

BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI OSTRZA NOŻA TOKARSKIEGO PRZY UŻYCIU METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

JERZY WODECKI

*Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska
e-mail: jerzy.wodecki@polsl.pl*

Streszczenie. Wyznaczono rozkłady naprężeń w ostrzu noża tokarskiego w warunkach skrawania ortogonalnego, stosując metodę elementów skończonych. Uwzględniono trzy fazy obróbki: wcinanie ostrza w obrabiany materiał, ciągle skrawanie oraz wyjścia ostrza z obrabianego materiału. Zaproponowano hipotezy wytrzymałościowe dla wyznaczenia niebezpiecznych wartości naprężeń redukowanych. Określono wpływ posuwu na współczynniki zapasu kruchej i plastycznej wytrzymałości materiału ostrza noża.

1. WSTĘP

Przy wciąż wzrastającym stopniu automatyzacji obróbki skrawaniem istotnym problemem jest zmniejszenie ryzyka nieprzewidzianego uszkodzenia narzędzi skrawających. Zwiększenie niezawodności pracy narzędzi skrawających można uzyskać przez badanie mechanizmów wywołujących nagłą utratę ich własności skrawnych, a następnie ograniczenie przyczyn tego typu zużycia. Wymaga to wyznaczenia wartości i rozkładów naprężeń występujących w narzędziach podczas pracy. Możliwie dokładne określenie maksymalnych wartości naprężeń, które decydują o wytrzymałości narzędzi, pozwoli na optymalizację kształtu narzędzi ze względu na ich wytrzymałość oraz na wyznaczenie dopuszczalnych parametrów skrawania. Istotnym zagadnieniem teorii skrawania jest więc zbadanie mechanizmów powodujących zniszczenie części roboczej narzędzi, a jednocześnie opracowanie wiarygodnej i możliwie prostej w zastosowaniu metody wyznaczenia naprężeń w ostrzach narzędzi.

Ze względu na to, że metody elastooptyczne oraz analityczne nie pozwalają na wyznaczenie rozkładów naprężeń w ostrzach narzędzi z wystarczającą dla przedstawionych powyżej celów dokładnością [1, 5], w badaniach modelowych wytrzymałości ostrza noża tokarskiego zastosowano metodę elementów skończonych.

Stosując tę metodę można bowiem:

- obciążyć model ostrza narzędzia zarówno od strony powierzchni natarcia, jak też przyłożenia, naprężeniami normalnymi i stycznymi, o rozkładach zbliżonych do rozkładów, określonych na podstawie licznych badań doświadczalnych,
- przeprowadzić badania stosując wartości obciążeń wyznaczone na podstawie empirycznych wzorów na siły skrawania, opracowanych dla różnych materiałów skrawanych,
- określić rozkłady wybranych naprężeń w całym ostrzu skrawającym,

- wyznaczyć wartości naprężeń głównych w dowolnym miejscu ostrza oraz obliczyć wartości naprężeń redukowanych, dla wybranych hipotez wyężeniowych.

Celem analizy było wyznaczenie rozkładów i wartości naprężeń w ostrzu przy różnych rodzajach obciążenia, odpowiadających zarówno ustalonej pracy podczas skrawania materiału, jak też w stanach przejściowych, podczas wcinania ostrza w materiał, a także podczas jego wychodzenia z obrabianego materiału. W celu symulacji takich stanów pracy ostrza obciążano je w różny sposób na powierzchniach natarcia i przyłożenia. Rozkłady i wartości naprężeń obciążających ostrze wyznaczono na podstawie badań własnych i literatury [2, 3, 4, 8, 9, 11].

Przyjęte warianty obciążenia ostrza noża:

- a) obciążenie naprężeniami normalnymi powierzchni natarcia (gwałtowne wejście ostrza w obrabiany materiał),
- b) obciążenie naprężeniami normalnymi i stycznymi powierzchni natarcia oraz naprężeniami normalnymi i stycznymi powierzchni przyłożenia (ustalona praca ostrza),
- c) obciążenie naprężeniami normalnymi i stycznymi, skierowanymi w kierunku krawędzi skrawającej, powierzchni natarcia oraz naprężeniami normalnymi i stycznymi powierzchni przyłożenia (gwałtowne wyjście ostrza z obrabianego materiału).

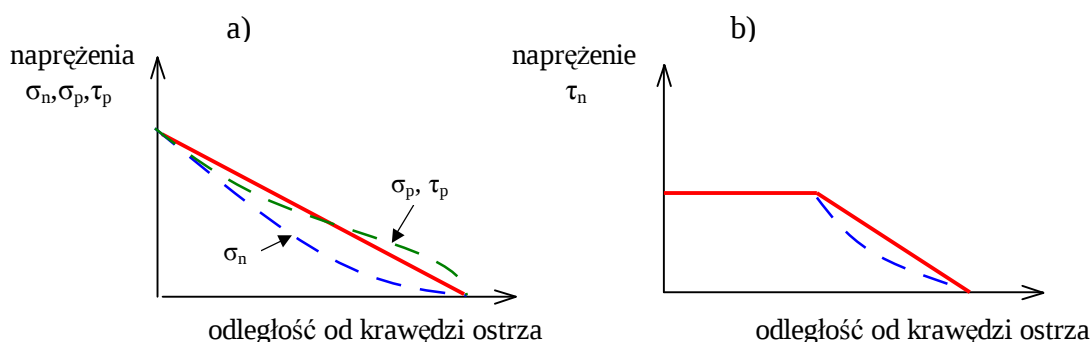
2. MODEL OSTRZA NOŻA I SPOSÓB JEGO OBCIĄŻENIA

Analizę naprężeń przeprowadzono dla modeli klinowego ostrza noża tokarskiego przecinaka, wykonanego ze stali szybko tnącej oraz węglików spiekanych. Do badań przyjęto ostrze o kącie natarcia $\gamma_o = 0^\circ$, kącie przyłożenia $\alpha_o = 6^\circ$ i szerokości $b = 2$ mm.

W przypadku, gdy badano wpływ składowych siły skrawania działających na powierzchni przyłożenia, na modelu wykonano fazę na powierzchni przyłożenia, odpowiadającą starciui o szerokości $VB = 0,2$ mm.

Założono, że obrabiana jest stal 45 w stanie normalizowanym, w warunkach skrawania ortogonalnego.

Rozkłady naprężenia normalnego σ_n i stycznego τ_n na powierzchni natarcia oraz naprężenia normalnego σ_p i stycznego τ_p na powierzchni przyłożenia ostrza zostały uproszczone w stosunku do teoretycznych [1, 8], w celu ułatwienia ich zamodelowania – rys. 1.



Rys. 1. Rozkłady obciążeń na powierzchni natarcia i powierzchni przyłożenia ostrza noża:
a – rozkład naprężenia σ_n na powierzchni natarcia, naprężenia σ_p na powierzchni przyłożenia i naprężenia τ_p na powierzchni przyłożenia ; b – rozkład naprężenia τ_n na powierzchni natarcia (linią przerywaną oznaczono rozkłady teoretyczne)

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Analiza naprężeń na powierzchniach ostrza noża

Stale szybko tnące i węgliki spiekane należą do materiałów półkruchych [6]. Takie cechy jak kruchość czy plastyczność nie są ich immanentnymi własnościami i w dużym stopniu uzależnione są od stanu naprężeń, jakim te materiały są poddane. W warunkach jednoosiowego rozciągania, w temperaturze pokojowej, w próbkach wykonanych ze stali szybko tnącej lub węglików spiekanych nie zauważa się jakichkolwiek odkształceń plastycznych i próbki ulegają kruchemu zniszczeniu, a otrzymane dane charakteryzują kruchą wytrzymałość tych materiałów. Jeżeli jednoosiowe rozciąganie zamienić na badanie twardości przez wciskanie piramidki, to wyniki zasadniczo się zmieniają. Sądząc po otrzymanych odciskach, dla wymienionych materiałów narzędziowych zachodzi plastyczna deformacja, bez zauważalnego śladu kruchego zniszczenia w postaci utworzenia mikropęknięć, tj. przy badaniach twardości maksymalne naprężenia nie osiągają wartości granicy wytrzymałości na rozrywanie i twardość wyraża opór odkształcenia plastycznego materiału [1].

Przyjęto więc następujące zasady doboru hipotez wytrzymałościowych, decydujących o kruchej i plastycznej wytrzymałości materiału.

1. Naprężenia główne $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \geq 0$,

o wytrzymałości decyduje naprężenie główne σ_1

$$\sigma_1 = R_m \quad (1)$$

2. Naprężenia główne $\sigma_1 > 0$ i $\sigma_3 < 0$,

do wyznaczenia wartości naprężenia redukowanego przyjęto hipotezę Mohra

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \frac{R_m}{R_c} \cdot \sigma_3 \quad (2)$$

$$\sigma_{red} = R_m \quad (3)$$

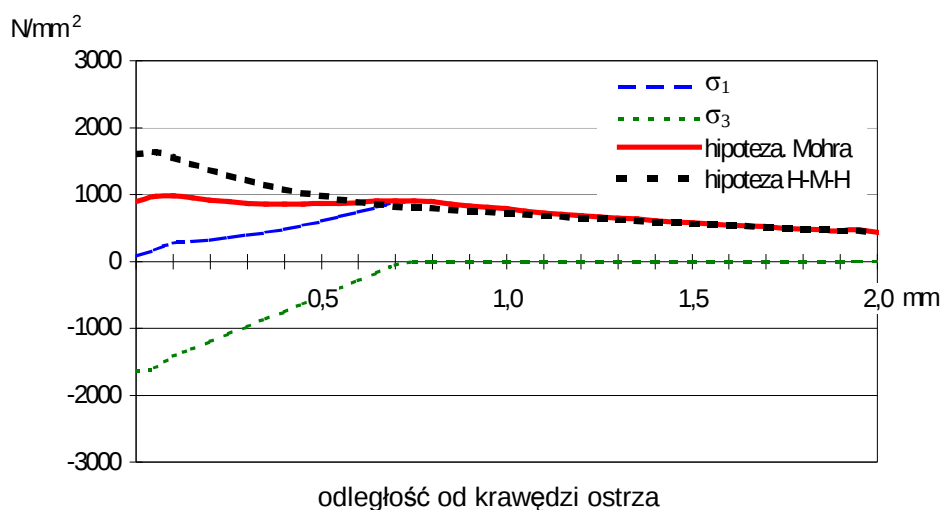
3. Naprężenia główne $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 \leq 0$,

do wyznaczenia wartości naprężenia redukowanego przyjęto hipotezę H-M-H

$$\sigma_{red} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

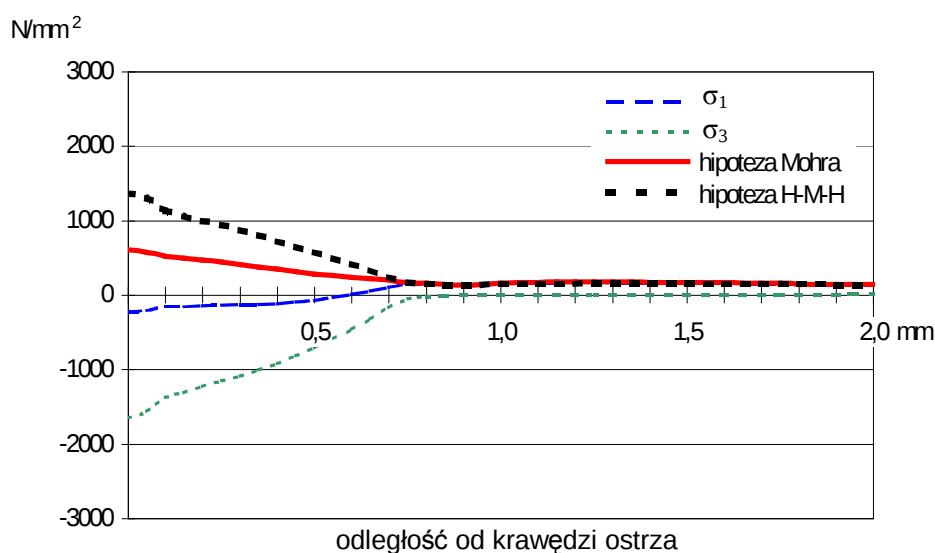
$$\sigma_{red} = R_e \quad (5)$$

Analizując rozkład naprężeń na powierzchni natarcia ostrza podczas jego nagłego wcinania w obrabiany materiał (rys. 2) można zauważyć, że w obszarze styku wióra z powierzchnią natarcia, którego długość dla posuwu $f = 0,2$ mm wynosi ok. 0,7 mm [6], naprężenia σ_1 i σ_3 mają różne znaki, natomiast poza tym obszarem oba naprężenia mają wartości dodatnie. O kruchej wytrzymałości ostrza będzie więc decydować maksymalna wartość naprężenia redukowanego wyznaczonego na podstawie hipotezy Mohra, a pęknięcie może wystąpić w obszarze styku wióra z powierzchnią natarcia.



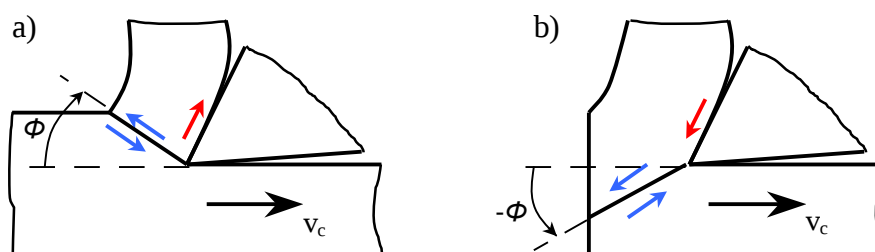
Rys. 2. Rozkłady naprężeń głównych i redukowanych na powierzchni natarcia ostrza wykonanego ze stali szybko tnącej, podczas wcinania w materiał, przy skrawaniu stali 45 z posuwem $f = 0,2$ mm/obr

Podczas ciągłego skrawania (rys. 3), w obszarze styku wióra z powierzchnią natarcia naprężenia σ_1 i σ_3 mają wartości ujemne, natomiast poza tą strefą naprężenie σ_1 ma wartość dodatnią, a wartość naprężenia σ_3 jest zbliżona do zera. Wynika stąd, że w obszarze styku wióra z powierzchnią natarcia powierzchniowe warstwy materiału ostrza mogą podlegać odkształceniom plastycznym, czemu dodatkowo sprzyjają wysokie temperatury, jakie tam występują. O wytrzymałości narzędzia będzie w tym wypadku decydować naprężenie redukowane wyznaczone na podstawie hipotezy H-M-H. Poza tą strefą występuje niebezpieczeństwo kruchego pęknięcia materiału, a o wytrzymałości będzie decydować maksymalna wartości naprężenia głównego σ_1 .



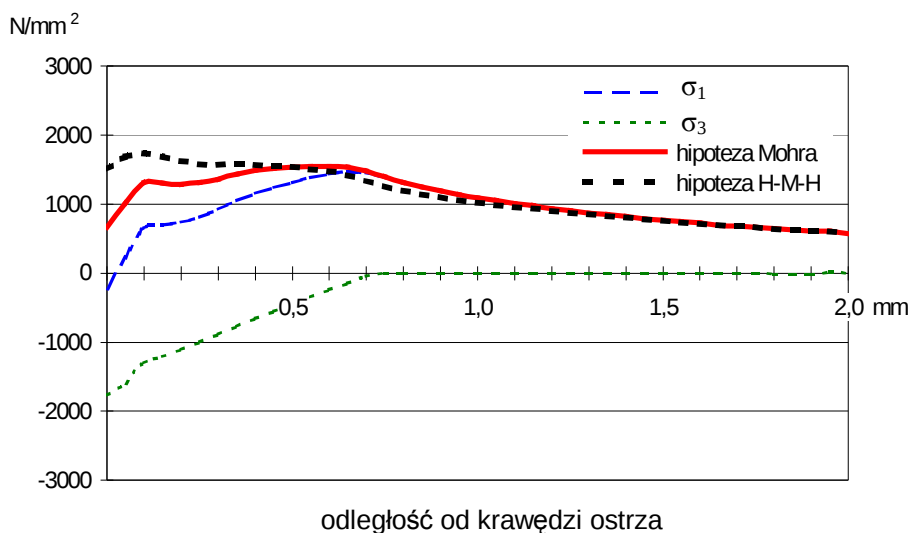
Rys. 3. Rozkłady naprężeń głównych i redukowanych na powierzchni natarcia ostrza wykonanego ze stali szybko tnącej, podczas ustalonej pracy, przy skrawaniu stali 45 z posuwem $f = 0,2$ mm/obr

Podczas nagłego wychodzenia ostrza z obrabianego materiału występuje zwiększone niebezpieczeństwo wykruszenia krawędzi skrawającej. Istotne znaczenie dla powstawania wykruszeń ma tworzenie się ujemnie zorientowanej płaszczyzny ścinania podczas powstawania zadzioru (rys. 4). Powoduje ona chwilową zmianę kierunku poślizgu wióra po powierzchni natarcia i jednocześnie zmianę kierunku składowej stycznej siły działającej na tę powierzchnię.



Rys. 4. Zmiana kierunku działania siły stycznej na powierzchni natarcia ostrza:
a – model z umowną płaszczyzną poślizgu (tworzenie wióra);
b – model z ujemnie zorientowaną, umowną płaszczyzną poślizgu (tworzenie zadzioru)

Rozkład naprężeń na powierzchni natarcia ostrza dla takiego przypadku obciążenia ostrza przedstawiono na rys. 5.

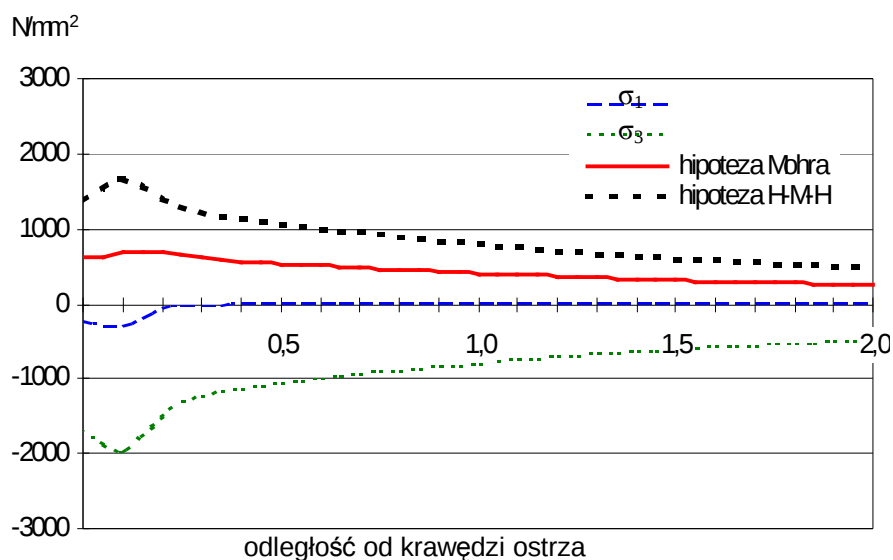


Rys. 5. Rozkłady naprężeń głównych i redukowanych na powierzchni natarcia ostrza wykonanego ze stali szybko tnącej, podczas wyjścia z obrabianego materiału, przy skrawaniu stali 45 z posuwem $f = 0,2 \text{ mm/obr}$

Naprężenie główne maksymalne σ_1 osiąga w tym przypadku wartości większe niż podczas wcinania ostrza i w czasie jego ciągłej pracy. Przy ujemnych wartościach naprężenia σ_3 występuje znaczne niebezpieczeństwo kruchego zniszczenia ostrza, a decydują o tym wartości naprężenia redukowanego wyznaczonego na podstawie hipotezy Mohra.

Na rys. 6 przedstawiono rozkład naprężeń na powierzchni przyłożenia ostrza podczas ciągłej obróbki. Ze względu na to, że w pobliżu krawędzi skrawającej wartości naprężeń głównych są ujemne, występuje tam niebezpieczeństwo plastycznego odkształcenia

wierzchnich warstw materiału ostrza, czemu sprzyjają dodatkowo wysokie temperatury tam występujące. O plastycznej wytrzymałości ostrza decydują wartości naprężenia redukowanego wyznaczonego na podstawie hipotezy H-M-H. Podobny charakter rozkładu mają naprężenia na powierzchni przyłożenia również dla pozostałych analizowanych przypadków pracy ostrza.



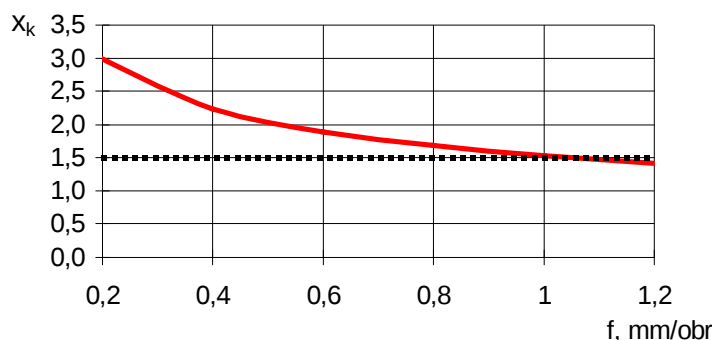
Rys. 6. Rozkłady naprężeń głównych i redukowanych na powierzchni przyłożenia ostrza wykonanego ze stali szybko tnącej, podczas ustalonej pracy, przy skrawaniu stali 45 z posuwem $f = 0,2 \text{ mm/obr}$

3.2. Wpływ posuwu na zapas kruchej i plastycznej wytrzymałości materiału ostrza

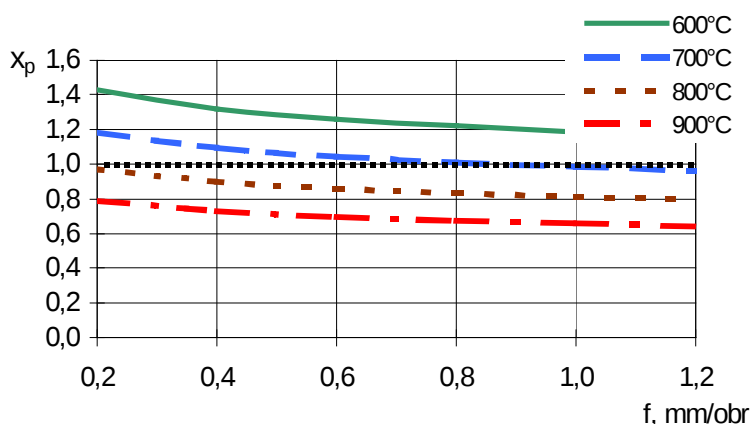
Badania modelowe naprężeń w ostrzu noża tokarskiego wykazały, że podczas ciągłej obróbki niebezpieczne naprężenia, ze względu na kruchą wytrzymałość ostrza, występują na powierzchni natarcia, natomiast ze względu na plastyczną wytrzymałość – na powierzchni przyłożenia. Naprężenia te rosną wraz ze wzrostem posuwu. Przyjmując odpowiednie, dla danego materiału narzędziowego, wartości wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności oraz wartości współczynników bezpieczeństwa ze względu na kruchą i plastyczną wytrzymałość materiału, można wyznaczyć maksymalne, dopuszczalne wartości posuwu, ze względu na kruchą oraz plastyczną wytrzymałość ostrza noża. Badania przeprowadzono dla ostrza wykonanego z węglików spiekanych gatunku S10.

Na rys. 7 przedstawiono wpływ posuwu na wartość współczynnika bezpieczeństwa wyznaczonego ze względu na kruchą wytrzymałość materiału x_k . Wartość x_k powinna wynosić dla prostych narzędzi skrawających od 1,2 do 1,5 [5].

Na rys. 8 przedstawiono wpływ posuwu na wartości współczynnika bezpieczeństwa wyznaczonego ze względu na plastyczną wytrzymałość materiału, dla różnych temperatur skrawania (7). Na podstawie tego wykresu wyznaczono graniczne wartości posuwu, ze względu na plastyczną wytrzymałość ostrza, przyjmując $x_p = 1$ [5].



Rys. 7. Wpływ posuwu na wartość współczynnika bezpieczeństwa, wyznaczonego ze względu na kruchą wytrzymałość materiału ostrza



Rys. 8. Wpływ posuwu na wartość współczynnika bezpieczeństwa, wyznaczonego ze względu na plastyczną wytrzymałość materiału ostrza

Z porównania wykresów wynika, że dla temperatury ostrza ok. 700°C, dopuszczalne wartości posuwów, przy uwzględnieniu kruchej i plastycznej wytrzymałości ostrza są zbliżone, natomiast przy temperaturze ok. 800°C, dopuszczalna wartość posuwu wyznaczona z uwzględnieniem plastycznej wytrzymałości jest ok. pięciokrotnie mniejsza od posuwu wyznaczonego z uwzględnieniem kruchej wytrzymałości ostrza. W warunkach skrawania nie zapewniających dobrego odprowadzenia ciepła ze strefy skrawania o wytrzymałości materiału ostrza narzędzia decyduje więc jego wytrzymałość plastyczna.

4. WNIOSKI

- Podczas nagłego wchodzenia ostrza noża w obrabiany materiał występuje niebezpieczeństwo kruchego pęknięcia materiału ostrza na powierzchni natarcia, w obszarze styku wióra z tą powierzchnią.
- W czasie ciągłej obróbki, w obszarze styku wióra z powierzchnią natarcia, może nastąpić uplastycznienie zewnętrznej warstwy materiału ostrza, natomiast poza tą strefą może wystąpić jego kruche zniszczenie.

- W momencie nagłego wyjścia ostrza z obrabianego materiału może nastąpić jego wykruszenie na skutek wystąpienia na powierzchni natarcia naprężeń rozciągających o dużych wartościach. Obecność tych naprężeń należy wiązać z powstaniem ujemnie zorientowanej płaszczyzny poślizgu podczas tworzenia się zadzioru.
- We wszystkich badanych stanach obciążenia ostrza na powierzchni przyłożenia, w pobliżu krawędzi skrawającej, występują naprężenia ściskające, sprzyjające uplastycznieniu zewnętrznych warstw materiału ostrza, co przy wysokiej temperaturze, jaka tam występuje, może prowadzić do jego plastycznego zniszczenia.
- Analiza wskazuje na duży wpływ temperatury na wytrzymałość plastyczną i w ten sposób na ogólną wytrzymałość narzędzia skrawającego.

LITERATURA

1. Бетанели А., И.: Прочность и надежность режущего инструмента. Издательство "Сабчота сакартвело", Тбилиси 1973.
2. Czech M. Wodecki J.: Badania w zakresie obróbki skrawaniem stali austenitycznych. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej Nr 1/1996, Gliwice 1996, s.111-122
3. Famuła J., Mrowiec St., Nikiel J., Szumański T.: Tablice stali jakościowych. Wyd. 4, Katowice: Wyd. „Śląsk”, 1966.
4. Kunstetter S.: Narzędzia skrawające do metali – konstrukcja. Wyd. 3, Warszawa: WNT 1973.
5. Лоладзе Т., Н.: Прочность износостойкость режущего инструмента., Москва: Издательство "Машиностроение"1982.
6. Maciejny A.: Kruchość metali. Wyd. 1, Katowice Wyd. „Śląsk”, 1973.
7. Pekelharing A., J.: The exit failure in interrupted cutting. Annals of the CIRP, vol. 27/1/1978, s. 5-10.
8. Полетика М., Ф.: Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. Москва: Издательство "Машиностроение", 1969.
9. Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Wyd.2, , Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2000.
10. Зорев Н. Н.: Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, Москва 1956.
11. Praca zbiorowa: Poradnik Mechanika – obróbka skrawaniem. Tom 2, Wyd. 1, Warszawa: WNT, 1991.

INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF CUTTING TOOL WEDGE USING FINITE ELEMENT METHOD

Summary. Stresses in the wedge of cutting tool in conditions of orthogonal cutting were determined. Different kinds of machining were taken into consideration: sinking of the wedge into processed material, continuous cutting and exit from the material. Strength hypothesis for determination of dangerous values of reduced stresses were suggested. The influence of feed rate on the coefficient of reserve of brittle and plastic strength was determined.