

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Analiza stanu wiedzy i techniki w zakresie szlifowalności stopów na bazie niklu

State of the art in grindability of the nickel-based alloys

**MICHAŁ WOJTEWICZ
KRZYSZTOF NADOLNY
WALERY SIENICKI**

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.395

W artykule przedstawiono stan wiedzy i techniki w zakresie szlifowania superstopów niklu. Główny nacisk położono na zjawisko adhezji oraz na defekty szlifierskie jakie towarzyszą obróbce tego typu materiałów. Opisano również metody przeciwdziałania tym niepożądanym zjawiskom potwierdzone własnymi badaniami.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, adhezja, defekty szlifierskie, impregnacja, superstopowy niklu

This article describes the state of the art. In grindability of the nickel-based alloys. The main objective of this article is to describe two typical phenomena like adhesion wear and grinding defects in the process of grinding. The methods to counteract of this phenomena concurred with own research were also described.

KEYWORDS: grinding, adhesion wear, grinding defects, treatment, nickel-base superalloys

Wprowadzenie

Nikiel jest pierwiastkiem z 10 grupy układu okresowego, oznaczony symbolem Ni, o liczbie atomowej 28 i masie molowej $58,6934 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Metal ten nie wykazuje alotropii, krystalizuje w sieci regularnej ściennie centrowanej A1 o parametrze $a = 0,3516 \text{ nm}$, co powoduje, że obróbkę plastyczną niklu można przeprowadzać na zimno, jak i na gorąco. Według poradnika fizykochemicznego [1] temperatura topnienia niklu T_T wynosi 1453°C a temperatura wrzenia T_W wynosi 2732°C . Gęstość Ni mierzona w temperaturze 20°C wynosi $8,902 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a twardość 64 HV [2].

Nikiel jest ferromagnetykiem, jego temperatura Curie wynosi 358°C . Wytrzymałość na rozciąganie w stanie zmięk-

czonym wynosi $R_m = 450 \text{ MPa}$ a wydłużenie $A = 45\%$, natomiast w stanie odkształconym na zimno z 50% stopniem zgniotu odpowiednio: $R_m = 750 \text{ MPa}$ i $A = 3\%$. Dobre własności mechaniczne zachowuje w podwyższonej temperaturze, tj. do około 500°C [2].

Zanieczyszczenia w postaci siarki, węgla czy tlenu pogarszają własności niklu. Kobalt, żelazo, krzem oraz miedź, tworzące z nikiem roztwory stałe, nie wpływają znacząco na zmianę własności niklu, przyczyniają się głównie do zwiększenia jego rezystywności. Zanieczyszczenia Bi, Pb, Se, tworzące niskotopliwe eutektyki, znacznie wpływają na ciągliwość niklu, zmniejszając ją, natomiast As, Sb, Cd i P tworzą z nikiem twarde i kruche fazy, które obniżają własności mechaniczne [2].

Nikiel wykazuje odporność na korozję atmosferyczną oraz w środowisku wody morskiej, wód mineralnych i kwasów organicznych, nie jest odporny natomiast na działanie kwasu azotowego (V) i ortofosforowego (V) oraz związków siarki [2].

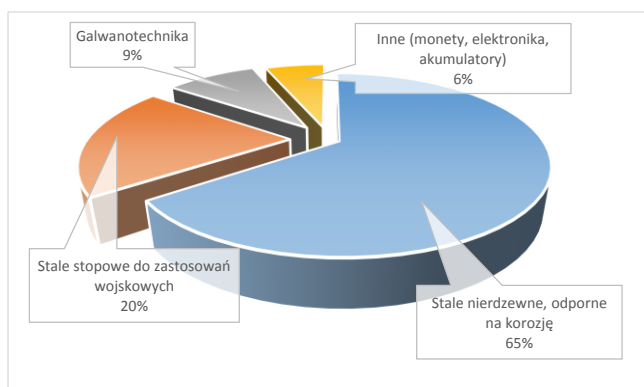
Na początku XX wieku odkryto grupę stali o specjalnych właściwościach fizykochemicznych odpornych na korozję i opatentowano pod nazwą stali nierdzewnej, gdzie w niektórych odmianach dodatek w postaci niklu odgrywał i odgrywa do dnia dzisiejszego znaczącą rolę. Stopy na bazie niklu odznaczają się bardzo dobrą odpornością na korozję i wysokie temperatury co pozwoliło na wykorzystanie ich w inżynierii chemicznej do produkcji reaktorów chemicznych czy w przemyśle lotniczym do produkcji silników odrzutowych. Dzięki swoim właściwościom zapotrzebowanie na nikiel stale wzrasta. Stanowi on cenny dodatek stopowy stali oraz osnowę licznych stopów. Czysty Ni najczęściej stosuje się na podzespoły w lotnictwie i kosmonautyce (elementy silników odrzutowych czy obudowy silników rakietowych), w elektronice i elektrotechnice (elementy specjalnej aparatury badawczej i chemicznej odpornej na działanie kwasów czy zasad oraz na sprzęt w przetwórstwie żywności). Niklu

* mgr inż. Michał Wojtewicz (michal.wojtewicz@tu.koszalin.pl),
dr hab. inż. Krzysztof Nadolny (krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl),
dr hab. inż. Walery Sienicki (walery.sienicki@tu.koszalin.pl)

używa się również w galwanotechnice oraz jako katalizator w wielu procesach chemicznych. Znalazł on zastosowanie w ponad 300.000 produktów przeznaczonych dla konsumentów, przemysłu, transportu, lotnictwa, medycyny oraz budownictwa. Masowy udział całkowitej produkcji niklu do zastosowań technicznych został przedstawiony na rys. 1. W wielu zastosowaniach nie ma możliwości stosowania zamienników dla tego pierwiastka, które by nie zmniejszały wydajności oraz nie zwiększały kosztów procesu [2, 3].

Klasyfikacja stopów niklu

Stopy niklu ze względu na zastosowanie można podzielić na: konstrukcyjne, oporowe, o szczególnych właściwościach fizycznych, w tym stopy magnetycznie miękkie, odporne na korozję, żarowytrzymałe. Dodatkowo niektóre stopy niklu znajdują zastosowanie jako stopy z pamięcią kształtu lub ze szczególnym przeznaczeniem w obróbce plastycznej. Skład chemiczny stopów do obróbki plastycznej opisuje norma PN-ISO 9722:2000. Oznaczenie tych stopów (zgodnie z ISO/TR9721:1992) rozpoczyna się od symbolu Ni, po nim są kolejno symbole oraz średnie stężenie głównych pierwiastków stopowych np. NiCo20Cr15Mo5Al4Ti, gdzie skład procentowy wynosi: Cr – 14,9%, Fe – ≤1%, Co – 20%, Mo – 5%, Cu – ≤0,2%, Mn – ≤1%, Si – ≤1%, C – 0,15%, B – 0,006%, Al. – 4,7%, Ti – 1,2% i inne [2].



Rys. 1. Masowy udział całkowitego wydobycia niklu (źródło: Nickel Development Institute, 2015)

Stopy konstrukcyjne

Do stopów konstrukcyjnych zaliczamy nikiel stopowy objęty normą PN-79/H-87046, który zawiera zwykle jeden pierwiastek stopowy – na ogół 0,1÷0,2% Si, 1÷5,4% Mn, do 0,1% Mg lub 3,7÷4,2% W. Najczęściej stosowanymi stopami konstrukcyjnymi niklu są monety, zawierające 27÷34% Cu, do 2% Mn i do 2,5% Fe. Wykorzystuje się je przede wszystkim w elektronice, przemyśle elektrycznym, chemicznym i maszynowym. Mają one strukturę roztworu stałego. Do tej grupy można zaliczyć dwa najważniejsze stopy tj. Monel 400™ (stop 400) oraz jego wersją po utwardzaniu wydzieleniowym – K-500™. Stop 400 został odkryty na początku 20 wieku i ze względu na znakomitą odporność na korozję jest używany szczególnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, stoczniowym, rafineryjnym oraz innych, głównie jako zbiorniki, wały napędowe, łopatki pomp wirowych, elementy skraplaczy czy wymienniki ciepła. Stop ten zawiera 30÷33% miedzi w osnowie niklu. Dodatek w postaci żelaza i manganu zwiększa właściwości wytrzymałościowe moneli natomiast właściwości fizyczne jak i twardość stopów zależą od zawartości niklu. Stop K-500, który zawiera dodatkowo glin oraz tytan, odznacza się, tak jak Monel 400™, doskonałą odpornością korozyjną, a także posiada zwiększoną wytrzymałość przekraczającą ponad 1000MPa, którą utrzymuje aż do 600° C i twardość w porównaniu ze swoją starszą wersją. Stop ten stosowany jest najczęściej na wały

napędowe statków, na sprężyny oraz narzędzia chirurgiczne [2], [4].

Stopy oporowe

Jedne z podstawowych stopów oporowych niklu to chromel, alumel i nichrom. Chromel, który zawiera ok. 9÷10% chromu, wykazuje strukturę roztworu stałego chromu w niklu. Dodatek chromu powoduje zwiększenie rezystywności, żaroodporności i żarowytrzymałości niklu. Alumel tak samo jak chromel wykazuje strukturę roztworu stałego. Stop ten zawiera do 2,5% Al, 2% Mn i 2% Si. Oba stopy są stosowane jako termopara, w której chromel jest elektrodą dodatnią. Nichromy zawierają 15÷20% Cr. Wykazują dobre właściwości mechaniczne, dobrą żarowytrzymałość i dużą rezystywność, ok. 70-krotnie wyższą niż Cu. Są one używane jako elementy oporowe grzejne i rezystory oraz termopary pracujące do temperatury ok. 900°C. Aby wydłużyć dziesięciokrotnie czas pracy elementów grzejnych wykonanych z nichromu oraz podwyższyć temperaturę ich pracy do ok. 1200°C, do stopu dodaje się ok. 0,1% Ce. Natomiast dodatek ok. 25% Fe powoduje obniżenie temperatury pracy do 800° C [2].

Stopy o szczególnych właściwościach fizycznych

Do stopów niklu o szczególnych właściwościach fizycznych zaliczamy przede wszystkim inwary, elinwary i permalloye. Stopy niklu typu inwar zawierają 36÷52% niklu a resztę stanowi żelazo. Spotkać można również gatunki inwaru zawierające ponadto 5% chromu lub 1,25% manganu. Inwary cechują się niemal stałym współczynnikiem rozszerzalności liniowej w zależności od składu chemicznego w zakresie temperatur 20÷300° C lub -80÷100°C. Gdy w stopie zastąpi się część Ni kobaltem otrzymuje się stop zwany kowarem lub fernico, który zawiera ok. 30% niklu, 15÷20% kobaltu i resztę żelaza, o mniejszym od inwaru temperaturowym współczynnikiem rozszerzalności liniowej. Stopy inwar i kowar stosowane są w produkcji lamp w elektronice jako złącza metal-ceramika lub metal-szkło [2].

Stopy elinwar to mieszanina 33÷43% niklu, 5÷9% chromu, do 0,4% węgla, a także do 4% wolframu, do 2% tytanu, do 3% manganu, resztę stanowi żelazo. Stopy te cechują się stałymi wartościami modułu Younga E oraz modułu Kirchhoffa G w określonym zakresie temperatur. Stosuje się je do produkcji precyzyjnych przyrządów, kamertonów oraz sprężyn [2].

Stopy zwane permalloyami z dodatkiem ok. 20÷22% żelaza charakteryzują się około dziesięciokrotnie większą przenikalnością magnetyczną w porównaniu do żelaza technicznego. Jako magnetycznie miękkie stosuje się je w przyrządach pracujących w stałych polach, głównie w radiotechnice czy telekomunikacji. Dodatkowo ich przenikalność magnetyczną można zwiększyć poprzez zastąpienie części żelaza dodatkiem ok. 3% molibdenu [2].

Stopy odporne na korozję, żarowytrzymałe i zaworowe

Jedną z najważniejszych cech, jaką posiadają stopy niklu, jest ich odporność na korozję, możliwość pracy w wysokich temperaturach jak i w innych ekstremalnych warunkach środowiskowych. Tego typu stopy niklu określane są często jako superstopy i są wykorzystywane głównie w przemyśle lotniczym. Są to głównie stopy Ni-Cr-Fe oraz Ni-Cr-Mo z niewielkim dodatkiem innych metali. Każdy dodatek stopowy ma różny wpływ na właściwości stopu. Wpływ dodatków stopowych na właściwości stopu został

przedstawiony w tab. 1. Podstawowe zastosowania superstopów przedstawiono natomiast w tab. 2.

Jako grupy superstopów niklu można wymienić stopy typu hastelloy, inconel czy nimonic. Stopy typu hastelloy zawierają do 20% żelaza i do 25% molibdenu, częściowo zastępowanego przez chrom, którego stężenie może dochodzić do 20%. Stopy te zawierają również niewielkie ilości dodatków w postaci krzemu, manganu, wanadu lub wolframu. Stężenie węgla w tego typu stopach ograniczone jest do ok. 0,1%. Hastelloye mogą być stosowane do budowy aparatury chemicznej pracującej we wrzących lub gorących kwasach siarkowym i chlorowodorowym, na elementy turbin gazowych, w urządzeniach do przetwarzania paliwa jądrowego, a także w przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu ziemnego, instalacjach przesyłowych paliwa czy sprzętu do wytrawiania. Ponadto odznaczają się odpornością na działanie gazów zawierających siarkę, dzięki czemu można je wykorzystać na płuczki wieżowe spalin i zbiorniki do przechowywania kwasów ortofosforowego (V) i siarkowego (VI) [2].

Tab. 1. Rola dodatku stopowego w superstopach niklu (według Agarwal, 2004)

Dodatek stopowy	Wpływ na właściwości stopu
Cr	<ul style="list-style-type: none"> – odporność na utlenianie do temperatury 950° C; – odporność na nasiarczanie, korozję popiołową, atak stopionego szkła; – zmniejszanie dyfuzji węgla, odporność na nawęglanie; – zmniejszona odporność na azotowanie, podnosi wytrzymałość w wysokich temperaturach;
Si	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa odporność na utlenianie, azotowanie, nasiarczanie i nawęglanie; – w synergii z chromem wpływa na zwiększenie skali odporności; – zmniejsza odporność na działanie kwasu chlorowodorowego;
Mo	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa wytrzymałość termiczną i odporność na chlorowanie; – zwiększa odporność na pełzanie; – negatywny wpływ na utlenianie w wysokich temperaturach;
W	<ul style="list-style-type: none"> – zachowuje się podobnie jak molibden;
C	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa wytrzymałość; – pomaga w odporności na azotowanie;
Y	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa adhezję warstwy pasywnej i zapobiega jej wykruszaniu; – poprawia odporność na nasiarczanie;
Al	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa odporność na utlenianie i nasiarczanie;
Ti	<ul style="list-style-type: none"> – zmniejsza odporność na azotowanie;
Nb	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa wytrzymałość na pełzanie; – korzystnie wpływa na odporność na nawęglanie;
Mn	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększa wytrzymałość w wysokich temperaturach; – zwiększa rozpuszczalność azotu;
Co	<ul style="list-style-type: none"> – zmniejsza stopień dyfuzji siarki; – umocnienie roztworu stałego; – odporność na nasiarczanie;

Drugą ważną grupę stopów żaroodpornych stanowią stopy typu inconel i nimonic, które znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym, kosmonautyce czy przemyśle chemicznym jako łopatki i dysze turbin gazowych, silników rakietowych i odrzutowych, elementy aparatury chemicznej, pracującej w wysokiej temperaturze i niekorzystnych warunkach.

Stopy te zawierają, oprócz niklu, dodatki do 20% chromu lub do 20% molibdenu i do 10% żelaza, a także niewielkie dodatki krzemu, manganu, tytanu, niobu, wanadu lub wolframu. Mogą być również wprowadzane, w stężeniu 5÷10%, dodatki glinu, miedzi, a także, do 15% kobaltu [2].

Stopy niklu posiadają austenityczną, regularną ścienną centrowaną strukturę krystalograficzną. Mimo, że żelazo krystalizuje w sieci regularnej przestrzennie centrowanej a kobalt w sieci heksagonalnej zwartej w temperaturze pokojowej, superstopy zawierają inne domieszki, które determinują, że sieć regularna ściennie centrowana jest stabilna w każdym zakresie temperaturowym. To właśnie dzięki strukturze krystalograficznej niklu, większość opracowanych superstopów może być poddawana obróbce plastycznej w temperaturze pokojowej. Jednakże niektóre dodatki wysokostopowe nie posiadają tej własności, wtedy trzeba szukać alternatywnych metod wytwarzania jak odlewnictwo czy metalurgia proszków. Superstopy są relatywnie ciężkie, gęstości w zakresie 7,8÷9,4 g·cm⁻³. Gęstość ta zależy od rodzaju stosowanych dodatków stopowych, przez co można ją modyfikować. Dodatki takie jak glin, tytan czy chrom obniżają gęstość stopu, natomiast pierwiastki jak wolfram, ren, czy tantal zwiększają ją [5].

Tab. 2. Podstawowe zastosowania superstopów (według Dobrzański, 2004)

Gałąź przemysłu	Wytwarzane elementy
Przemysł lotniczy	<ul style="list-style-type: none"> – sprężarki wysokiego i niskiego ciśnienia; komory spalania; turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia; łopatki; dysze, osłony, wały;
Przemysł ciepłowniczy	<ul style="list-style-type: none"> – palety, mufle pieców, osprzęt, taśmy przenośników, kosze, wentylatory;
Przemysł atomowy	<ul style="list-style-type: none"> – trzpienie zaworów; sprężyny, kierownice;
Kosmonautyka	<ul style="list-style-type: none"> – poszycia statków kosmicznych; elementy silników rakietowych;
Przemysł chemiczny i petrochemiczny	<ul style="list-style-type: none"> – dysze; wentylatory, zawory, zbiorniki, rury, pompy;
Przemysł medyczny	<ul style="list-style-type: none"> – elementy protez; zastosowania stomatologiczne;
Ochrona środowiska	<ul style="list-style-type: none"> – płuczki wieżowe; oprzyrządowanie do odsiarczania gazów (kierownice, wentylatory);
Przemysł papierniczy	<ul style="list-style-type: none"> – rury, listwy zgarniające, chloratory;

Nikiel jest podstawowym składnikiem wszystkich wymienionych stopów, który decyduje o ich strukturze, stabilności faz i zachowaniu w procesach technologicznych. Żelazo może częściowo zastępować nikiel ale wzrost stężenia żelaza może niekorzystnie wpływać na żaroodporność, ponieważ jego tlenki wykazują zmniejszoną adhezję do podłoża. Żelazo powoduje ponadto zwiększenie podatności stopów niklu na wydzielanie fazy międzykrystalicznej. Dodatek w postaci kobaltu wpływa na podwyższenie żarowytrzymałości i poprawę właściwości technologicznych roztworu stałego oraz powoduje zmniejszenie rozpuszczalności w osnowie glinu oraz tytanu. Chrom zwiększa odporność na utlenianie w wysokich temperaturach. Ponadto dodatek chromu przyczynia się do umocnienia osnowy stopu, zwiększenia odporności na pełzanie oraz wytrzymałości w wysokich temperaturach. Dodatek glinu wpływa na wzrost żaroodporności, natomiast molibden i wolfram przyczyniają się głównie do umocnienia osnowy w stopach Ni-Co-Cr oraz Fe-Ni-Cr. Węgiel występuje w omawianych stopach

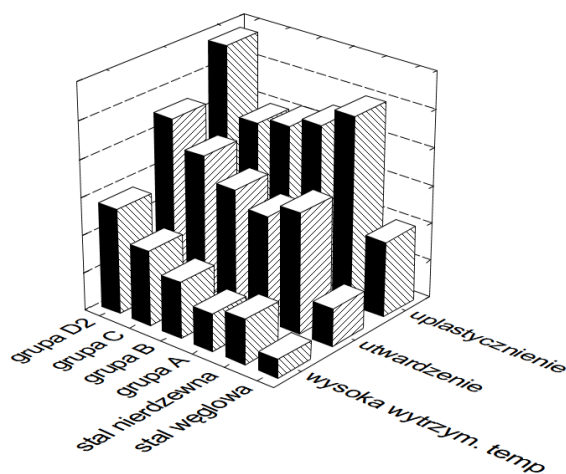
w stężeniu ok. 0,05% - w stopach przerobionych plastycznie i 0,12÷0,18% - w stopach odlewniczych, powodując zwiększenie wytrzymałości [2].

Szlifowanie stopów niklu

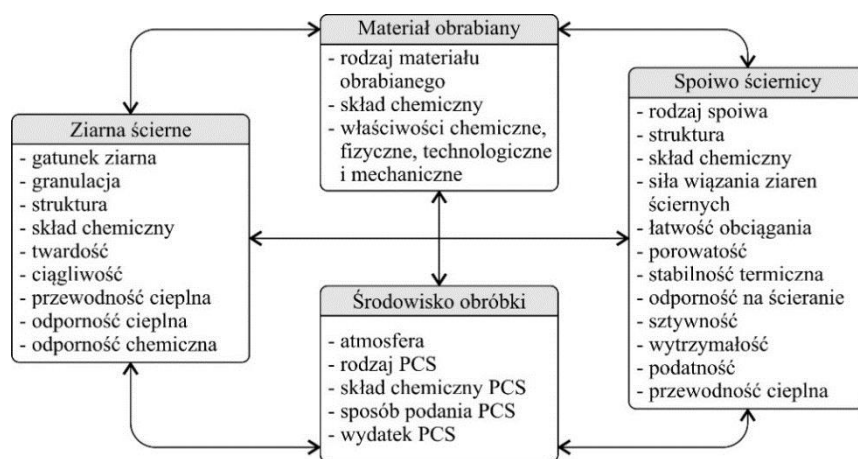
Przy produkcji elementów, dla których wymagane są bardzo małe tolerancje wymiarowe, najlepszą metodą obróbki ubytkowej stopów niklu wydaje się być szlifowanie. Do tego celu zaleca się stosowanie ściernic wytwarzanych przez czołowych producentów narzędzi ściernych takich jak Norton Abrasives, Grindwell Norton, Carborundum – marki Saint-Gobain Abrasives, Super Abrasives, Grier Abrasive Company, Andre Abrasive Articles Sp. z o.o. Sp. k. i inne, którzy są w stanie zaproponować właściwe narzędzie w odniesieniu do wymaganych potrzeb. U samych producentów stopów również można znaleźć informacje o doborze ściernic jak i płynów obróbkowych stosowanych przy szlifowaniu superstopów. Według producentów ściernic jak i stopów niklu, szlifowanie stopów niklu nie różni się znacząco od procesów szlifowania stali (ze względu na właściwości mechaniczne zbliżone do austenitycznych stali nierdzewnych) [4]. Aby uzyskać najlepszą wydajność oraz uniknąć przegrzania powierzchni i jej uszkodzenia, szlifowanie powinno odbywać się z udziałem płynu chłodząco-smarującego. Cała powierzchnia przedmiotu powinna być nieprzerwanie chłodzona przez płyn chłodząco-smarujący. Do szlifowania stopów niklu zaleca się zastosowanie emulsji typu O/W (emulsja oleju w wodzie), które nadają się do wszystkich operacji szlifierskich poza szlifowaniem kształtowym i gwintów [6]. Jeżeli chodzi o sam dobór narzędzi ściernych, Agarwal [4] zaleca stosowanie ściernic z węgla wolframu lub ściernic ceramicznych. Z kolei Nickel Development Institute sklasyfikował stopy niklu, według obrabialności, na 5 grup oznaczonych literowo od A do E i 2 podgrupy: D1 i D2, i każdej grupie zaproponował stosowanie odpowiednich narzędzi ściernych. I tak zaleca stosowanie ściernic wykonanych z węgla krzemu do szlifowania stopów z grupy A, B, D1 oraz E, dla stopów grupy C oraz D2 najlepsze są ściernice korundowe o numerze ziarna 46-60 [3]. Trudno się jednak z tym zgodzić, ponieważ w tym samym opracowaniu został przedstawiony wykres zmian właściwości mechanicznych w zależności od rodzaju stopu (rys. 2), z którego jasno wynika, że dokonując przejść od obróbki stali węglowej, przez stal nierdzewną, a kończąc na stopach niklu, zjawiska takie jak uplastycznienie, utwardzenie oraz wysoka wytrzymałość termiczna, stopniowo wzrastają, co oznacza odpowiednio zmienne warunki w strefie szlifowania oraz trudniejszą obróbkę [3].

Analizując materiały źródłowe dotyczące szlifowania stopów niklu należy również nadmienić, że chemiczne i fizyczne właściwości tych materiałów sprawiają podobne trudności w procesach szlifowania, jak podczas skrawania z tą różnicą, że są jeszcze bardziej widoczne. Wynika to na ogół z trudniejszych warunków pracy ziaren ściernych w strefie szlifowania, ponieważ duża ilość ziaren uczestniczy w procesie obróbki, gdzie tylko ich część wykonuje pracę skrawania, natomiast reszta w dużej mierze odkształca sprężysto i plastycznie materiał obrabiany. Ma to decydujący wpływ na zmienność przekrojów warstw skrawanych poszczególnymi wierzchołkami ziaren oraz losowych, z reguły ujemnych, kątów ich natarcia. Istotny wpływ mają również małe objętości przestrzeni na gromadzenie wiórów na czynnej powierzchni ściernicy (CPS) oraz trudności w ich usuwaniu [7].

Na szlifowalność superstopów niklu zasadniczy wpływ mają duża ciągliwość, duża przewodność cieplna oraz podatność na utwardzanie w procesie obróbki. Często występuje zjawisko nadmiernego zalepiania CPS wiórami materiału obrabianego oraz innymi produktami szlifowania, wynikające z właściwości stopów niklu. To niekorzystne zjawisko powoduje ograniczenie zdolności skrawnej narzędzi, skrócenie czasu ich pracy, a także może doprowadzić do powstawania defektów szlifierskich na powierzchni materiału obrabianego. Z uwagi na te zjawiska autorzy prac dotyczących szlifowania stopów na osnowie niklu najczęściej rezygnują ze stosowania konwencjonalnych narzędzi ściernych na rzecz narzędzi wykonanych z materiałów super-twardych jak diament czy cBN. W swoich publikacjach opisują efekty procesu szlifowania z użyciem ściernic z materiałów supertwardych jak ściernice diamentowe oraz ściernice z regularnego azotku boru [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].



Rys. 2. Wykres zmian właściwości mechanicznych w stopach niklu (źródło: Nickel Development Institute, 2015)



Rys. 3. Oddziaływania chemiczne podczas szlifowania (PCS – płyn chłodząco-smarujący) (źródło: Nadolny i inni, 2015)

Zjawiska w strefie szlifowania

W strefie szlifowania, w której narzędzie ściernic podczas pracy styka się z przedmiotem obrabianym, dochodzi do kontaktu czterech podstawowych elementów: ziaren ściernych, spoiwa, materiału obrabianego oraz środowiska. Kontakt tych elementów w warunkach wysokiej temperatury, wywołanej tarciem i dużą dynamiką procesu, może powodować zachodzenie reakcji chemicznych [17, 18] – rys. 3. Do najważniejszych zjawisk chemicznych w obróbce ściernic

nej zaliczyć należy oddziaływania pomiędzy ziarnami ściernymi i materiałem obrabianym oraz oddziaływania pomiędzy materiałem obrabianym a wypełniaczami i impregnatami zawartymi w narzędziach ściernych. Istotne są również oddziaływania pomiędzy ziarnami ściernymi a środowiskiem obróbki [17, 19, 20].

W celu ochrony ziaren ściernych przed ich chemicznym zużyciem, celowo wprowadzane są środki czynnie oddziałujące chemicznie na powierzchnię obrabianą w celu zwiększenia efektywności obróbki. Na efektywność szlifowania wpływają również działania mające na celu obniżenie temperatury w strefie szlifowania, zapobiegające adhezji wórwów do powierzchni obrabianej i materiału ściernego [17].

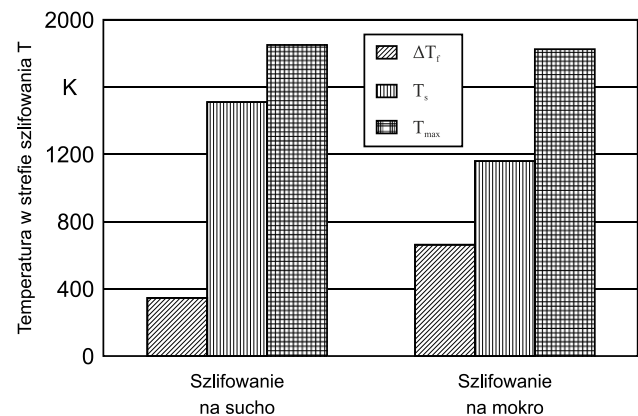
■ Defekty szlifierskie

Ze względu na swoje właściwości, na powierzchni stopów niklu, często dochodzi do powstawania defektów szlifierskich, w tym głównie przypaleń [21], deformacji plastycznych [22] oraz powstawanie warstwy białej [23], nawet przy stosowaniu niewielkich wydajności ubytkowych. Wynika to z niewielkiej przewodności cieplnej tego typu materiałów i powoduje znaczący wzrost temperatury w strefie szlifowania. Wysoka temperatura obróbki ma negatywny wpływ głównie na właściwości zmęczeniowe obrobionego przedmiotu. Pierwsze wzmianki w literaturze na temat defektów szlifierskich powstających podczas szlifowania stopów niklu (stopu Nimonic® 108) można znaleźć w publikacji Ye i Pearce [21]. W swojej publikacji zwrócili oni uwagę na przypalenia szlifierskie, przy szlifowaniu powierzchni płaskich z posuwem pelżającym (ang. *Creep Feed Grinding*), z wykorzystaniem dwóch mediów chłodzących: emulsji wodnej O/W i czystego oleju. Badania swoje przeprowadzili na ściernicach o strukturze wielkoporowej z elektrokorundu szlachetnego Al_2O_3 . Wyniki badań wskazują, że wykorzystanie czystego oleju jako chłodziwa wpływa korzystnie na jakość powierzchni obrobionej, pozwala zredukować jej chropowatość w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy użyciu emulsji jako chłodziwa. Jednakże stosowanie oleju zwiększa ryzyko wystąpienia przypaleń na powierzchni materiału obrobionego, które z kolei zmniejszają wydajność ubytkową procesu szlifowania.

Ósterle i inni ([23], [24]) wykazali, że w strefie szlifowania dochodzi do miejscowych nadtopień materiału obrabianego, co stanowi swoisty mechanizm prowadzący do powstawania warstwy białej. Wykazano ponadto, że decydujący wpływ na warunki termiczne w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym mają parametry obciążania czynnej powierzchni ściernicy, w szczególności ciągłe obciążanie stosowane w procesie szlifowania pelżającego, którego zastosowanie pozwala na znaczące obniżenie temperatury powierzchni obrabianego stopu niklu oraz zapobiega powstawaniu warstwy białej. Również efektywne podawanie płynów chłodząco-smarujących pozwala na znaczące zredukowanie wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej oraz ograniczenie powstawania mikropęknięć na powierzchni obrobionej spowodowanych wysoką temperaturą w strefie szlifowania (rys. 4). Prace Ósterle potwierdziły również badania Tso [22] wykazując, że podczas szlifowania superstopów niklu dochodzi do powstawania lokalnych deformacji plastycznych.

W pracy [25] przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury szlifowania (tab. 3) na stan warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego wykonanego ze stopu K417. Analizie poddano zmiany chropowatości powierzchni, mikrotwardości, naprężeń własnych, struktury metalograficznej oraz trwałości zmęczeniowej (ang. *fatigue life*) wynikające ze

zmian temperatury w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym. Wykazano znaczący wzrost chropowatości powierzchni w przypadku wystąpienia na powierzchni obrobionej przypaleń szlifierskich. Zjawisko to wynika z występowania odkształconych plastycznie powłok pojawiających się przy podwyższonych temperaturach (rys. 5a). Dokonując natomiast oceny obrazów mikroskopowych SEM (rys. 6), na powierzchni większości obrobionych próbek nie zauważono mikropęknięć, co świadczy o tym, że nawet temperatura rzędu $1440^{\circ}C$ w strefie szlifowania nie powodowała naruszenia integralności struktury powierzchni szlifowanego stopu. Dopiero w przypadku próbki przy szlifowaniu której maksymalna temperatura wynosiła $1600^{\circ}C$ [25] ujawniono występowanie mikropęknięć powierzchni przedmiotu obrobionego – rys. 6d. Wyznaczona głębokość zalegania naprężeń własnych dla powierzchni bez i z przypaleniami szlifierskimi nie przekraczała $40\ \mu m$ – rys. 5b. Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano możliwość dwuetapowej obróbki badanego stopu, gdyż takie zmiany eliminują powierzchnie. W pierwszym etapie możliwa jest wysokowydajna obróbka, nawet jeżeli prowadzi do powstawania przypaleń szlifierskich. Powstałe odkształcone plastycznie powłoki na powierzchni przedmiotu mogłyby zostać usunięte w drugim etapie ze znacznie mniejszą wydajnością ubytkową, ponieważ grubość warstwy zalegania defektów nie przekracza $40\ \mu m$, co jest wartością znacznie mniejszą w porównaniu z głębokością szlifowania wykończeniowego.



Rys. 4. Temperatury w strefie szlifowania podczas szlifowania pelżającego stopu Inconel® 738LC (źródło: Ósterle i Li, 1997)

Tab. 3. Zmiana zabarwienia powierzchni materiału obrobionego w funkcji temperatury w strefie szlifowania (według Xu i inni, 2002)

		Maksymalna temperatura w strefie szlifowania, °C				
		95	990	1215	1440	1600
Kolor	normalny	be-zowy	brązo-wy	fioletowo-brązowy	hiacyntowy	

Po przeprowadzeniu analizy XPS [26] dla poszczególnych powierzchni z widocznymi przypaleniami stwierdzono, że przypalenia te są spowodowane przez reakcje chemiczne zachodzące w trakcie procesu szlifowania z posuwem pelżającym pomiędzy środowiskiem obróbki a poszczególnymi metalami wchodzącymi w skład materiału obrabianego K417 (nikiel, chrom, tytan i glin), czyli reakcje utleniania. Tlenki tych metali tworzą ciekłą warstwę tlenków (Na_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 oraz TiO_2), której grubość ma decydujący wpływ na kolor przypalenia. Stwierdzono ponadto, że tytan

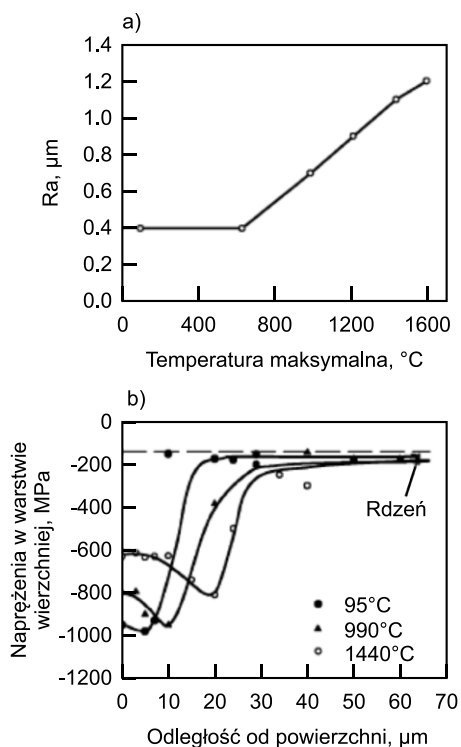
obecny w stopie może reagować z tlenem atmosferycznym już w temperaturze powyżej 500°C.

Ze względu na specyfikę procesów szlifowania nadstopów niklu, prowadzi się szereg prac badawczych w celu doskonalenia metod ich monitorowania i diagnostyki.

Przykładem tego kierunku badań jest praca [27], w której przedstawiono możliwości identyfikacji powstawania przypaleń szlifierskich w procesie szlifowania stopu CSMX4 z użyciem sygnału emisji akustycznej (EA). Wyniki badań wykazały, że istotne cechy sygnału akustycznego EA mogą być ekstrahowane za pomocą pakietowej transformaty falkowej, bazującej na analizie częstotliwości w domenie czasu. Na podstawie doświadczeń określono, że rozkład energii sygnałów EA związanych z rozszerzalnością cieplną materiału obrabianego w wysokiej temperaturze ($\Theta_{max} = 784^\circ\text{C}$) jest skoncentrowany w paśmie wysokich częstotliwości. Energia sygnału przechodzi do pasma niskich częstotliwości wraz ze spadkiem temperatury. Zjawisko to może stanowić podstawę do stosowania sygnału EA w celu wykrywania przypaleń szlifierskich w trakcie szlifowania nadstopów niklu.

■ Zalepienia czynnej powierzchni ściernicy

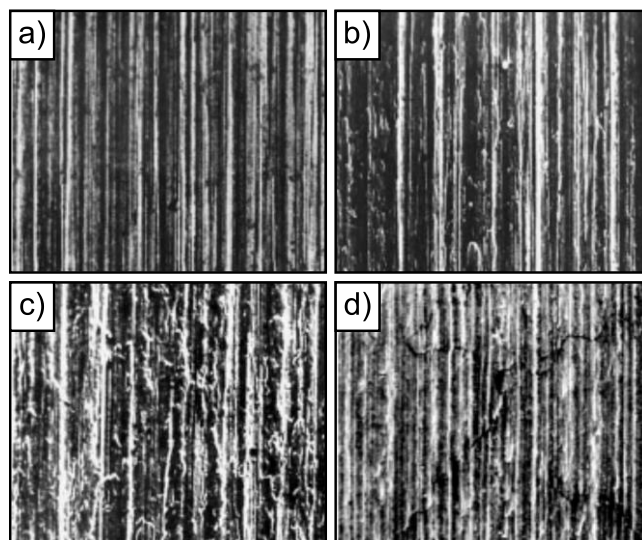
Po raz pierwszy obraz mikroskopowy zalepionej powierzchni ściernicy stopem niklu (Inconel[®] 718) przedstawił w swoich badaniach w roku 1995 Tso [28]. Stwierdził on, że superstopy niklu wykazują dużą adhezję materiału obrabianego do powierzchni czynnej ściernicy wywołaną wysoką temperaturą w strefie obróbki i siłą tarcia działającą równoległe do kierunku obrotu ściernicy, przez co konieczne jest stosowanie płynu chłodząco-smarującego, który będzie smarował, przewodził ciepło oraz odprowadzał wióry poza strefę obróbki. Poza tym stwierdził on, że wartości siły szlifowania zależą od intensywności tworzenia zalepień na CPS – w momencie powstawania zalepień siły szlifowania znacznie wzrastają.



Rys. 5. Zmiana chropowości powierzchni obrabianej dla poszczególnych temperatur bez i z widocznymi przypaleniami szlifierskimi w strefie szlifowania – a), rozkład naprężeń własnych

w warstwie wierzchniej dla powierzchni wolnej od przypaleń i z przypaleniami szlifierskimi – b) (źródło: Xu i inni, 2002)

W roku 2002 Xu i Yu przeprowadzili analizę XPS powierzchni zalepionej (rys. 7). Wyniki nie wykazały żadnej różnicy w składzie chemicznym między zalepieniem a materiałem obrabianym, co potwierdziło wystąpienie zjawiska adhezji pomiędzy ziarnem ściernym a materiałem obrabianym. Na powierzchni zalepień autorzy zaobserwowali specyficzne ślady równoległe do kierunku obrotu ściernicy, które świadczyły o tym, że materiał ten ślizgał się po przedmiocie obrabianym. Dzięki tym obserwacjom przedstawili oni 5-etapowy model tworzenia się zalepień na powierzchni czynnej ściernicy [26].



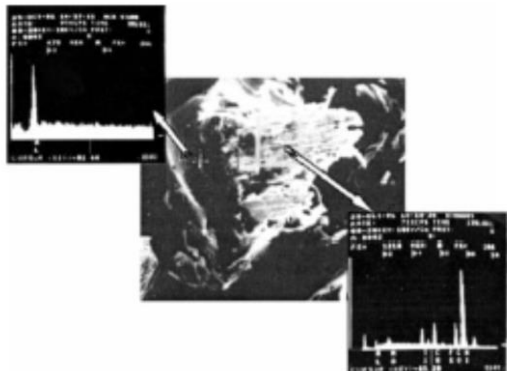
Rys. 6. Obrazy mikroskopowe SEM dla powierzchni obrabianej: a) bez przypaleń, temperatura 95°C; b) przypalenia w kolorze beżowym, temperatura 990°C; c) przypalenia w kolorze fioletowobrązowym, temperatura 1440°C; d) przypalenia w kolorze hiacyntowym, temperatura 1600°C (widoczne mikropęknięcia) [25]

Liu i inni z kolei określają w swojej publikacji stopy niklu jako materiały trudnoskrawalne, ponieważ podczas obróbki ściernic cechują je wysokie siły szlifowania oraz krótki okres trwałości ściernic. Dokonali oni oceny wpływu trzech rodzajów ściernic (konwencjonalnej ściernicy z ziarnami Al_2O_3 oraz dwóch ściernic wykonanych z ziaren supertwardych: ściernicy z cBN oraz ściernicy diamentowej) na efektywność procesu szlifowania stopu niklu (CMSX-4). Ściernice z materiałów supertwardych odznaczały się dużo wyższym wskaźnikiem szlifowania G. Było to spowodowane dużą odpornością na zużycie tych ściernic. Na czynnych powierzchniach ściernic wykonanych z ziaren supertwardych zaobserwowano jedynie występowanie oznak zużycia ściernego, które może zwiększać podatność ściernicy na zalepianie w przypadku, gdy zastosowane chłodzenie będzie mało efektywne. Autorzy również podkreślili, że jeżeli ściernice (diamentowa oraz z cBN) wykonane zostaną na spoiwie galwanicznym zawierającym nikiel, wtedy ściernice takie będą wykazywały bardzo dużą tendencję do zalepiania się. Dodatkowo stosowanie wodnych emulsji jako płynu chłodząco-smarującego zalecane jest tylko w przypadku szlifowania ściernicami korundowymi i diamentowymi. Ściernice z cBN natomiast w wysokich temperaturach wchodzi w reakcję z wodą, co przyczynia się do ich szybszego zużycia. Ściernice diamentowe wykazały najlepszą wartość współczynnika jakości do ceny [29].

Neslušan dodatkowo pisze, że powstawanie zalepień na CPS znacząco wpływa na warunki w strefie szlifowania skutkując wzrostem sił, mocy i temperatury szlifowania, skróceniem okresu trwałości ściernicy oraz pogorszeniem

jakości powierzchni obrabianej [30]. W efekcie uzyskuje się niskie wartości wskaźnika szlifowania G , niekorzystne silne naprężenia rozciągające i obniżenie dokładności wymiarowo-kształtowej powierzchni obrabianej z powodu niestabilnego procesu szlifowania [31].

Jednym z kierunków badań dotyczących ograniczenia zjawiska zalepiania czynnej powierzchni ściernicy jest stosowanie ściernic o podwyższonej porowatości (tzw. wielkoporowych).



Rys. 7. Zalepienie spowodowane adhezją materiału obrabianego do ziarna (źródło: Xu i Yu, 2002)

Ściernice stosowane w szlifowaniu nadstopów niklu

W procesach szlifowania nadstopów niklu coraz częściej stosowane są ściernice z jednowarstwowym nasypem ściernym wiązany galwanicznie z korpusem narzędzia. Najczęściej stosowane są w takim przypadku supertwarde ziarna ściernic cBN i diamentowe. Ściernice galwaniczne charakteryzują się odmiennym mechanizmem zużycia w porównaniu do ściernic ze spoiwem ceramicznym lub żywicznym. Wierzchołki aktywnych ziaren ściernych ulegają starci i wypłaszczeniu. Część słabiej związanych z podłożem ziaren zostaje wyrwanych ze ściernicy co z jednej strony ogranicza liczbę wierzchołków skrawających a z drugiej może prowadzić do powstawania defektów obrabianej powierzchni w postaci osadzonych na niej ziaren.

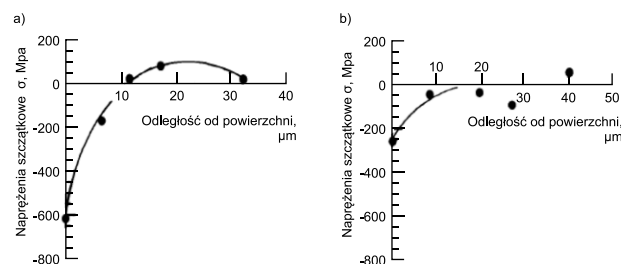
W pracy Tso wykazano, że zastosowanie ściernic z ziarnami cBN w procesie szlifowania powierzchni płaskich ze stopu Inconel[®] 718 pozwala na uzyskanie najkorzystniejszych wyników obróbki w porównaniu do ściernic z ziarnami Al_2O_3 i SiC. Dla ściernic cBN zanotowano najkorzystniejsze wartości sił szlifowania, chropowatości powierzchni obrabianej, najwyższą dokładność wymiarowo-kształtową oraz najdłuższy okres trwałości ściernicy. Jedynym niekorzystnym czynnikiem związanym ze stosowaniem ściernic z ziarnami cBN jest wysoka cena narzędzi [28].

Według Österle i Li stosowanie ściernic, wykonanych z ziaren o lepszym przewodnictwie cieplnym w porównaniu do konwencjonalnych korundowych, na przykład z regularnego azotku boru, pozwala na skuteczne ograniczenie powstawania warstwy białej oraz na obniżenie temperatury w strefie obróbki [23].

W roku 1999 Kawagoishi i inni przeprowadzili badania wpływu szlifowania z użyciem ściernicy cBN na wytrzymałość próbki walcowej. Wyniki pomiarów wykazały wzrost wytrzymałości zmęczeniowej badanej próbki w temperaturze pokojowej będący skutkiem występowania naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej przedmiotów po szlifowaniu (rys. 8a). Przedstawiono również, że w temperaturze 500°C zanika ten korzystny wpływ szlifowania ściernicami z

ziarnami cBN ze względu na wywołane podwyższoną temperaturą uwalnianie naprężeń ściskających (rys. 8b) i zmniejszenie odporności na rozwój mikropęknięć w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego [8].

Sunarto i Ichida w 2001 roku przebadali wpływ dwóch rodzajów ziaren ściernych, z polikrystalicznego azotku boru (PcBN) oraz z mikrokrystalicznego azotku boru (McBN), na efektywność procesu szlifowania z posuwem pełzającym stopów niklu (Nimonic[®] 80A). Wyniki tych prac wykazały, że stosowanie PcBN jako ziaren ściernych do produkcji ściernicy może skutecznie zredukować siły szlifowania o ok. 20÷30% w porównaniu do zastosowania ziaren ściernych z monokrystalicznego azotku boru. Ponadto ściernica wykonana z PcBN charakteryzuje się wydłużonym okresem trwałości oraz mniejszym błędem kształtu podczas szlifowania stopów niklu [9].



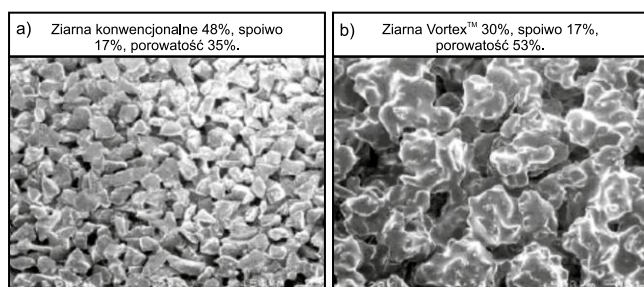
Rys. 8. Rozkład własnych naprężeń ściskających dla stopu Inconel[®] 718: a) przed wygrzewaniem, b) po wygrzewaniu (źródło: Kawagoishi i inni, 1999)

W pracy [32] wykazano, że w przypadku stosowania ściernic z ziarnami Al_2O_3 zjawisko zalepiania CPS materiałem szlifowanym występuje z większą intensywnością w porównaniu do szlifowania ściernicami z ziarnami cBN. Tłumaczyć to można większą stabilnością chemiczną regularnego azotku boru w wysokich temperaturach oraz jego wysoką przewodnością cieplną.

W pracy [10] do szlifowania powierzchni kształtowych w stopach Inconel[®] 718i Udimet[®] 720 zastosowano profilowe ściernice galwaniczne z ziarnami cBN i diamentowymi. Wykazano, że przy zastosowaniu dużych prędkości szlifowania (v_s do 90 m/s – $n_s = 60\ 000-90\ 000$ obr./min) badanymi ściernicami, na powierzchni przedmiotu obrabianego nie wystąpiły przypalenia a na CPS nie zaobserwowano zalepień. Uzyskane chropowatości powierzchni obrabianej wyrażone parametrem R_a wynosiły od 0,8-2,0 μm, przy czym najniższe wartości uzyskano stosując ściernice z ziarnami diamentowymi. Przy zastosowaniu ściernic z ziarnami cBN zarejestrowano natomiast mniejsze zużycie promienne.

Zhang i inni analizując temperaturę w strefie szlifowania, siły szlifowania, parametry chropowatości powierzchni materiału obrabianego oraz rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego dobrali najbardziej optymalne parametry szlifowania stopu GH2132 z użyciem ściernicy z mikrokrystalicznego korundu spiekane-go SG o spoiwie ceramicznym. Według ich badań wzrost prędkości liniowej ściernicy powoduje spadek sił szlifowania oraz polepszenie parametrów chropowatości materiału obrabianego podczas, gdy temperatura i naprężenia własne w warstwie wierzchniej materiału obrabianego rosną. Żeby nie dopuścić do przypalenia materiału oraz zalepiania ściernicy najbardziej optymalna prędkość szlifowania powinna wynosić między 18 a 22 m·s⁻¹, a głębokość szlifowania nie powinna przekroczyć 0,02 mm [33].

W pracy Neslušana określono wpływ zastosowania ściernicy typu Vortex™ firmy Norton (rys. 9b) zbudowanej z aglomeratów ziaren ściernych Al_2O_3 spojonych spoiwem ceramicznym i charakteryzującej się podwyższoną otwartością struktury – struktura 17 (Vortex™ 1 250×20×76/60J17V) na proces szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu El 698 VD (podobnego do stopu Nimonic® 90). Wykazano, że przy zastosowaniu ściernicy typu Vortex™ uzyskuje się efekt znacznego ograniczenia zjawiska zalepiania CPS w porównaniu do konwencjonalnej ściernicy z ziarnami 99A o strukturze 9 (1-250×20×76/A9960J9V) (rys. 9a). Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych wykazały ponadto korzystny wpływ ściernicy wielkoporowej na siły szlifowania (szczególnie przy zwiększonej głębokości szlifowania), zwiększenie wartości wskaźnika szlifowania G o około 30% oraz znaczące obniżenie temperatury w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym (o około 20-30%) [30].



Rys. 9. Porównanie obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni ściernic a) ściernicy tradycyjnej, b) ściernicy z ziarnami Vortex™ (źródło: Neslušana, 2009)

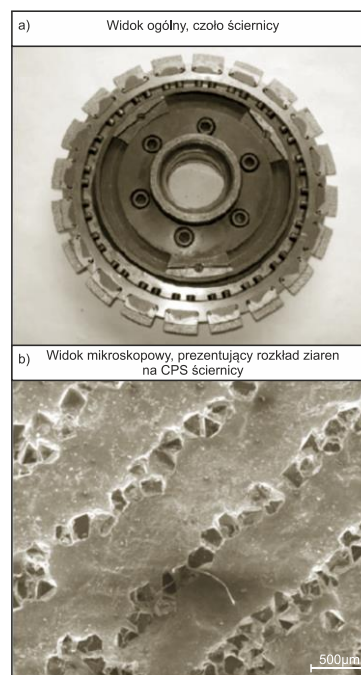
Modyfikacja procesu szlifowania na bazie niklu

Na stabilność procesu szlifowania nadstopów niklu oraz powstawanie defektów szlifierskich w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych decydujący wpływ ma temperatura w strefie szlifowania. Jak wykazały analizy teoretyczne oraz badania doświadczalne opisane w pracy [32], jednym ze sposobów obniżenia temperatury przedmiotu obrabianego są różnego rodzaju modyfikacje procesu szlifowania. Autorzy pracy [32] zastosowali ściernicę z nieciągłą powierzchnią czynną (ściernicę segmentową). Uzyskane wyniki badań wykazały, że zastosowanie w procesie szlifowania powierzchni płaskich w stopie K417 ściernicy o zmodyfikowanej geometrii pozwala znacząco zwiększyć głębokość szlifowania (a tym samym wydajność procesu) przy zachowaniu temperatury przedmiotu poniżej 100°C.

Również w pracy [13] do szlifowania głębokiego z posuwem pełzającym rowków w stopie K424 zastosowano ściernicę segmentową (rys. 10a). Została ona dodatkowo zmodyfikowana poprzez nałożenie regularnych linii ziaren ściernych CBN na powierzchni czynnej (rys. 10b). Wyniki badań wykazały, że przy obróbce stopu K424 energia właściwa szlifowania wynosi 200-300 J/mm³ i jest znacznie wyższa niż ma to miejsce w przypadku szlifowania innych nadstopów na bazie niklu stosowanych do produkcji łopatek turbin gazowych, takich jak Udimet® 520 (130-160 J/mm³) i Inconel® 713C (80-120 J/mm³). Oznacza to, że stop K424 można uznać za znacznie trudniejszy do skrawania niż inne stopy niklu o podobnym zastosowaniu. Mimo tego, zastosowanie ściernicy segmentowej o zmodyfikowanej budowie czynnej powierzchni pozwoliło na uzyskanie temperatury w strefie szlifowania o wartości około 100°C. Ograniczenie wpływu temperatury na warstwę wierzchnią przedmiotu obrabianego pozwoliło uniknąć powstawania defektów szli-

fierskich. Powierzchnia obrabiona charakteryzowała się chropowatością wyrażoną parametrem $Ra = 0,1 \mu m$ i pozbawiona była przypaleń oraz mikropęknięć a także zarejestrowano na niej korzystne naprężenia ściskające. Przytoczone wyniki szlifowania uzyskano stosując następujące parametry szlifowania głębokiego z posuwem pełzającym: $v_s = 22,5 \text{ m/s}$, $v_w = 0,1 \text{ m/min}$ i $a_e = 0,2 \text{ mm}$.

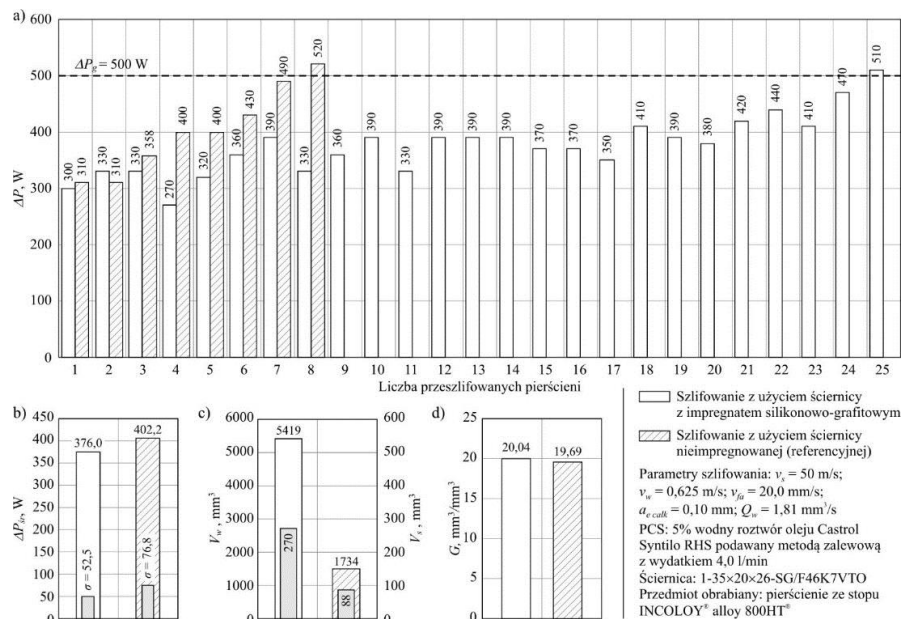
Również autorzy w swoich publikacjach zaproponowali sposób modyfikacji ściernic wykonanych z mikrokryształicznego korundu spiekanego SG o strukturze wielkoporowej, który polega na impregnacji, czyli wprowadzeniu w przestrzenie międzyziarnowe dodatkowych substancji (różnych w zależności od zamierzonego efektu). Takie rozwiązanie jest korzystne ze względu na możliwość modyfikacji w trakcie lub po wytworzeniu narzędzia, przez co dokonywać tego mogą sami operatorzy obrabiarek [34, 35].



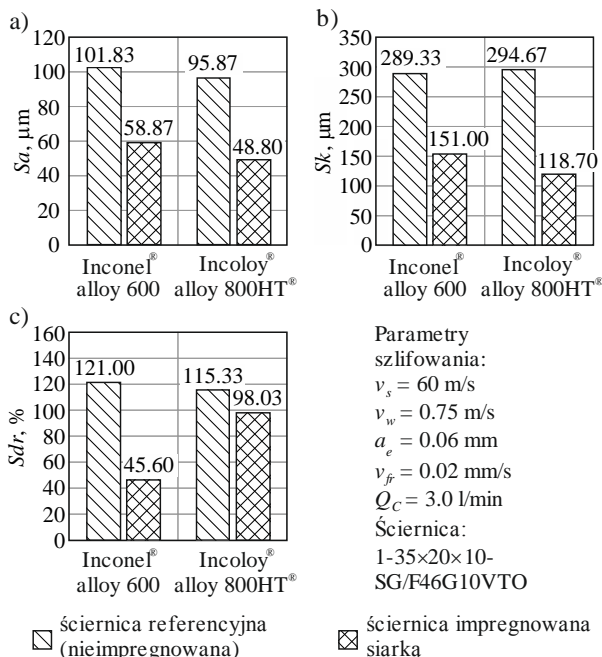
Rys. 10. Ściernica segmentowa a) widok od czoła ściernicy, b) ziarna z cBN rozłożone na czynnej powierzchni ściernicy (źródło: Ding i inni, 2010)

W pracy [34] przeanalizowano możliwość ograniczenia adhezji wiórów materiału obrabianego (Inconel® alloy 600 i Incoloy® alloy 800HT®) do powierzchni czynnej ściernicy z mikrokryształicznego korundu spiekanego SG o spoiwie szklanokryształicznym impregnowanej siarką. Wyniki szlifowania odniesiono do wyników uzyskanych, w tych samych warunkach szlifowania, dla ściernicy referencyjnej, nie impregnowanej. Przeanalizowano parametry struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernic (rys. 11), z których wynikało, że impregnacja przyczyniła się do niemal dwukrotnej poprawy parametru S_a zarówno w przypadku szlifowania stopu Inconel® alloy 600 jak i stopu Incoloy® alloy 800HT®. W przypadku szlifowania stopu Inconel® alloy 600 wartość współczynnika rozwinięcia powierzchni S_{dr} zmniejszyła się niemal trzykrotnie, natomiast w przypadku szlifowania stopu Incoloy® alloy 800HT® parametr ten zredukował o ok. 15%. Badania te potwierdziły korzystny wpływ siarki jako impregnatu zapobiegającemu zużyciu adhezyjnemu narzędzia ściernego.

W pracy [35] natomiast wykazano, podczas szlifowania prostoliniowo-walcowego powierzchni wewnętrznych stopu INCOLOY® alloy 800HT® ściernicą z mikrokrystalicznego korundu spiekane go SG o spoiwie szkano-kryształicznym z impregnatem silikonowo-grafitowym, że okres trwałości ściernicy wydłużył się ponad trzykrotnie poprzez zastosowanie tego impregnatu. W przypadku ściernicy referencyjnej (nieimpregnowanej) okres trwałości zakończył się po obróbce 8 pierścieni (rys. 12a), co odpowiadało usunięciu 1743 mm³ materiału obrabianego (rys. 12c). Natomiast w przypadku ściernicy impregnowanej, graniczną wartość mocy szlifowania ΔP_g (jako kryterium zużycia ściernicy przyjęto przekroczenie wartości granicznej mocy szlifowania $\Delta P_g = 500$ W, ustalonej na podstawie badań rozpoznawczych) przekroczone dopiero podczas obróbki pierścienia nr 25, co oznacza, że narzędzie to usunęło ponad trzykrotnie większą objętość materiału ($V_w = 5419$ mm³) – rys. 12c. Z uwagi na fakt, że zużycie objętościowe obu ściernic również różniło się trzykrotnie, obliczona wartość wskaźnika szlifowania G była niemal taka sama ($G \approx 20$). Dodatkowo, wyznaczona wartość średnia przyrostu mocy szlifowania ΔP_{sr} dla ściernicy impregnowanej była o około 7% mniejsza i charakteryzowała się mniejszym rozrzutem (rys. 12b).



Rys. 12. Zmiany wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP oraz wartości parametrów opisujących okres trwałości ściernicy z impregnatem silikonowo-grafitowym i ściernicy referencyjnej w procesie szlifowania stopu INCOLOY® alloy 800HT®: a) wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP dla kolejnych pierścieni obrabianych; b) wartość średnia mocy szlifowania ΔP_{sr} i jej odchylenie standardowe σ ; c) ubytek materiału V_w i zużycie objętościowe ściernicy V_s ; d) wskaźnik szlifowania $G = V_w / V_s$ (źródło: Wojtewicz i inni, 2014)



Rys. 11. Parametry struktury geometrycznej powierzchni CPS nieimpregnowanej oraz impregnowanej siarką dla stopu Inconel® alloy 600, stopu Incoloy® alloy 800HT® a) średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni S_a , b) współczynnik rozwinięcia powierzchni S_{dr} , c) głębokość chropowatości rdzenia S_k (źródło: Nadolny i inni, 2015)

Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy literatury dotyczącej szlifowania superstopów na osnowie niklu można sformułować następujące wnioski:

- w procesach szlifowania nadstopów niklu coraz częściej stosowane są ściernice z jednowarstwowym nasypem

- ściernym z materiałów supertwardych (cBN, diament) związanym galwanicznie z korpusem narzędzia;
- ściernice galwaniczne charakteryzują się odmiennym mechanizmem zużycia w porównaniu do ściernic ze spoiwem ceramicznym lub żywicznym;
- spoiwo galwaniczne może wykazywać duże powinowactwo chemiczne do materiału ściernego, przez co ściernice z takim spoiwem szybciej zużywają;
- stosowanie supertwardych ziaren ściernych nie zapewnia uzyskiwania wysokich wartości współczynnika szlifowania G , przez co efektywność ekonomiczna ich stosowania jest niewielka z racji wysokich kosztów ściernicy;
- ściernice ze spoiwem żywicznym wykazują największe zużycie;
- zużycie adhezyjne występuje w każdym procesie szlifowania superstopów niklu, niezależnie od rodzaju użytego narzędzia ściernego, dlatego też operatorzy częściej skupiają się nie na doborze narzędzi tylko na możliwości wpływania na obniżenie adhezji, również na drodze modyfikacji narzędzi ściernych.

W ostatnich latach uwidaczniają się nowe trendy rozwojowe w zakresie szlifowania stopów niklu. Autorzy coraz częściej poszukują możliwości modyfikacji narzędzi, które mają za zadanie zapobiec niepożądanym zjawiskom w trakcie obróbki i tym samym wydłużyć ich okres trwałości. Bardzo szybki rozwój w zakresie inżynierii materiałowej sprawia, że ukazują się na rynku ściernice korundowe o bardzo dużym rozwinięciu powierzchni, czy z bardziej wytrzymałymi spoiwami. Ich zastosowanie może nie obniżyć kosztów pracy (związanych z przestojem na obciążanie CPS narzędzi) jak przy szlifowaniu ściernicami diamentowymi czy z regularnego azotku boru, ale pozwoli wyeliminować zjawisko zużycia adhezyjnego oraz przypaleń szlifierskich na powierzchni przedmiotu obrabianego. Ściernice takie również w łatwiejszy sposób można poddać procesowi impregnacji, przez co odpowiedni dobór impregnatu mogłyby przybliżyć wartości współczynnika szlifowania G do

tych osiągniętych przy szlifowaniu stopów niklu ściernicami z materiałów supertwardych.

LITERATURA

- Praca zbiorowa, Poradnik fizykochemiczny, Warszawa: WNT, 1974.
- L. A. Dobrzański, Metalowe materiały inżynierskie, Gliwice - Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
- Nickel Development Institute, „<http://www.nickelinstitute.org/>,” 23 marzec 2015. [Online]. Available: <http://www.nickelinstitute.org/>.
- D. Agarwal, "Nickel and Nickel Alloys," in *The Handbook of Advanced Materials. Enabling New Designs*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, pp. 217-270.
- F. C. Campbell, *Element of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, 2008.
- P. Sutowski, „Proces szlifowania powierzchni płaskich przedmiotów z materiałów trudno skrawalnych,” w *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012, pp. 178-205.
- J. Plichta, „Charakterystyka materiałów trudno skrawalnych,” w *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, J. Plichta, K. Nadolny, W. Musiał i P. Sutowski, Redaktorzy, Koszalin, Zachodniopomorskie: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012, pp. 18-32.
- N. Kawagoishi, Q. Chen, E. K. M. Goto and H. Nisitani, "Influence of Cubic Boron Nitride Grinding on the Fatigue Strengths of Carbon Steels and a Nickel-Base Superalloy," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 8, no. 2, pp. 152-158, 04. 1999.
- Sunarto i Y. Ichida, „Creep feed profile grinding of Ni-based superalloys with ultrafine-polycrystalline cBN abrasive grits,” *Precision Engineering*, tom 25, pp. 274-283, 09. 01. 2001.
- D. Aspinwall, S. Soo, D. Curtis and A. Mantle, "Profiled Superabrasive Grinding Wheels for the Machining of a Nickel Based Superalloy," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 335-338, 2007.
- C. Guo, Z. Shi, H. Attia i D. McIntosh, „Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels,” *Annals of the CIRP*, tom 56, nr 1, pp. 343-346, 2007.
- D. Curtis, S. Soo, D. Aspinwall and C. Sage, "Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, p. 173-176, 2009.
- W. Ding, J. Xu, Z. Chen, H. Su i Y. Fu, „Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed CBN Abrasive Wheels,” *Chinese Journal of Aeronautics*, tom 23, pp. 501-510, 2010.
- H. Adibi, S. M. Rezaei i A. A. D. Sarhan, „Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tom 68, p. 473-485, 2013.
- A. Caggiano i R. Teti, „CBN Grinding Performance Improvement in Aircraft Engine Components Manufacture,” *Procedia CIRP*, tom 9, p. 109 – 114, 2013.
- Q. Zeng, G. Liu, L. Liu i Y. Qin, „Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-13, 2014.
- Q. Zeng, G. Liu, L. Liu i Y. Qin, „Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-13, 2014.
- K. Nadolny, W. Sienicki and M. Wojtewicz, "The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 1, p. 71-86, 2015.
- M. Nakayama, K. Kudo, T. Hirose and M. Iino, "Experimental study of Grinding Fluids for Abrasive-belt Grinding of Stainless Steel," *Tribology International*, vol. 20, no. 3, pp. 133-143, 1987.
- K. Woźniak, *Chemiczne podstawy obróbki ścierniej*. Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 17, Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 1984.
- N. E. Ye and T. R. A. Pearce, "A comparison of oil and water as grinding fluids in the creep feed grinding process," *Institution of Mechanical Engineers*, vol. 198B, no. 14, pp. 229-237, 04 06 1984.
- P. L. Tso, „An investigation of chip types in grinding,” *Journal of Materials Processing Technology*, tom 53, pp. 521-532, 1995.
- W. Österle and P. X. Li, "Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates," *Materials Science and Engineering*, vol. A238, pp. 357-366, 12. 05. 1997.
- W. Österle, P. X. Li and G. Nolze, "Influence of surface finishing on residual stress depth profiles of a coarse-grained nickel-base superalloy," *Materials Science and Engineering*, vol. A262, pp. 308-311, 05. 10. 1998.
- X. P. Xu, Y. Q. Yu i H. Xu, „Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, tom 129, pp. 359-363, 2002.
- X. Xu and Y. Yu, "XPS and SEM characterization of wheel/workpiece interface in grinding of superalloy," *Surface and Interface Analysis*, vol. 33, pp. 343-350, 16. 01. 2002.
- Q. Liu, X. Chen and N. Gindy, "Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, pp. 284-292, 2006.
- P. L. Tso, "Study on the grinding of Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 55, pp. 421-426, 1995.
- Q. Liu, X. Chen and N. Gindy, "Assessment of Al₂O₃ and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 940-951, 2007.
- M. Neslušán, "Grinding of Ni-based alloys with grinding wheels," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 4, no. 1-2, pp. 29-36, 2009.
- M. Neslušán i A. Czán, „Machining of Titanium and Nickel Alloys,” *EDIS Žilina*, 2001.
- X. Xu, Y. Yu and H. Huang, "Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys," *Wear*, vol. 255, p. 1421-1426, 2003.
- H. Zhang, W. Chen and Z. Chen, "Grindability of high-temperature alloy with ceramic alumina wheels," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 139-145, 2008.
- K. Nadolny, W. Sienicki i M. Wojtewicz, „The effect of sulfurization on the grinding wheel cutting ability in the internal cylindrical grinding of nickel superalloys,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-15, 2015.
- M. Wojtewicz, K. Nadolny, W. Sienicki i D. Herman, „Wpływ impregnatu silikonowo-grafitowego na właściwości eksploatacyjne ściernicy w procesie szlifowania otworów w superstopach niklu,” *Mechanik*, tom 9, pp. 328-334, 2014.
- Nadolny K., Sienicki W. i Wojtewicz M., *Wpływ impregnacji ściernicy pierwiastkami niemetalicznymi na intensywność zalepiania jej czynnej powierzchni*, *Mechanik*, 8-9, str. 664 oraz CD, 2012.