

Proces szlifowania stopów niklu – Inconel 600 i Monel 400

Grinding process of nickel alloys – Inconel 600 and Monel 400

RYSZARD WÓJCIK
WOJCIECH STACHURSKI*

Przedstawiono badania nad szlifowaniem próbek płaskich wykonanych ze stopów niklu – Inconel 600 i Monel 400. Próbki szlifowano ściernicami TGP i XGP z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL). Użyto dwa rodzaje cieczy: Ecocut Micro Plus 82 i Biocut 3000. Opisano wpływ warunków obróbki na wartość stycznej siły szlifowania F_t oraz chropowatość powierzchni obrabianej (parametr R_a). Porównano uzyskane wyniki dając zalecenia do dalszych badań.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, stopy niklu, MQL.

In the paper experimental results obtained during surface grinding process of nickel alloys: Inconel 600 and Monel 400 are presented. TGP and XGP grinding wheels are applied and Ecocut Micro Plus 82 and Biocut 3000 fluids have been supplied into a cutting zone with minimal quantity lubrication (MQL) strategy. Influence of cutting conditions on tangential cutting force F_t and surface roughness parameter R_a are described. Finally, comparison of obtained results and conclusions are presented.

KEYWORDS: grinding process, nickel alloys, MQL.

W ostatnich latach widoczny jest dynamiczny rozwój przemysłu, w tym m.in., przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego i medycznego. Stawia on duże wymagania wobec materiałów konstrukcyjnych stosowanych w tych gałęziach przemysłu, a także wobec technologów i konstruktorów, którzy z nich korzystają. Jednym z coraz szerzej stosowanych materiałów są stopy niklu [2]. Jednak stopy te, takie jak m.in.: Hastelloy, Waspalloy, Inconel, Incoloy, zaliczane są do materiałów trudno skrawalnych. Charakteryzują się one bowiem dużą wytrzymałością i ciągliwością, niską przewodnością cieplną, dużym powinowactwem chemicznym względem narzędzi obróbkowych oraz dużymi wartościami współczynników tarcia. Prowadzi to np. do występowania

zjawiska zalepiania czynnej powierzchni narzędzia [5].

W związku z powyższym autorzy niniejszego artykułu podjęli badania nad procesem szlifowania wybranych stopów niklu, takich jak Inconel 600 i Monel 400. Po szczegółowej analizie problemu do badań wybrano ściernice TGP i XGP. Wybór ten potwierdzają także inne badania [3].

Z uwagi na wielokrotnie opisywane w literaturze [4] niedogodności związane z zalewowym sposobem podawania do strefy skrawania cieczy chłodząco-smarującej, postanowiono wykorzystać metodę minimalnego wydatku cieczy obróbkowej (MQL). Zastosowano przy tym dwa rodzaje cieczy.

Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.

Właściwości badanych stopów

Jak już wspomniano na wstępie podczas badań szlifowano dwa rodzaje stopów: Inconel 600 oraz Monel 400.

Pierwszy z nich – Inconel 600, to stop niklowo-chromowy charakteryzujący się dużą odpornością na utlenianie w wysokich temperaturach, a także odpornością na korozję i pękanie korozyjne w środowisku jonów chlorkowych. Z uwagi na swoje właściwości znajduje powszechne zastosowanie w urządzeniach do obróbki cieplnej (np. elementy pieców przemysłowych) oraz w przemyśle chemicznym i spożywczym (np. urządzenia do alkalizacji) [8].

Drugi z nich – Monel 400, to stop niklowo-miedziowy posiadający wysoką wytrzymałość i bardzo dużą odporność na korozję, nawet w środowiskach takich jak: woda morska, kwas fluorowodorowy czy kwas siarkowy. Monel 400 znajduje zastosowanie m.in. przy budowie maszyn i urządzeń okrętowych, w konstrukcjach lotniczych, w przemyśle chemicznym (np. zawory, pompy, wały, złącza, wymienniki ciepła) [9].

Poniżej zaprezentowano cechy charakteryzujące omawiane materiały, takie jak:

* dr hab. inż. Ryszard Wójcik, prof. PŁ (ryszard.wojcik@p.lodz.pl), dr inż. Wojciech Stachurski (wojciech.stachurski@p.lodz.pl), – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej

- skład chemiczny (tabela 1),
- właściwości fizyczne (tabela 2),
- właściwości mechaniczne (tabela 3).

Tab. 1. Inconel 600, Monel 400 – składy chemiczne

Materiał	Skład chemiczny (wartości max.) [%]			
	C	Fe	Cr	Mn
Inconel 600	0,15	6-10	14-17	1,0
Monel 400	0,3	2,5	-	2,0
	Si	S	Cu	Ni (+Co)
Inconel 600	0,5	0,015	0,50	72,0 (min)
Monel 400	0,5	0,024	28-34	63,0 (min)

Tab. 2. Inconel 600, Monel 400 – właściwości fizyczne

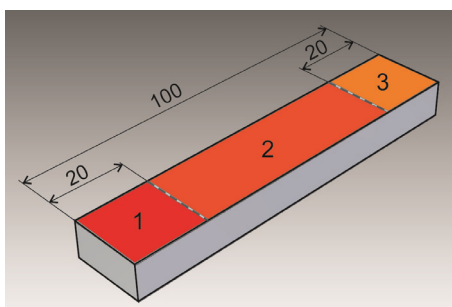
Właściwości fizyczne	Materiał	
	Inconel 600	Monel 400
Gęstość [g/cm ³]	8,47	8,80
Temperatura topnienia [°C]	1354-1413	1300-1350
Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	445	430
Temperatura Curie [°C]	-124	35
Rozszerzalność cieplna 20-100°C [μm/(m·K)]	10	14

Tab. 3. Inconel 600, Monel 400 – właściwości mechaniczne

Właściwości mechaniczne	Materiał	
	Inconel 600	Monel 400
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	655	403
Umowna granica plastyczności [MPa]	310	103
Wydłużenie [%]	40	50

Warunki badań

W trakcie badań szlifowano próbki płaskie o wymiarach 20x100x10 mm, wykonane ze stopów Inconel 600 i Monel 400. Powierzchnie obrabiane próbek umownie podzielono na trzy obszary ponumerowane od 1 do 3 (rys. 1). W trakcie badań mierzono styczną siłę szlifowania F_t oraz parametr chropowatości powierzchni R_a , a następnie określano ich wartości w trzech obszarach dla każdej próbki.



Rys. 1. Umowne obszary na powierzchni obrabianej badanych próbek

Na stole szlifierki do płaszczyzn Jotes SPD-30 mocowano przyrząd specjalny składający się z siłomierza 4-składowego Kistler 9321B wraz z przymocowanym do niego uchwytem do mocowania badanych próbek. Stanowiło to było szczegółowo prezentowane we wcześniejszych pracach autorów [6, 7]. Siłomierz służył do pomiarów siły stycznej F_t występującej podczas szlifowania. Sygnał z si-

łomierza był kierowany do wzmacniacza Kistler 5011A, a następnie poprzez kartę pomiarową rejestrowany w komputerze.

Jako narzędzia zastosowano ściernice tarczowe firmy Norton o tej samej wielkości ziarna i twardości – 3TGP 54K i 3XGP 54K. Są to ściernice, w których ścierniwo stanowi mieszaninę submikrokryształicznego korundu spiekane z elektrokorundem chromowym. Pierwszy składnik to ziarna wykonane z submikrokryształicznych cząstek Al_2O_3 o kształcie wydłużonym (TG) lub blaszkowatym (XG), a drugi składnik to tlenek glinu stopiony z dodatkiem tlenku chromu (Cr_2O_3) [3].

Ciecz chłodząco-smarującą podawano w strefę szlifowania z wykorzystaniem metody minimalnego wydatku cieczy obróbkowej (ang. MQL). Do wytworzenia mgły olejowej zastosowano urządzenie MicroJet MKS-G100 firmy Link [12]. Ciecz obróbkową dostarczano poprzez pojedynczą dyszę rozpylającą z wydatkiem $v=40$ ml/godz. W tabeli 4 zawarte są dane techniczne urządzenia wykorzystanego w opisywanych badaniach.

Tab. 4. MicroJet MKS-G100 – dane techniczne

MicroJet MKS-G100	
Parametr	Wartość
Maksymalne ciśnienie zasilające [MPa]	1
Maksymalne ciśnienie [MPa]	0,7
Ciśnienie robocze [MPa]	0,05-0,6
Zużycie powietrza [l/min]	50-70
Zużycie cieczy [ml/godz.]	5-200
Pojemność zasobnika z cieczą [l]	1,6

Jako ciecz obróbkowe wykorzystano dwa rodzaje płynów przeznaczonych, wg danych producentów, do zastosowań MQL: (1) Ecocut Micro Plus 82 [10] i (2) Biocut 3000 [11]. Są to ciecz na bazie alkoholi tłuszczowych, o dobrych właściwościach chłodząco-smarujących, zalecane w szerokim zakresie obróbek ubytkowych. Właściwości fizyczne tych cieczy zestawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Ciecze obróbkowe – właściwości fizyczne

Właściwości fizyczne	Rodzaj oleju	
	Ecocut Micro Plus 82	Biocut 3000
Gęstość (15°C) [g/m ³]	0,84	0,91
Lepkość kinematyczna (20°C) [mm/s]	51,4	39-49
Lepkość kinematyczna (40°C) [mm/s]	17	-
Temperatura zapłonu [°C]	>150	>150
Temperatura krzepnięcia [°C]	-20	-20
Rozpuszczalność w wodzie	niemieszalny	niemieszalny
Barwa	bezbardwy	żółty

Parametry szlifowania wykorzystywane w badaniach zestawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Parametry szlifowania

Parametry szlifowania	
Prędkość obwodowa ściernicy v_s [m/s]	25
Prędkość posuwu wzdłużnego v_w [m/s]	0,5

Głębokość szlifowania a_e [mm]	$a_{e1}=0,02$
	$a_{e2}=0,05$

Do pomiaru chropowatości powierzchni 2D zastosowano profilografometr T8000 firmy Hommelwerke. Jako wartość chropowatości reprezentującą każdy obszar pomiarowy próbki brano uśrednioną wartość z trzech jego pomiarów. Do analizy chropowatości wybrano parametr Ra , powszechnie stosowany do opisu chropowatości w warunkach przemysłowych [1].

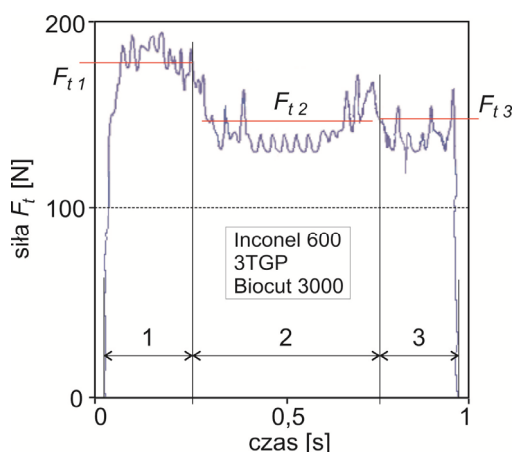
Przebieg badań

Przed przystąpieniem do badań właściwych powierzchnia każdej próbki była szlifowana w 10-ciu przejściach z wyskrzaniem z głębokością $a_e=0,005$ mm. Ciecz chłodząco-smarującą podawano w trybie zalewowym. Opisane powyżej zabiegi miały na celu przygotowanie powierzchni próbek do dalszych badań, tak aby uzyskać jak najmniejsze zmiany strukturalne w warstwach wierzchnich.

Badania właściwe prowadzono dla warunków opisanych w poprzednim rozdziale. W pierwszym etapie tych badań zostały zastosowane dwie głębokości szlifowania: $a_{e1}=0,02$ mm i $a_{e2}=0,05$ mm przy stałej prędkości posuwu wzdłużnego: $v_w=0,1$ m/s i stałej prędkości obwodowej ściernicy $v_s=25$ m/s. Ściernica wykonywała jedno przejście wgłębne, zaczynając od strony obszaru 1 (rys. 1), po czym przerywano obróbkę. Pomiarzy rzeczywistej głębokości szlifowania przeprowadzone na profilografometrze wykazały, że dla mniejszej głębokości nastawczej $a_{e1}=0,02$ mm rzeczywista głębokość szlifowania wynosi 0,018-0,019 mm, natomiast dla $a_{e1}=0,05$ mm wynosi 0,023-0,027 mm. Zdecydowano więc, że w drugim etapie badań zostaną użyte następujące parametry szlifowania: $a_{e1}=0,02$ mm, $v_w=0,1$ m/s i $v_s=25$ m/s.

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy wykres przebiegu stycznej siły szlifowania F_t uzyskany podczas szlifowania stopu Inconel 600 ściernicą 3TGP z użyciem cieczy obróbkowej Biocut 3000.



Rys. 2. Przebiegi stycznej siły szlifowania F_t ; ściernica: 3TGP, ciecz: Biocut 3000

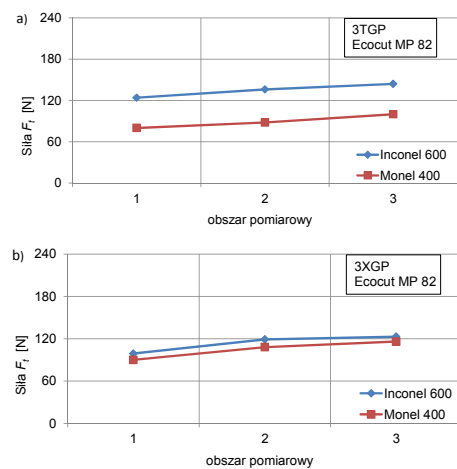
Na wykresie zaznaczono trzy przedziały czasowe obejmujące swymi zakresami obszary (1-3) na powierzchni obrabianej. Dla każdego przedziału wyznaczano średnią wartość stycznej siły szlifowania i podawano jako wartość odpowiadającą danemu obszarowi (1-3). Uzyskane w ten sposób wyniki zestawiono w tabeli 7.

Na podstawie tabeli 7 opracowano wykresy (rys. 3 i 4) przedstawiające uśrednione wartości stycznej siły szlifowania F_t odpowiadające obszarom od 1 do 3.

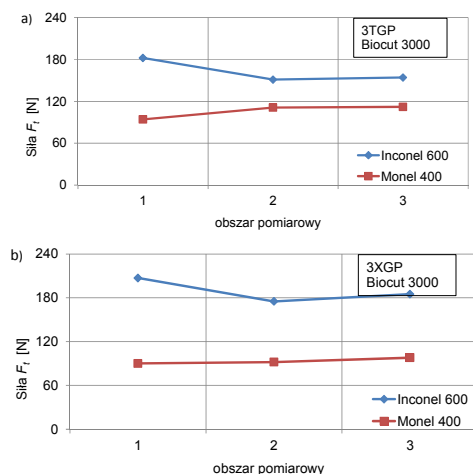
Tab. 7. Wartości stycznej siły szlifowania F_t w obszarach 1-3

Ciecz:	Ecocut Micro Plus 82					
Ściernica:	3TGP			3XGP		
Siła F_t [N]	1	2	3	1	2	3
Inconel 600	124	136	144	99	119	123
Monel 400	80	88	100	90	108	116

Ciecz:	Biocut 3000					
Ściernica:	3TGP			3XGP		
Siła F_t [N]	1	2	3	1	2	3
Inconel 600	182	151	154	207	175	185
Monel 400	94	111	112	90	92	98



Rys. 3. Uśrednione wartości stycznej siły szlifowania F_t w obszarach 1-3; ściernice: 3TGP i 3XGP, ciecz: Ecocut Micro Plus 82



Rys. 4. Uśrednione wartości stycznej siły szlifowania F_t w obszarach 1-3; ściernice: 3TGP i 3XGP, ciecz: Biocut 3000

Na podstawie powyższych wyników (tab. 7, rys. 3) można stwierdzić, że podczas szlifowania ściernicami 3TGP i 3XGP z zastosowaniem cieczy Ecocut Micro Plus 82 styczna siła szlifowania F_t rośnie wzdłuż całej długości próbki. Dotyczy to zarówno stopu Inconel 600, jak i Monel 400 i wskazuje na stałe zwiększanie się naddatku podczas obróbki. Warto zauważyć, że wartości F_t są dla obu ściernic są większe w przypadku szlifowania stopu Inconel 600, przy

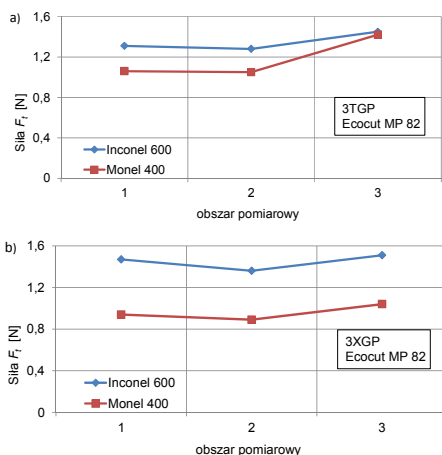
czym dla ściernicy 3XGP różnica wynosi do 10%, natomiast dla ściernicy 3TGP jest to ok. 50%.

Rozpatrując wyniki związane z zastosowaniem cieczy Biocut 3000 (tab. 7, rys. 4) na uwagę zwraca fakt, że tylko dla stopu Inconel 600 wartość stycznej siły szlifowania F_t była największa w obszarze 1 próbki, następnie malała w obszarze 2 by w obszarze 3 ulec niewielkiemu wzrostowi. Warto zauważyć, że w tym przypadku poziom sił był największy z wszystkich rozpatrywanych przypadków.

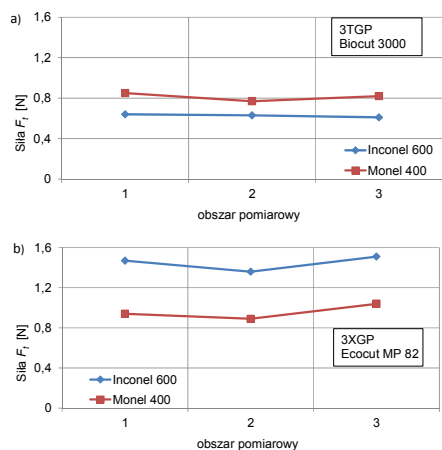
W tabeli 8 zestawiono wyniki pomiarów chropowatości badanych próbek. Podano wartość parametru R_a dla każdego z trzech obszarów. Na podstawie tabeli 8 opracowano wykresy (rys. 5 i 6) przedstawiające uśrednione wartości parametru R_a odpowiadające obszarom od 1 do 3.

Tab. 8. Wartości parametru R_a w obszarach 1-3

Ciecz:	Ecocut Micro Plus 82					
Ściernica:	3TGP			3XGP		
R_a [μm]	1	2	3	1	2	3
Inconel 600	1,31	1,28	1,45	1,47	1,36	1,51
Monel 400	1,06	1,05	1,42	0,94	0,89	1,04
Ciecz:	Biocut 3000					
Ściernica:	3TGP			3XGP		
R_a [μm]	1	2	3	1	2	3
Inconel 600	0,64	0,63	0,61	0,51	0,54	0,58
Monel 400	0,85	0,77	0,82	0,72	0,71	0,67



Rys. 5. Uśrednione wartości parametru R_a w obszarach 1-3; ściernice: 3TGP i 3XGP, ciecz: Ecocut Micro Plus 82



Rys. 6. Uśrednione wartości parametru R_a w obszarach 1-3; ściernice: 3TGP i 3XGP, ciecz: Biocut 3000

Największe wartości R_a uzyskano podczas szlifowania ściernicami 3TGP i 3XGP z udziałem cieczy Ecocut Micro Plus 82. Jednocześnie dla tych przypadków obserwowano wzrost parametru R_a przy wychodzeniu ściernicy (obszar 3 na rys. 5), a wartości R_a były większe na powierzchni stopu Inconel 600. Zastosowanie cieczy Biocut 3000 spowodowało, że wartości R_a były większe dla powierzchni próbek wykonanych ze stopu Monel 400.

Podsumowanie

Badania eksperymentalne przeprowadzone dla stopów Inconel 600 i Monel 400 w zakresie zastosowania różnych płynów chłodząco-smarujących podawanych z minimalnym wydatkiem w strefę szlifowania (MQL) potwierdzają specyficzny i trudnoobrabialny charakter tych materiałów, zwłaszcza podczas procesu szlifowania wgłębnego jedno przejściowego powierzchni płaskich.

Szczególną uwagę należy w tym przypadku zwracać na właściwy dobór cieczy obróbkowych przeznaczonych do metody MQL. Należy pamiętać, że nie wszystkie z nich zapewniają odpowiednie parametry jakościowe obrabianej powierzchni. Istotny jest też dobór właściwej ściernicy pod względem ziarna, a zwłaszcza jego budowy.

Zastosowana w badaniach metoda uśredniania wartości składowych sił szlifowania umożliwiła ocenę skutków zakłóceń występujących w procesie szlifowania. Możliwe jest określenie między innymi wpływu skutków oddziaływań cieplnych na rzeczywistą wartość usuwanego naddatku.

W dalszych badaniach autorzy planują zastosowanie glikolu propylenowego jako czynnika chłodząco-smarującego, a także prowadzenie prób nad modyfikacją czynnej powierzchni ściernicy, w celu zwiększenia skuteczności wprowadzenia cieczy obróbkowej podawanej z minimalnym wydatkiem w strefę ściernica/przedmiot.

LITERATURA

- Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- Borowski T., Płociński T., Kurzydłowski K. J., Wierchoń T., Mikrostruktura warstwy azotowanej jarzeniowo na stopie Inconel 600. Inżynieria Materiałowa, vol. 32, nr 4, 348-351, 2011.
- Niżankowski C., Matras A., Wpływ gatunku ścierniwa na dokładność wałków stalowych po szlifowaniu ściernicowym. Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 3, 55-68, 2010.
- Sutowski P., Nadolny K., Plichta J., Kapłonek W., Wpływ sposobu podawania płynu chłodząco-smarującego w procesie szlifowania otworów na efektywność obróbki stopu Inconel® Alloy 600. Mechanik, 8-9, 377-390/704, 2013.
- Sienicki W., Nadolny K., Wojtevicz M., Wpływ impregnacji ściernic silikonem na efekty procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel® Alloy 600. Mechanik, 8-9, 349-360/704, 2013.
- Wójcik R., Aktywny pomiar odkształceń i wydłużeń w procesie szlifowania. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 29, nr 2, 74-78, 2009.
- Wójcik R., Rosik R., Badania wpływu MQL z użyciem glikolu propylenowego na chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego. Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 4, 122-131, 2010.
- www.specialmetals.com, Inconel alloy 600. Nr SMC-027, 2008.
- www.specialmetals.com, Monel alloy 400. Nr SMC-053, 2005.
- www.fuchs-oil.pl, Przemysłowe środki smarne Fuchs. Nr 10, 2013.
- www.molyduval.org, Karta charakterystyki Biocut 3000. 2011.
- www.microjet.de