze względu na mały wpływ posuwu na trwałość ostrza daje nieduże różnice w stosunku do przyjętego założenia.

$$i \quad V_T = \frac{C'}{g^{0,66}} \quad (13a)$$

dla zakresu głębokości frezowania od 3 do 6 mm.

Z porównania wartości wykładników we wzorach (8), (10), (12) i (12a) wynika, że przy frezowaniu celulojdu frezem palcowym największy wpływ na trwałość ostrzy ma szybkość skrawania, mniejszy głębokość frezowania, najmniejszy zaś posuw. W wypadku frezowania stali i żeliwa frezami o uzębieniu obwodowym wymienione parametry wpływają na trwałość ostrzy w podobnej kolejności jedynie w zakresie małych posu-



Rys. 26. Wpływ głębokości frezowania na okres trwałości ostrzy freza; szybkość skrawania $v = 118$ m/min; posuw $p_z = 0,1$ mm/ostrze

wów. W zakresie większych posuwów od około 0,1 mm/ostrze przy frezowaniu stali oraz od około 0,15 mm/ostrze przy frezowaniu żeliwa wpływ posuwu na trwałość ostrzy znacznie wzrasta, przewyższając wpływ głębokości frezowania. Porównując wpływ posuwu na trwałość ostrzy przy frezowaniu stali i żeliwa oraz celulojdu zauważyć można znaczną istniejącą tu różnicę. Przy frezowaniu celulojdu w zakresie większych posuwów (od 0,1 do 0,2 mm/ostrze) wpływ posuwu na trwałość nie tylko nie staje się większy, ale, jak wynika z przytoczonych badań, w podanym zakresie zmiany posuwu praktycznie nie wpływają na trwałość ostrzy

lub, ściślej mówiąc, na intensywność zużycia ostrzy na powierzchniach przyłożenia.

Na podstawie omówionych zależności można opracować pełny wzór podający związek między okresową szybkością skrawania w m/min a okresem trwałości ostrzy w min, głębokością frezowania w mm i posuwem w mm/ostrze. Wzór ten posiada postać:

$$V_T = \frac{2800}{T^{0,7} \cdot p_z^{0,06} \cdot g^{0,37}} \text{ [m/min]} \quad (14)$$

dla zakresu głębokości frezowania od 1 do 3 mm

oraz

$$V_T = \frac{3930}{T^{0,7} \cdot p_z^{0,06} \cdot g^{0,66}} \text{ [m/min]} \quad (14a)$$

dla zakresu głębokości frezowania od 3 do 6 mm.

Szybkości liczone podanym wzorem wykazują odstępstwa od wartości pomiarowych nie przekraczające $\pm 2\%$. Obok występujących w podanych wzorach parametrów niewątpliwie na szybkość skrawania posiadają wpływ i inne czynniki, jak ilość ostrzy freza, szerokość frezowania oraz przede wszystkim wymiary freza. Ze względu na podany we wstępie bezpośredni cel i ograniczony zakres pracy, wpływu wymienionych czynników na szybkość skrawania nie przebadano.

W oparciu o znajomość wzorów (14) i (14 a) można podać zasadę doboru ekonomicznych warunków skrawania przy frezowaniu celuloиду ustalonym uprzednio frezem palcowym. Z wzorów tych wynika, że jeśli skrawanie ma się odbywać w warunkach odpowiadających pewnemu stałemu ekonomicznemu okresowi trwałości ostrza freza, to przy zazwyczaj zadanej głębokości frezowania iloczyn $v \cdot p_z^{0,06}$ musi posiadać pewną stałą wartość. Szybkość skrawania zatem i posuw muszą być tak dobierane, aby spełniały one równanie:

$$V \cdot p_z^{0,06} = \text{const.} \quad (15)$$

Wydażność frezowania wyrażona objętością skrojonego materiału w jednostce czasu zmienia się przy danej głębokości i szerokości frezowania oraz przy danym frezie wprost proporcjonalnie do iloczynu $v \cdot p_z$. Największe wartości tego iloczynu, a więc największe wydażności frezowania uzyskuje się przy równoczesnym spełnieniu równania (15), gdy skrawanie odbywa się z możliwie największym dopuszczalnym posuwem. Stosowanie dużych posuwów jest korzystne tutaj również ze względu na rodzaj wiórów i łatwość ich odprowadzania. Wybrany posuw nie może przekraczać wartości dopuszczalnej ograniczonej przy danym frezie warunkiem

umieszczenia się wiórów w rowkach wiórowych freza oraz warunkiem uzyskania żądanej klasy gładkości powierzchni.

Po dobraniu największego dopuszczalnego posuwu i ustaleniu wartości ekonomicznego okresu trwałości można wyliczyć ekonomiczną szybkość skrawania, korzystając ze wzoru (14) lub (14a).

10. Wnioski

Przy frezowaniu celuloideu frezem ze stali węglowej ostrza freza zużywają się głównie na powierzchniach przyłożenia. W miarę pracy freza następuje również zwiększanie się promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej oraz stosunkowo nieznaczne wycieranie się powierzchni natarcia, powodujące zmniejszanie się wartości kąta γ .

Jako kryterium stępienia ostrzy freza można przyjmować szerokość starcia na powierzchniach przyłożenia h_p o wartości ograniczonej względami technologicznymi. Przyjmowanie jako kryterium stępienia optymalnej względnie ekonomicznej szerokości starcia jest praktycznie niemożliwe, gdyż krzywe zużycia w warunkach przeprowadzonych badań nie wykazały w stosunkowo dużym zakresie zużycia przegięcia, a więc okresu intensywnego zużycia.

Przy frezowaniu płyt celuloidowych z posuwem ręcznym dopuszczalna szerokość starcia ostrzy h_p jest ograniczona wzrostem sił skrawania i posiada wartość odpowiadającą zaledwie początkowi okresu normalnego zużycia.

Przy kopiowym maszynowym frezowaniu dopuszczalna szerokość starcia jest znacznie większa i jest ograniczona postacią tworzących się wiórów, gładkością powierzchni oraz wielkością zużycia promieniowego ostrzy freza, dopuszczalnego ze względu na dokładność obróbki.

Ze względu na duże posuw, jakie powinno się stosować przy frezowaniu celuloideu, należy przy konstruowaniu frezów zwracać uwagę na dobór odpowiednich wymiarów rowków wiórowych. Orientacyjne wymiary rowków można dobierać tak, aby w rowek freza nowego i zostrzonego można było wpisać koło o powierzchni około 5 razy większej od iloczynu głębokości frezowania i posuwu na ostrze.

Optymalny kąt przyłożenia ostrzy powinien być tak dobierany, aby odpowiadający mu łączny koszt wymiany i użytkowania narzędzia przypadający na jednostkę wyrobu lub na jednostkę czasu skrawania posiadał wartość jak najmniejszą. Gdy wartość kąta przyłożenia odpowiadająca największemu okresowi trwałości ostrzy różni się od wartości tego kąta, odpowiadającej największej żywotności narzędzia — optymalny kąt

przyłożenia odpowiadający najmniejszemu kosztowi posiada wartość pośrednią między wspomnianymi obiema wartościami i zależną od stosunku kosztu narzędzia nowego do sumy kosztów ostrzenia i wymiany.

W wypadku frezowania opraw okularowych z celuloиду optymalny kąt przyłożenia ostrzy freza ze stali węglowej ustalono o wartości 20° .

Optymalny kąt natarcia odpowiadający największej trwałości ostrzy freza wynosi tutaj około 0° .

Gładkość frezowanej powierzchni celuloиду przy danej średnicy freza jest głównie zależna od posuwu na obrót, bicia promieniowego freza oraz stanu powierzchni ostrzy. Przy frezowaniu ostrym frezem palcowym o średnicy 11 mm i stosunkowo dużym biciu promieniowym w zakresie posuwów zmieniających się od 0,5 do 1,5 mm/obr można uzyskać gładkość powierzchni odpowiadającą klasom od 5 do 3 według normy PN/M-04251.

Wzrost stopienia ostrzy freza powoduje pogorszenie gładkości powierzchni tylko w przekroju poprzecznym. Przy dużym stopieniu rzędu $h_p = 0,3$ mm gładkość w przekroju poprzecznym może ulec pogorszeniu nawet o dwie klasy.

Na trwałość ostrzy freza ze stali węglowej NE000110 przy frezowaniu celuloиду przezroczystego największy wpływ ma szybkość skrawania, mniejszy głębokość frezowania, najmniejszy zaś posuw.

Mała wartość wykładnika przy szybkości skrawania we wzorze $T = f(v)$ wskazuje na stosunkowo mały wpływ temperatury skrawania na tępienie się ostrzy i dominujący wpływ ścierności celuloidu.

Wpływ głębokości frezowania na trwałość ostrzy ewentualnie na okresową szybkość skrawania przy frezowaniu celuloidu frezem palcowym jest stosunkowo znaczny. Wpływ ten nie jest stały i zwiększa się w zakresie większych głębokości frezowania. W zakresie mniejszych głębokości polega on głównie na zmianie drogi, wzdłuż której ostrza stykają się z materiałem skrawanym. Zwiększenie się wpływu głębokości frezowania jest spowodowane prawdopodobnie wzrostem temperatury skrawania.

Bardzo mały wpływ na trwałość ostrzy i okresową szybkość skrawania przy frezowaniu celuloidu ma posuw. W szczególności zmiana posuwu w zakresie większych posuwów (od 0,1 do 0,2 mm/ostrze) nie wpływa praktycznie na trwałość ostrzy.

Celem uzyskania największej okresowej wydajności skrawania należy przy ustalaniu ekonomicznych warunków dla frezowania celuloidu dobrać posuw możliwie największy. Dopuszczalna największa wartość posuwu może być ograniczona warunkiem uzyskania żądanej gładkości powierzchni lub warunkiem swobodnego pomieszczenia się wiórów w rowkach freza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Bonwitt, *Celuloïd i jego zamieniteli*. Kijów 1936.
- [2] F. Pabst, *Kunststoffe*. Berlin 1943.
- [3] F. Pabst, *Tworzywa sztuczne*. Warszawa 1955.
- [4] D. W. Brown, *Handbook of Engineering Plastics*. Londyn 1946.
- [5] *SPI Handbock* (Society of the Plastics Industry). Nowy Jork 1947.
- [6] *Maszynostrojenije*. T. 7. Moskwa 1949.
- [7] M. N. Łarin, *Osnowy friezierowanija*. Moskwa 1947.