

WYBRANE OPERACJE OBRÓBK STOPÓW ŻAROWYTRZYMAŁYCH

Mirosław Dalak*, Jacek Lewandowski**

**Katedra Inżynierii Produkcji, **Koło Naukowe Mechaników
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy*

Streszczenie

W pracy przedstawiono niektóre aspekty obróbkowe superstopów żarowytrzymałych oraz wybrane zalecenia umożliwiające ekonomiczne przeprowadzenie operacji procesu ich skrawania. Odniesiono się do toczenia, frezowania i wykonywania gwintów wewnętrznych, jak też do stosowanych materiałów narzędziowych.

1. WPROWADZENIE

Superstopy żarowytrzymałe (Heat Resistant Super Alloys – HRSA) są przeznaczone do pracy w podwyższonej do około 600°C temperaturze i głównie wykonuje się z nich urządzenia ciśnieniowe do energetyki oraz elementy silników odrzutowych: turbiny i ich obudowy. Dlatego stopy te pomimo odporności na pracę w wysokich temperaturach muszą odznaczać się odpornością na agresywne działanie gazów powstających w wyniku spalania paliwa. Jednocześnie elementy silnika odrzutowego muszą posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne, czyli odporność na obciążenia dynamiczne i zmęczenie. Wymagana jest także odpowiednia odporność na ewentualne zderzenia z ptakami i fragmentami złamanych łopatek sprężarki [2].

Wszystkie wyżej wymienione wymagania stawiane stopom żarowytrzymałym sprawiają, iż są one materiałami trudno obrabialnymi. Do najważniejszych przyczyn złej skrawalności należą: silna skłonność do umocnienia odkształceniowego i tworzenia narostu, mała przewodność i pojemność cieplna, przyspieszone zużycie ostrza oraz utrudniona kontrola wióra. Przy wyjściowej twardości około 200 HB warstwa wierzchnia zostaje umocniona nawet do 400÷500 HB na głębokość 0,08÷0,12 mm. Z tych względów głębokość skrawania w operacji zgrubnej powinna być dostatecznie duża, aby ostrze nie pracowało w obszarze silnie umocnionego materiału [5].

Celem pracy jest ocena możliwości obróbki superstopów żarowytrzymałych z zastosowaniem tradycyjnych oraz nowoczesnych środków obróbkowych, a także tendencji rozwijających się w przemyśle.

2. WYBRANE SPOSOBY OBRÓBK HRSA

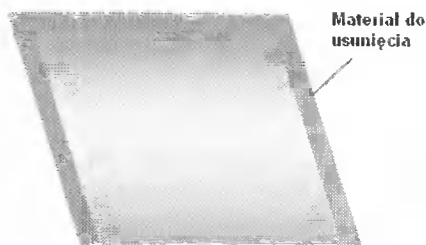
Stopy żarowytrzymałe są coraz bardziej popularnym materiałem stosowanym do wytwarzania elementów stosowanych w przemyśle lotniczym i kosmicznym – z tego powodu opracowywane są nowe i rozwijane dotychczasowe metody ich obróbki [1]. Generalnie stopy żarowytrzymałe są trudno obrabialnymi materiałami w porównaniu ze stalami ogólnego przeznaczenia i ze stalami nierdzewnymi, jest to spowodowane cechami tych stopów, które są wymagane od materiałów stosowanych na turbiny [4]. Obróbka stopów żarowytrzymałych jest różna w zależności od obróbki wstępnej mate-

riału. Obrabiając materiał przed hartowaniem można stosować płytki węglkowe pokrywane metodą CVD. Jeżeli materiał poddany został starzeniu, ciepło wydzielane podczas skrawania jest tak duże, że mogą być stosowane jedynie najbardziej odporne gatunki płytek. W przypadku materiałów hartowanych najlepsze rezultaty daje obróbka płytkami ceramicznymi (z whiskersami, sialon). Jeżeli nie jest możliwe użycie płytek ceramicznych, należy zastosować płytki pokrywane, wykonane z węglków drobnoziarnistych [3].

2.1. Toczenie

Ogólnie toczenie stopów żarowytrzymałych może składać się z trzech etapów, z których każdy wymaga specyficznych operacji obróbkowych:

- *toczenie zgrubne* (FSM – *First Stage Machining*), podczas którego głębokość skrawania wynosi do 10 mm (rys. 1).



Rys. 1. Materiał usunięty podczas toczenia zgrubnego [4]

Zazwyczaj półfabrykatami są elementy odlewane lub odkuwki posiadające „chropowatą” i nierówną powierzchnię [4]. Generalnie toczenie zgrubne przeprowadza się w stanie miękkim (twardość wynosi około 26 HRC) na komponentach uzyskanych z odlewni lub kuźni, za pomocą narzędzi z węglków spiekanych przy wysokim posuwie, dużej głębokości i niskiej prędkości skrawania [3]. Bardzo często stosowane są narzędzia z ceramiki, które szczególnie nadają się do obróbki odkuwek. Podczas toczenia zgrubnego głównym priorytetem jest wydajność i objętość usuniętego materiału. W całym procesie skrawania często usuwa się nawet do 80% początkowej masy półfabrykatu i większość jej jest właśnie usuwana podczas toczenia zgrubnego (FSM). Podczas tego rodzaju toczenia wykonywane są z reguły proste kształty (głównie walce i stożki), dlatego w celu przeprowadzenia go stosuje się standardowe sposoby zamocowania przedmiotu obrabianego [4],

- *toczenie kształtujące* (ISM – *Intermediate Stage Machining*), podczas którego głębokość skrawania wynosi 0,5÷3 mm. W tym rodzaju toczenia materiał obrabiany jest zazwyczaj w stanie utwardzonym i poddany starzeniu w wyniku obróbki cieplnej przeprowadzonej po toczeniu zgrubnym. Toczenie to obejmuje głównie kształtowanie obrabianego komponentu z zastosowaniem zmiennej głębokości skrawania i bez większych wymagań tolerowania wymiarów. Jednocześnie ważne jest „bezpieczeństwo” płytki skrawającej, aby nie uległa uszkodzeniu [4]. Najodpowiedniejszymi materiałami skrawającymi narzędziowymi na tym etapie obróbki są materiały ceramiczne [3]. Obrabiane elementy często posiadają złożony kształt, który wymaga wykonywania głębokich rowków w profilu obrabianego komponentu (rys. 2). Z tego powodu narzędzia stosowane w tym rodzaju obróbki posiadają specjalne właściwości, stąd zachodzi potrzeba stosowania odpowiednich płytek skrawających [4].



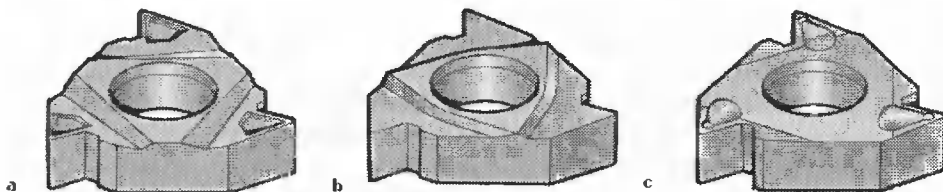
Rys. 2. Materiał usunięty podczas toczenia kształtującego [4]



Rys. 3. Materiał usunięty podczas toczenia wykończeniowego [4]

- *toczenie wykończeniowe* (LSM – *Last Stage Machining*), podczas którego głębokość skrawania wynosi $0,2-0,5$ mm (rys. 3). W tym etapie usuwana jest mała ilość materiału. Od tego rodzaju obróbki wymaga się, aby uzyskana powierzchnia obrabianego elementu była jak najlepszej jakości (niska chropowatość). Jest to najważniejszy etap toczenia. Z tego powodu w wielu przypadkach podmiot obrabiający musi poświadczyć certyfikatem jakich używano narzędzi, ścieżek narzędzia i jakie zastosowano parametry obróbki. Najczęściej stosowane podczas toczenia wykończeniowego są narzędzia z węglików spiekanych, ponieważ zapewniają one minimalną strefę odkształceń oraz uzyskanie odpowiednich naprężeń powierzchniowych w gotowym elemencie obrabianym [4].

Toczenie gwintów wewnętrznych. Podczas toczenia gwintów wewnętrznych największym problemem jest usunięcie wiórów z otworu, szczególnie podczas wycofywania narzędzia z gwintowanego otworu. W tym celu modyfikowany jest posuw wglębny, aby powstawały ciągle i spiralne wióry, które łatwo usunąć na zewnątrz otworu. Zalecane jest, aby posuw wglębny pomiędzy kolejnymi przejściami nie był większy niż $0,2$ mm i nie mniejszy niż $0,06$ mm. Nie należy też wykonywać ostatniego przejścia bez wcześniejszego przesunięcia wglębnego narzędzia, dzięki temu nie powstają drgania [6]. Gwintowanie otworów w porównaniu z toczeniem jest ograniczone do gwintowania na pewną głębokość. Jest to spowodowane wzrostem sił promieniowych. Dla otworów o głębokości powyżej $2,5D$ (D – średnica otworu) zalecane jest stosowanie trzonków narzędzi wzmocnionych węglnikami spiekanymi, co ma wpływ na zmniejszenie drgań i wzrost wydajności. Wśród płytek skrawających można wyróżnić trzy najczęściej stosowane typy (rys. 4).



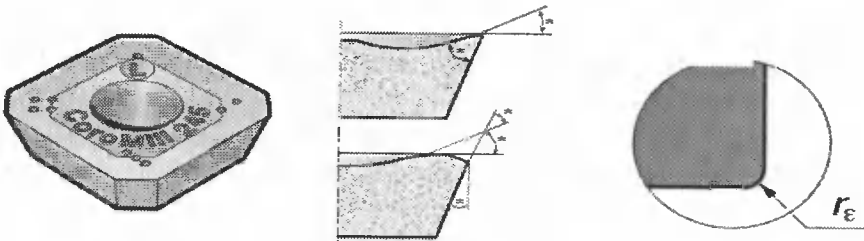
Rys. 4. Płytki skrawające do toczenia gwintów: a) z zaokrągloną krawędzią skrawającą (r_n), b) z geometrią F ($r_n \rightarrow 0$), c) z geometrią C z kształtową powierzchnią natarcia [6]

Pierwszym jest płytka z zaokrągloną krawędzią skrawającą (r_n). Jest ona najczęściej stosowana, ponieważ nadaje się do wykonywania większości operacji i obrabiania większości materiałów oraz zapewnia dobre formowanie wióra. Natomiast płytka z geo-

metrię typu F posiada ostrą krawędź skrawającą (nie ma zaokrąglenia, $r_n \rightarrow 0$). Takie rozwiązanie ma wpływ na obniżenie siły skrawania i stan końcowy obrobionej powierzchni oraz zmniejszenie skłonności do powstawania narostu. Z kolei płytka typu C posiada geometrię, która umożliwi łamanie wióra, przez co obróbka wymaga ograniczonej kontroli operatora obrabiarki [4, 6, 7].

2.2. Frezowanie

Zazwyczaj frezowanie stopów żarowytrzymałych wymaga sztywniejszych narzędzi i pewniejszego zamocowania przedmiotu i narzędzia, aby nie wystąpiły drgania, które mogą wpłynąć negatywnie na dokładność obróbki. Narzędzie powinno posiadać wysoką dokładność wymiarową zarówno w kierunku osiowym, jak i promieniowym, aby obciążenie narzędzia było stałe przez cały czas obróbki (nie wystąpią drgania), co w konsekwencji zapobiegnie uszkodzeniu (wyłamaniu lub pęknięciu) ostrza frezu. Krawędzie skrawające powinny być ostre ($r_n \rightarrow 0$), ale jednocześnie minimalnie zaokrąglone (r_e), co zapobiega przywieraniu wióra do ostrza w miejscu, gdzie ostrze opuszcza materiał obrabiany (rys. 5) [4].



Rys. 5. Płytki skrawające służące do frezowania z małym promieniem naroża (* – wymiary charakteryzujące płytkę skrawającą) [6]

Zalecane jest stosowanie jak największej liczby ostrzy skrawających we frezie, ponieważ pozwala to na uzyskanie wysokiej wydajności pod warunkiem, że zostaje zachowana sztywność narzędzia. Korzystne jest także rozmieszczenie płytek skrawających nierównomiernie na obwodzie frezu [6]. Podczas frezowania stopów żarowytrzymałych prędkości skrawania są niskie. Powszechnie stosuje się obróbkę z małymi prędkościami skrawania, z jednoczesnym zastosowaniem dość wysokiego posuwu na ostrze, tak aby grubość wióra nie była mniejsza niż 0,1 mm. Zapobiega to utwardzeniu materiału obrabianego i sprawia, że struktura powierzchni jest prawidłowa [4]. Zalecane jest stosowanie dużych ilości chłodziwa podczas skrawania z małymi prędkościami na całym obwodzie narzędzia, ponieważ zmniejsza to przyleganie wiórów. Podczas skrawania z większymi prędkościami, w górnych zalecanych granicach, bardziej korzystne jest stosowanie chłodziwa w postaci mgły [6].

Geometria ostrza skrawającego powinna być zawsze dodatnia. Podczas frezowania z głębokością skrawania do 5 mm kąt przystawienia nie powinien być mniejszy niż 45° . W praktyce stosowane są okrągłe płytki skrawające z dodatnim kątem natarcia. Ważne jest także, aby przestrzeń pomiędzy poszczególnymi ostrzami frezu była dość duża. Umożliwia to dobre usuwanie wióra na całym obwodzie narzędzia. Stosowanie większych odległości jest spowodowane tym, że długość wióra podczas frezowania superstopów żarowytrzymałych jest większa w porównaniu z obróbką przedmiotów ze stali wę-

głowej. Zużycie powierzchni przyłożenia nie powinno przekroczyć wartości $0,2\pm 0,3$ mm, ponieważ po przekroczeniu tych wartości wzrasta możliwość katastroficznego zużycia narzędzia. Z tego powodu należy często sprawdzać poziom zużycia, jest to uzasadnione głównie aspektami ekonomicznymi [4].

Bardziej korzystniejsze jest frezowanie współbieżne, ponieważ wiór w momencie wychodzenia ostrza z materiału ma małą grubość, dzięki czemu w mniejszym stopniu przylega do narzędzia. Czasami korzystne jest zastosowanie frezowania przeciwbieżnego, głównie w przypadku, gdy sposób zamocowania przedmiotu nie umożliwia frezowania współbieżnego, najczęściej jest to spowodowane tym, że podczas frezowania współbieżnego występują drgania [6].

3. PŁYTKI SKRAWAJĄCE NARZĘDZI DO OBRÓBKI HRSA

Szybkie zużycie się płytek skrawających jest głównym problemem, który występuje podczas obróbki HRSA. Największe zużycie następuje, gdy głębokość skrawania jest większa od promienia naroża r_n [6] i kąt przystawienia narzędzia $\kappa_r = 90^\circ$. (Głębokość skrawania jest decydującym czynnikiem; gdy głębokość jest mniejsza od promienia naroża, to efektywny kąt przystawienia ulega zmniejszeniu). Przestrzeganie ogólnych zasad umożliwi kontrolowanie przebiegu zużycia:

- stosowanie okrągłej płytki, a gdy nie jest to możliwe – użycie płytki skrawającej z kątem przystawienia nie większym niż $\kappa_r = 45^\circ$,
- skrawanie z dużymi kątami natarcia i płytkami z dużym promieniem naroża.
- skrawanie ze zmienną głębokością w czasie jednej operacji. Powoduje to rozkład zużycia na całe ostrze, przez co zwiększa się jego żywotność i zużycie może być w większym stopniu kontrolowane. Ta odmiana skrawania jest głównie stosowana podczas stosowania płytek ceramicznych o okrągłym kształcie [4].

3.1. Płytki z węglików spiekanych

Węgliki spiekane są najpowszechniejszymi materiałami skrawającymi stosowanymi w nowoczesnych rozwiązaniach. Posiadają one strukturę drobnoziarnistą, co sprawia, że są w stanie sprostać stawianym im wymaganiom podczas obróbki stopów żarowytrzymałych.

3.2. Węgliki z powłoką PVD

Przykładem węglików spiekanych (rys. 6) pokrytych metodą PVD jest gatunek materiału skrawającego GC1005 pokrytego powłoką TiAlN, który posiada strukturę drobnoziarnistą i jest głównie przeznaczony do toczenia rowków i obróbki kształtującej HRSA oraz stali nierdzewnych. Materiał ten jest także stosowany tam, gdzie występuje duża udarność, szczególnie w przemyśle lotniczym i kosmicznym, turbin gazowych oraz przemysłach naftowym i gazowniczym. GC1005 charakteryzuje się dużą odpornością na zużycie powierzchni przyłożenia i odpornością na powstawanie karbu w połączeniu z dobrą udarnością krawędzi ostrza [8]. Nadaje się zarówno do operacji FSM, jak i w ISM. Dobierając optymalną prędkość skrawania płytkami wykonanymi z węglików GC1005 należy uwzględnić głębokość skrawania i twardość obrabianego materiału [4].

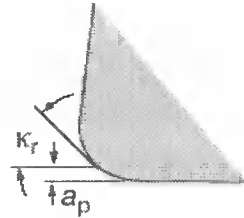
3.3. Węgliki z powłoką CVD

Przykładem węglików pokrytych warstwą metodą CVD jest gatunek S05F, który posiada strukturę drobnoziarnistą i jest przeznaczony do operacji obróbki wykończe-

niowej. Węglik z warstwami CVD nie są zwykle stosowane z powodu szybkiego zużycia podczas skrawania z dużą głębokością, znalazły natomiast zastosowanie podczas obróbki wykończeniowej (LSM), gdzie głębokość skrawania jest mała. Zalecane jest obrabianie węglkami z głębokością a_p wynoszącą około 30% promienia naroża płytki skrawającej (rys. 7), wtedy nie występuje zjawisko szybkiego zużycia [4].



Rys. 6. Płytki skrawające z węglików spiekanych GC1105 [8]



Rys. 7. Głębokość skrawania węglkami z powłoką CVD [4]

Warstwy CVD posiadają dużą twardość na gorąco i przyleganie pokrycia do podłoża, co umożliwia skrawanie z wysokimi prędkościami (powyżej 120 m/min dla Inconel 718). Trwałość płytki skrawającej zależy przede wszystkim od prędkości skrawania.

3.4. Płytki z materiałów ceramicznych

Materiały ceramiczne umożliwiają skrawanie HRSA z prędkościami sześciokrotnie wyższymi niż węgliki spiekane. Płytki wykonane z tych materiałów posiadają tendencję do wykruszania się, dlatego najczęściej wytwarza się okrągłe płytki skrawające. Równocześnie skrawając płytkami ceramicznymi uzyskuje się zły stan powierzchni przedmiotu obrobionego, dlatego nie stosuje się ich w operacjach wykończeniowych. Najodpowiedniejsze do obróbki superstopów żarowytrzymałych są dwa gatunki ceramiki. Pierwszym jest posiadająca dużą wytrzymałość ceramika CC670 z whiskerami. Natomiast drugi gatunek CC6080 zapewnia mniejsze opory skrawania, ale w porównaniu z CC670 posiada niższą wytrzymałość [4]. Wybór najbardziej odpowiedniego materiału skrawającego zależy zarówno od skrawanego materiału, jak i przeprowadzanej operacji.

Obróbka zgrubna jest najwydajniejsza, gdy kąt przystawienia wynosi 45° lub mniej. Podczas obróbki superstopów żarowytrzymałych najczęściej stosowane są dwa typy płytek skrawających: o kształcie okrągłym lub kwadratowym. Płytkami okrągłymi można skrawać na głębokość $0,15 d$ (d – średnica okrągłej płytki), przy kącie przystawienia 45° . Zalecane jest stosowanie płytek skrawających o możliwie największej średnicy, aby uzyskać jak największą głębokość skrawania a_p .

Podczas skrawania płytkami okrągłymi ważna jest odpowiednia grubość wiórów, dlatego należy ją kontrolować. Grubość wiórów zależy od średnicy płytki skrawającej i prędkości posuwu. Zalecane jest, aby grubość wióra znajdowała się w zakresie $0,1 \div 0,15$ mm i należy ją modyfikować prędkością posuwu [4].

Płytki kwadratowe, o kącie przystawienia $\kappa_r = 45^\circ$, są stosowane, gdy wymagana jest większa głębokość skrawania. Ponadto płytki te zapewniają największą wydajność, ale w wielu przypadkach kształty elementu wykonywanego ograniczają ich zastosowanie.

4. PODSUMOWANIE I UWAGI KOŃCOWE

Superstopy żarowytrzymałe są trudno obrabialnymi materiałami w porównaniu ze stalami ogólnego przeznaczenia i ze stalami nierdzewnymi, jest to spowodowane cechami tych stopów, które są wymagane od materiałów stosowanych na turbiny (twardość około 200 HB). Obróbka stopów żarowytrzymałych jest różna w zależności od obróbki wstępnej materiału. Obrabiając materiał przed hartowaniem można stosować płytki węglkowe pokrywane metodą CVD. Jeżeli materiał poddany został starzeniu, ciepło wydzielane podczas skrawania jest tak duże, że mogą być stosowane jedynie najbardziej odporne gatunki płytek skrawających. W przypadku materiałów hartowanych najlepsze rezultaty daje obróbka płytkami ceramicznymi (z whiskersami, sialon).

Skrawając superstopy żarowytrzymałe przeprowadza się takie same operacje obróbkowe jak podczas obróbki stali ogólnego przeznaczenia. Głównym problemem występującym podczas obróbki jest szybkie zużycie narzędzi. Największe zużycie następuje, gdy głębokość skrawania jest większa od promienia naroża r_c ostrza i kąt przystawienia narzędzia $\kappa_r = 90^\circ$. Zużycia nie da się wyeliminować, ale przestrzeganie ogólnych zasad pozwala na kontrolowanie jego przebiegu. Do głównych zasad zaliczyć można: stosowanie zawsze okrągłych płytek, a gdy nie jest to możliwe, stosowanie płytek skrawających z kątem przystawienia nie większym niż $\kappa_r = 45^\circ$, skrawanie z dużymi kątami natarcia i płytkami z dużym promieniem naroża, skrawanie ze zmienną głębokością w czasie jednej operacji, gdyż powoduje to rozkład zużycia na całe ostrze, przez co zwiększa się jego żywotność i zużycie może być w większym stopniu kontrolowane. Pomimo stosowania powyższych zasad trwałość narzędzi jest bardzo mała. Na ogół trwałość wynosi kilka minut, w sporadycznych przypadkach trwałość może wynieść kilkanaście minut. Dodatkowym czynnikiem, który pokazuje jak niska jest żywotność narzędzi podczas skrawania superstopów żarowytrzymałych, jest prędkość skrawania, która jest kilkukrotnie niższa w porównaniu z obróbką stali węglowych. Wszystkie powyżej wymienione czynniki sprawiają, że obróbka stopów HRSA jest droga, ze względu na szybkie zużycie narzędzi. Dodatkowo skrawanie tych stopów jest mało wydajne z powodu małych prędkości skrawania i potrzeby częstych przebrożeń obrabiarek.

Podczas skrawania superstopów żarowytrzymałych należy stosować sztywniejsze narzędzia i metody zamocowania przedmiotu oraz narzędzia, aby nie wystąpiły drgania, które mogą wpłynąć negatywnie na dokładność obróbki. Należy także używać dokładnych wymiarowo narzędzi zarówno w kierunku osiowym, jak i promieniowym, aby obciążenie narzędzia było stałe przez cały czas obróbki (nie wystąpią drgania), co w konsekwencji zapobiegnie ewentualnemu uszkodzeniu narzędzia. Innym sposobem na uniknięcie drgań w wielu przypadkach jest zmniejszenie prędkości skrawania.

Do obróbki superstopów żarowytrzymałych stosowane są seryjnie produkowane obrabiarki, najczęściej pięcioosiowe, aczkolwiek stosowane są także obrabiarki czteroosiowe i trójosiowe. Te ostatnie są stosowane do obrabiania mniej skomplikowanych kształtów i przeprowadzania operacji remontowych. Natomiast zalecane jest stosowanie do wykonywania nowoczesnych operacji skrawania obrabiarek pięcioosiowych sterowanych numerycznie, które pozwalają na maksimum elastyczności i wszechstronności podczas stosowania nadal standardowego narzędzia skrawającego. Innym zaleceniem jest stosowanie, w przypadku wytwarzania dużych liczb podobnych do siebie komponentów, autonomicznych stacji obróbkowych.

Cały czas prowadzone są badania nad nowymi stopami żarowytrzymałymi, które posiadałyby lepsze właściwości użytkowe, jednocześnie pogarsza się skrawalność tych materiałów. Dlatego z tego powodu rozwijane są także materiały stosowane na narzędzia do obróbki tych stopów oraz opracowywane najkorzystniejsze kształty płytek skrawających. Wszystko w celu zwiększenia wydajności obrabiania stopów HRSA, a w konsekwencji obniżenia kosztów wytwarzania.

LITERATURA

- [1] Cutting heat resistant alloys, <http://www.machinetools.ca> (pobrano 25.02.2007).
- [2] Dobrzański L., 2006. Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. WNT Warszawa.
- [3] Domański S., Nowoczesna obróbka skrawaniem w przemyśle lotniczym. Warszawa, Sandvik, <http://www.coromant.sandvik.com> (pobrano 14.03.2007).
- [4] Gas turbines – Application guide, AB Sandvik Coromant, 2006, (pobrano 25.03.2007).
- [5] Grzesik W., 1998. Podstawy skrawania materiałów metalowych. WNT Warszawa.
- [6] How to reduce vibration in metal cutting, AB Sandvik Coromant, 2006, (pobrano 23.03.2007).
- [7] <http://www.coromant.sandvik.com> (pobrano 23.03.2007).
- [8] When the going gets tough, Our new super alloy solution – GC1105, AB Sandvik Coromant, <http://www.coromant.sandvik.com> (pobrano 25.02.2007).

SOME HEAT RESISTANT SUPER ALLOYS MACHINING OPERATIONS

Summary

Paper deals with heat resistant super alloys machining operations, like turning, milling and threading, choice abilities. It is determined some phenomena and the grade of tool insert, the tool insert type, feed rate, cutting speed and other for that operations. Correct cutting parameters junction will result in machining time minimizing and significant cost savings.