

**Dr hab. inż. Wojciech ZĘBALA, prof. PK**  
**Dr inż. Bogdan SŁODKI**  
**Dr inż. Grzegorz STRUZIKIEWICZ**

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny  
Politechnika Krakowska  
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Poland  
E-mail: zebala@mech.pk.edu.pl

## **Poprawa produktywności i niezawodności toczenia stopu Inconel 718 – studium przypadku**

**Słowa kluczowe:** *Inconel, toczenie, produktywność, optymalizacja, parametry, mikro-  
twardość*

**Streszczenie:** Artykuł opisuje badania obróbki wykończeniowej toczeniem stopu Inconel 718, mające na celu optymalizację parametrów skrawania z uwzględnieniem maksymalizacji objętościowej wydajności obróbki, jako kryterium optymalizacyjnego. Proponowana procedura uwzględnia wymagane w procesie ograniczenia dotyczące wartości parametru chropowatości obrabianej powierzchni, siły skrawania oraz maksymalnej temperatury w strefie skrawania. Procedura optymalizacyjna zawiera wstępne testy mające na celu ustalenie w lokalnych warunkach obróbki użytecznego zakresu parametrów skrawania (posuwu i głębokości skrawania) dla otrzymania korzystnej postaci wiórów. Wykonane pomiary mikro-twardości w strefie skrawania umożliwiły określenie wielkości strefy zgniotu warstwy wierzchniej, co z kolei pozwoliło na zdefiniowanie minimalnej wartości posuwu. Procedurę optymalizacyjną zweryfikowano na przykładzie obróbki wybranej powierzchni elementu silnika lotniczego. Osiągnięto znaczną poprawę produktywności i niezawodności procesu obróbki.

### **Nomenklatura**

$A_D$  przekrój warstwy skrawanej w  $\text{mm}^2$   
 $a_p$  głębokość skrawania w mm  
 $D_c$  średnica przedmiotu obrabianego w mm  
 $f$  posuw w mm/obr  
 $F_c F_f F_p$  składowe całkowitej siły skrawania w N  
 $i$  liczba przejść  
 $n$  prędkość obrotowa w obr/min  
 $Q_v$  wydajność objętościowa obróbki w  $\text{cm}^3/\text{min}$   
 $Ra$  chropowatość powierzchni w  $\mu\text{m}$   
 $t_1$  czas skrawania dla jednego przejścia w min  
 $T_{cut}$  temperatura  $^{\circ}\text{C}$   
 $t_{cut}$  całkowity czas skrawania w min  
 $v_c$  prędkość skrawania w m/min  
 $R^2$  współczynnik determinacji

### **1. Wprowadzenie**

Stopy na bazie niklu (HRSA) z uwagi na ich dobre właściwości mechaniczne w wysokiej temperaturze są powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym np. na części silników odrzutowych. Najbardziej popularne stopy HRSA to Inconel 718, Inconel 626 i

Waspaloy. Około 45% odkuwek i 15% odlewów jest wykonywanych ze stopu Inconel 718 [6,29].

Pomimo dobrych właściwości konstrukcyjnych stopy na bazie niklu są materiałami trudnoskrawalnymi. Inconel 718 charakteryzuje się wysoką twardością w podwyższonej temperaturze, co determinuje wysoki opór skrawania. Stop ten ma tendencję do utwardzania się w warstwie przypowierzchniowej. Niska przewodność cieplna przyczynia się do powstawania wysokiej temperatury w strefie skrawania. Wynosi ona od 900°C przy niskiej prędkości skrawania, rzędu 30 m/min, do 1300°C przy 300 m/min [18].

Skład chemiczny większości stopów niklu zawiera 10-20% chromu, do 8% glinu i tytanu łącznie, od 5 do 15% kobaltu i niewielkie ilości boru, chromu, magnezu i węgla. Pozostałe składniki to molibden, niob i wolfram.

Od końca lat siedemdziesiątych stopy niklu są obiektem szczegółowych badań [4,10,12,13,15,21-23,26,27,34]. Szczególną uwagę przykładają się do jakości powierzchni i spójności warstwy wierzchniej części wykonanych z tych stopów [24,31]. Jest to istotne z uwagi na trwałość, wytrzymałość zmęczeniową i funkcjonalność obrobionych części [2,3,5,35,36].

Proces obróbki może mieć miejsce wówczas, gdy konieczna siła, właściwie usytuowana w czasie i przestrzeni, jest przyłożona do przedmiotu obrabianego. Siła działająca na ostrze musi przewyciężyć opór materiału obrabianego, jego sprężyste i plastyczne odkształcenia oraz opór tarcia podczas tworzenia nowej powierzchni [9,28,33].

Analiza literatury opisującej zjawiska występujące w procesie skrawania wykazuje, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania (przy stałej wartości wydajności skrawania) następuje zmniejszenie wartości siły skrawania [14]. Pozwala to na obróbkę przedmiotów cienkościennych.

Wpływ prędkości skrawania na siłę skrawania i chropowatość powierzchni jest powiązany z wpływem prędkości odkształcenia warstwy skrawanej na granicę plastyczności obrabianego materiału i zużycie narzędzia [11,16]. Temperatura w strefie obróbki jest ściśle powiązana z prędkością skrawania i wzrasta przy jej większych wartościach. Ciepło zmienia mikrostrukturę stopu i powoduje powstawanie naprężeń [25]. Przy niskich prędkościach skrawania dominującą rolę odgrywa zużycie ściernie na powierzchni przyłożenia [8]. Przy wyższych prędkościach skrawania występuje zużycie adhezyjne i dyfuzyjne [20].

Wiele artykułów poświęcono optymalizacji obróbki stopu Inconel 718. Zagadnienia dotyczące optymalizacji procesu skrawania stopu Inconel 718 z chropowatością powierzchni jako kryterium optymalizacyjnym były prezentowane w [1,16-18,35]. W [1] rozpatrywano kryterium ekonomiczne w optymalizacji procesu obróbki hybrydowej. Inne podejście do optymalizacji parametrów skrawania zaprezentowano w [7], gdzie głównym kryterium była maksymalizacja okresu trwałości ostrza i minimalizacja kosztów wytwarzania.

Podobne podejście dotyczące optymalizacji parametrów frezowania zaprezentowali autorzy w [19]. Optymalizację parametrów skrawania za pomocą RSM (Response Surface Methodology) rozpatrywano w [1]. Algorytm genetyczny w połączeniu ze sztuczną siecią neuronową, jako inteligentną techniką optymalizacji parametrów skrawania stopu Inconel 718 opisano w [30]. Inne podejście optymalizacji toczenia szybkościowego HSC przy pomocy TGRA (Taguchi Grey Relational Analysis) opisano w [26].

Z uwagi na fizyczne właściwości stopu Inconel 718 oraz utwardzanie warstwy wierzchniej w wyniku odkształcenia i niskiej przewodności cieplnej występuje brak dedykowanych procedur optymalizacji z kryterium produktywności. Stąd, autorzy podjęli próbę ustalenia procedury znajdowania optymalnych parametrów skrawania dla obróbki wykończeniowej stopu Inconel 718 z maksymalizacją objętościowej wydajności obróbki (produktywności) jako kryterium optymalizacyjnym, przy jednoczesnym nie przekraczaniu

wymaganych wskaźników chropowatości powierzchni, siły skrawania i temperatury ostrza. Weryfikację poprawności działania algorytmu opisano w części 3 tego opracowania.

## 2. Procedura optymalizacji

Zagadnienie poprawy toczenia z maksymalizacją wydajności objętościowej jako kryterium optymalizacyjnym można przedstawić w następujący sposób, równania (1-7):

$$a_{p \min} \leq a_p \leq a_{p \max} \quad (1)$$

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (2)$$

$$v_{c \min} \leq v_c = f(n, D_c) \leq v_{c \max} \quad (3)$$

$$Q_v = f(v_c, f, a_p) \rightarrow Q_{v \max} \quad (4)$$

$$F \leq F_{\lim} \quad (5)$$

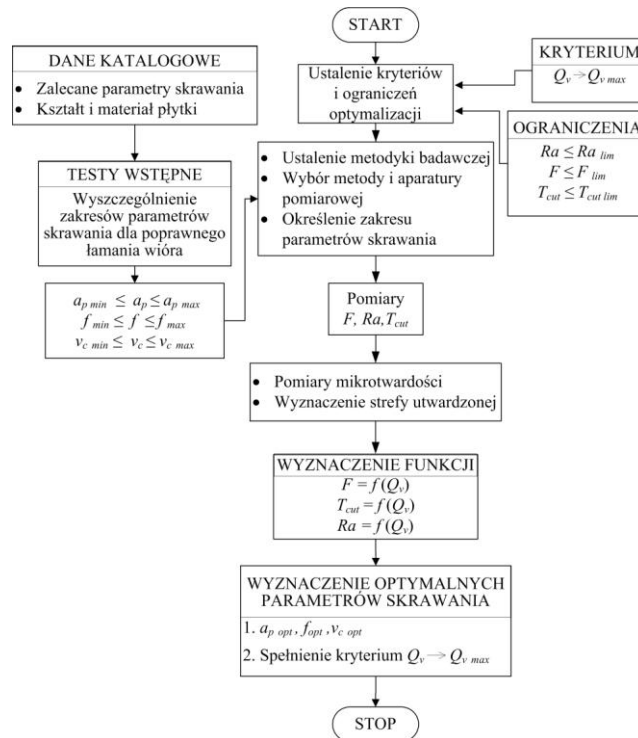
$$T_{cut} \leq T_{cut \lim} \quad (6)$$

$$Ra \leq Ra_{\lim} \quad (7)$$

gdzie:  $Q_{v \max}$  – maksymalna wydajność objętościowa;  $Ra_{\lim}$  – graniczna wartość chropowatości powierzchni;  $F_{\lim}$  – akceptowalne wartości składowych siły skrawania ( $F_{c \lim}$ ,  $F_f \lim$ ,  $F_p \lim$ ), z uwagi na wytrzymałość przedmiotu obrabianego w obszarze zamocowania oraz ich bezpośredniego wpływu na właściwości warstwy wierzchniej;  $T_{cut \lim}$  – akceptowalna graniczna wartość temperatury ostrza.

Wyrażenia (1-3) określają zbiory dopuszczalnych wartości głębokości skrawania, posuwu i prędkości skrawania. Zakresy ich dopuszczalnych wartości wynikają z wytycznych producenta narzędzia i wytypowanych badań w lokalnych warunkach obróbki (np. poprawne łamanie wióra). Ogólna procedura bazująca na doświadczeniach jest przedstawiona na Rys. 1. Na początku tej procedury należy zdefiniować zakres parametrów skrawania i optymalizacyjne kryterium procesu. Bazując na wynikach uzyskanych z kolejnych kroków procesu optymalizacyjnego wybiera się poprawne parametry skrawania. Schemat zaprezentowany na Rys. 1 składa się kolejno z:

- (1) Zdefiniowanie kryterium optymalizacyjnego (w tym przypadku  $Q_v$ ) i ograniczeń optymalizacyjnych ( $F$ ,  $T_{cut}$ ,  $Ra$ ).
- (2) Wstępne testy skrawania w celu ustalenia zakresu parametrów skrawania pozwalających na poprawne łamanie wióra.
- (3) Ustalenie metodyki badawczej i zestawienie aparatury pomiarowej. Na tym etapie należy ustalić ostateczny zakres parametrów skrawania stosowany w testach.
- (4) Pomiary ( $F$ ,  $Ra$ ,  $T_{cut}$ ) dla wybranych parametrów skrawania.
- (5) Pomiary mikrotwardości w celu określenia strefy zgniotu.
- (6) Określenie i analiza funkcji  $F = f(Q_v)$ ,  $T_{cut} = f(Q_v)$  i  $Ra = f(Q_v)$ .
- (7) Ustalenie optymalnych parametrów skrawania dla przyjętego kryterium optymalizacyjnego i ograniczeń na podstawie analizy powyższych funkcji.



Rys. 1. Schemat procedury poprawy produktywności toczenia ( $Q_{v \max}$ )

### 3. Weryfikacja procedury optymalizacyjnej

Proces optymalizacji parametrów skrawania, zgodnie z procedurą przedstawioną na Rys. 1, zastosowano dla wybranej powierzchni (\*\*) części silnika lotniczego (tulejki), wytworzonej ze stopu Inconel 718, Rys. 2a. Początkowe parametry skrawania (Przypadek 1), ustalone na podstawie zaleceń producenta narzędzi ( $a_p$ ,  $f$  i  $v_c$ ) oraz obliczone wartości przedstawiono w Tabeli 1.

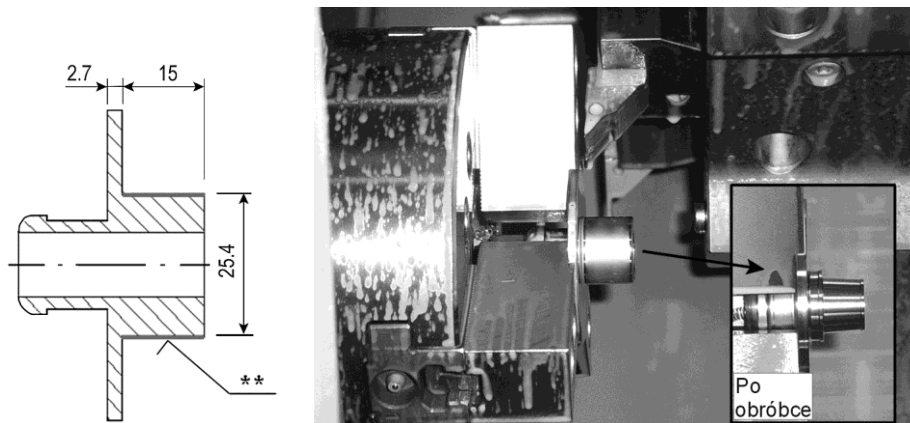
Tabela 1. Początkowe parametry skrawania oraz obliczone wartości  $A_D$ ,  $t_1$  oraz  $t_{cut}$

	$a_p$ mm	$f$ mm/rev	$v_c$ m/min	$A_D$ mm <sup>2</sup>	$t_1$ min	$t_{cut}$ min	$i$
Przypadek 1	1.1	0.080	40	0.088	0.374	2.25	6

Zmierzona wartość chropowatości powierzchni wyniosła  $Ra = 0.95 \mu\text{m}$  przy  $Q_v = 3.52 \text{ mm}^3/\text{min}$ . Były to wyjściowe parametry skrawania w stosunku do których poszukiwano optymalnych parametrów. Testy skrawania przeprowadzono na stanowisku badawczym zbudowanym na bazie centrum tokarskiego, wyposażonego w układ pomiaru sił skrawania. Rys. 2b przedstawia fotografię toczenia zewnętrznej powierzchni części pokazanej na Rys. 2a.

a)

b)



Rys. 2. Kształt półproduktu (a) oraz fotografia jego obróbki (b)

Do toczenia stosowano płytkę z węglików spiekanych, VCMT 160404-SM z pokryciem TiAlN, i kątem przyłożenia  $\alpha_n = 7^\circ$ . Płytkę zamocowano w oprawce SVJCR 2020K-16.

Kryterium optymalizacyjne – (maksymalizacja  $Q_v$ ) i ograniczenia, równanie (8) były zdefiniowane jako pierwszy krok procedury. Siła posuwowa i promieniowa nie były rozpatrywane.

$$Ra \leq 1.15 \mu\text{m} ; F_c \leq 470 \text{ N} \text{ oraz } T_{cut} \leq 650 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

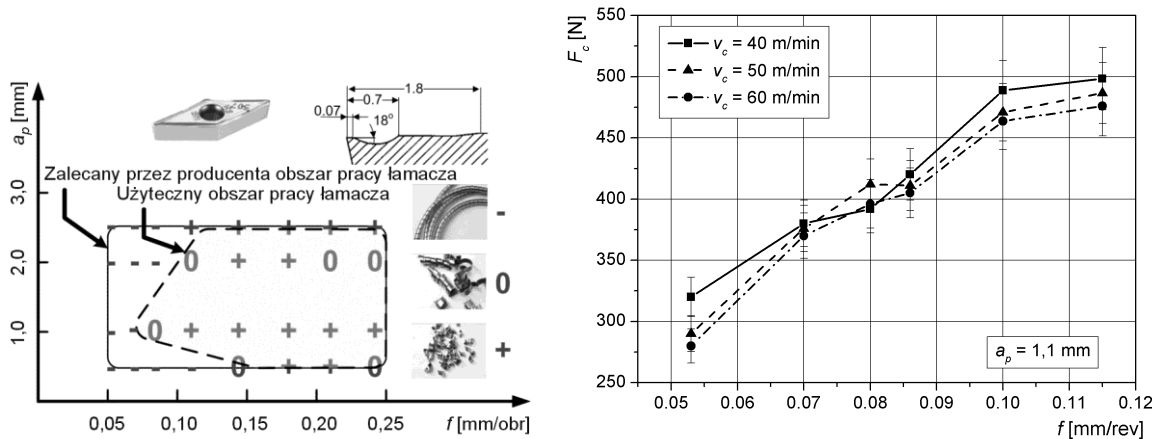
Analiza efektywności łamacza wióra typu SM w bieżącym, lokalnym środowisku obróbki była szczegółowo opisana w [32,37]. Wyniki dla  $v_c = 50$  m/min przedstawiono na Rys. 3a. Znaki na rysunku oznaczają: „x” – nieakceptowalną postać wióra, “0” – akceptowalną postać wióra, „+” – poprawną postać wióra. Podstawowe wymiary kształtu łamacza wióra przedstawiono w górnej części rysunku. Przeprowadzone testy potwierdzają fakt, że najbardziej korzystne formy wióra powstają dla następujących zakresów parametrów skrawania:  $v_c = 40\text{-}60$  m/min, posuw  $f = 0.08\text{-}0.25$  mm/obr i głębokość skrawania  $a_p > 1$  mm.

Wartości uzyskane dla siły skrawania  $F_c$  i temperatury  $T_{cut}$  w funkcji posuwu i prędkości skrawania przedstawiono odpowiednio na Rys. 3b i Rys. 4a. Przykładowe termogramy dla najwyższej i najniższej temperatury w strefie skrawania, zmierzone przy użyciu kamery termowizyjnej przedstawiono odpowiednio na Rys. 4b i Rys. 4c.

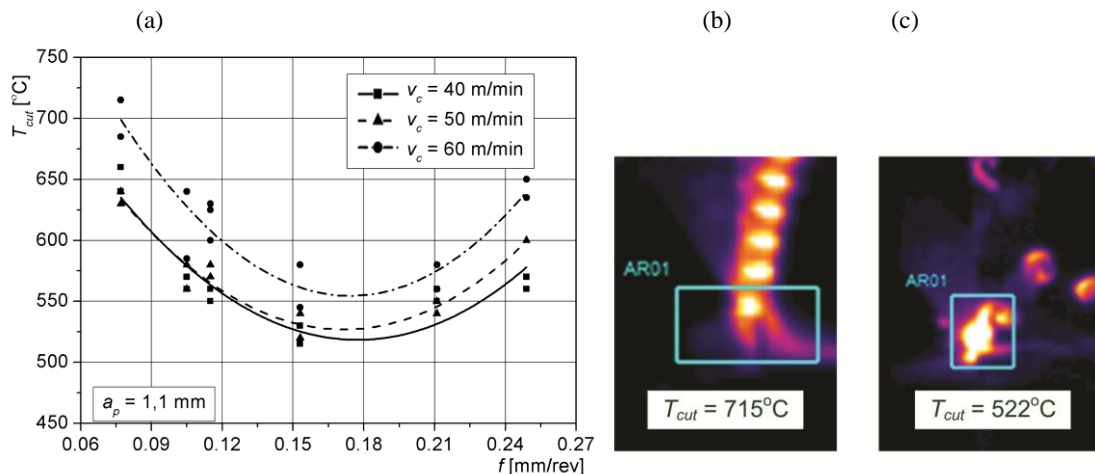
Rozpatrując Rys. 3b można zaobserwować, że dla wartości posuwu większej niż 0.1 mm/obr siła skrawania wzrasta wolniej przy dalszym wzroście wartości posuwu. Uogólniając, gdy zwiększa się posuw, przekrój warstwy skrawanej powiększa się i wzrasta opór skrawania. Powyżej wartości posuwu 0.1 mm/obr następuje spowolniony wzrost siły skrawania. Wynika to z faktu, że proces dekohezji materiału ma miejsce poniżej warstwy utwardzonej i opór skrawania maleje. Jest to potwierdzone przez pomiary mikrotwardości materiału obrabianego w strefie skrawania, opisane poniżej. Sugeruje to ustalenie wyższej granicy wartości posuwu (powyżej 0.1 mm/obr) niż było to początkowo proponowane (0.08 mm/obr).

a)

b)



Rys. 3. Klasyfikacja wiórów z użytecznym polem pracy łamacza wióra typu SM w lokalnych warunkach obróbki dla  $v_c = 50$  m/min, (a) oraz wpływ posuwu na prędkość skrawania (b)



Rys. 4. Temperatura ostrza narzędzia: a)  $T_{cut} = f(f, v_c)$ , b) obraz termograficzny dla  $v_c = 60$  m/min i  $f = 0.08$  mm/obr, c) obraz termograficzny dla  $v_c = 40$  m/min i  $f = 0.15$  mm/obr

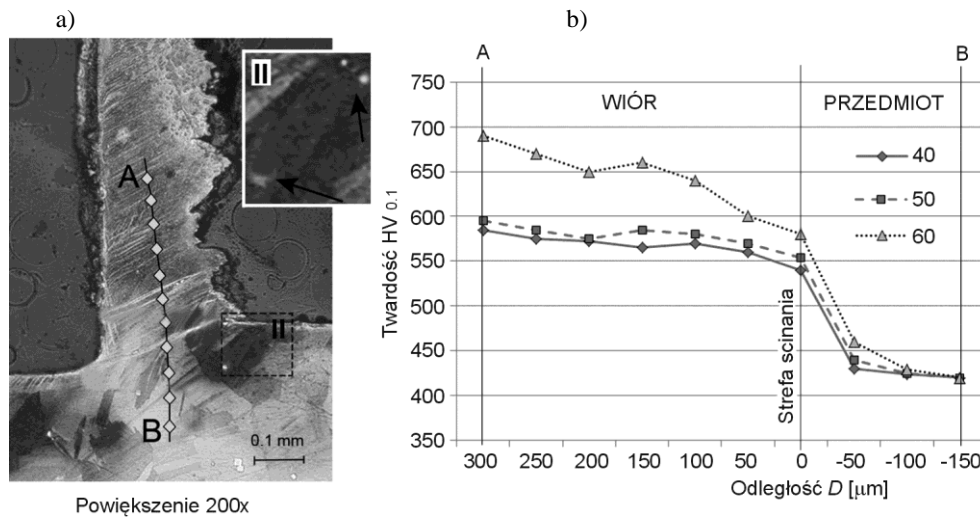
Wpływ prędkości skrawania na temperaturę ostrza pokazano na Rys. 4. Przy wyższej prędkości skrawania temperatura materiału obrabianego jest wyższa, co zmniejsza jego wytrzymałość.

Obserwując temperaturę ostrza dla różnych wartości posuwów i prędkości skrawania można stwierdzić, że gdy posuw wzrasta do około 0.18 mm/obr występuje spadek temperatury. Jest to prawdopodobnie bezpośrednio powiązane ze zmniejszaniem grubości warstwy utwardzonej w stosunku do całkowitej grubości warstwy skrawanej. Temperatura ostrza osiąga wartość minimalną dla każdej prędkości skrawania w obszarze posuwów około  $f = 0.18$  mm/obr. Wraz ze zwiększaniem wartości posuwu temperatura ostrza rośnie z powodu powiększania się przekroju warstwy skrawanej i równocześnie występuje mniejszy wpływ warstwy utwardzonej na proces dekohezji.

Aby przeanalizować morfologię wióra i określić warstwę utwardzoną obrabianego materiału wykonano testy z gwałtownym zatrzymaniem procesu. Przykład fotografii mikrop przekroju wykonanej na mikroskopie skaningowym pokazano na Rys. 5a. Można zaobserwować austenityczną strukturę materiału, rozmiar ziarna i lokalizację nielicznych cząsteczek węgla tytanu (strzałki na rysunku).

Następnie, zmierzono mikrotwardość  $HV_{0.1}$  (metodą Hannemann'a) w strefie skrawania wzdłuż linii umieszczonej wewnątrz wióra i przedmiotu obrabianego (linia AB na

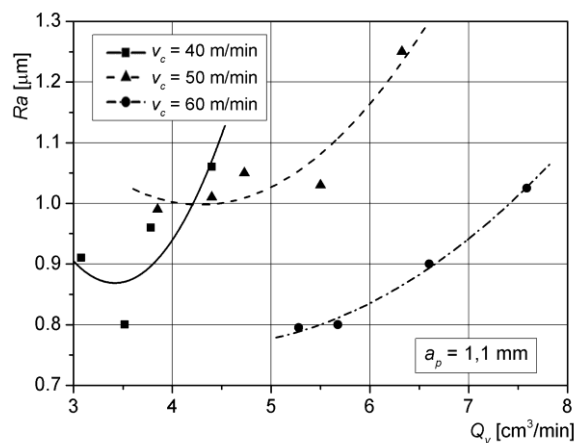
Rys. 5a). Wykres ilustrujący wpływ prędkości skrawania na rozkład mikro-twardości dla posuwu  $f = 0.1$  mm/obr pokazano na Rys. 5b).



Rys. 5. Strefa tworzenia wióra z zaznaczonymi, przy pomocy strzałek, cząstkami węgliku tytanu (a) oraz rozkład mikro-twardości wzdłuż linii AB dla posuwu  $f = 0.1$  mm i prędkości skrawania  $v_c = 40; 50; 60$  m/min (b)

Stopy na bazie niklu utwardzają się w czasie obróbki, co jest spowodowane przez znaczne utwardzenie plastyczne w obszarze umiejscowionym z przodu ostrza. Rozmiar tej deformacji zmienia się w funkcji odległości od obrabianej powierzchni. Przekłada się to na wzrost twardości od 420 HV<sub>0.1</sub> dla materiału rdzenia (blisko punktu B), do 540;554;580 HV<sub>0.1</sub> w strefie ścinania dla odpowiednio  $v_c = 40; 50; 60$  m/min, Rys. 5b. W odległości około 0.1 mm od powierzchni obrabianej można zaobserwować znaczny spadek twardości do 425-429 HV<sub>0.1</sub>. Oznacza to, że powinno się zalecić wartość posuwu co najmniej 0.1 mm/obr tak, aby krawędź skrawająca przemieszczała się poniżej warstwy utwardzonej.

Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych objętościowych wydajności obróbki przedstawiono na Rys. 6.



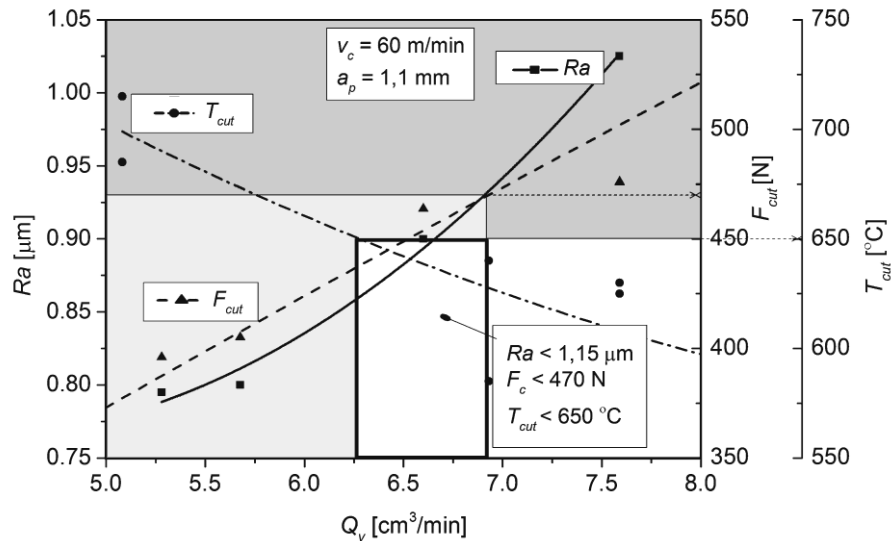
Rys. 6. Zależność parametru chropowatości powierzchni obrobionej  $R_a$  od objętościowej wydajności skrawania dla różnych prędkości skrawania

Można zaobserwować, że dla niższych prędkości skrawania parametr chropowatości  $R_a$  osiąga akceptowalne wartości poniżej 0.95  $\mu\text{m}$  ale objętościowa wydajność obróbki jest

niewielka, poniżej 4 cm<sup>3</sup>/min. Wydaje się więc zasadne stosowanie prędkości skrawania powyżej 50 m/min.

Biorąc pod uwagę powyżej opisane rozważania ustalono odpowiednie zakresy posuwu ( $0.1 \text{ mm/obr} \leq f \leq 0.25 \text{ mm/obr}$ ) i prędkości skrawania ( $50 \text{ m/min} \leq v_c \leq 60 \text{ m/min}$ ). Głębokość skrawania ustalono tak jak w Przypadku 1.

Na podstawie pomiarów i obliczeń wykonano wykres pokazany na Rys. 7. Wykres ten umożliwia wybór najlepszych wartości parametrów skrawania, spełniających ograniczenia optymalizacyjne (8).



Rys. 7. Zależności  $F_c$ ,  $T_{cut}$  oraz  $Ra$  od objętościowej wydajności skrawania dla  $v_c=60 \text{ m/min}$

Wykres z Rys. 7 i równania (9-11) pozwalają określić maksymalną wydajność obróbki dla prędkości skrawania  $v_c = 60 \text{ m/min}$ . Wartość ta została wybrana z zakresu spełniającego ograniczenie temperatury  $T_{cut}$  (wykres na Rys. 4a).

$$Ra = 1.20005 - 0.20395Q_v + 0.02386Q_v^2 \quad (R^2 = 0.98162) \quad (9)$$

$$T_{cut} = 1018.31177 - 80.68902Q_v + 3.50898 Q_v^2 \quad (R^2 = 0.97467) \quad (10)$$

$$F_c = 96.5146 + 58.97511Q_v - 0.73246 Q_v^2 \quad (R^2 = 0.97987) \quad (11)$$

Optymalne parametry skrawania zostały wybrane dla maksymalnej wydajności obróbki  $Q_v = 6.92 \text{ cm}^3/\text{min}$  i przedstawione w Tabeli 2.

Tabela 2. Początkowe parametry skrawania (Przypadek 1) oraz parametry po optymalizacji dla  $v_c=60 \text{ m/min}$

	$a_p$ mm	$f$ mm/rev	$v_c$ m/min	$Ra$ µm	$Q_v$ cm <sup>3</sup> /min	$T_{cut}$ °C	$F_c$ N
Początkowe parametry skrawania (Przypadek 1)	1.1	0.080	40	0.95	3.52	580	392
Parametry skrawania po optymalizacji	1.1	0.105	60	0.93	6.92	628	469

#### 4. Wnioski



Wyniki testów skrawania pozwoliły na ustalenie najlepszych wartości parametrów skrawania przy obróbce zewnętrznej powierzchni tulei wykonanej ze stopu Inconel 718 przy maksymalizacji objętościowej wydajności obróbki i ustalonych wartościach ograniczeń  $F_c$ ,  $T_{cut}$  i  $Ra$ . W wyniku realizacji procedury optymalizacyjnej osiągnięto zwiększenie produktywności o prawie 97% przy jednoczesnym niewielkim wzroście chropowatości powierzchni do wartości parametru  $Ra = 1,1 \mu\text{m}$  (dozwolona wartość  $Ra_{lim} = 1.15 \mu\text{m}$ ) i wzroście wartości siły skrawania o około 20%, ale wciąż poniżej granicznej wartości. Proces obróbki jest bardziej niezawodny jeżeli weźmie się pod uwagę poprawne formowania i łamanie wióra dla zoptymalizowanych parametrów skrawania. Badania udowodniły potrzebę wstępnych testów skrawania w lokalnych warunkach obróbki, służących jako pierwotne źródło informacji dla procedury optymalizacyjnej.

## Literatura

1. Aruna M, Dhanalaksmi V. Design optimization of cutting parameters when turning Inconel 718 with cermet inserts. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2012; 61:952-956.
2. Arunachalam RM, Mannan MA, Spowage AC. Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2004; 44:879-887.
3. Arunachalam RM, Mannan MA, Spowage AC. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2004; 44:1481-1491.
4. Arunachalam RM, Mannan MA. Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology* 2000; 4:127-168.
5. Axinte DA, Gindy N, Fox K, Unanue I. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining. *Machine Tools and Manufacture* 2004; 44:1091-1108.
6. Choudhoury IA, El-Baradic MA. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Materials Processing Technology* 1998; 77:278-284.
7. Choudhoury SK, Appa Rao IVK. Optimization of cutting parameters for maximizing tool life. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 1999; 39:343-353.
8. D'Addona D, Segreto T, Simeone A, Teti R. ANN tool wear modelling in the machining of nickel superalloy industrial products. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2011; 4:33-37.
9. Devillez A, Schneider F, Dominiak S, Dudzinski D, Larrouquere D. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear* 2007; 262:931-942.
10. Dudzinski D, Devilleza A, Moufkia A, Larrouquèreb D, Zerroukib V, Vigneaub J. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2004; 44:439-456.
11. El-Hossainy TM, El-Zoghby AA, Badr MA, Maalawi KY, Nasr MF. Cutting Parameter Optimization when Machining Different Materials. *Materials and Manufacturing Processes* 2010; 25:1101-1114.
12. Ezugwu EO, Fadarea DA, Bonneya J, Da Silvaa RB, Salesa WF. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005; 45:1375-1385.
13. Ezugwu EO. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005; 45:1353-1367.

14. Fang N, Wu Q. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2009; 209:4385–4389.
15. Gullu A, Karabulut S. Dynamic Chip Breaker Design for Inconel 718 Using Positive Angle Tool Holder. *Materials and Manufacturing Processes* 2008; 23:852-857.
16. Guo YB, Li W, Jawahir IS. Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult-To-Machine Alloys: A State-Of-Art Research Review and Analysis. *Machining Science and Technology* 2009; 13:437-470.
17. Jonak J, Podgórski J, Zubrzycki J. Wybrane zagadnienia mechaniki procesu skrawania materiałów. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 5:27-31.
18. Kitagawa T, Kubo A, Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn. *Wear* 1997; 202:142-148.
19. Krain HR, Sharman ARC, Ridgway K. Optimization of tool life and productivity when end milling Inconel 718. *Materials Processing Technology* 2007; 189:153–161.
20. Liao YS, Shiue RH. Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy. *Wear*. 1996; 193:16-24.
21. Nalbant M, Altin A, Gokkaya H. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys. *Materials&Design* 2007; 28:1334–1338.
22. Narutaki N, Yamane Y. Machining of difficult-to-cut materials. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 1993; 27:307-310.
23. Narutaki N, Yamane Y, Hayashib K, Kitagawa T, Uehara K. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 1993; 42:103-106.
24. Oktem H, Erzurumlu T, Kurtaran H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 170:11-16.
25. Outeiro JC, Pina JC, M'Saoubi R, Pusavec F, Jawahir IS. Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2008; 57:77–80.
26. Pawade RS, Joshi S. Mechanism of chip formation in high-speed turning of Inconel 718. *Machining Science and Technology* 2011; 15:132-152.
27. Pawade RS, Joshi S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2011; 56:47–62.
28. Rusinek R. Drgania w procesie skrawania stopu tytanu. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 3:48-55.
29. Sandvik Coromant, Aerospace Engine – application guide 2004.
30. Senthilkumar JS, Selvarani P, Arunachalam RM. Intelligent optimization and selection of machining parameters in finish turning and facing of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012; 58:885–894.
31. Sharman ARC, Hughes JI, Ridgway K. An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718TM when turning. *Journal of Materials Processing Technology* 2006; 173:359–367.
32. Słodki B, Zębala W. The analysis of selected chipbreakers efficiency in difficult-to-cut material turning in local operating features. *Naukowy Żurnal, National University in Chmielnicki, Ukraine* 2007; 1:179-189.

33. Taranenko G, Taranenko W, Świć A, Szabelski J. Modelowanie układów dynamicznych obróbki skrawaniem wałów o małej sztywności. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 4:4-15.
34. Thakur DG, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. A Study on the Parameters in High-Speed Turning of Superalloy Inconel 718. *Materials and Manufacturing Processes* 2009; 24:497-503.
35. Wrigth PK, Chow JG. Deformation characteristic of nickel alloys during machining. *Journal of Engineering Materials and Technology* 1982; 104:85–93.
36. Yoo JT, Yoon JH, Lee HS, Youn SK. Material characterization of Inconel 718 from free bulging test at high temperature. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2012; 26:2101-2105.
37. Zębala W, Słodki B. Some aspects of chipbreakers efficiency in difficult-to-cut materials turning. *Proc. of Int. Users' Conf. „Modelling Technology – Machining Solution”*, Minneapolis, MN, USA 2008; 14:1-14.