

Prof. dr inż. Jan KACZMAREK
Prof. dr Witold ROSIŃSKI
Dr inż. Edmund KULAWIK
Mgr inż. Stanisław CHRZĄSZCZ
IPPT-PAN Warszawa

BADANIA W CELU OPTYMALIZACJI WARUNKÓW SKRAWANIA
PRZY TOCZENIU STALI 55 OSTRZAMI IMPLANTOWANYMI
AZOTEM I BOREM

Implantacja jonów azotu oraz jednocześnie azotu i boru powoduje korzystne zmiany własności skrawanych narzędzi. Dotyczy to przede wszystkim zwiększenia trwałości ostrzy i zmniejszenia oporów skrawania. Ma to istotne znaczenie ze względu na optymalizację warunków procesu skrawania. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu warunków skrawania na okres trwałości, opory skrawania i chropowatość powierzchni przy toczeniu stali 55 ostrzami z węglików spiekanych implantowanych azotem oraz jednocześnie azotem i borem, w porównaniu z ostrzami nieimplantowanymi. Otrzymane zależności analityczne stanowią podstawę do opracowania normatywów warunków skrawania.

1. WPROWADZENIE

W Zakładzie Układów Mechanicznych IPPT-PAN prowadzone są m.in. prace naukowo-badawcze mające na celu podwyższenie własności skrawanych ostrzy narzędzi za pomocą implantacji jonów /C,N,B,N+B/. Z dotychczasowych badań /L2/ można wysunąć następujące, istotne dla teorii i praktyki - wnioski:

- zużycie ostrzy skrawających poddanych implantacji jest mniejsze niż w przypadku ostrzy nieimplantowanych,
- jakościowe i ilościowe oddziaływanie poszczególnych pierwiastków implantowanych jest zróżnicowane i zależy od rodzaju implantowanego pierwiastka, dawki i energii jonów oraz od stosowanych parametrów skrawania, warunkujących stan termiczno-dynamiczny procesu skrawania,
- spośród implantowanych pierwiastków, najlepsze rezultaty w

zakresie zwiększenia trwałości ostrza, daje implantacja jednoczesna azotu i boru oraz azotu,

- porównując oddziaływanie parametrów implantacji na zużycie ostrzy można stwierdzić, że implantacja z dużymi gęstościami $N_2/2 \times 10^{17}/+B/4 \times 10^{17}/$ i $N_2/4 \times 10^{17}/$ nie daje wyraźnie lepszych rezultatów od implantacji $N_2/1 \times 10^{17}/+B/2 \times 10^{17}/$ i $N_2/2 \times 10^{17}/$. Zwiększenie zaś gęstości implantacji powoduje znaczny wzrost jej kosztów.

Otrzymane dotychczas rezultaty, pozwalają na stwierdzenie że implantacja azotu i boru oraz azotu w warstwę wierzchnią narzędzi skrawających powinna znaleźć szerokie zastosowanie praktyczne.

Wdrożenie w praktyce przemysłowej ostrzy implantowanych uwarunkowane jednak jest następującymi względami:

- obniżeniu kosztu implantacji, a takie możliwości istnieją m.in. poprzez budowę implantatorów uproszczonych, składających się z indywidualnych źródeł wybranych jonów oraz komory umożliwiające jednoczesną implantację dużej liczby ostrzy
- opracowaniem zależności analitycznych do modelu optymalizacyjnego warunków skrawania dla ostrzy implantowanych, umożliwiającego sporządzenie tzw. normatywów warunków skrawania.

W niniejszym opracowaniu przedstawiamy wyniki badań umożliwiających sporządzenie takich normatywów dla ostrzy nieimplantowanych, implantowanych azotem $N_2/2 \times 10^{17}/$ oraz jednocześnie azotem i borem; $N_2/1 \times 10^{17}/+B/x10^{17}/$ j/cm² [L3]

2. Program i metodyka badań.

Na podstawie przeprowadzonej analizy [L1] przyjęto, że zasadniczym celem badań powinno być znalezienie zależności analitycznych, określających związki między parametrami skrawania a okresem trwałości ostrza T, główną siłą skrawania P_z i chropowatością powierzchni R_z , wzgl. R_a dla ostrzy nieimplantowanych i implantowanych

$$\begin{aligned} T &= F_1/g, p, v/ \\ /1.II/ \quad P_z &= F_2/g, p, v/ \\ R_z &= F_3/g, p, v/ \end{aligned}$$

Do badań przyjęto noże tokarskie składane NNZu P32x25 z czterostrzowymi płytkami z węglików spiekanych wolframowo-tytanowych S10S, o wymiarach 12,75x12,75x3,18 mm. Ustawienie płytek w gnieździe oprawki zapewniało otrzymanie nast.wartości kątów ostrza:

$$\alpha_0 = 8^\circ, \gamma_0 = 5^\circ, \chi = 70^\circ, \chi' = 20^\circ, \lambda = -5^\circ, r_e = 1 \text{ mm}$$

Płytki z węglików spiekanych były implantowane azotem oraz jednocześnie azotem i borem. Parametry implantacji były w przypadku:

a/ implantacji azotem

$$N_2/1 \times 10^{17} \text{ j/cm}^2 \quad E = 100 \text{ keV} \quad \theta = 300^\circ \text{C}$$

b/ w przypadku implantacji azotem i borem

$$N_2/1 \times 10^{17} \text{ j/cm}^2 + B/2 \times 10^{17} \text{ j/cm}^2 \quad E=100 \text{ keV} \quad \theta = 300^\circ \text{C}$$

Przed przystąpieniem do badań i do implantacji przeprowadzono selekcję defektoskopową płytek /obserwacje pod mikroskopem płytek pokrytych substancjami penetrującymi w szczelinie/.

Wszystkie badania przeprowadzono na stali 55 dostarczonej w formie prętów walcowanych. Celem stwierdzenia stopnia jednorodności własności, przeprowadzono pomiary wytrzymałości na rozciąganie R_m i granicy plastyczności R_e . Stwierdzono, że rozstęp skrajnych własności R_m - wynosi ok.19%, zaś R_e -ok.16%. Jest to okoliczność wpływająca niewątpliwie na rozrzut wielkości mierzonych w trakcie badań zasadniczych. Wszystkie próby skrawania przeprowadzono na tokarce SNA 630x2000 mm.

Pomiary zużycia ostrza, to jest szerokości starcia od strony powierzchni przyłożenia, VB μm - przeprowadzono na mikroskopie warsztatowym MWDC za pośrednictwem elektronicznego wskaźnika cyfrowego EWC-3, o rozdzielczości $\pm 1 \mu\text{m}$. Wszystkie pomiary przeprowadzone były po stałym czasie skrawania, z zachowaniem również stałego czasu przerw.

Pomiary głównej siły skrawania P_z dokonywane były za pomocą siłomierza z czujnikami tensometrycznymi, współpracującego z rejestratorem. Siłomierz był cechowany przed i po zakończeniu pomiarów.

Chropowatość powierzchni mierzono za pomocą profilografu "Kalibr". Dokonywano pomiaru parametru R_a , oraz wykonywano profilogramy powierzchni.

Przyjęto plan badań quasi-rotatabilny, umożliwiający wyznaczenie zależności między warunkami skrawania a mierzonymi wielkościami w postaci wielomianów wzgl. funkcji potęgowych. Zakres zmienności parametrów skrawania był następujący:

- głębokość skrawania g [mm] - 0,4; 0,93; 1,7; 2,47; 3,
- posuw p [mm/obr] - 0,08; 0,2; 0,355; 0,5; 0,63,
- prędkość skrawania v [m/min] - 140; 162,3; 195; 227,7; 250.

3. Wyniki badań i ich analiza.

3.1. Zużycie i trwałość ostrzy.

Wyniki pomiarów zużycia, po ich opracowaniu statystycznym, nanoszono na wykresy $VB-f/\sqrt{\quad}$, których przykłady przedstawiono na wykresach 1+5. Z wykresów tego typu, odczytywano wartość okresu trwałości ostrzy, przy przyjętym kryterium stępienia $VB=300 \mu\text{m}$.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że we wszystkich przypadkach zużycie ostrzy implantowanych jest mniejsze od zużycia ostrzy nieimplantowanych. Występuje jednak pewne zróżnicowanie przebiegów krzywych zużycia w czasie. Analiza tych przebiegów pozwala zauważyć, że istnieją dwa typowe przypadki:

- występuje różnica w początkowym okresie zużycia ostrzy nieimplantowanych i implantowanych przy porównywalnej intensywności zużycia w dalszych przedziałach czasowych, co decyduje o końcowym efekcie różnic w zużyciu,
- końcowy efekt różnic w zużyciu ostrzy implantowanych i nieimplantowanych jest również wynikiem niejednakowej intensywności ich zużycia w kolejnych przedziałach czasowych.

Mechanizm takiego oddziaływania możnaby próbować wyjaśnić w sposób następujący. Wprowadzając jony azotu lub azotu i boru w warstwę powierzchniową ostrza, powoduje się zmianę jego własności a w szczególności zmniejszenie tarcia i zwiększenie odporności na ścieranie. Zmniejszając tarcie, uzyskuje się efekt zmniejszenia oporów skrawania, pracy i ciepła skrawania. Powoduje to w konsekwencji - przy jednoczesnym zwiększeniu odporności na ścieranie - zmniejszenie zużycia.

Powstające w procesie skrawania ciepło sprzyja dyfuzji implan-

towanych jonów, poza początkowy zasięg uzależniony od energii implantacji, dzięki czemu dalsze warstwy materiału ostrza uzyskują korzystniejsze własności.

Aby jednak proces ten mógł oddziaływać w sposób praktycznie zauważalny, trzeba aby prędkość dyfuzji była dostatecznie duża. Jak wiadomo, na tę prędkość oddziałuje zwłaszcza różnica temperatur, ta zaś gzaależy od ciepła wydzielonego w procesie technologicznym, w danym przypadku-skrawania. W wyniku takiego oddziaływania, intensywność zużycia ostrzy implantowanych jest mniejsza niż w przypadku ostrzy nieimplantowanych. W miarę jednak upływu czasu i przesuwania się na skutek starcia powierzchni ostrza, gęstość implantowanych jonów maleje, aż do zupełnego ich zaniku. Powoduje to w konsekwencji wzrost intensywności zużycia. Można wyciągnąć więc wnioski, że intensywność zużycia ostrzy implantowanych będzie zależeć od prędkości dyfuzji w określonych warunkach dynamiczno-termicznych procesu skrawania i prędkości ścierania warstw materiału ostrza.

Z przebiegu zużycia w czasie przedstawionych na wykresach rys. 1 i 2 wynika, że prędkość ścierania jest widocznie większa od prędkości dyfuzji. Po starciu więc warstwy wzbogaconej w implantowane jony, następuje zużycie ostrzy z intensywnością porównywalną z intensywnością zużycia ostrzy nieimplantowanych. Natomiast z wykresów rys.4 i 5 wynika, że w danych przypadkach dyfuzja przebiega szybciej niż następują ubytki materiału ostrza na skutek ścierania. Tezę tę potwierdzają wyniki przeprowadzonych badań, w których stwierdzono fakt występowania implantowanych pierwiastków w nowo powstałych na skutek starcia powierzchniach ostrzy.

Badania przeprowadzone metodą spektroskopii Auger'a wskazują na znaczny ubytek wolframu i tytanu z powierzchni podlegającej zużyciu, w stosunku do wartości początkowej. Powoduje to niewątpliwie dezintegrację ziarn węglików wolframu i tytanu trącej powierzchni ostrza. W przypadku zastosowanie implantacji azotu, wzgl.w jeszcze silniejszym stopniu - boru, obserwuje się znacznie mniejsze ubytki wolframu jak również i tytanu, dzięki czemu nie następuje tak intensywny rozpad ziarn TiC i WC.

Dla umożliwienia wnioskowania ilościowego i jakościowego, przeprowadzono oprócz rutynowej oceny statystycznej, również ocenę testową oddziaływania implantacji na zużycie ostrzy. Z obliczeń tych wynika, że dla czasów pracy odpowiadających przyjętemu kryterium stępienia, istnieje istotna różnica średnich wartości zużycia ostrzy implantowanych i nieimplantowanych. Nie można natomiast we wszystkich przypadkach stwierdzić tej różnicy dla ostrzy implantowanych azotem oraz jednocześnie azotem i borem.

Na podstawie wykresów $VB=f/$ / określono wartości okresów trwałości ostrzy T , przy przyjętym stałym kryterium stępienia $VB=300$ um. Uzyskane w ten sposób wartości okresu trwałości ostrzy pozwoliły na aproksymację zależności $T=f/g, p, v/$ za pomocą funkcji potęgowych w postaci:

$$/2.II/ \quad T = \frac{C_T}{v^S \cdot p^{u_T} \cdot g^{e_T}}$$

- dla ostrzy nieimplantowanych

$$/3.II/ \quad T = \frac{1,5276 \cdot 10^{12}}{g^{0,91} p^{0,90} v^{4,73}}$$

Z oceny statystycznej dla tej zależności otrzymano:

- współczynnik korelacji całkowitej $R = 0,93$, średni błąd estymowany $\bar{\delta} = 0,376$, test $F_{obl} > F_{kr}$ dla stopni swobody $n_1=3$ i $n_2 = 16$ $F_{obl} = 34,76 > F_{0,05} = 3,24$

- dla ostrzy implantowanych azotem N_2 2×10^{17}

$$/4.II/ \quad T = \frac{1,268141603 \cdot 10^{12}}{p^{0,83} g^{0,89} v^{4,6}}$$

Przy czym: $R = 0,911$; $\bar{\delta} = 0,484$; $F_{obl} = 29,1 > F_{0,05} = 3,24$

- dla ostrzy implantowanych azotem i borem N_2 $1 \times 10^{17} + B2 \times 10^{17}$

$$/5.II/ \quad T = \frac{4,257567327 \cdot 10^{11}}{p^{0,83} g^{0,84} v^{4,37}}$$

$$R = 0,90, \quad \zeta = 0,44, \quad F_{obl} = 23,06, \quad F_{0,5} = 3,24$$

Z przebiegu zależności /rys.6,7,8/ wykonanych na podstawie wzorów /3+5.II/ dla centralnego punktu z programu badań $V=195$ m/min, $p = 0,355$ mm/obr, $g = 1,7$ mm /, można sformułować bardzo istotne spostrzeżenia:

- wartość wykładnika s jest największa dla ostrzy nieimplantowanych $/s = 4,73/$ najmniejsza dla ostrzy implantowanych azotem i borem $/s = 4,37/$. Oznacza to, że intensywność wpływu prędkości skrawania na okres trwałości jest znacznie mniejsza dla ostrzy implantowanych. Jest to niewątpliwie związane z tarciem i oddziaływaniem ciepła na własności materiału ostrza i zjawiska występujące na styku: ostrze-materiał obrabiany,
- wartość wykładnika U_T jest większa w przypadku ostrzy nieimplantowanych $/u_T = 0,90/$ niż implantowanych $/u_T = 0,83/$
- również wartość wykładnika e_T jest najmniejsza w przypadku ostrzy implantowanych podwójnie - azotem i borem.

Ma to bardzo istotne znaczenie praktyczne. Chcąc np. uzyskać dla ostrzy implantowanych taki sam okres trwałości co dla nieimplantowanych / np. ekonomiczny okres trwałości/ można stosować wyższe wartości warunków skrawania co wpływa korzystnie zarówno na wydajność jak i koszty jednostkowe - a więc podstawowe wskaźniki optymalizacji.

3.2. Siły skrawania.

Przeprowadzone badania wpływu warunków skrawania na główną siłę skrawania P_z pozwoliły na znalezienie nast. zależności analitycznych, podanych w formie funkcji potęgowych:

$$/6.II/ \quad P_z = C_z \cdot p^{u_z} \cdot g^{e_z} \cdot v^{s_z}$$

- dla ostrzy nieimplantowanych:

$$/7.II/ \quad P_z = 16,64 \cdot p^{0,62} \cdot g^{1,12} \cdot v^{0,41}$$

- dla ostrzy implantowanych:

$$/8.II/ \quad P_z = 51,05 \cdot p^{0,66} \cdot g^{0,96} \cdot v^{0,195}$$

Po przeprowadzeniu testu istotności wartości średnich, stwierdzono, że w przypadku ostrzy implantowanych azotem oraz podwójnie azotem i borem, nie ma istotnych różnic wartości średnich.

Nie stwierdza się również istotnych różnic w wartościach średnich dla ostrzy implantowanych i nieimplantowanych w zakresie prędkości $v=140 + 162,3$ m/min. Różnice te występują dopiero w zakresie prędkości $195 + 250$ m/min.

Przebiegi zależności siły skrawania od poszczególnych parametrów przedstawiono na rys.9,10,11. Wartości sił obliczono z wzorów /7.II i 8.II/ dla centralnego punktu programu $/v = 195$ m/m $p=0,355$, $g = 1,7$ mm/. Z przebiegów tych zależności oraz z analizy wykładników stojących przy poszczególnych parametrach wynika, że ich oddziaływanie jest zróżnicowane. Rozpatrując zależność $P_z = f/p/$ można stwierdzić, że przyrosty sił ze wzrostem posuwu są porównywalne. Dość wyraźne natomiast jest zróżnicowanie oddziaływania w przypadku głębokości i prędkości skrawania. Ze wzrostem tych parametrów - różnica sił skrawania dla ostrzy nieimplantowanych i implantowanych jest większa. Taki przebieg możnaby tłumaczyć oddziaływaniem tarcia i ciepła powstającego w procesie skrawania. Można przyjąć, że całkowita siła skrawania P jest sumą siły niezbędnej do wywołania stanu naprężeń i odkształceń przy którym następuje zburzenie spójności materiału - P_G oraz siły tarcia P_L na skutek przemieszczania się względem siebie narzędzia, przedmiotu i wióra:

$$/9.II./ \quad P = P_G + P_L$$

Jeżeli więc implantacja powoduje zmniejszenie tarcia, to w takim razie będzie malała siła P_L , co w konsekwencji powoduje zmniejszenie całkowitej siły skrawania a dalej pracy i ciepła skrawania. Zauważyć jednak należy, że różnice między siłami dla ostrzy implantowanych i nieimplantowanych są tym większe im większe są wartości głębokości i prędkości skrawa-

nia. Dla wyjaśnienia powyższego zjawiska należałoby wziąć pod uwagę kompleks uwarunkowań zachodzących w procesie skrawania, a więc oddziaływanie szybkości narastania naprężeń i odkształceń, oraz ciepła na właściwości materiału w strefie burzenia spójności / warunkujące wartość P_{sp} / oraz na współczynnik tarcia. Wszystko to należałoby rozpatrywać w powiązaniu z bilensem cieplnym i rozplywami ciepła do materiału obrabianego wióra i narzędzia oraz ośrodka obróbkowego w zależności od stosowanych warunków skrawania.

3.3. Chropowatość obrabianej powierzchni.

Przeprowadzone badanie wpływu implantacji na chropowatość powierzchni nie dały jednoznacznej odpowiedzi. Chropowatość powierzchni jest wynikiem odwzorowania kształtu ostrza i wpływu całego szeregu czynników związanych z przebiegiem burzenia spójności w skrawanie oraz innych procesów a przede wszystkim tarcia i drgań. Jakkolwiek można przyjąć, że implantacja zmniejsza tarcie, to w przypadku skrawania najprawdopodobniej chodzi o tarcie wióra o powierzchnię natarcia, a w znacznie mniejszym stopniu o tarcie pow. przyłożenia o powierzchnię obrabianą. Dla jednoznacznego więc określenia wpływu implantacji na chropowatość, należałoby przeprowadzić badania umożliwiające wydzielenie i ściśłe określenie procesów tarcia w przypadku skrawania ostrzami implantowanymi i nieimplantowanymi.

3.4. Analiza ekonomiczna.

Na podstawie badań można przyjąć, że średnia wartość stosunku okresu trwałości ostrzy implantowanych T_{im} do nieimplantowanych T wynosi średnio:

$$/10.II/ \quad a = \frac{T_{im}}{T} = 1,60$$

W takim razie stosunek kosztów narzędziowych K_N w ciągu jednego okresu trwałości dla ostrzy nieimplantowanych do kosztów narzędziowych ostrzy implantowanych $K_{Nim} = K_{im} + K_N$

gdzie K_{im} - koszty implantacji - wyniesie:

$$\frac{K_N}{K_{Nim}} = \frac{T}{T_{im}}$$

$$\frac{K_N}{K_N + K_{im}} = \frac{T}{a \cdot T} = \frac{1}{a}$$

W takim razie: $K_{im} = K_N / a - 1/$. Aby jednak implantacja była ekonomicznie uzasadniona musi w tym związku zachodzić nierówność, czyli że koszty implantacji K_{im} muszą być:

$$/11.II/ \quad K_{im} < K_N / a - 1 /$$

$$K_{im} < 0,6 K_N < 60\% K_N$$

Jest to jeden aspekt zagadnienia. Z drugiej bowiem strony trzeba rozpatrzyć oddziaływanie implantacji na koszty jednostkowe zabiegu,

Najogólniej rzecz biorąc, koszt jednostkowy zabiegu można wyrazić w postaci zależności:

$$/12.II/ \quad K_J = C + C_M / g, p, v \sqrt{} + C_R g \quad e_T^{-1} \quad u_T^{-1} \quad s^{-1} \quad p \quad v$$

gdzie: C - składniki kosztów niezależne od warunków skrawania

C_M - składniki kosztów zmieniające się w sposób odwrotnie proporcjonalny ze wzrostem warunków skrawania /malejące/

C_R - składniki kosztów zmieniające się w sposób nieproporcjonalny ze wzrostem warunków skrawania /zależnie od wartości wykładników e_T , u_T i s /. W stałej C_R - mieszczą się m.in. koszty narzędziowe.

Porównanie kosztów jednostkowych można przeprowadzić przy dwóch różnych założeniach:

- warunki skrawania pozostają stałe, wydłuża się okres trwałości i maleją wykładniki potęgowe e_T , u_T i s
- okres trwałości pozostaje stały, można wówczas w przypadku

ostrzy implantowanych zwiększyć warunki skrawania.

W pierwszym przypadku dla ostrzy implantowanych ulega zmniejszeniu trzeci człon wzoru 12.II na skutek zmniejszenia wartości wykładników e_T , u_T i s , pomimo zwiększenia kosztów narzędziowych. Przeprowadzone wyliczenia szczegółowe, pozwoliły na stwierdzenie, że stosunek kosztów jednostkowych zabiegu przeprowadzonego ostrzami implantowanymi azotem i borem w porównaniu z ostrzami nieimplantowanymi wynosi

$$/13.II/ \quad K_{J1m} = 0,74 K_J$$

Następuje więc obniżka kosztów jednostkowych w granicach 26%.

W drugim przypadku, jeżeli zachowa się ten sam okres trwałości dla ostrzy, można zwiększyć warunki skrawania, np. prędkość skrawania v . W takim razie ulegnie zmniejszeniu drugi człon wzoru 12.II, jak również ulegnie zmianie człon trzeci.

Z wyliczeń szczegółowych wynika, że zachowując ten sam okres trwałości dla ostrzy implantowanych i nieimplantowanych można zwiększyć prędkość skrawania o 15%. Porównania ilościowe kosztów jednostkowych dają w takim przypadku rezultat:

$$/14.II/ \quad K_{J1m} = 0,82 K_J$$

Następuje więc obniżka kosztów w granicach 18%

4. Wnioski

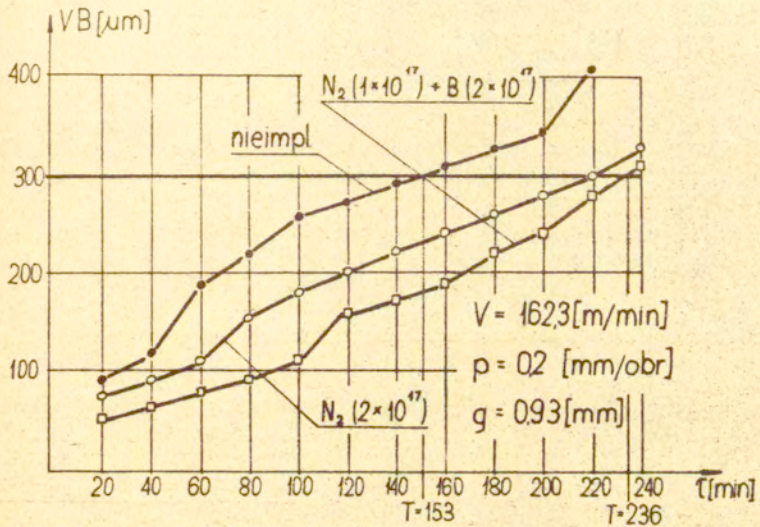
Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski.

1. Ostrza implantowane szotem oraz podwójnie azotem i borem, charakteryzują się wyższą trwałością niż ostrza nieimplantowane.
2. Intensywność wpływu /wyrażana wartościami wykładników potęgowych/ prędkości skrawania, posuwu i głębokości na trwałość ostrzy jest mniejsza dla ostrzy implantowanych niż dla nieimplantowanych.
3. Siły skrawania, a zatem i energochłonność procesu skrawania

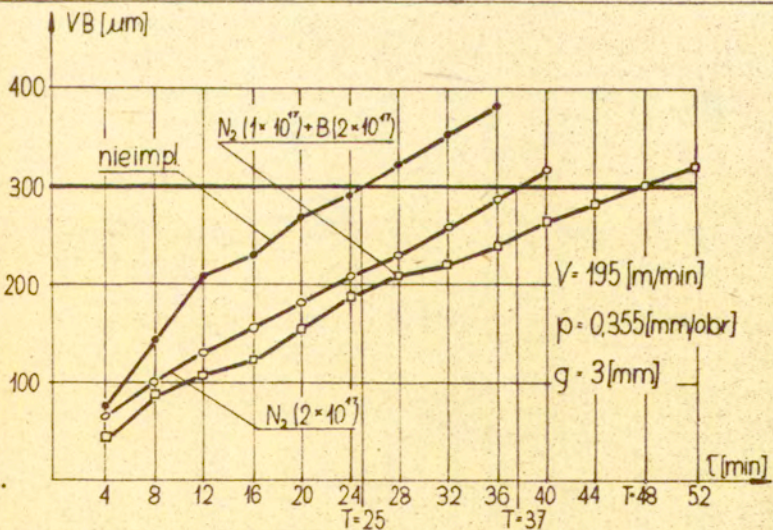
- nia-, są mniejsze przy skrawaniu ostrzami implantowanymi z wyższymi parametrami skrawania / g,p,v/
4. Przy stosowaniu ostrzy implantowanych następuje obniżka kosztów jednostkowych w granicach 18-26%
 5. W dalszych badaniach należy uwzględnić:
 - intensyfikację procesów implantacji, zwłaszcza w kierunku zwiększenia grubości implantowanej warstwy,
 - implantację innymi pierwiastkami dającymi nadzieję na podniesienie własności skrawanych ostrzy.

Spis literatury.

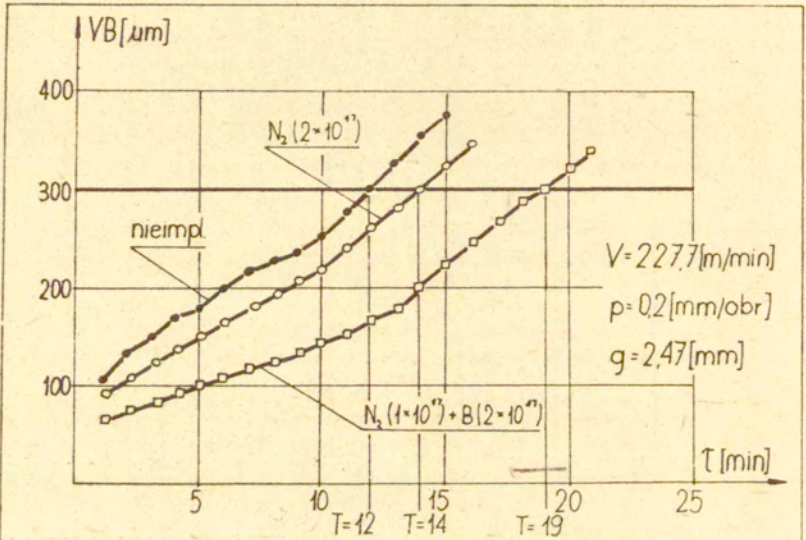
1. J.KACZMAREK: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej Warszawa, WNT 1970
2. S.CHRZASZCZ, J.KACZMAREK, M.KOZIEŁ, E.KULAWIK, W.ROSIŃSKI: Badanie wpływu implantacji jonami azotu i węgla na zużycie ostrzy skrawających z węglików spiekanych. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń Zeszyt 2/1982
3. A.BAC, S.CHRZASZCZ, E.KULAWIK, A.SEKUŁA: Badanie eksploatacyjne narzędzi skrawających i elementów maszynowych implantowanych różnymi pierwiastkami. Konsultacja naukowa: J.Kaczmarek, W.Rosiński. Sprawozdanie Zakładu Układów Mechanicznych IPPT PAN Warszawa 1984. Niepublikowane.
4. W.ROSIŃSKI: Wybrane zastosowanie implantacji jonów w nauce i technice. Wydawnictwo PAN Ossolineum - Wrocław 1978



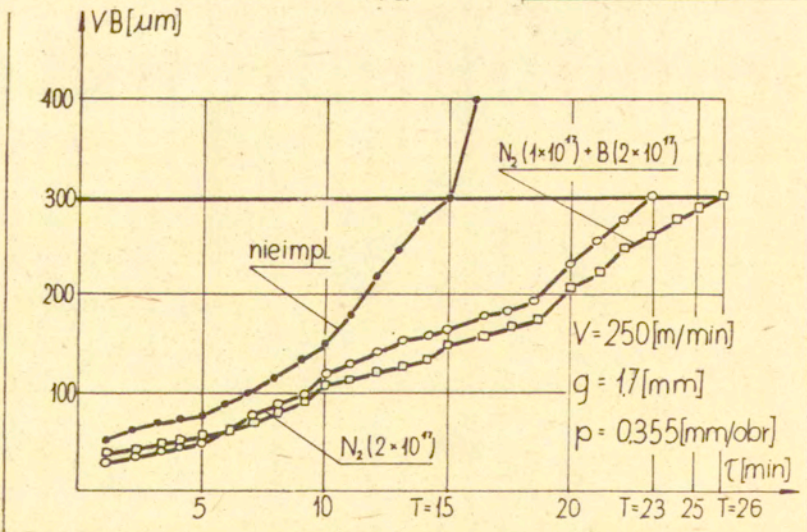
Rys. 1. Zależność $VB = f / \tau$



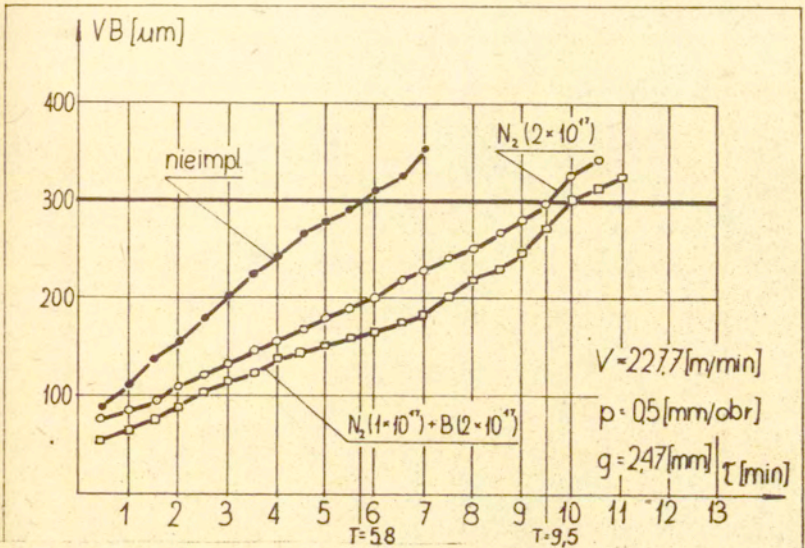
Rys. 2. Zależność $VB = f / \tau$



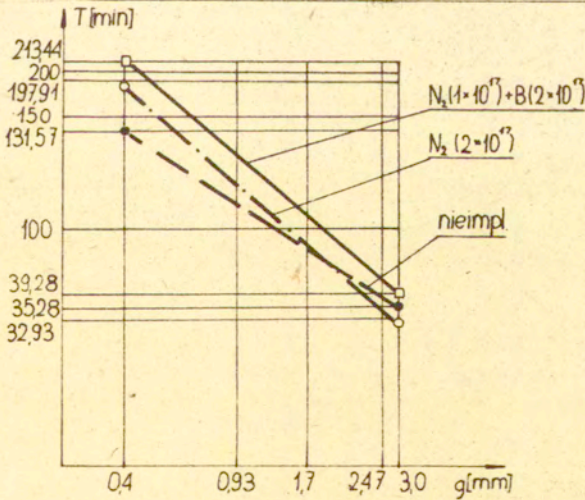
Rys. 3. Zależność $VB = f / \tau /$



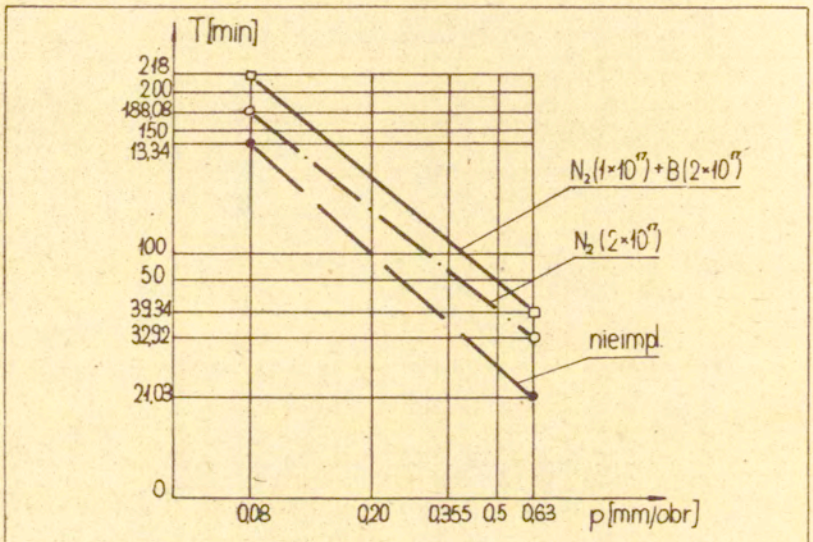
Rys. 4. Zależność $VB = f / \tau /$



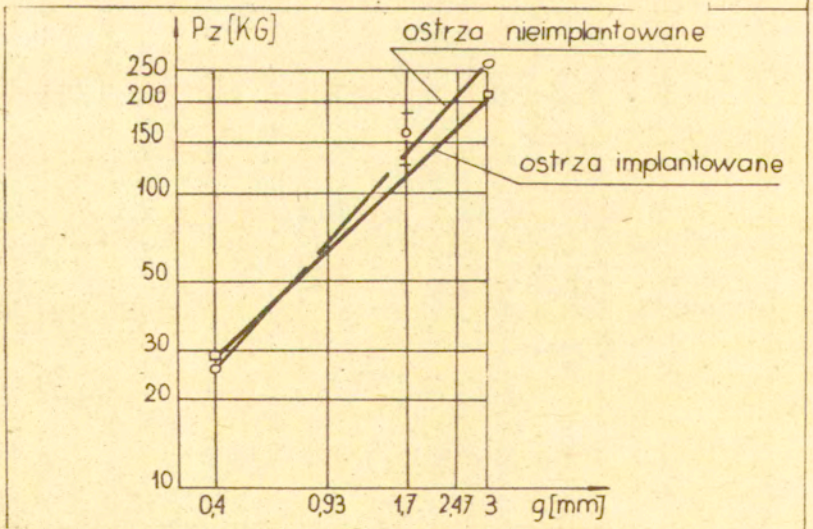
Rys. 5. Zależność $VB = f / \tau /$



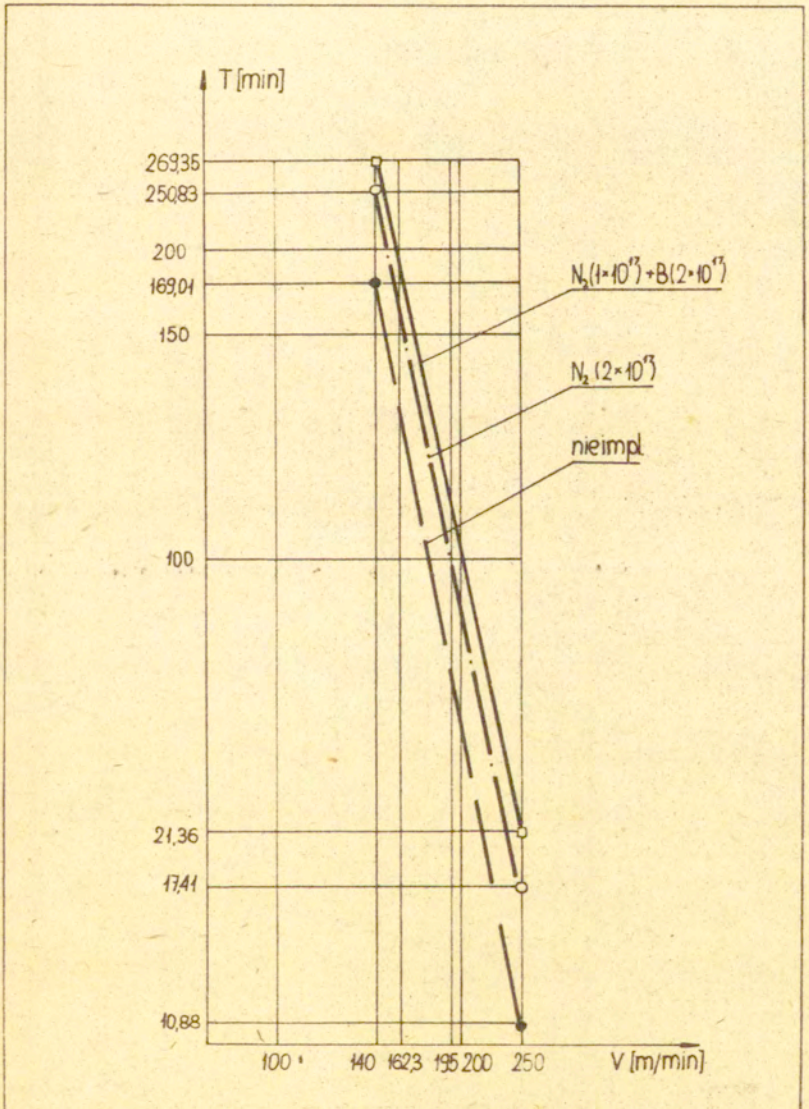
Rys. 6. Zależność $T = f / g /$; $v = 195 \text{ m}/\text{min}$; $p = 0.355 \text{ mm}/\text{obr}$



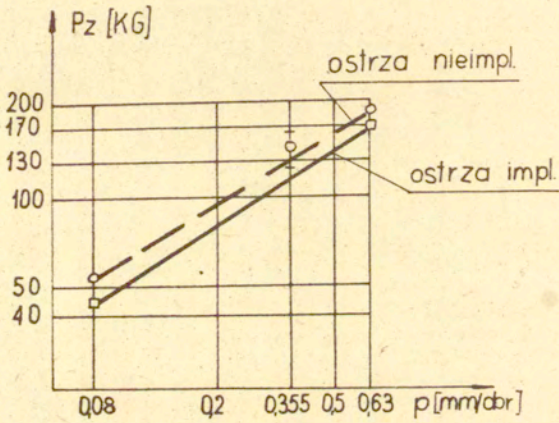
Rys. 7. Zależność $T = f/p$; $V=195$ m/min; $\xi=1,7$ mm



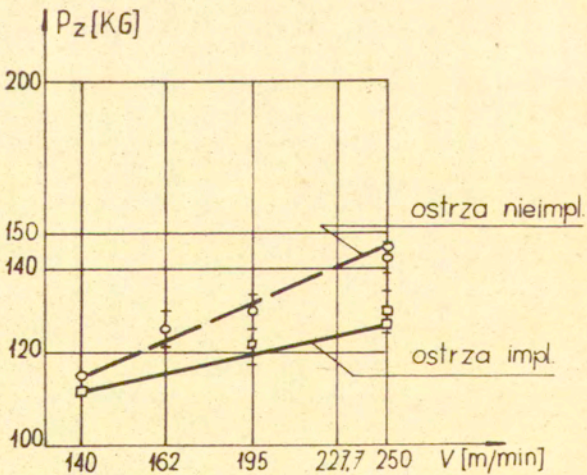
Rys. 9. Zależność $P_z = f/g$; $p=0,355$ mm/obr; $V=195$ m/min



Rys. 8. Zależność $T=f/v/$; $p=0,355$ mm/obr; $g=1,7$ mm



Rys.10. Zależność $P_z = f/p$; $\xi=1,7$ mm; $v = 195$ m/min



Rys.11. Zależność $P_z = f/v$; $\xi=1,7$ mm; $p = 0,355$ mm/obr