

Obróbka wykończeniowa superstopów i stali zahartowanej

Finishing of super alloys and hardened steel

JANUSZ WALCZAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.127>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wyzwania związane z optymalizacją obróbki wykończeniowej superstopów oraz stali zahartowanej. Podkreślono właściwe podejście do doboru narzędzi do obróbki wykończeniowej oraz wpływ doprowadzenia chłodziwa na parametry procesu i możliwości optymalizacji.

SŁOWA KLUCZOWE: toczenie wykończeniowe, mechanizmy umocnienia, pokrycia CVD i PVD, trwałość ostrza, chłodzenie wysokociśnieniowe

Presented are challenges of finishing machining of superalloys and hardened steel. The right approach to tool selection for finishing and the effect of coolant delivery on process parameters and optimization options will be described.

KEYWORDS: turning finishing, mechanisms of strengthening, coating CVD and PVD, tool life, high pressure coolant

Obróbka wykończeniowa jest kluczową operacją determinującą zgodność detalu z oczekiwaniami jakościowymi. Podstawowymi kryteriami oceny poprawności obróbki części są jej wymiary i zakresy tolerancji, jakość powierzchni, chropowatość lub inne wymagania zapisane w specyfikacji.

Obróbka zgrubna daje większą dowolność w wyborze metod, narzędzi czy parametrów. Zazwyczaj w tym procesie zostaje usunięta większość materiału, co pociąga za sobą teoretycznie znacznie większy udział czasowy w procesie obróbki skrawaniem, a więc i większy potencjał optymalizacyjny. Wymagania tolerancji są mniejsze niż w przypadku obróbki wykończeniowej. Dlatego przez lata obróbka wykończeniowa pozostaje na drugim miejscu przy rozpatrywaniu procesów optymalizacji lub planowaniu nowych procesów technologicznych, gdzie wybierane są dotychczas stosowane, tzw. sprawdzone metody.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowane rewolucyjne, opatentowane przez firmę Seco Tools pokrycie TH1000, które pozwala na bezpieczny wzrost wydajności i żywotności narzędzia w procesie toczenia wykończeniowego stali hartowanej, w zakresie 45÷62 HRC, oraz superstopów, takich jak Inconel 718.

Innym rozwiązaniem mającym na celu zwiększenie trwałości ostrza i wydajności obróbki materiałów hartowanych oraz stopów odpornych na wysoką temperaturę jest system wysokociśnieniowego chłodzenia Jetstream Tooling® opracowany przez firmę Seco Tools, dzięki któremu chłodziwo zostaje doprowadzone bezpośrednio do strefy skrawania [1]. Odpowiednio skierowany strumień chłodziwa wspomaga ewakuację wióra, poprawia jakość powierzchni i znacząco obniża temperaturę w strefie skrawania w porównaniu z konwencjonalnym doprowadzeniem chłodziwa.

Materiały ostrza i bariery obróbki wykończeniowej materiałów hartowanych i superstopów

W obróbce wykończeniowej stali hartowanych i superstopów najczęściej stosuje się ostrza z pokrywanych płytek węglkowych oraz płytek z polikrystalicznego sześciennego azotku boru, tzw. PCBN, które mogą występować w wersji pokrywanej lub bez pokrycia.

Do operacji wykończeniowej materiałów hartowanych powyżej 50 HRC najbardziej optymalnym narzędziem będzie PCBN, zapewniający możliwie wysokie parametry przy stosunkowo długiej żywotności. Ale co w przypadku, kiedy detal jest hartowany powierzchniowo, a obróbka wykończeniowa musi być prowadzona w materiale, którego twardość spada poniżej 45 HRC pod twardą warstwą? Przykładem takiej sytuacji jest rowkowanie w stali powierzchniowo hartowanej lub stacanie twardej warstwy pod spawanie. Przy niskiej twardości stosowanie PCBN jest nieopłacalne. Krótka żywotność jest spowodowana dynamicznie postępującą dyfuzją materiału ostrza z materiałem obrabianym – zużyciem chemicznym. Dodatkowym problemem jest długi wiór z uwagi na brak łamaczy wiórów na narzędziach z ostrzem z PCBN.

Płytki węglkowe nie pozwalają na stosowanie wysokich parametrów; prędkość skrawania nie przekracza 40÷70 m/min w zależności od twardości materiału. Przy twardości powyżej 50 HRC praca narzędziami z węglika jest bardzo utrudniona lub praktycznie stabilna praca nie jest możliwa z uwagi na bardzo szybkie zużycie krawędzi, a co za tym idzie, problemy z uzyskaniem oczekiwanych tolerancji i jakości powierzchni po obróbce wykończeniowej. Wyjątek stanowi opisywany dalej gatunek węglika TH1000, który umożliwia uzyskanie o 50–100% wyższej prędkości skrawania, której towarzyszy znaczący wzrost żywotności.

W typowej obróbce wykończeniowej superstopów stosuje się narzędzia z węglika lub PCBN. Ze względu na wysoką cenę zaawansowanych materiałów wykorzystywanych w produkcji oraz elementów z nich wykonanych procesy obróbkowe muszą być niezawodne. Wytwórcy nie mogą sobie pozwolić na produkcję złomu, a jednocześnie poszukują wydajnego procesu, w którym – z uwagi na niezawodność – kluczowa będzie obróbka wykończeniowa. Dobór odpowiednich narzędzi i parametrów obróbki zapewnia jakościowo i ekonomicznie spójne wyniki.

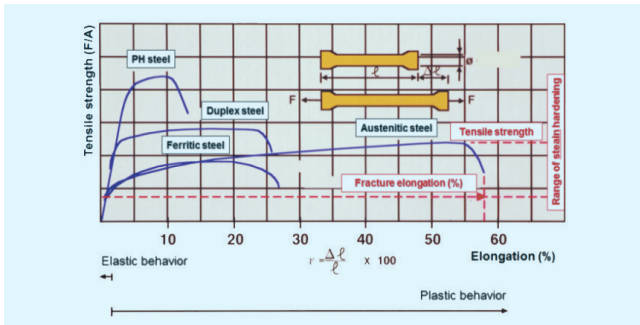
Narzędzia z PCBN umożliwiają uzyskanie podczas obróbki wykończeniowej prędkości skrawania nawet powyżej 300 m/min w przypadku superstopów, jednak niektórzy producenci w operacjach wykończeniowych nie dopuszczają obróbki narzędziami z PCBN tylko narzędziami węglkowymi. Węgiel, mimo że oferuje znacznie mniejsze prędkości skrawania, pozostaje pierwszym wyborem przy obróbce superstopów z uwagi na większy obszar działania i większą odporność na zmienne warunki, które wpływają na bezpieczeństwo procesu.

* Mgr inż. Janusz Walczak (janusz.walczak@secotools.com) – Seco Tools (Poland)

Deformacja materiału obrabianego w procesie skrawania a wymagania narzędziowe

Skrawanie jest z definicji deformacją materiału, zanim jego fragmenty zostaną usunięte w postaci wiórów. Wióry powinny być formowane w krótkie kawałki. Analizując dalej definicję i związane z procesem skrawania właściwości obrabianego materiału, spotykamy się z takimi cechami, jak:

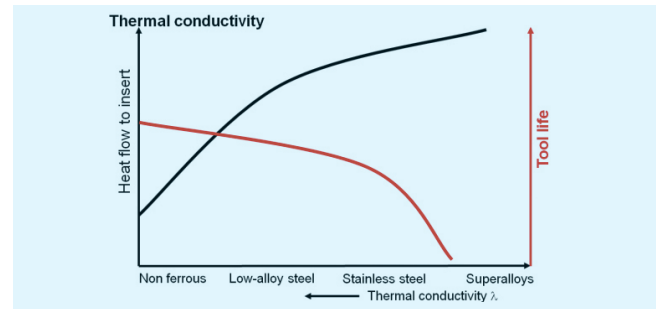
- **wytrzymałość na rozciąganie i ciągliwość**, czyli zdolność materiału do stawiania oporu deformacji przed jego rozerwaniem; im większa ciągliwość materiału, tym większy problem przy łamaniu i kontroli wióra (rys. 1);
- **twierdź**, czyli zdolność materiału do stawiania oporu na ściskanie bez deformacji; im wyższa twierdź, tym większe siły skrawania;
- **przewodność cieplna**, czyli zdolność materiału do przewodzenia temperatury; duża przewodność cieplna oznacza, że duża ilość ciepła wygenerowana w procesie skrawania jest usuwana z wiórami i do detalu obrabianego (dla porównania przewodność cieplna miedzi wynosi 400 W/m·K, a tytanu tylko 17 W/m·K [2]);
- **mechanizmy umocnienia materiału**: umocnienie przez zgmiot, utwardzenie roztworowe, umocnienia granicy ziaren, utwardzenie wydzieleniowe, umocnienie dyspersyjne.



Rys. 1. Wykres porównawczy wytrzymałości na rozciąganie różnych materiałów

Mechanizmy umocnienia materiału należy rozpatrywać na każdym etapie obróbki superstopów. Co prawda superstopy nie uzyskują wysokiej twierdzy w porównaniu z materiałami zahartowanymi, lecz mechanizmy umocnienia przez zgmiot i utwardzenie wydzieleniowe aktywowane temperaturą w strefie skrawania doprowadzają do tzw. mikrotwardzenia. Przy materiałach podatnych na umocnienie przez zgmiot, jak omawiany Inconel 718, strefa deformacji sięga minimum 70÷80 μm i jest znacznie twardsza niż materiał poniżej strefy utwardzonej, co z kolei przybliża ją do warunków pracy w materiale twardym [3]. Uważa się, że strefa utwardzona może znacznie przekraczać 0,1 mm, jeśli proces poprzedzający był prowadzony przy zużytym lub zbyt niebezpiecznym ostrzu, np. nieprawidłowo była dobrana płytka negatywna do obróbki zgrubnej.

Niska przewodność cieplna superstopów bezpośrednio wpływa na żywotność ostrza. Decydującą rolę w procesie odgrywa właściwe dobranie prędkości skrawania do gatunku ostrza [2]. W materiałach hartowanych limit prędkości skrawania jest podyktowany wysoką twierdzą i dużymi siłami generującymi wysoką temperaturę. Dlatego przy wyższych twierdżach praca tradycyjnym węglikiem jest utrudniona lub wręcz niemożliwa. Wtedy rozwiązaniem są narzędzia z PCBN, zachowujące twierdź w wysokiej temperaturze, podczas gdy materiał obrabiany, samoczynnie generując dużą ilość ciepła, odpuszcza się lokalnie w strefie skrawania. PCBN jest idealnym rozwiązaniem dla materiałów twardych charakteryzujących się dużą ścieralnością.



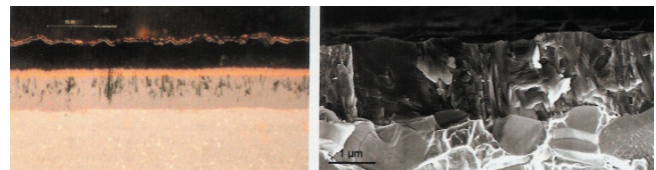
Rys. 2. Wpływ przewodności cieplnej na żywotność ostrza w zależności od obrabianego materiału

Niska przewodność cieplna jest odpowiedzialna za krótką żywotność ostrza. Przyjmuje się, że zużycie narzędzi w trudno obrabialnych materiałach jest 5- lub nawet 10-krotnie większe niż np. w podstawowych stalach konstrukcyjnych.

Różnice pomiędzy pokryciami z CVD i PVD dla płytek węglkowych

Gatunki węgla można podzielić ze względu na ich ciągliwość określoną klasami ISO, np. P05, P15, P25, P35 dla stali. Oczywiście klasyfikacja ta jest sporządzana przez producentów i powinna odpowiadać określonym aplikacjom. Decydującymi parametrami są wielkość ziarna i zawartość kobaltu, pełniącego funkcję lepiszcza dla ziaren węgla. Odpowiadają one za ciągliwość ostrza. Obecne technologie wytwarzania pozwalają na kontrolowanie zawartości kobaltu w różnych miejscach ostrza, tzw. gradient kobaltu, dzięki czemu twardsze płytki w mniejszym stopniu tracą na ciągliwości. Oczywiście na ciągliwość ostrza ma również wpływ sposób przygotowania krawędzi.

Pokrycie jest stosowane w celu zwiększenia odporności na zużycie i z reguły jego warstwa mieści się w zakresie 1÷20 μm . Są dwa rodzaje pokryć ze względu na technikę nakładania: pokrycia chemiczne z CVD, którego grubość może wynosić 4÷20 μm , oraz fizyczne z PVD, o grubości w zakresie 1÷5 μm .



Rys. 3. Przekrój 15 μm wielowarstwowego pokrycia z CVD (po lewej) oraz przekrój 1,5 μm pokrycia z PVD (po prawej)

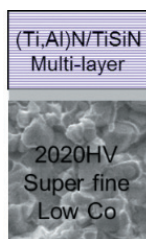
Typowe pokrycia z CVD w dolnej warstwie zawierają $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ a w górnej Al_2O_3 . Taka kombinacja zwiększa odporność na zużycie, dzięki $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$, i temperaturę, dzięki Al_2O_3 . Grubości warstw zmieniają się w zależności od oczekiwanej charakterystyki pokrycia (rys. 3). Grubsza warstwa Al_2O_3 poprawia odporność termiczną i jest przeznaczona głównie do obróbki zgrubnej, dużych komponentów lub do zastosowania przy dużych prędkości skrawania.

Technika pokrywania PVD pozwala na wykorzystanie różnych kombinacji materiałów, takich jak: Ti, Al, Cr, Si, N, O oraz C. Pokrycia z PVD są twardsze niż pokrycia z CVD, dlatego przy obróbce wykończeniowej, gdzie twardsze pokrycie zapewnia dłuższą żywotność, stosuje się najczęściej narzędzia z pokryciem PVD. Z uwagi na mniejszą warstwę usuwanego materiału wpływ temperatury na ostrze jest mniejszy niż przy obróbce zgrubnej.

Kolejną niezmiernie ważną cechą różniącą pokrycia z CVD i PVD jest naprężenie powstałe po procesie pokrywania. Pokrycie z CVD jest nakładane w temperaturze ok. 1000°C. Kiedy ostrze stygnie, rośnie naprężenie rozciągające w pokryciu z uwagi na różną rozszerzalność cieplną pokrycia i substratu. W pokryciach z PVD, ze względu na technikę ich nakładania, występują później naprężenia ściskające, powodujące lepsze przywieranie pokrycia do substratu, co bezpośrednio przekłada się na poprawę ciągliwości [4].

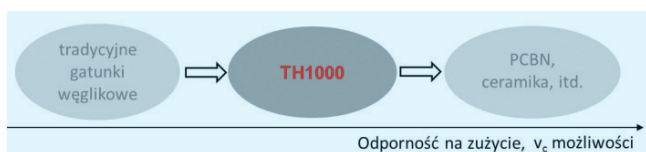
Gatunek węgla TH1000 i jego właściwości w obróbce wykończeniowej

TH1000 to unikalny, opatentowany przez firmę Seco Tools gatunek węgla z nanolaminatowym pokryciem z PVD (TiSiN-TiAlN) o grubości 3 µm. Cechuje się superdrobnym ziarnem z bardzo twardym substratem (2020 HV). To pierwszy komercyjny gatunek o tak wysokiej twardości (rys. 4). Dla porównania powszechnie stosuje się gatunki o twardości maksymalnie 1850 HV. Drobne ziarno i opisywane wcześniej cechy pokrycia z PVD zapewniają znakomitą ciągliwość ostrza, również przy obróbce przerywanej.



Rys. 4. Gatunek TH1000, nanolaminatowe pokrycie z PVD o grubości 3 µm – niska zawartość kobaltu, supertwardy substrat

Kombinacja dużej twardości z dobrą izolacją termiczną pochodzącą z nanolaminatowego pokrycia zapewnia doskonałą odporność na zużycie ścierne i pozwala stosować znacznie wyższe prędkości skrawania w porównaniu z innymi gatunkami węgla. Dzięki opisywanym właściwościom można śmiało wydzielić ten gatunek z grona tradycyjnych węglików, ponieważ obszarem pracy wypełnia lukę pomiędzy węglikami a zaawansowanymi materiałami, takimi jak PCBN czy ceramika (rys. 5).



Rys. 5. Pozycjonowanie materiałów ostrzy pod względem odporności na zużycie

TH1000 to najtwardszy gatunek węgla wśród wszystkich dostępnych gatunków PVD.

Gdy wybiera się narzędzia z twardymi ostrzami, należy wziąć pod uwagę, że zbyt duża warstwa skrawania w trudno obrabialnym materiale przy dużych parametrach zazwyczaj prowadzi do niekontrolowanego zużycia, a czasem katastroficznego pęknięcia całej płytki czy urwania naroża. Płytki TH1000 doskonale się sprawdzają w obróbce średniej i wykończeniowej stali hartowanej w zakresie 45÷62 HRC oraz superstopów, jak Inconel 718, Waspaloy czy Nimonic [5].

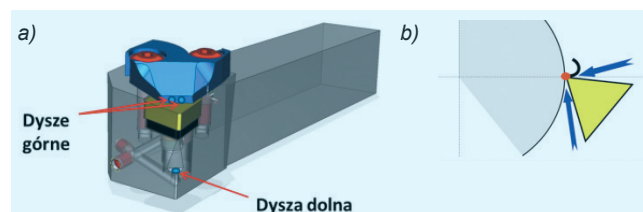
Doświadczenia z zastosowaniem gatunku TH1000 w przemyśle wykazują, że nawet przy 2-krotnie większej prędkości skrawania narzędzia te mają dłuższą żywotność. Można założyć prędkość skrawania na poziomie 100 m/min i godzinną trwałość ostrza w materiale typu Inconel 718.

System wysokociśnieniowego chłodzenia Jetstream Tooling®

Stosowanie wysokociśnieniowego układu doprowadzenia chłodziwa (Jetstream Tooling®) przyczynia się do zwiększenia wydajności procesu. Jeśli prędkość skrawania materiału ISO-S wynosi 50 m/min, system Jetstream w połączeniu z właściwie dobranym gatunkiem węgla pozwala na przyspieszenie skrawania do 200 m/min, a tym samym na 4-krotne zwiększenie wydajności [6]. Główną korzyścią jest fakt obniżenia temperatury w strefie skrawania, co jest istotne zwłaszcza przy materiałach o dużej ciągliwości, gdy występują problemy przy łamaniu wióra oraz jego ewakuacji. Dzięki stałemu, stabilnemu doprowadzeniu chłodziwa można przyjąć wyższe prędkości skrawania, ponieważ jest pewność, że chłodziwo jest zawsze dostarczane do strefy skrawania i zapewnia dłuższą żywotność bez narażania ostrza na szok termiczny czy deformację plastyczną.

Najważniejsze korzyści z użycia Jetstream Tooling®:

- bezpośrednio doprowadzenie chłodziwa zwiększa żywotność ostrza oraz poprawia jakość powierzchni,
- zwiększone ciśnienie znacznie poprawia łamanie wióra, oraz umożliwia stosowanie wyższych prędkości skrawania,
- system Jetstream Tooling® poprawia bezpieczeństwo i stabilność procesu oraz podnosi produktywność.



Rys. 6. System Jetstream Tooling® Duo: a) schemat doprowadzenia chłodziwa, b) zasada działania systemu Jetstream Tooling® Duo

Podsumowanie

Zrozumienie procesów zachodzących w materiale obrabianym oraz właściwe podejście do doboru narzędzi i parametrów pozwala na zaprojektowanie lub optymalizację procesu, zapewniając zarówno wysoką produktywność, jak i bezpieczeństwo. Zawsze należy rozpatrywać cały układ, z którego wynika wydajność i bezpieczeństwo. Kluczowymi parametrami są: obrabiany materiał i jego właściwości, sztywność obrabiarki i mocowania, możliwości uzyskania oczekiwanych parametrów na obrabiarkę, strategia obróbki, stabilna kontrola temperatury w strefie skrawania poprzez właściwe chłodzenie i parametry oraz wiele innych czynników które mogą bezpośrednio wpływać na proces. Tylko takie podejście zapewnia najwyższe możliwe wyniki pod kątem ekonomii, wydajności produkcji i bezpieczeństwa procesu.

LITERATURA

1. „New tools and strategies take on ISO S materials”, <https://www.seco-tools.com/#article/21491> (dostęp: 19.05.2017 r.).
2. De Vos P., Stahl J.-E. „Thermal conductivity”. *Metal Cutting Theories in Practice*. Lund-Fagersta, Sweden: Lund University, 2014.
3. Stahl J.-E. „Determining the deformation width”. *Metal Cutting Theories and Models*. Lund, Sweden: Lund University, 2012.
4. De Vos P., Stahl J.-E. „Cutting materials and their deterioration”. *Metal Cutting Theories in Practice*. Lund-Fagersta Sweden: Lund University, 2014.
5. „Seco introduces new insert geometries and holders for turning challenging materials”, <https://www.secotools.com/#article/20864> (dostęp: 27.06.2017 r.).
6. „Balancing key factors in stainless steel machining”, <https://www.seco-tools.com/#article/21497> (dostęp: 19.05.2017 r.).