



**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI

**mgr inż. Michał Wojtewicz**

**BADANIA WPŁYWU IMPREGNACJI ŚCIERNIC  
SUBSTANCJAMI ANTYADHEZYJNYMI  
NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU SZLIFOWANIA  
STOPÓW NIKLU**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: prof. nadzw. dr hab. Walery Sienicki

Promotor pomocniczy: prof. nadzw. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny

Koszalin 2017



# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW .....	6
Symbole .....	6
Akronimy .....	8
1. WPROWADZENIE .....	9
2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH Z ZAKRESU WYZNACZONEGO TEMATEM PRACY .....	11
2.1. Charakterystyka, klasyfikacja i zastosowanie stopów niklu .....	11
2.1.1. Stopy konstrukcyjne .....	12
2.1.2. Superstopy niklu .....	13
2.2. Szlifowanie stopów niklu .....	15
2.2.1. Defekty szlifierskie powierzchni przedmiotu obrabianego .....	19
2.2.2. Zużycie ściernicy .....	22
2.2.3. Ściernice stosowane w szlifowaniu nadstopów niklu .....	29
2.2.4. Modyfikacje narzędzi ściernych oraz płynów chłodząco-smarujących i sposobów ich doprowadzenia stosowanych w procesach szlifowania stopów na bazie niklu .....	37
2.2.5. Obróbka hybrydowa .....	48
2.2.6. Monitorowanie i diagnostyka procesu szlifowania nadstopów niklu .....	50
2.3. Impregnacja narzędzi ściernych substancjami antyadhezyjnymi w procesach szlifowania .....	50
2.3.1. Metody impregnacji narzędzi ściernych .....	51
2.4. Ocena efektywności procesów szlifowania .....	52
2.5. Podsumowanie i wnioski .....	54
3. CELE, PROBLEMY, HIPOTEZY I ZAKRES PRACY .....	57
3.1. Cele pracy .....	57
3.2. Sformułowanie problemu głównego oraz problemów szczegółowych .....	57
3.3. Hipotezy badawcze .....	58
3.4. Zakres pracy .....	58
4. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH .....	60
4.1. Cel i zakres badań .....	60
4.2. Charakterystyka użytych materiałów w procesie szlifowania otworów .....	62
4.3. Stanowisko badawcze i systemy pomiarowe .....	64
4.3.1. Stanowisko do szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych .....	64
4.3.2. System do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni obrabianej .....	64
4.3.3. System do rejestracji obrazów metodą mikroskopii konfokalnej .....	66
4.3.4. System do rejestracji obrazów metodą mikroskopii cyfrowej .....	66

4.3.5. System do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego (EDS).....	69
4.3.6. System do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy metodą topografii laserowej .....	70
4.4. Metodyka badań podstawowych.....	71
4.4.1. Ściernice użyte w badaniach.....	73
4.5. Metodyka badań rozpoznawczych.....	73
4.5.1. Ściernice użyte w badaniach.....	74
4.5.1. Określenie zbiorów czynników badanych, stałych, zakłócających i wynikowych .....	75
4.5.2. Ustalenie przedziału zmienności czynników badanych .....	76
4.5.3. Przyjęcie klasy modelu matematycznego obiektu badań.....	76
4.5.4. Realizacja badań rozpoznawczych – plan eksperymentu .....	77
4.6. Metodyka badań właściwych.....	77
4.6.1. Wyznaczenie kryterium zakończenia okresu trwałości ściernicy .....	80
4.6.2. Ściernice użyte w badaniach.....	82
<b>5. AUTORSKIE METODY IMPREGNOWANIA ŚCIERNIC SUBSTANCJAMI ANTYADHEZYJNYMI.....</b>	<b>84</b>
5.1. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych polegająca na częściowym odwirowaniu impregnatu z objętości ściernicy.....	84
5.2. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych węglem amorficznym .....	87
5.3. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi i/lub smarnymi .....	88
5.4. Wnioski oraz wybór metody, która zostanie wykorzystana w badaniach właściwych .....	94
<b>6. BADANIA ZJAWISK ELEMENTARNYCH ZUŻYCIA ŚCIERNIC IMPREGNOWANYCH SIARKĄ (STOSOWANYCH STANDARDOWO) W PROCESIE WGLĘBNEGO SZLIFOWANIA STOPÓW NIKLU .....</b>	<b>96</b>
6.1. Analiza wyników badań.....	96
6.1.1. Inconel® alloy 600 .....	96
6.1.2. Incoloy® alloy 800HT.....	98
6.1.3. Stal 100Cr6.....	100
6.1.4. Podsumowanie wyników badań.....	102
6.2. Wnioski z przeprowadzonych badań .....	104
<b>7. BADANIA ROZPOZNAWCZE PROCESU SZLIFOWANIA OTWORÓW ZE STOPU INCONEL® ALLOY 718 .....</b>	<b>106</b>
7.1. Wyniki eksperymentu.....	106
7.2. Eliminacja wyników obarczonych błędem grubym .....	106
7.3. Wyznaczenie modelu matematycznego dla zmian chropowatości powierzchni <i>Ra</i> .....	108



7.3.2. Wyznaczenie modelu matematycznego dla zmian przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ .....	109
7.4. Analiza wyników i podsumowanie .....	111
<b>8. BADANIA WŁAŚCIWE ZUŻYCIA NARZĘDZI ŚCIERNYCH W PROCESIE SZLIFOWANIA OTWORÓW ZE STOPU INCONEL<sup>®</sup> ALLOY 718 .....</b>	<b>112</b>
8.1. Wyniki badań właściwych .....	112
8.2. Analiza wyników procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 .....	117
8.2.1. Analiza obrazów mikroskopowych CPS użytych w badaniach po zakończeniu ich okresu trwałości .....	127
8.2.2. Ocena stopnia zalepienia czynnej powierzchni badanych ściernic po zakończeniu okresu trwałości .....	138
8.3. Ocena efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 .....	149
8.4. Wnioski.....	157
<b>9. WNIOSKI KOŃCOWE.....</b>	<b>159</b>
9.1. Wnioski dotyczące problemu głównego .....	159
9.2. Wnioski dotyczące wpływu impregnacji ściernicy substancjami antyadhezyjnymi na intensywność powstawania zalepień na CPS podczas szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu (wnioski poznawcze) .....	159
9.3. Wnioski dotyczące wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi na okres trwałości ściernicy podczas szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu (wnioski użytkowe).....	161
9.4. Wnioski dotyczące metod impregnacji (wnioski wynikające z celu metodycznego pracy).....	161
<b>10. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ .....</b>	<b>163</b>
<b>SPIS RYSUNKÓW .....</b>	<b>165</b>
<b>SPIS TABLIC.....</b>	<b>172</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>173</b>
<b>ZAŁĄCZNIKI .....</b>	<b>182</b>
Załącznik 1.    Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu .....	182
Załącznik 2.    Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 .....	191
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>198</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>201</b>

## Wykaz ważniejszych symboli i akronimów

### Symbole

- $a_e$  – głębokość szlifowania (styk roboczy), mm
- $a_{e\text{ całk}}$  – całkowita głębokość szlifowania (całkowity styk roboczy), mm
- $a_d$  – głębokość obciążania (styk roboczy obciążania), mm
- $b$  – szerokość nakroju stożkowego ściernicy, mm
- $b_w$  – szerokość przedmiotu obrabianego, mm
- $d_w$  – średnica przedmiotu obrabianego, mm
- $d_s$  – średnica zewnętrzna ściernicy, mm
- $G$  – wskaźnik szlifowania, –
- $H$  – średnica otworu ściernicy, mm
- $n_d$  – prędkość obrotowa obciążacza, obr./min
- $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy, obr./min
- $n_w$  – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, obr./min
- $P$  – moc szlifowania, W
- $q$  – stosunek prędkości  $v_s/v_w$ , –
- $q_d$  – stosunek prędkości rolki obciążającej do prędkości ściernicy  $v_d/v_s$ , –
- $Q_d$  – masa obciążacza diamentowego, kr
- $Q_{PCS}$  – wydatek płynu chłodząco-smarującego, dm<sup>3</sup>/min
- $Q_w$  – wydajność ubytkowa szlifowania, mm<sup>3</sup>/s
- $Q'_w$  – wydajność ubytkowa szlifowania na jednostkę szerokości czynnej powierzchni ściernicy, mm<sup>3</sup>/s·mm
- $Q'_{w\text{ ef}}$  – efektywna wydajność ubytkowa szlifowania na jednostkę szerokości czynnej powierzchni ściernicy, mm<sup>2</sup>/s
- $rms$  – średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego, μm
- $R$  – współczynnik korelacji, –
- $R^2$  – współczynnik determinacji, –

<i>Ra</i>	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, $\mu\text{m}$
<i>Rz</i>	– wysokość profilu chropowatości według 10 punktów, $\mu\text{m}$
<i>Sa</i>	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, $\mu\text{m}$
<i>Sci</i>	– wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń, –
<i>Sbi</i>	– wskaźnik powierzchni nośnej (wskaźnik nośności), –
<i>Sdr</i>	– współczynnik rozwinięcia powierzchni, %
<i>Sds</i>	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni, $\text{mm}^{-2}$
<i>SIQ</i>	– syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający, $\mu\text{m}^3/\text{s}$
<i>Sk</i>	– wysokość chropowatości rdzenia, $\mu\text{m}$
<i>Sm</i>	– średni odstęp profilu chropowatości, $\mu\text{m}$
<i>Smmr</i>	– średnia objętość materiału, $\text{mm}^3/\text{mm}^2$
<i>Smvr</i>	– średnia objętość pustek, $\text{mm}^3/\text{mm}^2$
<i>St</i>	– całkowita wysokość nierówności powierzchni, $\mu\text{m}$
<i>STp</i>	– udział nośny na zadanej (określonej) wysokości, % (1 $\mu\text{m}$ poniżej najwyższego punktu powierzchni, 0,5 $\mu\text{m}$ powyżej płaszczyzny średniej)
<i>Svi</i>	– wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia, –
<i>t</i>	– czas szlifowania, s
<i>t<sub>wyisk.</sub></i>	– czas wyiskrzania, s
<i>T</i>	– całkowita wysokość ściernicy w kierunku osiowym, mm
<i>T<sub>s</sub></i>	– temperatura szlifowania, K
<i>Ua</i>	– napięcie przyspieszające elektronowego mikroskopu skaningowego, kV
<i>v<sub>d</sub></i>	– prędkość obwodowa obciążacza, m/s
<i>v<sub>fa</sub></i>	– prędkość posuwu osiowego stołu, mm/s
<i>v<sub>fd</sub></i>	– prędkość posuwu osiowego przy obciążaniu, mm/s
<i>v<sub>fr</sub></i>	– prędkość posuwu promieniowego stołu, mm/min
<i>v<sub>s</sub></i>	– prędkość obwodowa ściernicy, m/s

- $v_{sd}$  – prędkość obwodowa ściernicy przy obciążaniu, m/s
- $v_w$  – prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego, m/s
- $V_s$  – zużycie objętościowe ściernicy, mm<sup>3</sup>
- $V_{sp}$  – procentowy udział objętościowy spoiwa w masie ściernicy, %
- $V_w$  – ubytek materiału, mm<sup>3</sup>
- $\Delta a$  – średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości, °
- $\Delta P$  – przyrost mocy szlifowania, W
- $\Delta P_{gr.}$  – wartość graniczna przyrostu mocy szlifowania, W
- $\Delta r_s$  – zużycie promieniowe ściernicy,  $\mu\text{m}$
- $\varepsilon$  – emisyjność obiektu, –
- $\varphi$  – kąt pracy obciążacza, °
- $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła, W/m·K
- $\lambda_l$  – długość fali światła, nm

### **Akronimy**

- cBN – regularny azotek boru (*ang. Cubic Boron Nitride*)
- CPS – czynna powierzchnia ściernicy
- EA – emisja akustyczna
- PCS – płyn chłodząco-smarujący
- SEM – elektronowy mikroskop skaningowy (*ang. Scanning Electron Microscope*)
- SGP – struktura geometryczna powierzchni
- WPM – wolne przestrzenie międzyziarnowe
- SR – ściernica referencyjna
- SIDM – ściernica impregnowana dwusiarczkiem molibdenu
- SIG – ściernica impregnowana grafitem
- SIS – ściernica impregnowana siarką

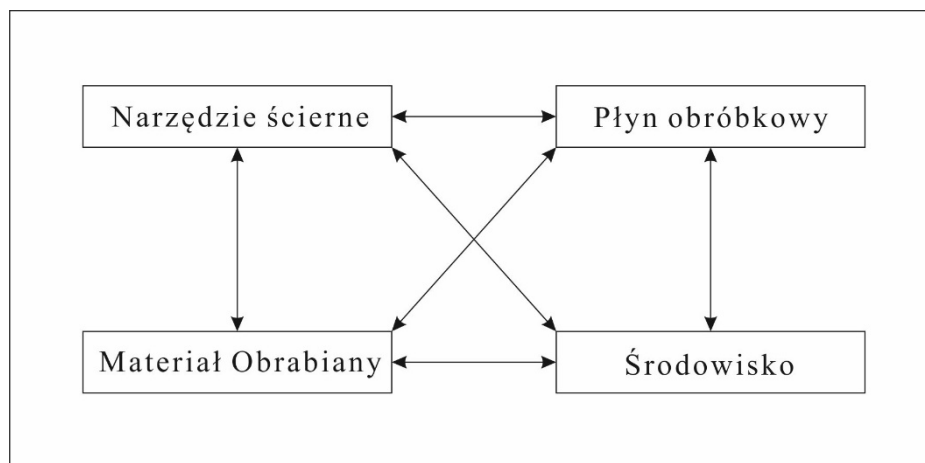
# 1. WPROWADZENIE

Zaawansowane materiały konstrukcyjne, takie jak stopy niklu, tytanu, kobaltu czy tantalu oferują wyjątkową kombinację takich właściwości jak duża wytrzymałość w wysokich temperaturach, odporność chemiczna, czy też odporność na ścieranie. Z tego powodu materiały te używane są jako komponenty stosowane w kosmonautyce, elektronice, procesach chemicznych, protetyce dentystycznej, ortopedii, w przemyśle militarnym oraz unieszkodliwianiu odpadów radioaktywnych [119]. Wysokojakościowa obróbka materiałów trudno skrawalnych stanowi poważne wyzwanie ze względu na [29,51,120]:

- wysoką temperaturę podczas obróbki,
- szybkie zużycie narzędzi ściernych,
- małą przewodność cieplną oraz małe ciepło właściwe materiału obrabianego,
- dużą siłę skrawania,
- szybkie zalepianie powierzchni czynnej narzędzi ściernych materiałem obrabianym, w trakcie realizacji procesu,
- dużą zdolność do hartowania podczas obróbki materiału obrabianego.

Rezultatem niskiej przewodności cieplnej jest znaczny przyrost temperatury w strefie obróbki [120], dochodzi wtedy do interakcji czterech składowych występujących w procesie szlifowania (rys. 1.1), czego wynikiem mogą być następujące oddziaływania [63]:

- procesy kontaktowe – powodują znaczny wzrost plastycznych i elastycznych deformacji oraz procesów fizykochemicznych tj.: absorpcji, adsorpcji, chemisorpcji, korozji,
- tarcie – charakteryzuje przemianę energii mechanicznej w inne typy energii tj.: energię termiczną, energię akustyczną, energię elektryczną, energię chemiczną – tarcie zaś powoduje fizykochemiczne zmiany materiału przy powierzchni styku, a także rozprzestrzenianie się tych zmian wewnątrz materiału obrabianego,
- procesy zużycia narzędzi ściernych – modyfikują kształt, wymiary oraz strukturę powierzchni czynnej ściernicy – z odpowiednim doбором narzędzia ściernego, zużycie warstwy ścierniej może prowadzić do samoostrzenia ściernicy oraz redukcji zalepiania jej powierzchni czynnej,
- skrawanie materiału obrabianego (szlifowanie),
- procesy smarowania – warunki obróbki mają wpływ na proces szlifowania – szlifowanie może przebiegać na sucho, z niewielką lub obfitą ilością płynu chłodząco-smarującego, ponadto używanie cieczy smarujących również wpływa na procesy fizykochemiczne zachodzące w strefie kontaktu ziarno ściernie - materiał obrabiany (rys. 1.1).



Rys. 1.1 Interakcje w procesie szlifowania [51]

Ciepło powstające podczas obróbki ścierniczej jest wynikiem plastycznych odkształceń wiórow, jak również tarcia pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym oraz między narzędziem a wiórem. Większość ciepła pozostaje w wiórze, część przechodzi do narzędzia i materiału obrabianego. Ta ilość ciepła jest wystarczająca, by w strefie obróbki powstała na tyle wysoka temperatura, że szybkość usuwania materiału obrabianego i żywotność ostrza drastycznie spadają [120]. Temperatura ta znacznie wpływa na zwiększenie adhezji wiórow materiału obrabianego do czynnej powierzchni ściernicy, przez co ściernica traci swoje właściwości ściernicze i nie nadaje się do dalszej pracy [63].

Zmniejszenie zużycia powierzchni czynnej ściernicy wymaga efektywnego kontrolowania temperatury w strefie szlifowania przez stosowanie różnego rodzaju płynów chłodzących. Obecnie ciecze obróbkowe stosowane są do chłodzenia i smarowania w procesach ścierniczych zmniejszając temperaturę obróbki i wydłużając żywotność narzędzi ścierniczych [29], zapobiegają adhezji wiórow do powierzchni obrabianej i materiału ściernego [63]. Do tych celów mogą być również stosowane różnego rodzaju impregnatory (siarka, żywice, detergenty, grafit, etc.), wprowadzane na powierzchnię narzędzia lub w jego pory na drodze chemicznej lub mechanicznej[63].

W dalszej części pracy przeanalizowano wpływ impregnacji narzędzi ścierniczych substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wieloletnich badań autora dotyczących impregnacji narzędzi ścierniczych z ziarnami korundowymi i spoiwem ceramicznym. Celem badań było określenie wpływu impregnacji na warunki, przebieg i wyniki procesów szlifowania otworów w stopach niklu.

## 2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH Z ZAKRESU WYZNACZONEGO TEMATEM PRACY

### 2.1. Charakterystyka, klasyfikacja i zastosowanie stopów niklu

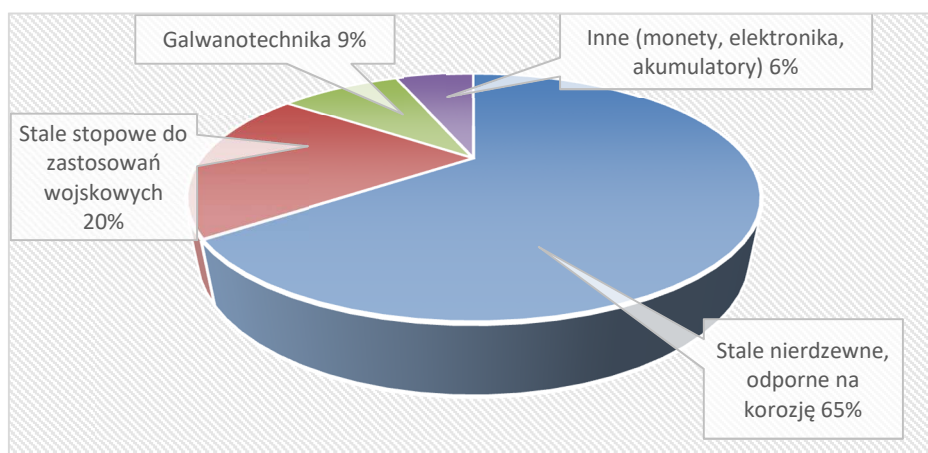
Nikiel Ni – pierwiastek metaliczny o liczbie atomowej 28 i masie molowej 58,6934 g/mol. Metal ten nie wykazuje alotropii, krystalizuje w sieci regularnej ściennie centrowanej A1 o parametrze  $a = 0,3516$  nm, co powoduje, że obróbkę plastyczną niklu można przeprowadzać na zimno, jak i na gorąco. Temperatura 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 g/cm<sup>3</sup> a twardość 64 HV [31].

Nikiel jest ferromagnetykiem, jego temperatura Curie wynosi 358°C. Wytrzymałość na rozciąganie w stanie zmiękczonej przyjmuje wartość rzędu  $R_m = 450$  MPa i wydłużenie  $A = 45\%$ , natomiast w stanie odkształconym na zimno z 50% stopniem zgniotu jego  $R_m = 750$  MPa, a  $A = 3\%$ . Wysokie właściwości mechaniczne zachowuje w podwyższonej temperaturze, tj. do około 500°C [31].

Zanieczyszczenia w postaci siarki, węgla czy tlenu pogarszają właściwości niklu zwiększając twardość przy jednoczesnym wzroście kruchości na zimno oraz uniemożliwiając obróbkę plastyczną na gorąco. Kobalt, żelazo, krzem oraz miedź, tworzące z nikiem roztwory stałe, nie wpływają znacząco na zmianę właściwości 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 właściwości mechaniczne [31].

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 podstawę licznych stopów. Czysty Ni najczęściej stosuje się na podzespoły w lotnictwie i kosmonautyce (elementy silników odrzutowych czy obudowy silników raketowych), w elektronice i elektrotechnice (elementy specjalnej aparatury badawczej i chemicznej odpornej na działanie kwasów czy zasad oraz na sprzęt w przetwórstwie żywności). Niklu używa się również w galwanotechnice oraz jako katalizator w wielu procesach chemicznych. Znalazł on zastosowanie w ponad 300.000

produktów przeznaczonych dla klientów indywidualnych, przemysłu, transportu, lotnictwa, medycyny oraz budownictwa. Masowy udział całkowitej produkcji niklu do zastosowań technicznych został przedstawiony na rysunku 2.1. W wielu zastosowaniach trudno jest znaleźć zamienniki dla tego pierwiastka, które by nie zmniejszały wydajności oraz nie zwiększały kosztów procesu [31,75].



Rys. 2.1 Masowy udział całkowitego wydobycia niklu [75]

Stopy niklu ze względu na zastosowanie można podzielić na: konstrukcyjne, oporowe, o szczególnych właściwościach fizycznych, w tym stopy magnetycznie miękkie, odporne na korozję i 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 średnia zawartość głównych pierwiastków stopowych np. NiCo20Cr15Mo5Al4Ti, gdzie skład procentowy wynosi: Cr – 14,9%, Fe –  $\leq 1\%$ , Co – 20%, Mo – 5%, Cu –  $\leq 0,2\%$ , Mn –  $\leq 1\%$ , Si –  $\leq 1\%$ , C – 0,15%, B – 0,006%, Al. – 4,7%, Ti – 1,2% i inne [31].

### 2.1.1. Stopy konstrukcyjne

Do stopów konstrukcyjnych zalicza się 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 Monele<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup> alloy 400 (alloy 400) oraz jego wersja po utwardzaniu wydzieleniowym – K-500. Alloy 400 został odkryty na początku XX wieku i prawie po 100 latach ze względu na znakomitą odporność na korozję jest



używany współcześnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, stoczniowym, rafineryjnym oraz innych, głównie do produkcji zbiorników, wałów napędowych, łopatek pomp wrotowych, elementów skraplaczy czy wymienników ciepła. Stop ten zawiera 30-33% miedzi w osnowie niklu. Dodatek 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<sup>®</sup> alloy 400, doskonałą odpornością korozyjną, a także posiada zwiększoną wytrzymałość mechaniczną przekraczającą ponad 1000 MPa, 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 [4,31].

### 2.1.2. Superstopy niklu

Jedną z najważniejszych ról jaką odgrywają stopy niklu jest ochrona przed korozją, praca 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. Podstawowe zastosowania superstopów przedstawiono w tabeli 2.1. Wpływ dodatków stopowych na właściwości stopu został przedstawiony natomiast w tabeli 2.2.

Tab. 2.1. Podstawowe zastosowania superstopów [31]

<i>Gałąź przemysłu</i>	<i>Wytwarzane elementy</i>
<i>Przemysł lotniczy</i>	sprężarki wysokiego i niskiego ciśnienia; komory spalania; turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia; łopatki; dysze, osłony, wały
<i>Przemysł ciepłowniczy</i>	palety, muflę pieców, osprzęt, taśmy przenośników, kosze, wentylatory
<i>Przemysł atomowy</i>	trzipienie zaworów; sprężyny, kierownice
<i>Kosmonautyka</i>	poszycia statków kosmicznych; elementy silników raketowych
<i>Przemysł chemiczny i petrochemiczny</i>	dysze; wentylatory, zawory, zbiorniki, rury, pompy
<i>Przemysł medyczny</i>	elementy protez; zastosowania stomatologiczne
<i>Ochrona środowiska</i>	płuczki wieżowe; oprzyrządowanie do odsiarczania gazów (kierownice, wentylatory)
<i>Przemysł papierniczy</i>	rury, listwy zgarniające, chloratory

Tab. 2.2. Rola dodatku stopowego w superstopach niklu [4]

Dodatek stopowy	Wpływ na właściwości stopu
Cr	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	zwiększa odporność na utlenianie, azotowanie, nasiarczanie i nawęglanie w synergii z chromem wpływa na zwiększenie skali odporności zmniejsza odporność na działanie kwasu chlorowodorowego
Mo	zwiększa wytrzymałość termiczną i odporność na chlorowanie zwiększa odporność na pełzanie negatywny wpływ na utlenianie w wysokich temperaturach
W	zachowuje się podobnie jak molibden
C	zwiększa wytrzymałość pomaga w odporności na azotowanie
Y	zwiększa adhezję warstwy pasywnej i zapobiega jej wykruszaniu poprawia odporność na nasiarczanie
Al	zwiększa odporność na utlenianie i nasiarczanie
Ti	zmniejsza odporność na azotowanie
Nb	zwiększa wytrzymałość na pełzanie korzystnie wpływa na odporność na nawęglanie
Mn	zwiększa wytrzymałość w wysokich temperaturach zwiększa rozpuszczalność azotu
Co	zmniejsza stopień dyfuzji siarki umocnienie roztworu stałego odporność na nasiarczanie

Drugą ważną grupę stopów żaroodpornych stanowią stopy typu Inconel<sup>®</sup> i Nimonic<sup>®</sup>. Stosowane są przede wszystkim w przemyśle lotniczym, kosmonautyce czy przemyśle chemicznym jako łopatki i dysze turbin gazowych, silników raketowych i odrzutowych, elementy aparatury chemicznej, pracującej w wysokiej temperaturze i niekorzystnych warunkach. Stopy te zawierają, oprócz Ni, dodatki do 20% Cr lub do 20% Mo i do 10% Fe, a także niewielkie

dotatki Si, Mn, Ti, Nb, V lub W. Mogą być również wprowadzane, w stężeniu 5-10%, dodatki Al, Cu, a także, do 15% Co [31].

Stopy niklu posiadają austenityczną, regularną ściennie centrowaną strukturę krystalograficzną A1. Mimo, że w temperaturze pokojowej żelazo krystalizuje w sieci regularnej przestrzennej centrowanej A2 a kobalt w sieci heksagonalnej zwartej A3, superstopy zawierają inne pierwiastki w postaci domieszek, które determinują, że sieć regularna ściennie centrowana jest stabilna w każdym zakresie temperatur. To właśnie dzięki strukturze krystalograficznej niklu, większość opracowanych superstopów może być poddawana obróbce plastycznej w temperaturze pokojowej. Jednakże niektóre dodatki wysokostopowe nie posiadają tej właściwości, wtedy trzeba szukać alternatywnych metod wytwarzania, takich jak odlewnictwo czy metalurgia proszków. Superstopy są relatywnie ciężkie. Ich gęstości wynoszą 7,8-9,4 g/cm<sup>3</sup>. Gęstość ta zależy od rodzaju stosowanych dodatków stopowych, przez co można ją modyfikować. Dodatki takie jak Al, Ti czy Cr obniżają gęstość stopu, natomiast pierwiastki jak W, Re, czy Ta zwiększają ją [23].

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 zwiększenie 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 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 przyczynia się do umocnienia osnowy stopu i zwiększenia odporności na pełzanie i poprawę właściwości plastycznych. Dodatek glinu wpływa na zwiększenie żaroodporności, natomiast molibden i wolfram przyczyniają się głównie do umocnienia osnowy w stopach Ni-Co-Cr oraz Fe-Ni-Cr. Węgiel występuje w opisywanych stopach w stężeniu ok. 0,05% w stopach przerobionych plastycznie i w stężeniu ok. 0,12-0,18% w stopach odlewniczych, powodując zwiększenie wytrzymałości [31].

## 2.2. Szlifowanie stopów niklu

Przy produkcji elementów, dla których wymagane są bardzo małe tolerancje wymiarowe, najlepszą metodą obróbki ubytkowej stopów niklu jest 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 producentów 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 (PCS). 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 [109]. Jeżeli chodzi o sam dobór narzędzi ściernych, Agarwal [4] zaleca stosowanie ściernic z węgla wolframu lub ściernic korundowych ( $Al_2O_3$ ). Z kolei Nickel Development Institute sklasyfikował stopy niklu, według obrabialności, na 5 grup (tabela 2.3) oznaczonych literowo od A do E oraz 2 podgrupy: D1 i D2. W każdej grupie proponował stosowanie odpowiednich narzędzi ściernych. Zalecane jest stosowanie ściernic wykonanych z węgla krzemu (SiC) do szlifowania stopów z grupy A, B, D1 oraz E, natomiast dla stopów grupy C oraz D2 najlepsze są ściernice korundowe o numerze ziarna 46-60 [75].

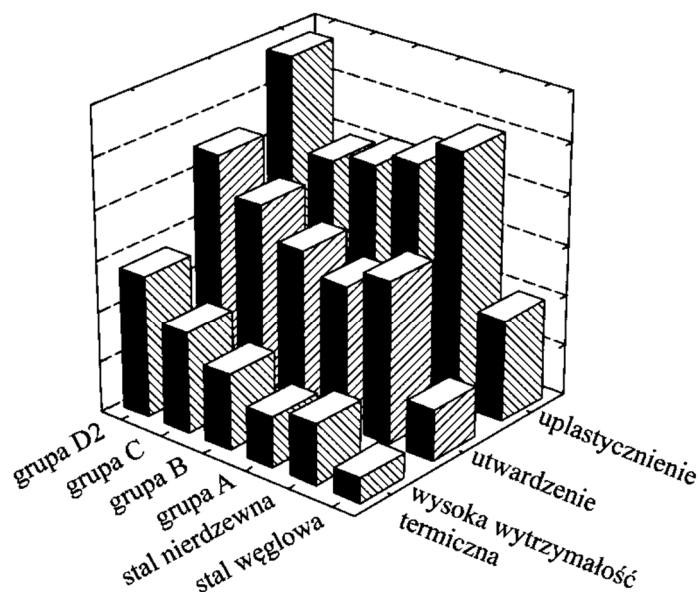
Tab. 2.3. Stopy niklu pogrupowane według obrabialności [75]

<i>Grupa</i>	<i>Właściwości</i>	<i>Stop</i>
<i>A</i>	Zawierają 95% i więcej niklu. Stopy z tej grupy posiadają umiarkowaną wytrzymałość mechaniczną i wysoką twardość. Swoje właściwości utrzymują tylko podczas pracy w niskich temperaturach. W wysokich temperaturach stają się ciągliwe dlatego też producent do ich obróbki wskazuje metodę przeciągania na zimno aby uzyskać najlepsze efekty.	Nikiel 200, 201, 205, 212, 222;
<i>B</i>	Składa się w głównej mierze ze stopów nikiel-miedź. Stopy z tej grupy wykazują wyższą wytrzymałość i nieco mniejszą twardość w porównaniu ze stopami z grupy A. Obróbka zalecana przez producentów to ciągnięcie na zimno lub ciągnięcie na zimno z wyżarzaniem odprężającym.	MONEL <sup>®</sup> alloy 400 (UNS N04400), 401 (UNS N04401), 450 (UNS N04405); FERRY <sup>®</sup> alloy (W. Nr. 2.0842); Invar 36 <sup>®</sup> alloy (Fe64Ni36), Invar 48 <sup>®</sup> alloy (Fe52Ni48); Kovar <sup>®</sup> alloy (UNS K94610); INCO <sup>®</sup> alloy MS-250;

Tab. 2.3. Stopy niklu pogrupowane według obrabialności [75] – *ciąg dalszy*

Grupa	Właściwości	Stop
C	Szeroka gama stopów, które składem zbliżone są do austenitycznej stali nierdzewnej. Główne pierwiastki jakie tworzą tą grupę stopów to nikiel-chrom-żelazo. Zalecane warunki obróbki są takie same jak w grupie B.	<p>NICKEL 270 (UNS N02270);</p> <p>MONEL<sup>®</sup> alloy K-500 (UNS N05500) (hartowany bez procesu starzenia);</p> <p>INCONEL<sup>®</sup> alloy 600 (UNS N06600), 601 (UNS N06601), 690 (UNS N06690);</p> <p>NIMONIC<sup>®</sup> alloy 75 (UNS N06075), 86;</p> <p>INCOLOY<sup>®</sup> alloy 800 (UNS N08800), 800HT (UNS N08811), 802 (UNS N08802), 825 (UNS N08825), DS<sup>™</sup> (W. Nr. 1.4862);</p> <p>INCO<sup>®</sup> alloy 330 (UNS N08330), 020 (UNS N08020);</p>
D-1	Charakteryzuje stopy niklu, które nie zostały poddane procesowi starzenia.	<p>DURANICKEL<sup>®</sup> alloy 301 (UNS N03301);</p> <p>INCOLOY<sup>®</sup> alloy 925 (UNS N09925), MA956 (UNS S67956)</p> <p>NI-SPAN-C<sup>®</sup> alloy 902 (UNS N09902),</p>
D-2	Stopy niklu z podgrupy D-1 poddane procesowi starzenia oraz kilka stopów zarówno poddanych jak i nie poddanych na proces starzenia.	<p>DURANICKEL<sup>®</sup> alloy 301;</p> <p>MONEL<sup>®</sup> alloy K-500 (poddane procesowi starzenia);</p> <p>INCONEL<sup>®</sup> alloy 617 (UNS N06617), 625 (UNS N06625), 706 (UNS N09706), 718 (UNS N07718), X-750 (UNS N07750), 751 (UNS N07751), MA754 (UNS N07754), G-3 (UNS N06985), HX (UNS N06002);</p> <p>NIMONIC<sup>®</sup> alloy 80A (UNS N07080), 81<sup>™</sup>, 90 (UNS N07090), 105 (W. Nr. 2.4634), 115 (W. Nr. 2.4636), 263 (UNS N07263), 901 (UNS N09901), PE11<sup>™</sup>, PE16<sup>™</sup>, PK50<sup>™</sup>;</p> <p>INCOLOY<sup>®</sup> alloy 903 (UNS N19903), 907 (UNS N19907), 909 (UNS N19909);</p> <p>NI-SPAN-C<sup>®</sup> alloy 902 (poddany procesowi starzenia);</p> <p>HASTELLOY<sup>®</sup> alloy C-276 (UNS N10276);</p>
E	Stop ten został zaprojektowany do uzyskania wysokiej wydajności produkcji np. w operacjach toczenia. MONEL <sup>®</sup> alloy R-405 twardością, wytrzymałością i odpornością na korozję przypomina MONEL <sup>®</sup> alloy R-400 i jednocześnie jest łatwy w obróbce. Jednakże powierzchnia obrobiona nie jest tak dobrej jakości jak w przypadku stopu MONEL <sup>®</sup> alloy R-405.	<p>MONEL<sup>®</sup> alloy R-405 (UNS N04405);</p>

Twierdzenie to jest jednak niejednoznaczne. W tym samym opracowaniu został przedstawiony wykres zmian właściwości mechanicznych w zależności od rodzaju stopu (rys. 2.2). Z rysunku tego wynika, że dokonując przejścia od obróbki stali węglowej, przez stal nierdzewną, a kończąc na stopach niklu, zjawiska takie jak uplastycznienie czy utwardzenie oraz wysoka wytrzymałość termiczna, stopniowo wzrastają, co oznacza odpowiednio zmienne warunki w strefie szlifowania oraz trudniejszą obróbkę [75].



Rys. 2.2 Wykres zmian właściwości mechanicznych w stopach niklu [75]

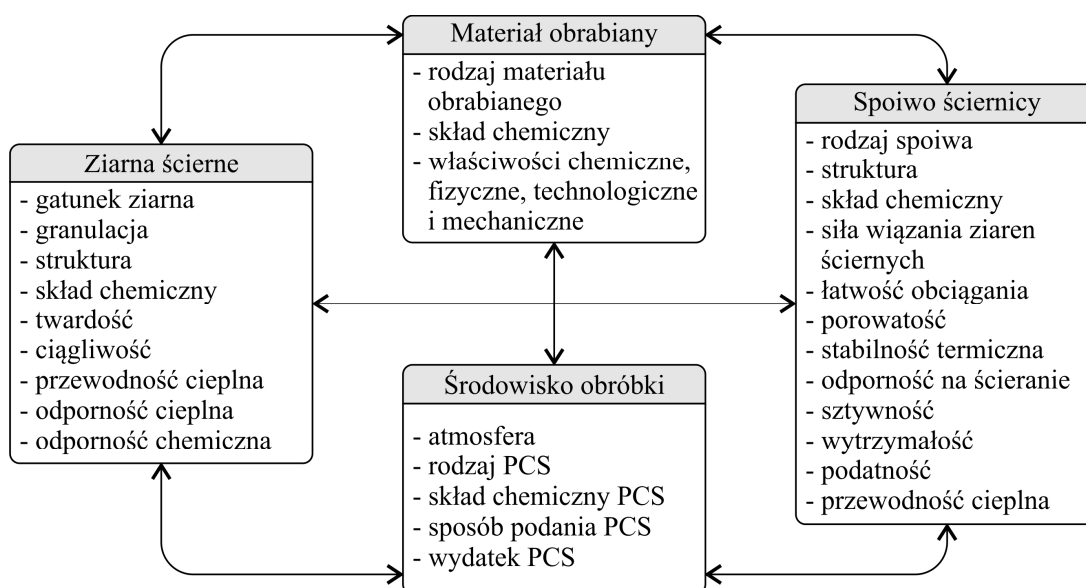
Analizując materiały źródłowe dotyczące szlifowania stopów niklu należy stwierdzić, że chemiczne i fizyczne właściwości tych materiałów utrudniają proces szlifowania i skrawania, szczególnie szlifowania. Wynika to na ogół z trudniejszych warunków pracy ziaren ściernych w strefie szlifowania (w odniesieniu do procesów skrawania), ponieważ duża liczba ziaren uczestniczy w procesie obróbki, gdzie tylko ich część wykonuje pracę skrawania, natomiast reszta w dużej mierze odkształca sprężyste 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 międzyziarnowych na gromadzenie wiórów na czynnej powierzchni ściernicy (CPS) oraz trudności w ich usuwaniu [85].

Na szlifowalność superstopów niklu zasadniczy wpływ mają: duża ciągliwość, mała 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 supertwardych, takich jak diament czy regularny azotek boru (cBN) [2,7,22,25,30,39,50,85,107,131].

### 2.2.1. Defekty szlifierskie powierzchni przedmiotu obrabianego

W strefie szlifowania, w której narzędzie ścierne podczas pracy styka się z przedmiotem obrabianym, dochodzi do kontaktu czterech podstawowych elementów: ziaren ściernych, spoiwa, materiału obrabianego oraz środowiska obróbki – rys. 2.3. Kontakt tych elementów w warunkach wysokiej temperatury, wywołanej tarciem i dużą dynamiką procesu, może powodować zachodzenie reakcji chemicznych [63]. Do najważniejszych zjawisk chemicznych w obróbce ścierniej 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 [72,63,123]. W celu ochrony ziaren ściernych przed ich chemicznym zużyciem, celowo wprowadzane oddziaływania chemiczne mają za zadanie obniżenie wytrzymałości powierzchni obrabianej, co zwiększa efektywność obróbki. Na efektywność szlifowania wpływają również działania mające na celu obniżenie temperatury w strefie szlifowania, i zapobiegające adhezji wiórów do powierzchni obrabianej i CPS [63].

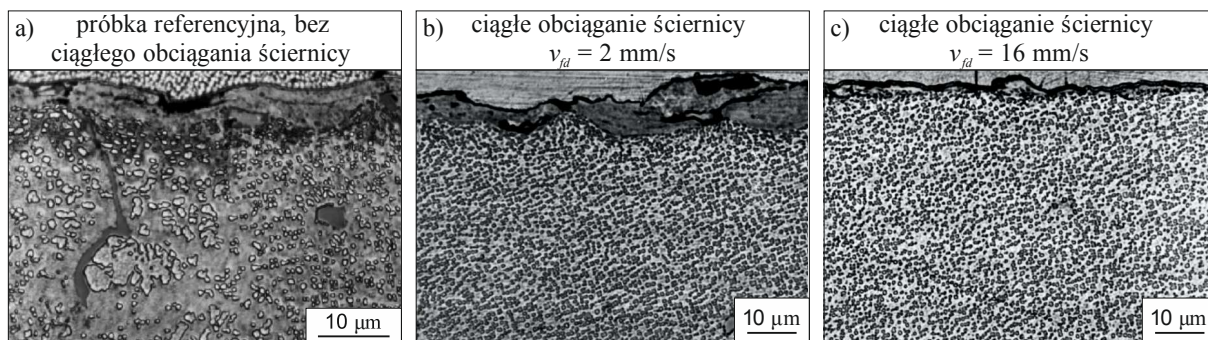


Rys. 2.3 Oddziaływania chemiczne podczas szlifowania (PCS – płyn chłodząco-smarujący)

Ze względu na swoje właściwości, na powierzchni stopów niklu, często dochodzi do powstawania defektów szlifierskich, w tym głównie przypaleń [130], deformacji plastycznych [116]

oraz warstwy białej [80], nawet przy stosowaniu niewielkich wydajności ubytkowych. Wynika to z niewielkiej przewodności cieplnej tego typu materiałów i powoduje znaczące zwiększenie temperatury w strefie szlifowania. Wysoka temperatura obróbki ma również negatywny wpływ na wytrzymałość powierzchni materiału obrobionego w trakcie eksploatacji i na właściwości zmęczeniowe obrobionego przedmiotu. Pierwsze wzmianki w literaturze na temat defektów szlifierskich powstających podczas szlifowania stopów niklu (stopu Nimonic<sup>®</sup> alloy 108) można znaleźć w publikacji Ye i Pearce [130]. Autorzy ci zwrócili uwagę na przypalenia szlifierskie powstające podczas szlifowania powierzchni płaskich z posuwem pełzającym CFG (ang. *creep feed grinding*), z wykorzystaniem dwóch mediów chłodzących: emulsji wodnej O/W i czystego oleju. Badania swoje przeprowadzili z użyciem ściernic o otwartej strukturze z elektrokorundu szlachetnego o oznaczeniu 99A. Z badań tych wynika, że wykorzystanie czystego oleju jako PCS wpływa pozytywnie na obniżenie chropowatości powierzchni obrobionej w porównaniu do wyników procesu szlifowania, w którym zastosowano emulsję jako PCS. Jednak wykorzystanie oleju również przyczynia się do zwiększenia sił szlifowania. Z kolei zwiększenie sił szlifowania zwiększa ryzyko wystąpienia przypaleń na powierzchni materiału obrobionego, które dyskwalifikują powierzchnię po obróbce.

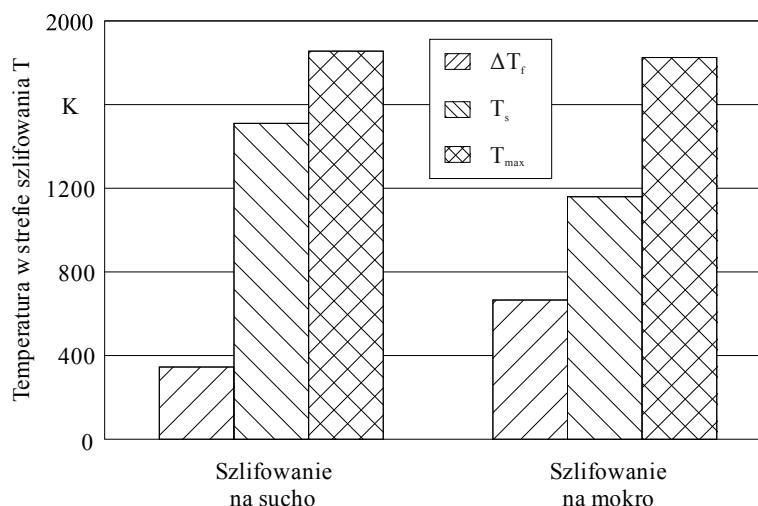
Österle i inni [80,81] wykazali, że w strefie szlifowania dochodzi do miejscowych nadtopień materiału obrabianego, co może skutkować powstawaniem warstwy białej. Wykazano ponadto, że decydujący wpływ na warunki termiczne w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym mają parametry obciążania czynnej powierzchni ściernicy, w szczególności ciągłe obciążanie stosowane w procesie szlifowania pełzającego, którego zastosowanie pozwala na znaczące obniżenie temperatury powierzchni obrabianego stopu niklu oraz zapobiega powstawaniu warstwy białej (rys. 2.4), której zmniejszanie obserwuje się wraz ze zwiększeniem prędkości posuwu osiowego rolki obciążającej  $v_{fd}$  (rys. 2.4b i c).



Rys. 2.4 Obrazy mikroskopowe wykonane z użyciem optycznego mikroskopu metalograficznego (przekroje poprzeczne) próbek materiału obrabianego, a) próbka referencyjna, bez ciągłego kondycjonowania narzędzia; b) ciągłe kondycjonowanie ściernicy, eksperyment CD4; c) ciągłe kondycjonowanie ściernicy, eksperyment CD2 [80]



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. 2.5).



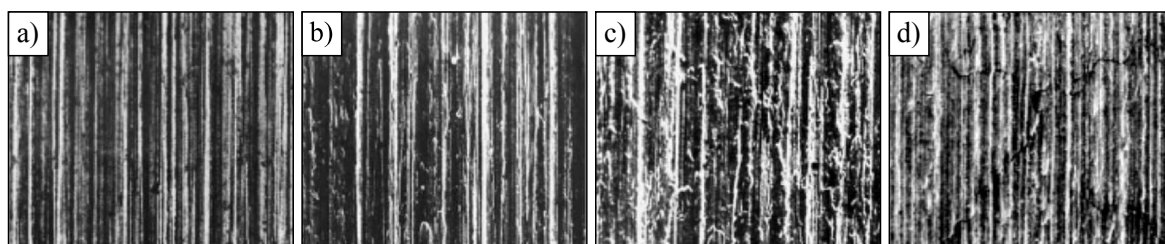
Rys. 2.5 Temperatury w strefie szlifowania podczas szlifowania pelzającego stopu Inconel® 738LC ( $\Delta T_f$  – temperatura plastycznego płynięcia;  $T_s$  – temperatura w styku ściernicy z materiałem obrabianym;  $T_{max}$  – temperatura maksymalna na powierzchni materiału obrabianego [80])

W pracy [128] przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury szlifowania na stan warstwy wierzchniej (WW) przedmiotu obrobionego wykonanego ze stopu K417 (tab. 2.4). Analizie poddano chropowatość powierzchni, mikrotwardość, naprężenia własne, strukturę metalograficzną oraz trwałość zmęczeniową (ang. *fatigue life*) wynikającą ze zmian temperatury w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym. Wykazano znaczące zwiększenie wartości parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  w przypadku wystąpienia na powierzchni obrobionej przypaleń szlifierskich. Dokonując oceny obrazów mikroskopowych SEM (rys. 2.6a-2.6c), na powierzchni większości obrobionych próbek nie zauważono mikropęknięć, co świadczy o tym, że nawet temperatura rzędu 1440°C w strefie szlifowania nie spowodowała naruszenia integralności struktury powierzchni szlifowanego stopu. Dopiero w przypadku próbki, przy szlifowaniu której maksymalna temperatura wynosiła 1600°C [128], ujawniono występowanie mikropęknięć powierzchni przedmiotu obrobionego, a takie zmiany sprawiają, że powierzchnia obrobiona nie spełnia wymogów eksploatacyjnych – rys. 2.6d. Wyznaczona głębokość zalegania naprężeń własnych dla powierzchni bez i z przypaleniami szlifierskimi nie przekraczała 40  $\mu\text{m}$ . Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano możliwość dwuetapowej obróbki badanego stopu. W pierwszym etapie możliwa jest wysokowydajna obróbka, nawet jeżeli prowadzi do powstawania przypaleń szlifierskich. Powstałe odkształcone plastycznie warstwy na powierzchni przedmiotu mogłyby zostać usunięte w drugim etapie ze znacznie mniejszą wydajnością ubytkową,

ponieważ grubość warstwy zalegania defektów nie przekracza 40  $\mu\text{m}$ , co jest wartością znacznie mniejszą w porównaniu z głębokością szlifowania wykończeniowego [128].

Tab. 2.4. Zmiana zabarwienia powierzchni materiału obrobionego w funkcji temperatury w strefie szlifowania [128]

	Maksymalna temperatura w strefie szlifowania, °C				
	95	990	1215	1440	1600
Barwa	normalny	beżowy	brązowy	brązowofioletowy	hiacyntowy



Rys. 2.6 Obrazy mikroskopowe SEM dla powierzchni obrobionej: a) bez przypaleń, temperatura 95°C; b) przypalenia w kolorze beżowym, temperatura 990°C; c) przypalenia w kolorze brązowofioletowym, temperatura 1440°C; d) przypalenia w kolorze hiacyntowym, temperatura 1600°C (widoczne mikropęknięcia) [128]

Po przeprowadzeniu analizy z użyciem rentgenowskiej spektrometrii fotoelektronów XPS (ang. *X-ray photoelectron spectroscopy*) [126] dla poszczególnych powierzchni przedmiotu obrobionego z widocznymi przypaleniami stwierdzono, że przypalenia te są spowodowane przez zachodzące w trakcie procesu szlifowania z posuwem pełzającym reakcje chemiczne pomiędzy środowiskiem obróbki a poszczególnymi metalami wchodzącymi w skład materiału obrabianego K417 (nikiel, chrom, tytan i glin), czyli reakcjami utleniania. Na przypalonej powierzchni materiału obrobionego tworzy się cienka warstwa tlenków ( $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{TiO}_2$ ), której grubość ma decydujący wpływ na barwę przypalenia. Stwierdzono ponadto, że tytan obecny w stopie może reagować z tlenem atmosferycznym już w temperaturze powyżej 500°C. Do podobnych wniosków doszli również Sinha i inni [102] podczas szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy z SiC i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### 2.2.2. Zużycie ściernicy

W procesie szlifowania zawsze występuje zużywanie ściernicy wskutek działania występujących sił oraz temperatury. Według Marinescu i innych [62] rozróżnić można trzy typy zużycia ściernicy: odchylenie kształtu profilu osiowego ściernicy, błąd okrągłości ściernicy oraz zmiana ostrości ściernicy. Zużycie ściernicy wpływa na zmianę jej topografii, modyfikując przy tym

przebieg procesu szlifowania. Tym samym oddziałuje na pozostałe istotne parametry procesu. Z tego względu zużycie narzędzia ściernego jest uważane jako podstawowe kryterium oceny szlifowalności materiału obrabianego i ma decydujący wpływ na okres trwałości narzędzi ściernych. Wymienić można kilka procesów wywołanych przez zjawiska zużycia ściernicy: zużycie ściernie, zużycie adhezyjne, zużycie trybochemiczne, dyfuzja i zużycie składników CPS [62,78].

Zużycie ściernicy uwarunkowane jest głównie zjawiskami elementarnymi zużycia dotyczącymi aktywnych wierzchołków skrawających ziaren ściernych. Wyraźny wpływ na charakter używania się narzędzi ściernych wykazuje także rodzaj, objętość oraz struktura zastosowanego spoiwa [78].

Marinescu [62,63] procesy zużycia składników CPS klasyfikują na 2 grupy: zużycie ściernie i wytrzymałościowe ziarna. Procesy te zachodzą zarówno w ziarnach ściernych, jak i w spoiwie, stąd można wyróżnić:

- zużycie ściernie wierzchołków aktywnych ziaren ściernych;
- zużycie ściernie spoiwa w miejscach kontaktu z materiałem obrabianym;
- zużycie wytrzymałościowe ziaren ściernych w skutek obciążeń mechanicznych i cieplnych;
- zużycie wytrzymałościowe mostków spoiwa;
- zużycie wytrzymałościowe na granicy faz ziarna ściernego i mostku spoiwa;
- zalepianie wierzchołków ziaren i przestrzeni międzyziarnowych materiałem obrabianym.

Proces zużycia jest uzależniony od wielu, zachodzących równocześnie, zjawisk fizykochemicznych i mechanicznych. Tępienie wierzchołków ziaren wywołane zużyciem ściernym występuje na skutek szeregu zjawisk zachodzących w mikroskali, takich jak [62,63]:

- zużycie ściernie wywołane wzajemnym oddziaływaniem pomiędzy ziarnem i obrabianą powierzchnią;
- plastyczne płynięcie ziarna ściernego pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia;
- wykruszanie mikrocząsteczek ziarna ściernego na skutek dyfuzji termicznej i mikrooddziaływań mechanicznych;
- reakcje chemiczne pomiędzy materiałem ściernym i szlifowanym, przy podwyższonej temperaturze i w obecności płynu chłodząco-smarującego.

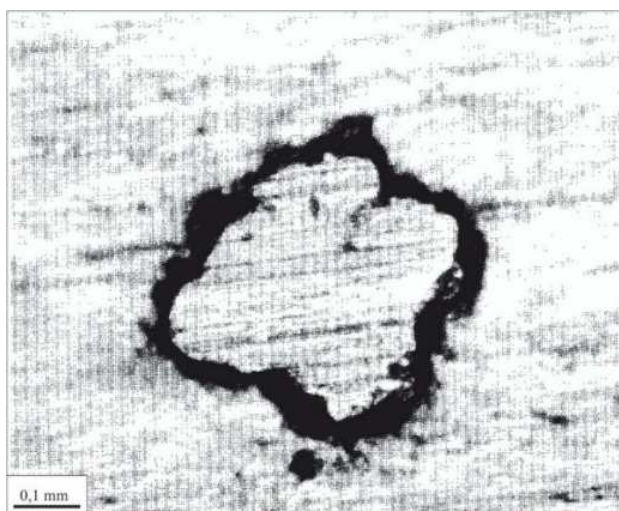
Natomiast do najważniejszych zjawisk powodujących zużycie wytrzymałościowe, występujące w postaci pękania lub wykruszania cząsteczek ziaren ściernych oraz wykruszania cząsteczek spoiwa i pękania jego mostków, należy zaliczyć [62,63]:

- zużycie doraźne wywołane obciążeniami mechanicznymi;
- zużycie zmęczeniowe wywołane cyklicznym oddziaływaniem obciążeń mechanicznych;

- zużycie termozmęczeniowe, w którym zużycie zmęczeniowe jest dodatkowo wspomagane okresowo zmiennym lub przerywanym obciążeniem termicznym.

W tak złożonym procesie zużycia, istotnego znaczenia nabiera więc wzajemne oddziaływanie ziarna ściernego, spoiwa i materiału obrabianego. Znajomość elementarnych zjawisk określających zużycie narzędzi ściernych umożliwia racjonalne planowanie i efektywną realizację procesu szlifowania. Utrata zdolności skrawnej ściernic lub zmiana ich pierwotnego kształtu wpływa na jakość powierzchni i dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych przedmiotów, szczególnie przy zastosowaniu ściernic z materiałów supertwardych, gdzie nadmierne zużycie znacząco zmniejsza opłacalność produkcji [62,78].

W procesach szlifowania nadstopów niklu największym problemem jest duża skłonność do zalepiania czynnej powierzchni ściernicy wiórami materiału obrabianego. Wynika ona z najważniejszych właściwości nadstopów niklu, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością, odpornością korozyjną i odpornością na zmęczenie ale również małą przewodnością cieplną i dużą ciągliwością. Powstawanie zalepień na CPS znacząco wpływa na warunki w strefie szlifowania skutkując zwiększeniem wartości siły, mocy i temperatury szlifowania, skróceniem okresu trwałości ściernicy oraz pogorszeniem jakości powierzchni obrobionej. W efekcie uzyskuje się niskie wartości wskaźnika szlifowania  $G$ , niekorzystne silne naprężenia rozciągające i obniżenie dokładności wymiarowo-kształtowej powierzchni obrobionej wynikające z niestabilnego procesu szlifowania [85]. Mikroskopowy obraz zalepionej powierzchni czynnej ściernicy stopem niklu (Inconel<sup>®</sup> 718) został przedstawiony w 1995 r. przez Tso [117] (rys. 2.7).

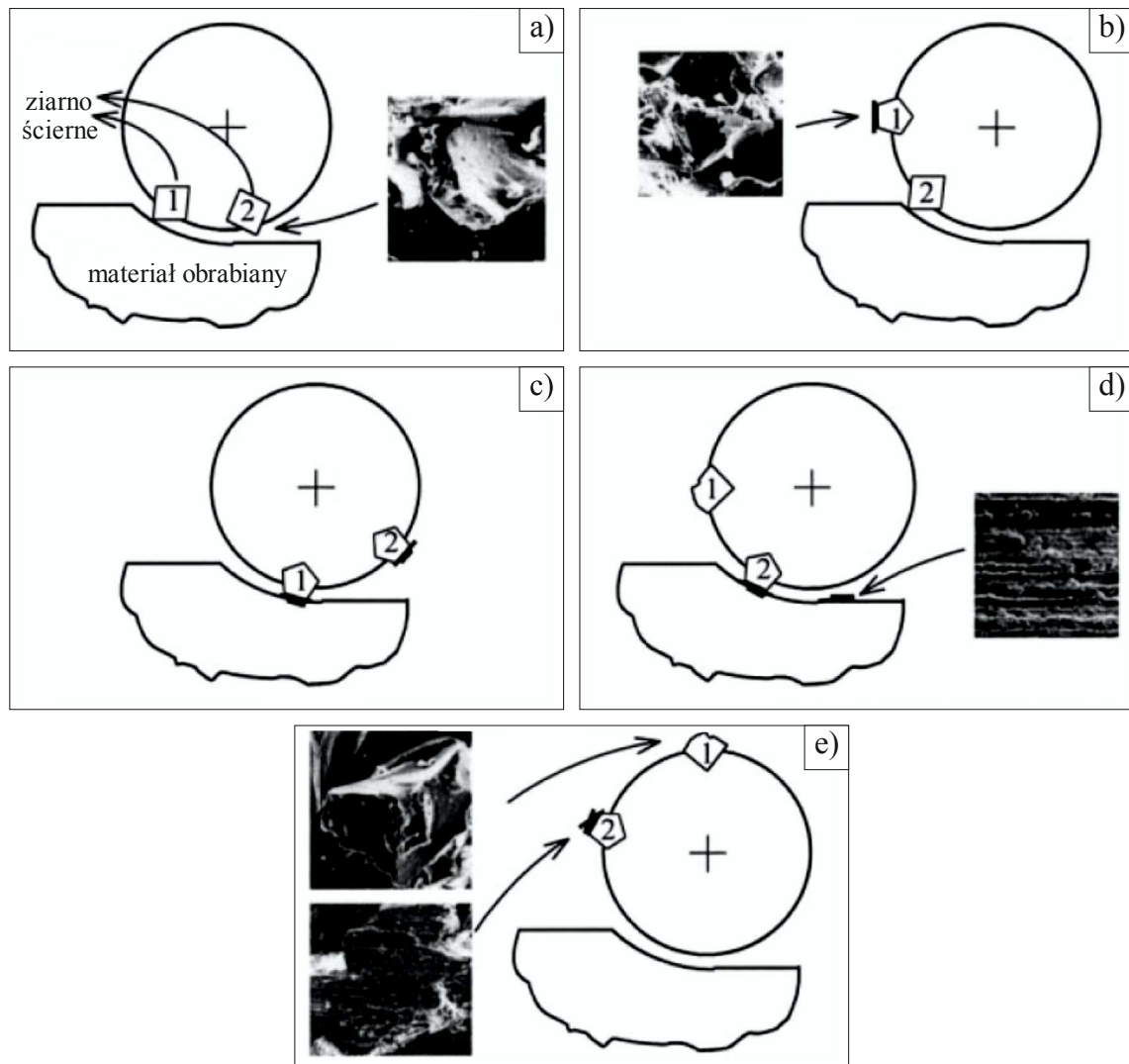


Rys. 2.7 Obraz mikroskopowy zalepienia (Inconel<sup>®</sup> alloy 718) na powierzchni czynnej ściernicy z ziarnami cBN [117]

Stwierdził on, że superstopy niklu wykazują dużą adhezję materiału obrabianego do CPS 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 zalepienia siły szlifowania znacznie wzrastają. Autor ten dokonał również oceny wpływu trzech rodzajów ziaren ściernych (ściernica z ziarnami węgla krzemowego, z ziarnami elektrokorundu szlachetnego oraz ściernica z ziarnami regularnego azotku boru) na efektywność procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Jako kryterium oceny efektywności wyznaczył porównanie wartości składowych normalnej  $F_n$  i stycznej  $F_t$  siły szlifowania, objętości zeszlifowanego materiału  $V_w$ , dokładności wymiarowej, wartości chropowatości powierzchni wyrażonej parametrem  $Ra$  otrzymanych podczas szlifowania powierzchni płaskich w tych samych warunkach z wykorzystaniem wyżej wymienionych ściernic.

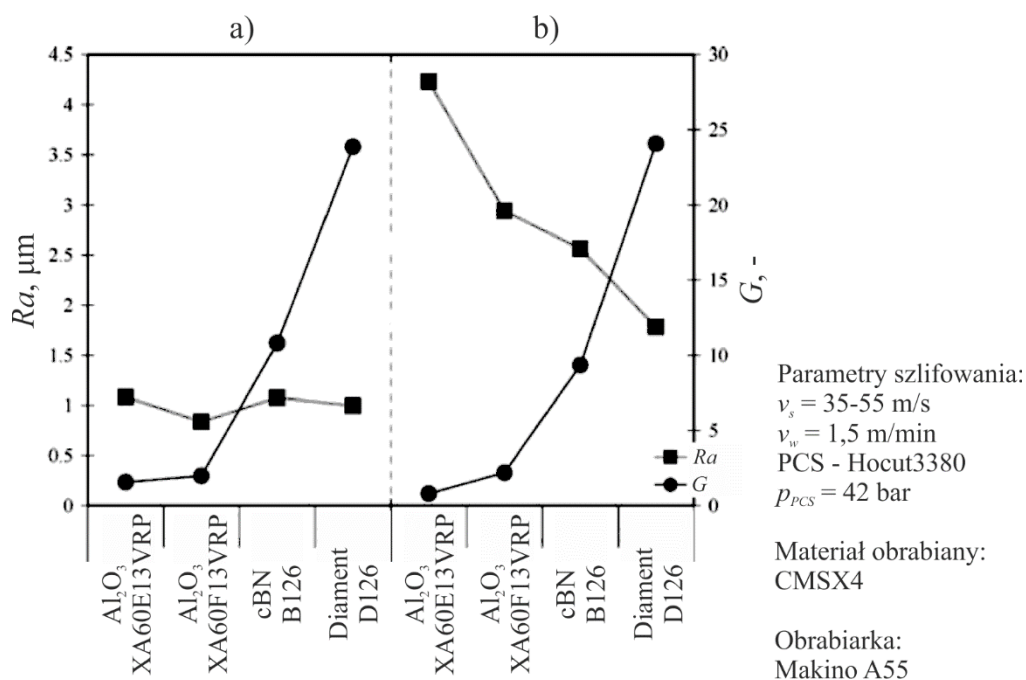
W 2002 roku Xu i Yu przeprowadzili analizę XPS powierzchni zalepionej. Nie wykazano żadnej różnicy w składzie chemicznym między zalepieniem a materiałem obrabianym, co potwierdziło wystąpienie zjawiska adhezji pomiędzy ziarnem ściernym a wiórami materiału obrabianego. Na powierzchni zalepienia autorzy zaobserwowali specyficzne ślady równoległe do kierunku obrotu ściernicy, które świadczyły o tym, że materiał ten ślizgał się po powierzchni przedmiotu obrabianego. Dzięki tym obserwacjom przedstawili oni 5-etapowy model tworzenia się zalepienia na powierzchni czynnej ściernicy [126] – rys. 2.8. W pierwszym etapie (rys. 2.8a), po obciążeniu ściernicy, ziarna ściernic z  $Al_2O_3$  są ostre. Jednak podczas szlifowania materiałów trudno skrawalnych po krótkim czasie może nastąpić zużycie ściernic. Wtedy dochodzi do stępienia i wypłaszczenia ich wierzchołków co skutkuje zwiększeniem temperatury w strefie szlifowania wywołane tarcie. Z uwagi, że materiały trudno skrawalne jak tytan czy nikiel wykazują dużą ciągliwość, zwiększenie temperatury powoduje, że w strefie szlifowania materiał obrabiany staje się na tyle ciągliwy żeby wytworzyć silną zgrzeinę z ziarnem ściernym. Siła wiązania między materiałem obrabianym i ziarnem ściernym powoduje zwiększenie wytrzymałości na ścinanie metalu w warstwie skrawanej i powstanie warstwy adhezyjnej na wierzchołku ziarna ściernego – rys. 2.8b. Zazwyczaj warstwa adhezyjna wzrasta stopniowo podczas kolejnych kontaktów ziarna z materiałem obrabianym, co powoduje, że ziarna zaczynają się powiększać (rys. 2.8c). Jeżeli warstwa ta stanie się wystarczająco duża cząstki przyspawanego metalu do ziarna ściernego zostaną z powrotem osadzone, zgodnie z zasadą działania dźwigni, na materiale obrabianym tworząc powłokę deformacji plastycznych (rys. 2.8d), natomiast ziarno ściernic zostanie wykruszone – rys. 2.8e.



Rys. 2.8 Model fizyczny tworzenia się zalepiania na powierzchni czynnej ściernicy: a) ostre ziarna ścierne, zaraz po obciążeniu ściernicy; b) powstanie warstwy adhezyjnej na wierzchołku ziarna ściernego; c) rozrost warstwy adhezyjnej na wierzchołkach ziaren ściernych; d) tworzenie powłoki deformacji plastycznych; e) wykruszanie ziarna ściernego [126]

Neslušán i Czán [74] dodatkowo piszą, że powstawanie zalepień na CPS znacząco wpływa na warunki w strefie szlifowania, w efekcie uzyskuje się niskie wartości wskaźnika szlifowania  $G$ , niekorzystne silne naprężenia rozciągające i obniżenie dokładności wymiarowo-kształtowej powierzchni obrobionej z powodu niestabilnego procesu szlifowania.

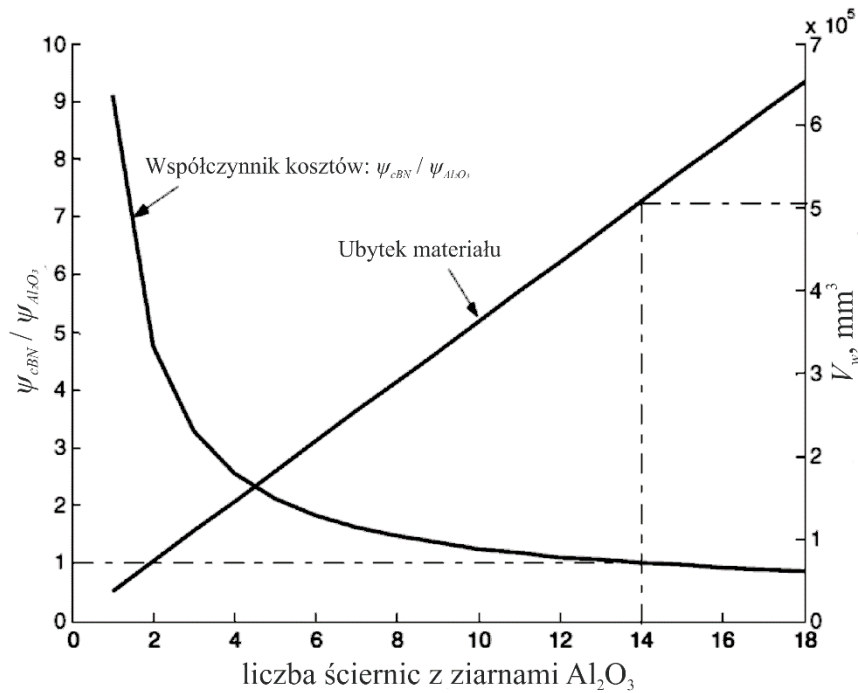
Liu i inni [56] z kolei określają w swojej publikacji stopy niklu jako materiały trudno skrawalne (ang. *hard-to-cut materials*), ponieważ proces szlifowania tych stopów cechują duże wartości siły szlifowania oraz krótki okres trwałości ściernicy. Dokonali oni oceny wpływu trzech rodzajów ściernicy (konwencjonalnej ściernicy z ziarnami  $Al_2O_3$  oraz dwóch ściernicy wykonanych z ziaren supertwardych: ściernicy z cBN oraz ściernicy z ziarnami diamentowej) na efektywność procesu szlifowania stopu niklu (CMSX-4). W procesie szlifowania ściernicami z materiałów supertwardych osiągnięto znacznie większe wartości wskaźnika szlifowania  $G$  (rys. 2.9).



Rys. 2.9 Porównanie wartości parametru chropowatości  $Ra$  i wartości wskaźnika szlifowania  $G$  podczas szlifowania współbieżnego powierzchni płaskich wykonanych ze stopu CMSX4 dla różnych typów ściernic przy ustalonych parametrach obróbkowych: a)  $a_p = 0,05 \text{ mm}$ ; b)  $a_p = 2 \text{ mm}$  [56]

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 (z ziarnami diamentowymi oraz ziarnami cBN) wykonane zostaną z użyciem spoiwa galwanicznego zawierającego 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. Natomiast ściernice z ziarnami cBN, w wysokich temperaturach, wchodzi w reakcję z wodą, co przyczynia się do ich szybszego zużycia. Wyniki procesu szlifowania wykazały, że koszty obróbkowe z wykorzystaniem ściernicy z ziarnami cBN są dziewięciokrotnie wyższe niż przy wykorzystaniu ściernicy z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o numerze 60 i twardości E (60E). Analizując koszty ściernicy, koszt zakupu jednej ściernicy z ziarnami cBN odpowiada kosztowi 14 ściernic 60E. Wynika z tego, że ściernica z ziarnami cBN musiałaby przeszlić 14 razy większą objętość materiału w porównaniu do ściernicy korundowej. W praktyce byłoby to mało prawdopodobne, z uwagi na powstające zalepienia CPS podczas szlifowania (rys. 2.10). Jednak ściernice z ziarnami diamentowymi wykazują dłuższy okres trwałości w porównaniu ze ściernicami z ziarnami cBN przy tej samej cenie ściernicy. Wyniki procesu szlifowania realizowanego z zastosowaniem ściernic z ziarnami diamentowymi wykazały najkorzystniejszą wartość współczynnika jakości do ceny.





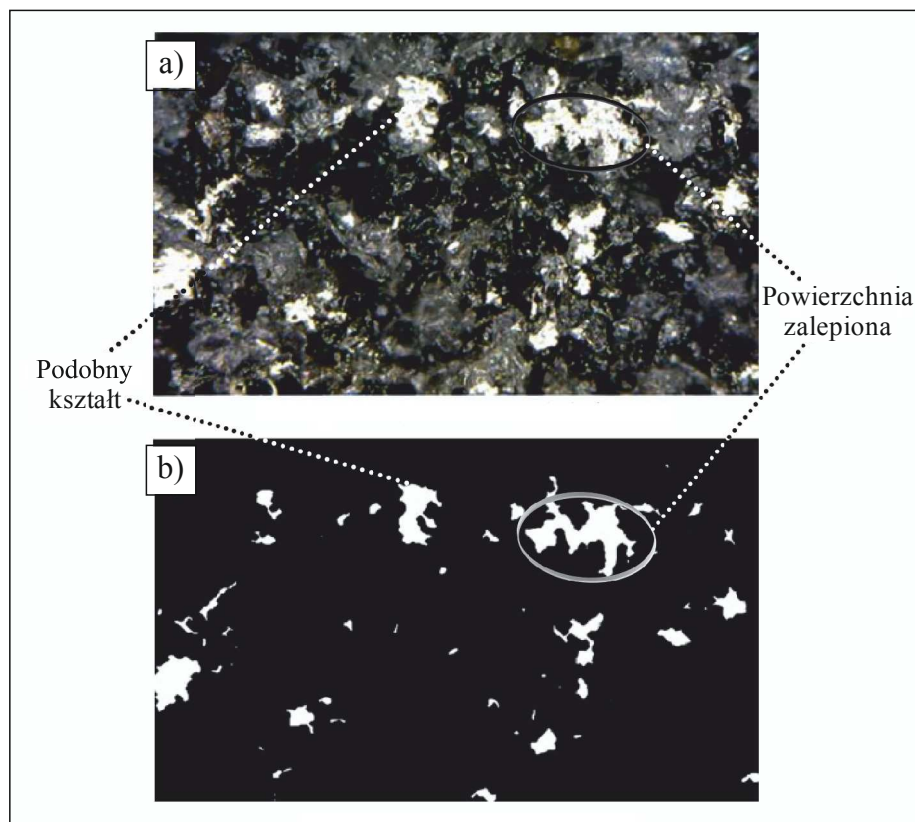
Rys. 2.10 Wykres zmian wartości współczynnika kosztów  $\psi$  dla ściernic z ziarnami cBN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [56]

Jednym z kierunków badań zmierzających do ograniczenia zjawiska zalepiania czynnej powierzchni ściernicy w procesach szlifowania stopów niklu jest stosowanie ściernic o podwyższonej porowatości (tzw. wielkoporowych). W pracy Neslušana [73] określono wpływ zastosowania ściernicy z ziarnami IPA<sup>TM</sup> firmy Norton, zbudowanej z aglomeratów ziaren ściernych Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spoiwanych spoiwem ceramicznym i charakteryzującej się podwyższoną otwartością struktury – struktura 17 (Vortex<sup>®</sup> 1 250×20×76/60J17V), na proces szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu EI 698-VD (podobnego do stopu Nimonic<sup>®</sup> alloy 90). Wykazano, że przy zastosowaniu ściernicy wielkoporowej uzyskuje się efekt znacznego ograniczenia zjawiska zalepiania CPS w porównaniu do konwencjonalnej ściernicy z ziarnami 99A o strukturze 9 (1 250×20×76/A9960J9V). Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych wykazały ponadto korzystny wpływ zastosowania ściernicy wielkoporowej na wartość 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%) [73].

Adibi i inni [2,3] opracowali model analityczny zmiany stopnia zalepiania w funkcji parametrów obróbkowych, struktury ściernicy i właściwości materiałowych przedmiotu obrabianego. Model ten bazuje na opisie zjawiska adhezji materiału obrabianego do powierzchni czynnej ściernicy. Autorzy dokonali również walidacji modelu teoretycznego w procesie szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 738 z użyciem ściernicy z ziarnami cBN i spoiwem ceramicznym. Autorzy badań wykazali dużą zgodność modelu z wynikami badań eksperymentalnych. Ocenę



stopnia zalepienia CPS materiałem obrabianym w badaniach eksperymentalnych przeprowadzili wykorzystując do tego celu program MATLAB® (rys. 2.11).



Rys. 2.11 Przetwarzanie obrazu czynnej powierzchni ściernicy: a) obraz zarejestrowany mikroskopem optycznym; b) obraz przetworzony z użyciem programu MATLAB® [2]

Analizując wyniki doświadczeń stwierdzili, że:

- po wyważeniu ściernicy zjawisko zalepienia ściernicy wiórami materiału obróbkowego gwałtownie wzrasta, co jest stanem przejściowym. Ostatecznie następuje stan równowagi, gdzie zwiększenie liczby/powierzchni zalepień zostaje kompensowane przez odrywanie zalepionego materiału z powierzchni czynnej ściernicy;
- stopień zalepienia ściernicy istotnie zależy od głębokości szlifowania  $a_p$ , natomiast w mniejszym stopniu od prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$ . Dlatego aby osiągnąć dużą wydajność szlifowania zaleca się zwiększenie posuwu osiowego stołu w przeciwieństwie do głębokości szlifowania; zwiększenie prędkości ściernicy  $v_s$  powoduje zwiększenie stopnia zalepienia CPS.

### 2.2.3. Ściernice stosowane w szlifowaniu nadstopów niklu

W procesach szlifowania nadstopów niklu coraz częściej stosowane są ściernice z jednowarstwowym nasypem ściernym wiązany galwanicznie z metalowym korpusem narzędzia. Najczęściej stosowane są w takim przypadku supertwarde ziarna ściernic z cBN oraz ziarna

diamentowe. Ściernice galwaniczne charakteryzują się odmiennym procesem zużycia w porównaniu do ściernic ze spoiwem ceramicznym lub żywicznym. Wierzchołki aktywnych ziaren ściernych ulegają starciu 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 [117], wykazano że zastosowanie ściernic z ziarnami cBN w procesie szlifowania powierzchni płaskich ze stopu Inconel<sup>®</sup> 718 pozwala na uzyskanie korzystniejszych wyników obróbki w porównaniu do wyników obróbki uzyskanych ściernicami z ziarnami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i SiC. W przypadku szlifowania ściernicami z ziarnami cBN zanotowano najkorzystniejsze wartości siły szlifowania, chropowatości powierzchni obrobionej, najwyższą dokładność wymiarowo-kształtową oraz najdłuższy okres trwałości ściernicy. Jedynym niekorzystnym czynnikiem związanym ze stosowaniem ściernic z ziarnami cBN jest wysoka cena narzędzi [117].

Według Österle i Li [80] stosowanie ściernic, wykonanych z ziaren o większym przewodnictwie cieplnym w porównaniu do ziaren korundowych, na przykład z regularnego azotku boru, pozwala na skuteczne zapobieżenie powstawaniu warswty białej oraz na obniżenie temperatury w strefie obróbki.

W 1999 roku Kawagoishi i inni przeprowadzili badania wpływu szlifowania z użyciem ściernicy z ziarnami cBN na wytrzymałość próbki walcowej. Wyniki pomiarów wykazały zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej badanej próbki w temperaturze pokojowej będący skutkiem występowania naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej przedmiotów po szlifowaniu. 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 i zmniejszenie odporności na rozwój mikropęknięć w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego [50].

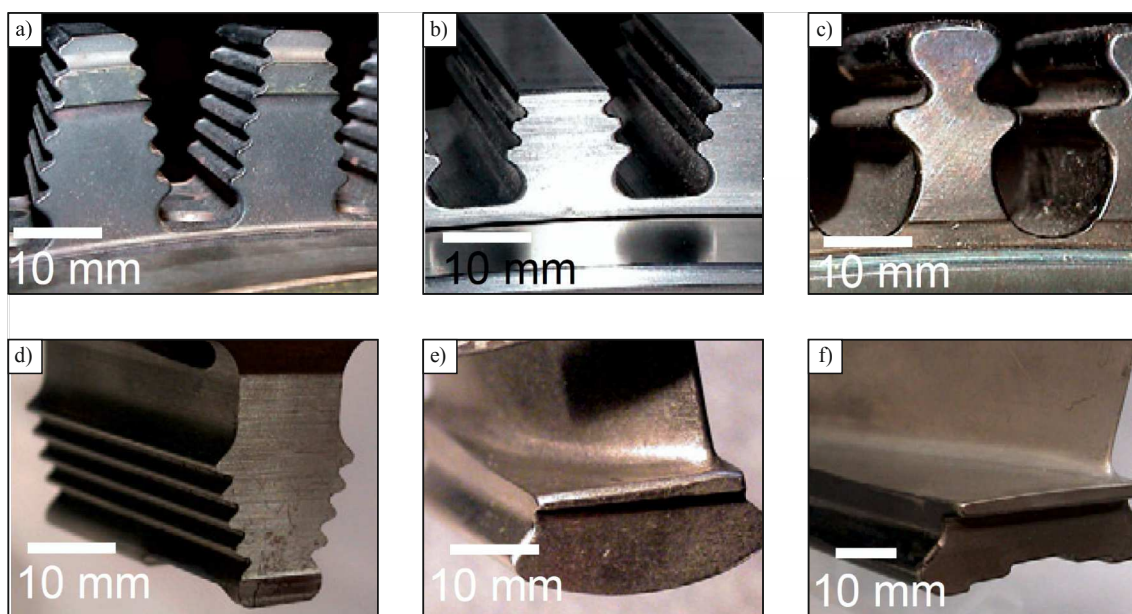
W pracy Sunatro i Ichidy [107] opisano wpływ dwóch rodzajów ziaren ściernych, z polikrystalicznego cBN (PcBN) oraz z mikrokryształicznego cBN (McBN), na efektywność procesu szlifowania z posuwem pełzającym stopów niklu (Nimonic<sup>®</sup> alloy 80A). Wyniki opisanych badań wykazały, że stosowanie PcBN jako ziaren ściernych do produkcji ściernicy może skutecznie zredukować wartości siły szlifowania o ok. 20-30% w odniesieniu do zastosowania ziaren ściernych z McBN. Ponadto ściernica wykonana z PcBN charakteryzuje się wydłużonym okresem trwałości oraz mniejszym błędem kształtu podczas szlifowania stopów niklu.

W pracy [127] wykazano, że w przypadku stosowania ściernic z ziarnami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zjawisko zalepiania CPS materiałem szlifowanym występuje z większą intensywnością w porównaniu

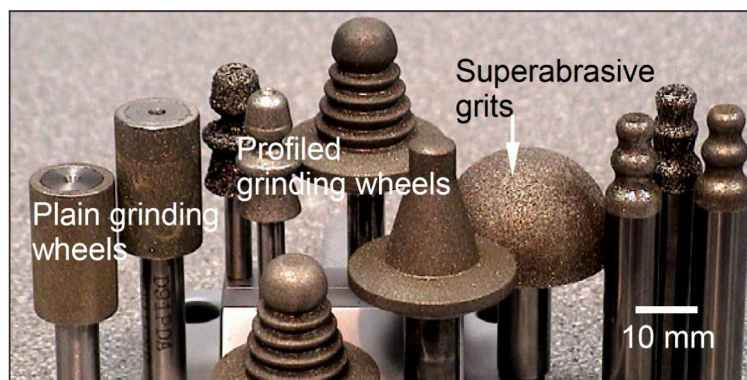
z procesem szlifowania realizowanym z użyciem ściernic z ziarnami cBN. Tłumaczyć to można większą stabilnością chemiczną regularnego azotku boru w wysokich temperaturach oraz jego wysoką przewodnością cieplną.

Przedstawione w pracy Rowe i innych [91] wyniki badań potwierdzają przewagę stosowania ściernic z ziarnami cBN do szlifowania nadstopów niklu (Inconel<sup>®</sup> alloy 718), w porównaniu ze ściernicami z ziarnami na bazie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy podwyższonej prędkości szlifowania ( $v_s = 120$  m/s). Wykazano, że mimo znacznej różnicy w cenie ściernic z ziarnami cBN, przy ich użyciu uzyskuje się najniższą wartość współczynnika kosztowności na przedmiot, dzięki wydłużeniu czasu pracy między obciążeniami.

W pracy Aspinwall i innych [7] do szlifowania powierzchni kształtowych w stopach Inconel<sup>®</sup> alloy 718 i Udimet<sup>®</sup> alloy 720 (rys. 2.12) zastosowano profilowe ściernice galwaniczne z ziarnami cBN (B46) i ziarnami diamentowymi (D46) – rys. 2.13. 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 wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej wyrażone parametrem  $Ra$  wynosiły od 0,8 do 2,0  $\mu\text{m}$ , przy czym najniższe wartości uzyskano stosując ściernice z ziarnami diamentowymi. Przy zastosowaniu ściernic z ziarnami cBN zarejestrowano natomiast mniejsze zużycie promieniowe ściernicy  $\Delta r$ .

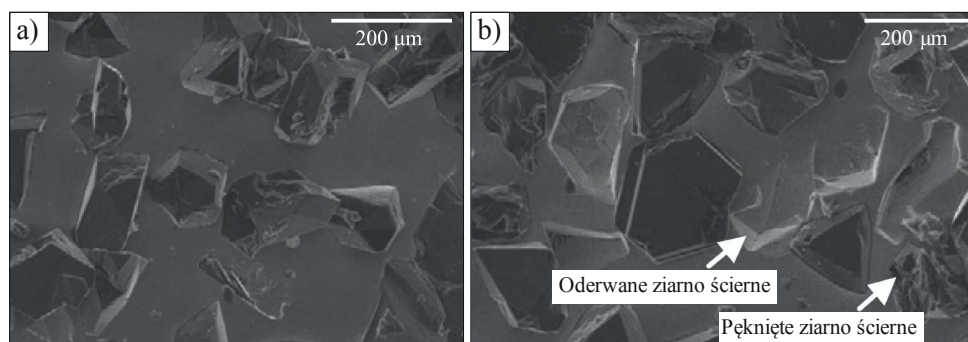


Rys. 2.12 Przykładowe kształty przedmiotów obrabianych po obróbce ściernej stopów Inconel<sup>®</sup> alloy 718 i Udimet<sup>®</sup> alloy 720: a-c) gniazdo do montażu łopatek turbin; d-f) zabierak pojedynczej łopatki turbiny [7]



Rys. 2.13 Profilowe ściernice galwaniczne z ziarnami cBN i ziarnami diamentowymi [7]

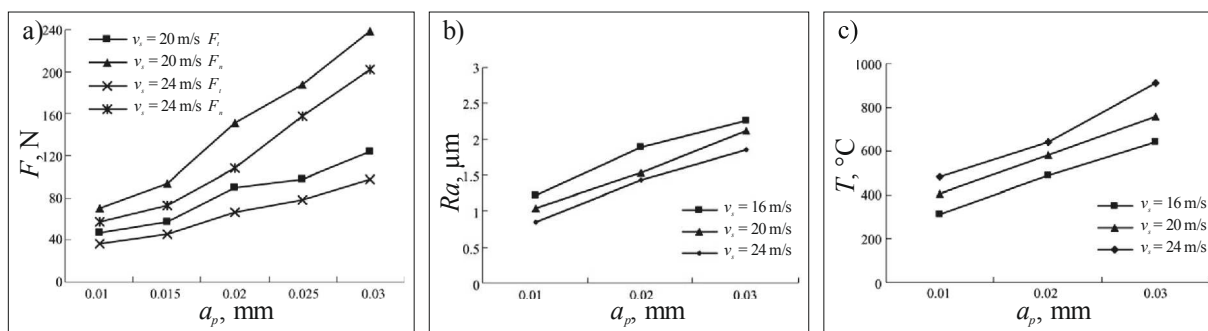
Z kolei Guo i inni (2007) wskazali, że dla szerokiego zakresu zmian parametrów szlifowania defekty warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (warstwa biała) wystąpiły tylko w przypadku pojawienia się zalepień na CPS, które spowodowały zwiększenie temperatury w strefie obróbki. Wykazali również, że zużycie ściernicy ze spoiwem galwanicznym, objawiające się zwiększaniem płaskich powierzchni startych wierzchołków skrawających ziaren ściernych (rys. 2.14), wpływa na zwiększenie mocy szlifowania ( $P = 0,8$  kW na początku pracy ściernicy i  $P = 2,2$  kW przy  $V_w' \approx 9.300$  mm<sup>3</sup>/mm). Uzyskane wartości chropowatości powierzchni obrobionej opisane parametrem  $Ra$  wynosiły od  $\sim 1,4$   $\mu\text{m}$  dla ściernicy ostrej do  $\sim 1,1$   $\mu\text{m}$  na końcu okresu trwałości ściernicy [39].



Rys. 2.14 Obrazy mikroskopowe CPS wykonanej z ziaren cBN o numerze B120: a) CPS nowej ściernicy przed przystąpieniem do procesu szlifowania; b) CPS po procesie szlifowania ( $V_w' \approx 9.300$  mm<sup>3</sup>/mm) [39]

Zhang i inni (2008) analizując temperaturę w strefie szlifowania, wartość siły szlifowania, parametry chropowatości powierzchni materiału obrabianego oraz rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego dobrali najkorzystniejsze parametry szlifowania stopu GH2132 z użyciem ściernicy z mikrokryształicznego korundu spiekane SG ze spoiwem ceramicznym. Według ich badań (rys. 2.15) zwiększenie prędkości liniowej ściernicy powoduje zmniejszenie siły szlifowania (rys. 2.15a) oraz polepszenie parametrów chropowatości powierzchni obrobionej (rys. 2.15b), podczas gdy temperatura i naprężenia własne w warstwie wierzchniej materiału obrabianego zwiększają się (rys. 2.15c). Żeby nie dopuścić do przypalenia

materiału oraz zalepienia ściernicy optymalna prędkość szlifowania  $v_s$  powinna wynosić między 18 a 22 m/s, a głębokość szlifowania  $a_p$  nie powinna przekroczyć 0,02 mm [132].

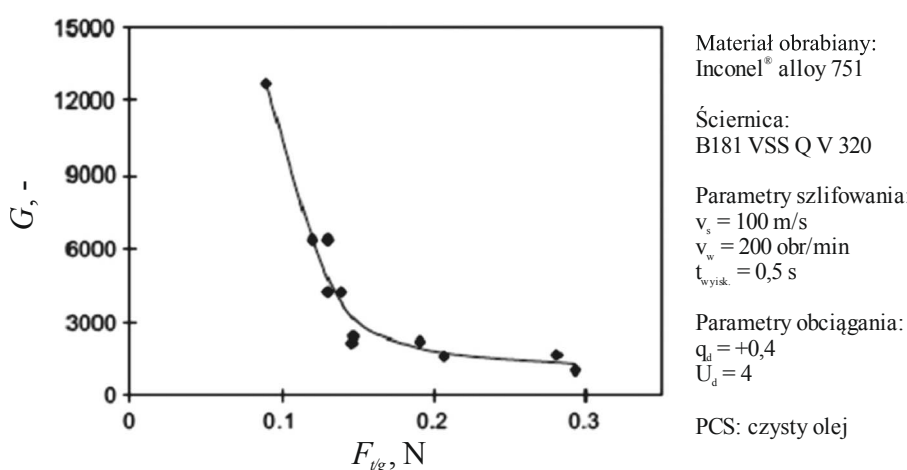


Rys. 2.15 Wpływ głębokości szlifowania  $a_p$  i prędkości ściernicy  $v_s$  na wartości siły szlifowania (a); na wartości parametru  $Ra$  materiału obrobionego (b); na temperaturę w strefie szlifowania (c) w procesie szlifowania stopu GH2132 [132]

Da Silva i Oliveira [27] stwierdzili, że na ocenę wydajności szlifowania w procesach szlifowania stopów lotniczych na bazie niklu największy wpływ mają takie wskaźniki efektywności procesu jak wskaźnik szlifowania  $G$  oraz wartości składowej stycznej siły szlifowania przypadającej na pojedyncze ziarno ściernicy  $F_{t/g}$ . Zużycie ściernicy najlepiej obrazuje krzywa zależności wskaźnika  $G$  od składowej stycznej siły szlifowania na ziarno  $F_{t/g}$  (rys. 2.16). Wyznaczenie wartości  $F_{t/g}$  opisano równaniem:

$$F_{t/g} = \frac{\Delta P}{v_s \cdot b \cdot l_c \cdot D}, \quad (1)$$

gdzie:  $P$  – przyrost mocy szlifowania (moc szlifowania netto);  $v_s$  – prędkość obwodowa ściernicy;  $b$  – szerokość szlifowania;  $l_c$  – długość kontaktu;  $D$  – liczba ziaren na jednostkę objętości ściernicy.

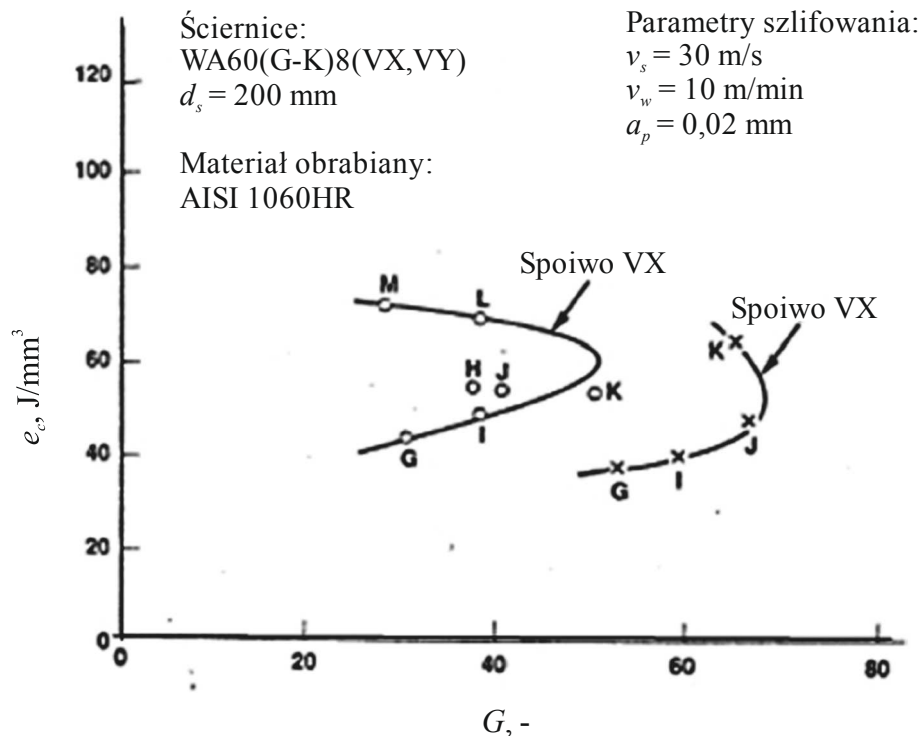


Rys. 2.16 Zmiana wartości wskaźnika szlifowania  $G$  w funkcji składowej stycznej siły szlifowania na ziarno ściernicy  $F_{t/g}$  [27]

Autorzy zalecają używanie ściernic z ziarnami cBN i ze spoiwem ceramicznym do szlifowania stopów niklu. Ponadto podają, że przy doborze ściernicy należy kierować się rodzajem



spoiwa oraz twardością ściernicy, która powinna być jak największa. Jednak wraz ze zwiększeniem twardości ściernicy zwiększa się wartość energii właściwej szlifowania na jednostkę objętości materiału  $e_c$ , która z reguły powinna być jak najmniejsza aby wyeliminować pojawienie się na powierzchni materiału obrabianego przypaleń szlifierskich (rys. 2.17).

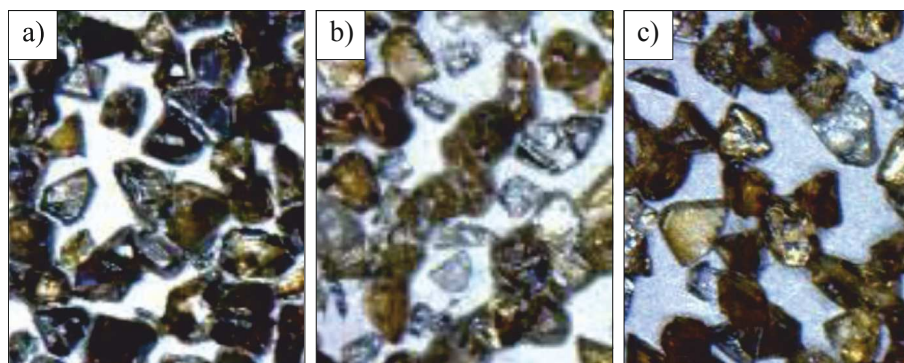


Rys. 2.17 Wartości energii szlifowania na jednostkę objętości materiału  $e_c$  w funkcji wartości wskaźnika szlifowania  $G$  w procesie szlifowania ściernicami z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z wykorzystaniem dwóch rodzajów spoiw (litery na rysunku odnoszą się do twardości ściernicy) [27]

Yao i inni [129] dokonali oceny wpływu różnych parametrów obróbkowych z wykorzystaniem różnych typów ściernic (ściernicy z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i ze spoiwem ceramicznym oraz ściernicy z ziarnami cBN i ze spoiwem żywicznym) na jakość powierzchni przedmiotu obrobionego, temperaturę oraz wartości siły szlifowania w procesie szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Po przeprowadzeniu badań najkorzystniejszą wartość parametru  $R_a$  chropowatości powierzchni obrobionej, wynoszącą  $0,112 \mu\text{m}$ , uzyskali stosując ściernicę z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zadając następujące wartości parametrów wejściowych:  $a_p = 0,005$  mm,  $v_w = 16$  m/min,  $v_s = 25$  m/s. Autorzy ci zauważyli również, że temperatura oraz składowe styczna  $F_t$  i normalna  $F_n$  siły szlifowania zwiększają się wraz ze zwiększaniem wartości prędkości przedmiotu obrabianego ( $v_w$ ) jak i głębokości szlifowania  $a_p$ , natomiast zwiększenie prędkości ściernicy  $v_s$  powoduje zmniejszenie wartości temperatury i siły w procesie szlifowania stopu niklu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

Celem pracy Caggiano i Teti [22] było określenie okresu trwałości trzech ściernic z ziarnami cBN i ze spoiwem galwanicznym, różniących się liczbą ziaren ściernych na powierzchni

ściernicy oraz optymalizacja procesu szlifowania CFG odlewów łopatek turbin samolotowych wykonanych ze stopu Renè 125. Trzy ściernice, o różnej zawartości ziaren z cBN (o wymiarze 181  $\mu\text{m}$ ) w objętości ściernicy, oznaczonych symbolami T0 (4,4  $\text{ct}/\text{cm}^3$  – ściernica referencyjna, stosowana w przemyśle), T1 (3,74  $\text{ct}/\text{cm}^3$ ) i T2 (3,08  $\text{ct}/\text{cm}^3$ ) – rys. 2.18, wykazały różny okres trwałości. Jako kryterium zakończenia okresu trwałości ściernicy przyjęto pojawienie się przypaleń lub mikropęknięć na powierzchni materiału obrobionego. Okres trwałości opisano jako liczba sztuk przeszlifowanych łopatek turbin, wykonanych ze stopu Renè 125, na ściernicę. Dla ściernicy T0 okres trwałości wynosił 41 szt./ściernicę, dla ściernicy T1 – 66 szt./ściernicę natomiast dla T2 – 50 szt./ściernicę. Mierzono również parametry chropowatości przedmiotów obrobionych, które przy szlifowaniu z wykorzystaniem wszystkich rodzajów narzędzi ściernych były akceptowalne. Największą trwałość wykazała ściernica T1, dlatego też użycie takiego narzędzia przy szlifowaniu łopatek turbin byłoby najkorzystniejsze, obniżyłoby koszty związane z obciążaniem narzędzia oraz koszty samego zakupu ściernic (mniejsza liczba sztuk ściernic). Należy również nadmienić, że okres trwałości dla ściernicy T2 był również dłuższy niż dla ściernicy stosowanej w przemyśle – T0. Biorąc pod uwagę fakt, że na koszt ściernicy w największym stopniu wpływa liczba ziaren cBN na jej CPS (mniejsza zawartość ziaren cBN obniża jej koszt) także ściernica T2 mogłaby okazać się dobrym wyborem przy szlifowaniu łopatek turbin samolotowych wykonanych ze stopu Renè 125.



Rys. 2.18 Widok CPS trzech ściernic z różnym udziałem ziaren cBN: a) ściernica T0; b) ściernica T1; c) ściernica T2 [22]

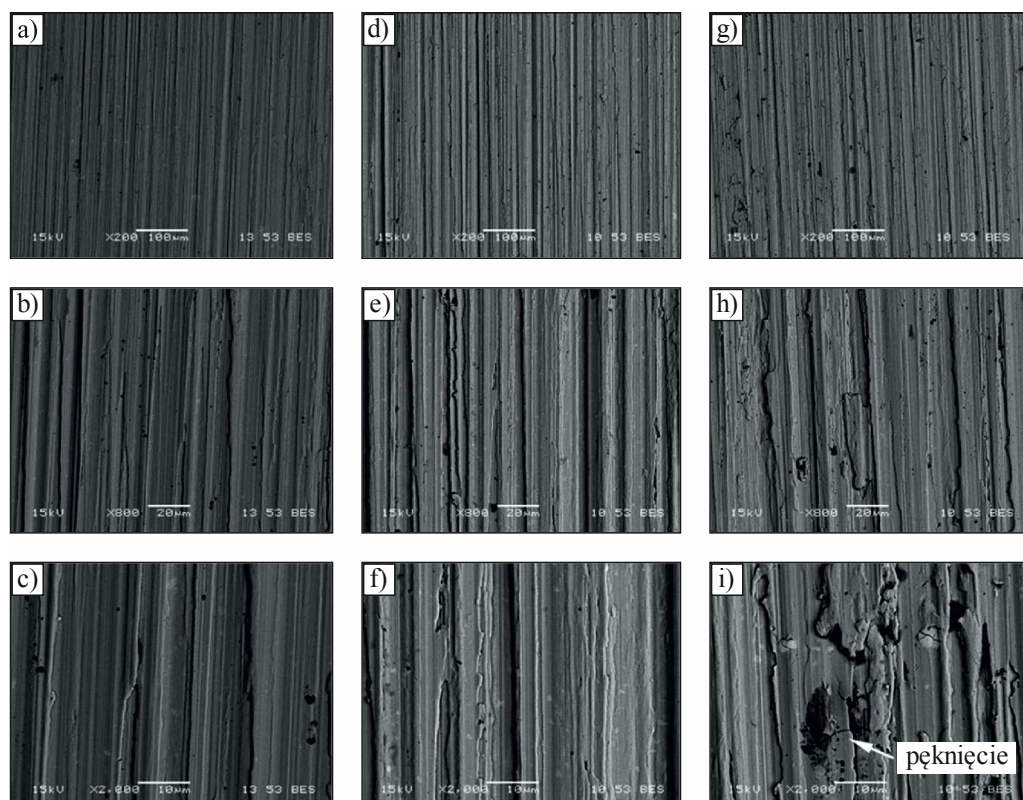
Zeng i inni [131] w swoim opracowaniu wyznaczyli najkorzystniejsze warunki szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych wykonanych ze stopu GH4169 (inna nazwa to Inconel<sup>®</sup> alloy 718). Wyniki badań odnieśli również do szlifowania powierzchni płaskich. Dobierając parametry obróbkowe posłużyli się metodą Taguchi. Do analizy wykorzystano ściernicę z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o numerze 80. Jako PSC użyto 5% emulsji O/W. W badaniach jako zmienne wejściowe wytypowano trzy parametry:  $v_s$ ,  $a_p$  i  $v_w$ . Zmiennymi wyjściowymi były chropowatość powierzchni obrobionej wyrażona parametrem  $R_a$ , rozkład naprężeń szczątkowych  $\sigma_{R0}$

oraz mikrotwardość  $HV$  powierzchni przedmiotu obrobionego. Oceniając istotność wybranych parametrów, przy doborze parametrów obróbkowych największy wpływ na parametry chropowatości powierzchni materiału obrobionego wykazano w przypadku posuwu osiowego  $a_p$  oraz prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$ . Jeżeli zmniejszy się wartość posuwu osiowego lub zwiększy się prędkość szlifowania, wtedy możliwe jest uzyskanie mniejszej wartości parametru  $Ra$  chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego. W przypadku szlifowania powierzchni płaskich, wraz ze zwiększaniem wartości  $a_p$  z 5 do 40  $\mu\text{m}$  zaobserwowano niemal trzykrotne pogorszenie się jakości powierzchni obrobionej wyrażonej parametrem  $Ra$  (zmiana wartości parametru z 0,284 na 0,896  $\mu\text{m}$ ). Analizując rozkład naprężeń szczątkowych powierzchni przedmiotu obrobionego, dla przyjętych warunków procesu szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718, autorzy wykazali, że mogą powstawać korzystne naprężenia ściskające, podczas gdy w przypadku szlifowania powierzchni płaskich powstają niekorzystne naprężenia rozciągające przy powierzchni materiału obrobionego [131]. Spowodowane jest to niską przewodnością cieplną stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 oraz niekorzystnymi warunkami kontaktu ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą w strefie szlifowania. Podczas szlifowania powierzchni płaskich mniej ciepła zostaje odebrane przez PCS ze strefy obróbki, co skutkuje zwiększeniem temperatury w strefie i powstaniem naprężeń rozciągających przy powierzchni materiału obrobionego. Przy dużych naddatkach obróbkowych  $a_p = 0,04$  mm może dochodzić również do powstawania mikropęknięć na powierzchni materiału obrobionego (rys. 2.19). Autorzy pracy [131] zauważyli również, że wysoka temperatura w strefie szlifowania przyczynia się do powstawania plastycznych deformacji powierzchni obrobionej, które mogą powodować kilka wariantów zmian mikrotwardości powierzchni przedmiotu obrobionego:

- jeżeli wierzchołki ziaren ściernych podczas szlifowania będą ostre oraz odpowiednia ilość PCS dotrze do strefy obróbki, a wydajność szlifowania będzie właściwie dobrana zaobserwuje się umacnianie mikrostruktury powierzchni;
- jeżeli nastąpi wypłaszczenie wierzchołków ziaren ściernych oraz wydajność szlifowania będzie zbyt duża, powstanie duża siła szlifowania i nastąpi zwiększenie temperatury w strefie obróbki – może to doprowadzić do odpuszczenia warstwy wierzchniej materiału obrobionego przy równoczesnym wystąpieniu efektu zimnego umacniania warstwy przy rdzeniu, skutkiem czego mikrotwardość przy powierzchni materiału obrobionego osiągnie mniejsze wartości od twardości rdzenia, natomiast w głąb osiągnie wartość większą, a następnie zrówna się z twardością rdzenia;



jeżeli zbyt mało PCS dotrze do strefy obróbki, temperatura w tej strefie gwałtownie wzrośnie – może to doprowadzić do przypaleń i odpuszczania warstwy przypowierzchniowej materiału obrabianego.



Rys. 2.19 Obrazy mikroskopowe SEM powierzchni przedmiotu obrobionego po procesie szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z prędkością ściernicy  $v_s = 25$  m/s i prędkością przedmiotu obrabianego  $v_w = 10$  m/min, przy zmiennych wartościach głębokości szlifowania  $a_p$ : a-c)  $a_p = 0,005$  mm; d-f)  $a_p = 0,025$  mm; g-h)  $a_p = 0,04$  mm [131]

Reasumując, korzystne naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych najczęściej uzyskiwane są przy zastosowaniu ściernic z ziarnami cBN i ziarnami diamentowymi. Wynika to z dużej przewodności cieplnej tych ziaren ściernych, która pozwala ograniczyć strumień ciepła wprowadzany do przedmiotu obrabianego. Jednak nawet stosowanie supertwardych ziaren ściernych nie zapewnia uzyskiwania wysokich wartości wskaźnika szlifowania  $G$ , przez co efektywność ekonomiczna ich stosowania jest niewielka z racji wysokich kosztów ściernicy.

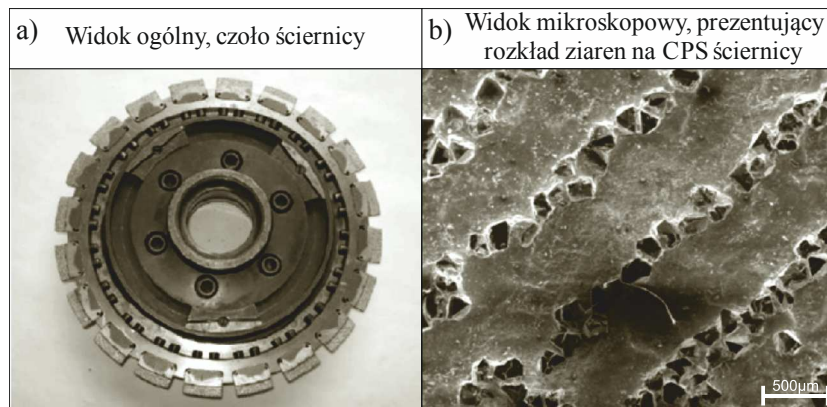
#### 2.2.4. Modyfikacje narzędzi ściernych oraz płynów chłodząco-smarujących i sposobów ich doprowadzenia stosowanych w procesach szlifowania stopów na bazie niklu

Na stabilność procesu szlifowania nadstopów niklu oraz powstawanie defektów szlifierskich w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych decydujący wpływ ma temperatura w strefie szlifowania. Jak wykazały analizy teoretyczne oraz badania doświadczalne opisane

w pracy [127], jednym ze sposobów zmniejszenia temperatury przedmiotu obrabianego są różnego rodzaju modyfikacje procesu szlifowania. Autorzy pracy [127] zastosowali ściernicę z nieciągłą powierzchnią czynną (ściernicę segmentową). Uzyskane wyniki badań wykazały, że zastosowanie w procesie szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu K417 ściernicy o zmodyfikowanej geometrii pozwala znacząco zwiększyć głębokość szlifowania (a tym samym wydajność procesu) przy zachowaniu temperatury przedmiotu poniżej 100°C.

Prabhu i Vinayagam [88] w celu zredukowania chropowatości powierzchni obrobionej w procesie szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Incoloy<sup>®</sup> alloy 600, zmodyfikowali skład płynu chłodząco-smarującego poprzez dodanie do oleju SAE 20W40 10% jednościennych nanorurek węglowych SWCNT (ang. *single-wall carbon nanotubes*). Charakteryzują się one średnicą rzędu 1 nm i długością, która może być kilka tysięcy razy większa. Strukturę przestrzenną takich nanorurek można przedstawić jako nawiniętą w formie bezszwowego cylindra warstwę grafenu o grubości pojedynczego atomu. Dzięki takiej budowie odznaczają się one unikalnymi cechami w porównaniu do odmian wielościennych MWCNT (ang. *multi-wall carbon nanotubes*), takimi jak właściwości elektryczne, które sprawiają, że SWCNT są doskonałymi przewodnikami. Przy zastosowaniu w procesie szlifowania oleju z dodatkiem SWCNT uzyskano od 6 do 24% zmniejszenie wartości parametru  $Ra$  zmierzonego na powierzchni obrobionej w porównaniu z wynikami obróbki z zastosowaniem oleju bez dodatku SWCNT.

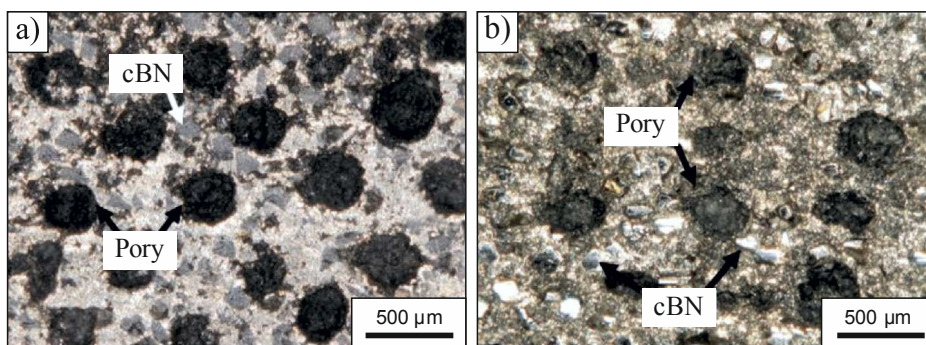
Natomiast w pracy [30] do szlifowania głębokiego z posuwem pełzającym rowków w stopie K424 zastosowano ściernicę segmentową ze spoiwem metalowym (rys. 2.20). Została ona dodatkowo zmodyfikowana poprzez nałożenie regularnych linii ziaren ściernych cBN na powierzchni czynnej. Wyniki badań wykazały, że przy obróbce stopu K424 energia właściwa szlifowania  $e_c$  wynosi 200-300 J/mm<sup>3</sup> 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<sup>®</sup> alloy 520 (130-160 J/mm<sup>3</sup>) i Inconel<sup>®</sup> alloy 713C (80-120 J/mm<sup>3</sup>). 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 szlifierskich. Powierzchnia obrobiona charakteryzowała się chropowatością wyrażoną parametrem  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$  i pozbawiona była przypaleń oraz mikropeknięć 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  $a_p = 0,2 \text{ mm}$ .



Rys. 2.20 Ściernica segmentowa z ziarnami cBN i spoiwem galwanicznym: a) widok od czoła ściernicy; b) ziarna z cBN rozłożone na czynnej powierzchni ściernicy [30]

Huddedar i inni [44] opisali kompleksowe badania wpływu prędkości posuwu osiowego, posuwu promieniowego, wielkości ziaren ściernych oraz typu PCS na siłę szlifowania (składowa styczna i normalna) i chropowatość powierzchni obrobionej w procesie szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> 718. W badaniach zastosowano ściernicę wykonaną z ziaren  $Al_2O_3$  o numerze 60, 120 i 220. Badano wpływ trzech odmian płynu chłodząco-smarującego: oleju kokosowego (CO), ciekłego azotu (LN) oraz oleju certyfikowanego przez SAE (ang. *Society of Automotive Engineers*) z dodatkiem grafitu (SG). Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wykazały, że spośród uwzględnionych czynników wejściowych, na uzyskaną chropowatość powierzchni obrobionej największy wpływ ma wielkość ziaren ściernych. Najniższe wartości składowych siły szlifowania oraz parametru  $Ra$  uzyskano przy zastosowaniu jako PCS oleju kokosowego. Natomiast zmiana parametrów kinematycznych procesu szlifowania powierzchni płaskich (prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i wartości posuwu promieniowego  $f_r$ ) w największym stopniu wpłynęła na zarejestrowane wartości składowych siły szlifowania.

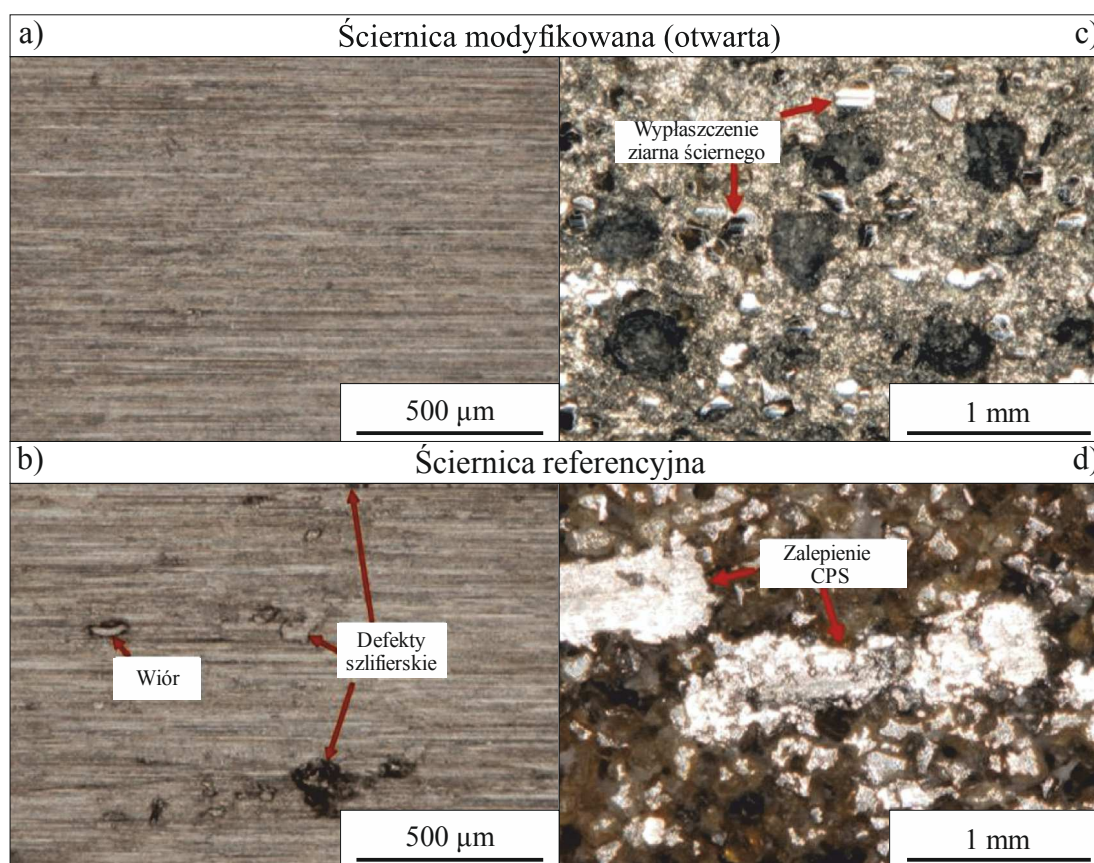
Z kolei Chen i inni [136] zaprojektowali wielkoporową ściernicę ze spoiwem ceramicznym. Ściernica ta zawierała 30% wolnych przestrzeni międzyziarnowych (WPM) o regularnym wzorze (rys. 2.21). Pory w ściernicy uzyskano przez zastosowanie pustych kulek ceramicznych o średnicy 0,5 mm, które otwierały się w procesie kondycjonowania narzędzia.



Rys. 2.21 Obrazy mikroskopowe CPS: a) po wyważeniu ściernicy; b) po kondycjonowaniu ściernicy [136]



Dokonując ocen obrazów mikroskopowych powierzchni przedmiotu obrobionego oraz czynnej powierzchni obu ściernic po procesie szlifowania realizowanego z następującymi parametrami:  $v_s = 80$  m/s,  $v_w = 2$  m/min i  $a_p = 20$   $\mu\text{m}$ , można stwierdzić, że na powierzchni materiału obrobionego po obróbce ściernicą o zwartej strukturze zauważalne były liczne defekty szlifierskie, takie jak mikropęknięcia czy deformacje plastyczne, które nie były obecne na powierzchni materiału obrobionego ściernicą modyfikowaną (rys. 2.22a i b). Wartości parametru chropowatości powierzchni obrobionej  $Ra$  przyjmowały wartości na zbliżonym poziomie, tj. 0,4  $\mu\text{m}$ . Analiza mikrostruktury geometrycznej CPS referencyjnej wykazała adhezję wiórów materiału obrobionego, natomiast w przypadku ściernicy zmodyfikowanej zaobserwowano jedynie drobne wypłaszczenia wierzchołków aktywnych ziaren ściernych (rys. 2.22c i d) [136].



Rys. 2.22 Obrazy mikroskopowe powierzchni przedmiotu obrobionego ściernicą modyfikowaną o strukturze otwartej (a) i referencyjną (b) oraz obrazy mikroskopowe CPS modyfikowanej (c) i referencyjnej (d) [136]

Porównując wartości składowych właściwej siły szlifowania  $F_t'$  i  $F_n'$ , zarejestrowane podczas procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z zastosowaniem ściernicy o strukturze otwartej i zwartej (ściernica referencyjna) dla różnych prędkości szlifowania  $v_s$  i różnych głębokości szlifowania  $a_p$ , autorzy zauważyli zmniejszenie wartości składowych właściwej siły szlifowania wraz ze zwiększeniem prędkości narzędzia oraz zwiększenie wartości składowych właściwej siły szlifowania wraz ze zwiększeniem głębokości szlifowania. Jednak w obu przypadkach wartości

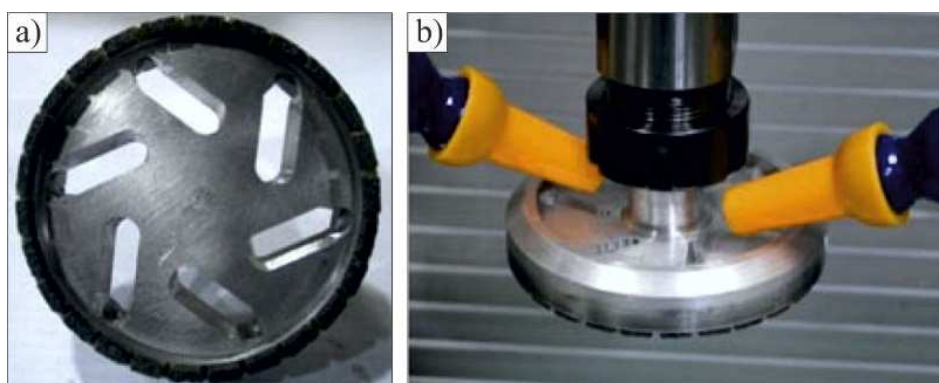
składowych właściwej siły szlifowania przy szlifowaniu ściernicą o otwartej strukturze przyjmowały najmniejsze wartości [136].

Jako płyny chłodząco-smarujące stosowane są najczęściej różnego rodzaju oleje, emulsje otrzymywane przez zmieszanie olejów z wodą, mikroemulsje, cieczy syntetyczne (otrzymywane na drodze chemicznej), pasty obróbkowe oraz gazy. Rola płynów obróbkowych w procesie szlifowania polega przede wszystkim na chłodzeniu narzędzia ściernego oraz przedmiotu obrabianego, a także na smarowaniu strefy kontaktu wierzchołków skrawających z materiałem obrabianym i wiórem. Ponadto płyny chłodząco-smarujące oczyszczają strefę obróbki z wiórów i innych produktów szlifowania oraz zabezpieczają powierzchnię materiału obrabianego przed korozją. Zaleca się stosowanie bezsiarkowych wodnych emulsji jako płynów chłodząco-smarujących w procesie szlifowania, ale to nie wystarcza aby skutecznie przeciwdziałać adhezji, która występuje podczas szlifowania stopów niklu [61,90].

Zastosowanie PCS nie zawsze prowadzi do uzyskania żądanych efektów, ponieważ istotne są również sposób i technika ich doprowadzenia do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym. Bardzo ważnym czynnikiem jest w tym kontekście dążenie do maksymalizacji ilości PCS trafiającego bezpośrednio do strefy szlifowania. Najczęściej stosowanym sposobem podawania PCS jest tzw. metoda zalewowa, polegająca na kierowaniu strugi płynu chłodząco-smarującego, pod niewielkim ciśnieniem ale z dużym wydatkiem, w bezpośrednie sąsiedztwo strefy szlifowania [60,90,125]. Metoda zalewowa nie zawsze zapewnia równomiernego podawania PCS. Na przykład, w przypadku szlifowania otworów skuteczność podawania PCS zmniejsza się wraz z przesuwaniem się ściernicy w głąb otworu. Ponadto tylko niewielka część płynu trafia do strefy obróbki, co powoduje, że stopień wykorzystania właściwości PCS jest niewielki. Istnieje wiele bardziej skutecznych metod podawania chłodziwa do strefy szlifowania. W 1994 Webster zaproponował stosowanie różnego rodzaju dysz czyszczących. Między innymi były to dysze trzewikowe, inżektorowe, dwustrumieniowe, iglicowe etc. [65,121,122]. Z jego wyników wynika, że ustawienie (kąt pod jakim PCS z dyszy podawany jest w strefę obróbki) dysz ma tylko niewielki wpływ na wydajność chłodzenia, o ile przepływ PCS skierowany jest do strefy szlifowania. Wydajność chłodzenia, natomiast zależy od odległości dysz od strefy szlifowania, zwłaszcza w dyszach strumieniowo-ciśnieniowych. W związku z tym, dysze powinny być umieszczone jak najbliżej przedmiotu obrabianego [26]. Jednak wyniki jego prac nie odnosiły się do szlifowania stopów niklu ale były inspiracją do podjęcia takich prób przez innych autorów.

Li [54] w swoim opracowaniu przedstawił wyniki badań procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z użyciem garnkowej ściernicy segmentowej ze spoiwem galwanicznym i nasypem ściernym z ziarnami cBN. Zaproponował on nowy rodzaj

podawania PCS do strefy obróbki, tzw. chłodzenie wewnętrzne (odśrodkowe), przez co możliwe było zwiększenie efektywności podawania PCS. Płyn chłodziąco-smarujący podawany był z wydatkiem  $33,33 \text{ dm}^3/\text{min}$  i ciśnieniem  $0,5 \text{ MPa}$  przez specjalnie wyprofilowane otwory w korpusie ściernicy (rys. 2.23). Dzięki sile odśrodkowej PCS trafia do strefy obróbki, chłodząc ją, a następnie zostaje odprowadzany na zewnątrz, zabierając wióry i wykruszony materiał ścierny przez szczeliny między segmentami ściernymi. Wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych z użyciem ściernicy modyfikowanej porównano do wyników procesu szlifowania realizowanego z użyciem tradycyjnego chłodzenia zalewowego. Do chłodzenia zastosowano dwa typy PCS: emulsję O/W oraz czysty olej. Przedstawione rozwiązanie pozwoliło na zmniejszenie temperatury w strefie obróbki o około 40% a tym samym niemal dwukrotne zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia przypaleń szlifierskich na powierzchni materiału obrabianego. Stosując takie rozwiązanie możliwe jest obniżenie wartości siły szlifowania o około 20%. Dodatkowo zastosowanie odśrodkowego (wewnętrznego) podawania PCS pozwala na ponadtrzykrotne zwiększenie wartości wskaźnika szlifowania  $G$ . Opisane badania Li [54] tym samym potwierdzają wyniki uzyskane przez Liu i innych [56] wykazując, że w przypadku szlifowania ściernicami z ziarnami cBN korzystne jest użycie oleju jako medium chłodzącego. Wskaźnik szlifowania  $G$ , stosując klasyczną metodę chłodzenia olejem, utrzymywał się na poziomie 62,37, natomiast wykorzystując chłodzenie wewnętrzne zwiększyła się jego wartość do 187,12.



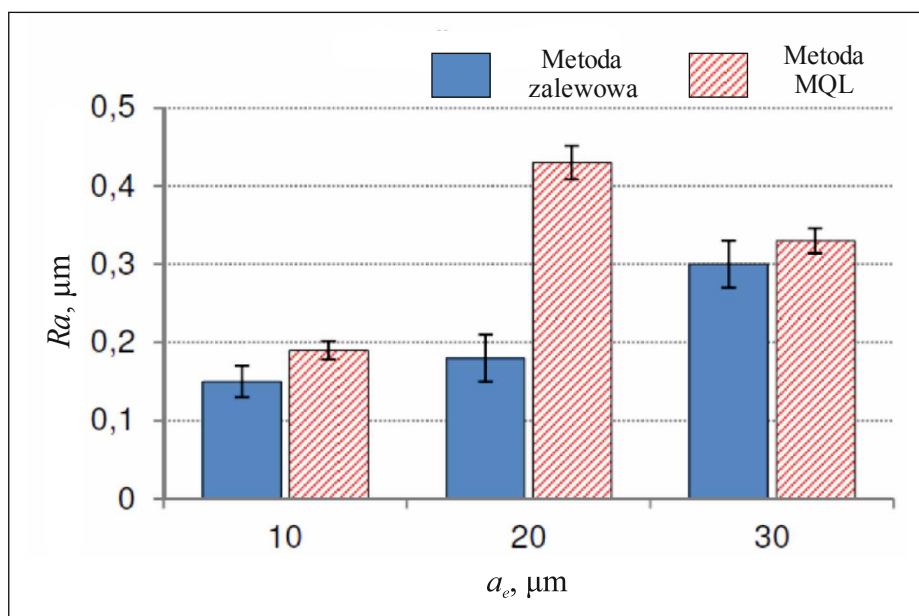
Rys. 2.23 Widok ogólny garnkowej ściernicy segmentowej ze spoiwem ceramicznym i z ziarnami cBN, w korpusie której ukształtowano otwory do chłodzenia odśrodkowego: a) widok od czoła ściernicy; b) widok ściernicy przymocowanej do trzpienia wrzeciona szlifierskiego [54]

Podczas szlifowania tylko część ziaren aktywnie szlifuje materiał, podczas gdy inne ziarna trą o powierzchnię obrabianą generując znaczne ilości ciepła. Tak więc ilość wytwarzanego ciepła w strefie kontaktu wywołana tarcie zależy od kąta nachylenia ziaren ściernych na CPS oraz długości kontaktu w procesie szlifowania [111]. Powierzchnia przedmiotu obrabianego podczas szlifowania na sucho lub gdy metoda zalewowa jest mało efektywna jest bardziej narażona przez połączone działanie temperatury oraz sił mechanicznych. Skutkiem takiego

działania jest powstawanie takich defektów jak defekty termiczne oraz niedokładności wymiarowe. Im mniejsza siła tarcia, tym mniejsza temperatura w strefie szlifowania, która może być zredukowana przez właściwe zastosowanie środka smarnego (w tym przypadku PCS) pod odpowiednim ciśnieniem  $p$  i z odpowiednim wydatkiem  $Q$ . W takim przypadku alternatywą metody zalewowej jest doprowadzenie PCS do strefy obróbki w postaci mgły olejowej, tzw. metoda MQL (ang. *minimum quantity lubrication*). Metoda MQL jest techniką, w której zamiast stosowania samej cieczy obróbkowej, stosuje się jej mieszaninę z powietrzem (aerozol). Taką mieszaninę wtryskuje się bezpośrednio w strefę obróbki. To powoduje, że zapotrzebowanie na ciecz chłodząco-smarującą jest wielokrotnie niższe w porównaniu z konwencjonalnym szlifowaniem przy uzyskiwaniu podobnych rezultatów. Ponadto, mniejsze zapotrzebowanie na PCS przekłada się na zmniejszenie kosztów operacyjnych oraz kosztów związanych z utylizacją zużytych PCS, a to z kolei wpływa proekologicznie na środowisko [8]. Badania Tawakoli i innych [112] wykazały znaczne polepszenie jakości powierzchni obrabianej stali hartowanej przy zastosowaniu techniki MQL w porównaniu do szlifowania na sucho. Dodatkowo Barczak i inni [11,12] wykazali, że przy odpowiednich warunkach metoda MQL może konkurować z metodą zalewową. Przy stosowaniu MQL podczas szlifowania twardych materiałów obserwuje się zmniejszenie siły szlifowania, wartości temperatury oraz poprawę parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego w porównaniu z metodą zalewową. Bardzo obszerna literatura dotycząca szlifowania MQL skupia się najczęściej na szlifowaniu stali, tylko nieliczne publikacje dotyczą szlifowania stopów niklu [10,13,55,118,133,134,135].

Z kolei Da Silva i inni [28] piszą, że metoda zalewowa jest bardziej efektywna niż metoda MQL pod względem uzyskiwanej jakości powierzchni obrabianej (uzyskuje się niższe wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażone parametrem  $Ra$ ) podczas szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicą z  $Al_2O_3$  przy głębokościach szlifowania  $a_e = 0,03$  mm (rys. 2.24).

Na efekt obróbki ścierniej w dużym stopniu mogą również wpływać substancje celowo wprowadzane do strefy obróbki i stanowiące integralny składnik narzędzia ściernego. Substancje niebędące ziarnem ściernym, ani spoiwem łączącym ścierniwo w narzędzie ściernie mogą pełnić rolę środka antyadhezyjnego czy wzmacniającego ściernice w celu zmniejszenia zużycia krawędziowego lub stałego smaru (ang. *solid lubricant*) powodując dodatkowy efekt smarowania [24,33,36,40,46-48,62,108,110,123]. Substancje te mogą być wprowadzane do narzędzi ściernych na przykład w postaci wypełniaczy. Opisaną modyfikację najczęściej stosuje się przy produkcji ściernic ze spoiwem żywicznym, ponieważ temperatura sieciowania spoiwa jest stosunkowo niewielka (ok. 200-250°C), co nie grozi rozkładem termicznym wypełniacza.



Rys. 2.24 Wartości parametru chropowatości  $Ra$  podczas szlifowania stopu Inconel® alloy 718 z użyciem konwencjonalnej metody zalewowej oraz metody MQL przy różnych głębokościach  $a_e$  szlifowania [28]

W przypadku ściernic o spoiwie ceramicznym taki zabieg jest utrudniony, ponieważ temperatura ich spiekania sięga  $1200^{\circ}\text{C}$ , a więc rozkład środków o właściwościach smarnych i/lub antyadhezyjnych nastąpiłby już podczas spiekania. W takim wypadku stosuje się impregnację ściernic poprzez wprowadzenie specjalnych substancji w pory gotowych narzędzi ściernych. Operacje takie mogą przeprowadzać producenci narzędzi jak też ich użytkownicy w zależności od potrzeb. Są to najczęściej substancje nieorganiczne lub mieszane. Tego typu zabieg jest więc bardziej uniwersalny w porównaniu ze stosowaniem różnego rodzaju wypełniaczy o właściwościach smarnych i/lub antyadhezyjnych [123].

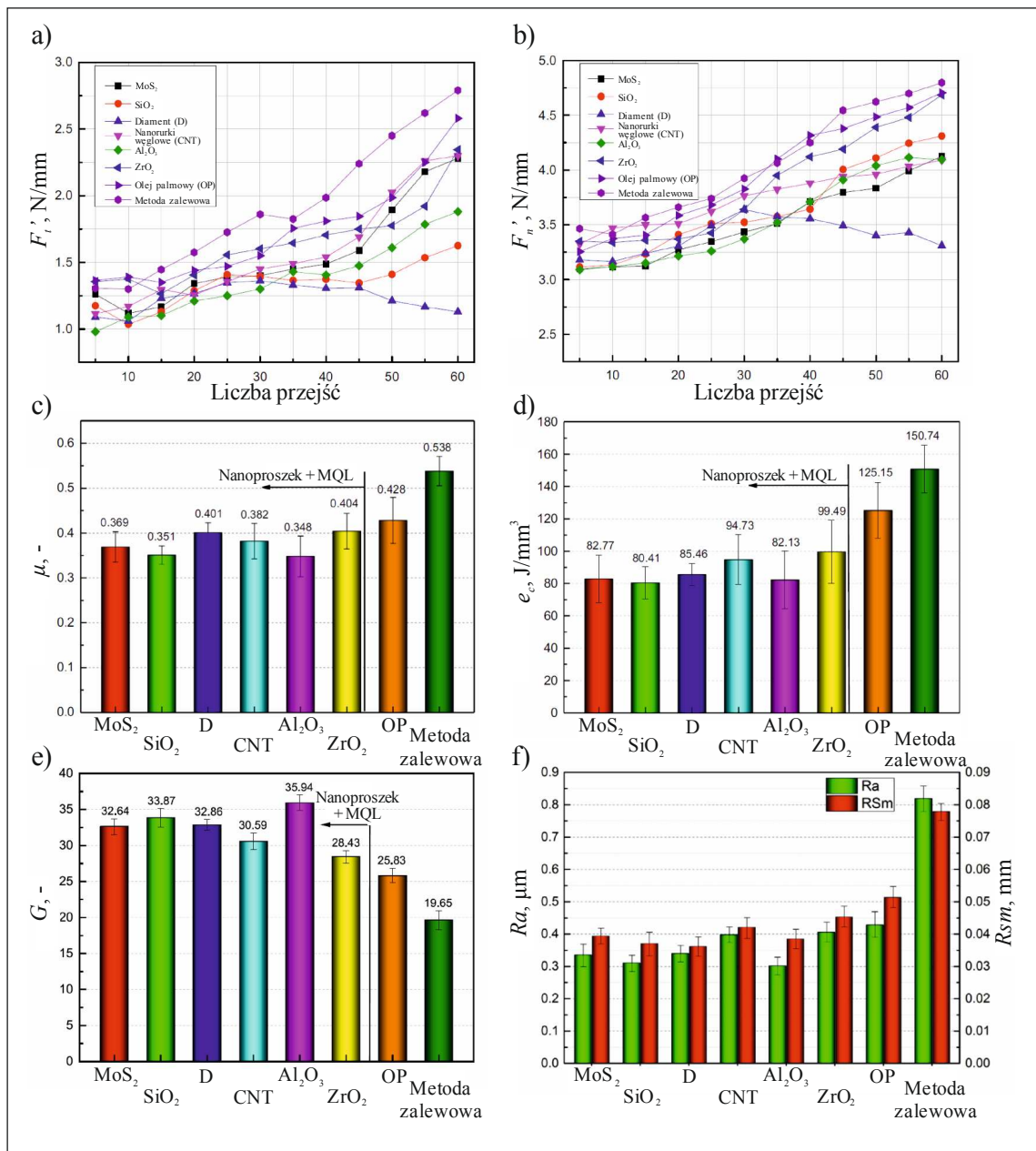
Jeden z kierunków prac dotyczących możliwości modyfikacji ściernic przez użycie środka smarnego jako wypełniacza przy produkcji ściernic reprezentują prace Pavana i innych [83,84]. Zaproponowali oni w swoich opracowaniach wykorzystanie nanopłytek grafenu jako suchego smaru w postaci wypełniacza w procesie technologicznym wywarzania ściernicy do obróbki stopu Inconel® alloy 718. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zawartość nanopłytek grafenu w ściernicy z ziarnami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ze spoiwem żywicznym może znacząco poprawić parametry chropowatości powierzchni obrobionej, przy czym same właściwości fizyczne i wielkość ziaren nanopłytek grafenowych również odgrywają znaczącą rolę w uzyskaniu żądanych wartości parametrów chropowatości [83,84].

Podczas szlifowania ściernicami zawierającymi nanopłytki grafenu wykazano ich korzystny wpływ na efektywność procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718. Zaobserwowano zmniejszenie wartości współczynnika tarcia  $\mu$  oraz ko-



rzystny wpływ na wartości wskaźnika szlifowania  $G$  i wartości parametru chropowatości powierzchni obrobionej  $Ra$ . Najlepszą efektywność obróbki podczas szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 można osiągnąć stosując ściernicę zawierającą 2% wag. grafenu [84].

W ostatnich latach ukazało się kilka prac zespołu Li C. [118,133,134,135] przedstawiających nowy rodzaj obróbki hybrydowej stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Badacze ci przedstawili metodę MQL, w której użyli nowego rodzaju PCS. Jako PCS użyli zawiesiny nanoproszków w oleju i tak spreparowany nanopłyn (ang. *nanofluid*) podawali do strefy szlifowania przez dyszę MQL. W publikacji [118] dokonano analizy porównawczej sześciu nanoproszków (siarczek molibdenu IV, tlenek krzemu, diament, nanorurki węglowe, tlenek glinu, tlenek cyrkonu IV) o koncentracji 6% wag. w czystym oleju palmowym jako PCS na efektywność procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Jako kryterium oceny efektywności wyznaczono wartości składowych  $F_t'$  i  $F_n'$  właściwej siły szlifowania, które mierzono co 5 przejść obróbkowych. Kolejne kryteria oceny efektywności procesu szlifowania jakie wyznaczono to wartości współczynników tarcia  $\mu$  z równania Bowden'a i Tabor'a [21], wartości energii właściwej szlifowania  $e_c$ , wartości wskaźnika szlifowania  $G$ , wartości chropowatości powierzchni materiału obrobionego wyrażone parametrami  $Ra$  i  $Rsm$ . Wartości te mierzono po 60 przejściach obróbkowych. Nanopłyn podawano do strefy obróbki za pomocą dyszy MQL z wydatkiem 50 cm<sup>3</sup>/h. Wyniki doświadczeń zostały odniesione do wyników uzyskanych przy „tradycyjnej” metodzie MQL (czysty olej palmowy) z takim samym wydatkiem PCS oraz do wyników uzyskanych metodą zalewową z wydatkiem  $Q_{PCS} = 60$  dm<sup>3</sup>/h (w metodzie zalewowej wykorzystano 5% emulsję O/W). W wyniku przeprowadzonej analizy metoda zalewowa okazała się najmniej efektywną pod każdym względem (rys. 2.25). Podczas szlifowania z wykorzystaniem czystego oleju palmowego jako PCS metodą MQL uzyskano lepszą jakość powierzchni w porównaniu do metody zalewowej (rys. 2.25f). Obecność dodatkowych substancji w PCS jako nanopłynów wpłynęła znacząco korzystnie na efektywność procesu w porównaniu do wyników uzyskanych podczas chłodzenia tradycyjną metodą MQL. Badania potwierdziły, że dodatek nanoproszków do PCS może istotnie wpłynąć na właściwości smarujące PCS co może przełożyć się na obniżenie wartości składowych  $F_t'$  i  $F_n'$  właściwej siły szlifowania (rys. 2.25a i b), zredukować tarcie w strefie szlifowania (rys. 2.25c), zmniejszyć zapotrzebowanie energetyczne do usunięcia jednostkowej objętości materiału obrabianego (rys. 2.25d). Dodatek nanoproszków do PCS może również przyczynić się do mniejszego zużycia narzędzia ściernego (rys. 2.25e) oraz poprawy jakości powierzchni obrobionej (rys. 2.25f).

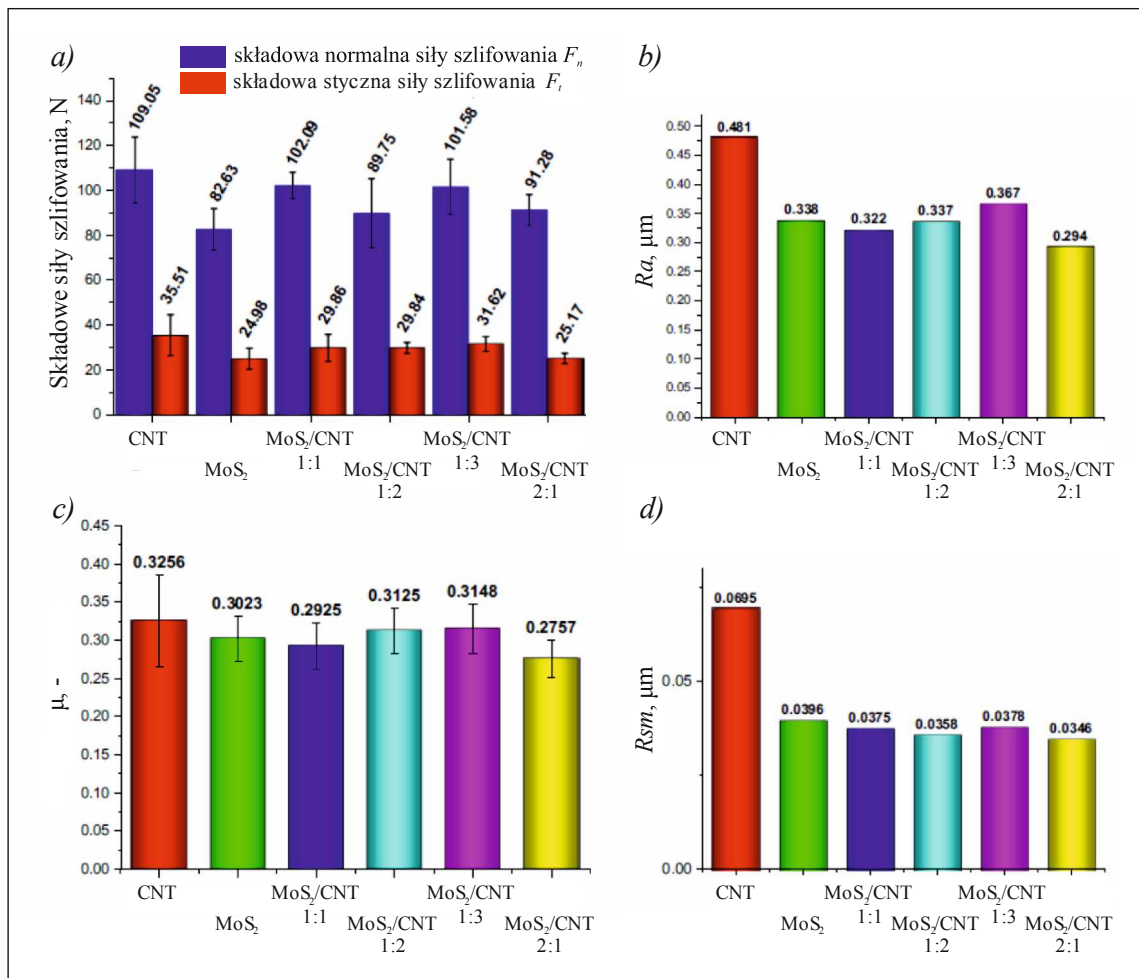


Rys. 2.25 Ocena efektywności procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 w zależności od rodzaju nanoproszków zawieszonych w PCS: a i b) porównanie składowych  $F_t'$  i  $F_n'$  właściwej siły szlifowania; c) porównanie wartości współczynników tarcia  $\mu$ ; d) porównanie wartości energii właściwej szlifowania  $e_c$ ; e) porównanie wartości wskaźników szlifowania  $G$ ; f) porównanie chropowatości materiału obrobionego wyrażone parametrami  $Ra$  i  $Rsm$  [118]

Dodatek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w postaci nanoproszku wykazał największą zdolność do obniżenia współczynnika tarcia  $\mu$  oraz energii właściwej szlifowania  $e_c$  w procesie szlifowania stopu niklu. W największym stopniu przyczynił się do zmniejszenia zużycia ściernicy ( $G = 35,94$ ) oraz do uzyskania najlepszej jakości powierzchni obrobionej. Proszek diamentowy przyczynił się do uzyskania dobrej jakości powierzchni obrobionej ( $Ra = 0,34 \mu$ m) wykazał jednak wysoki współczynnik tarcia ( $\mu = 0,401$ ). Autorzy tłumaczą to różnicą właściwości fizycznych nanopły-

nów diamentowych w porównaniu do innych nanopłynów. Autorzy uszeregowali sześć nanoproszków według wzrastającego potencjału do wykorzystania jako nanopłyny w obróbce ścierniej:  $ZrO_2 < \text{nanorurki węgłowe} < \text{diament} < MoS_2 < SiO_2 < Al_2O_3$ .

W artykule [134] został przedstawiony wpływ mieszaniny dwóch nanoproszków (nanoproszek dwusiarczku molibdenu –  $MoS_2$  o dobrych właściwościach smarnych oraz nanoproszek nanorurek węglowych CNT – ang. *carbon nanotube* – o dużym współczynniku przewodzenia ciepła) jako dodatków do płynu MQL (syntetyczne kwasy tłuszczowe) na przebieg procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 – rys. 2.26.



Rys. 2.26 Ocena efektywności procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 w zależności od proporcji nanoproszków zawieszonych w PCS: a) porównanie składowych  $F_t$  i  $F_n$  siły szlifowania; b) porównanie wartości parametru  $Ra$  materiału obrobionego; c) porównanie współczynników tarcia  $\mu$ ; d) porównanie wartości parametru  $Rsm$  materiału obrobionego  $Rsm$  [134]

Przyjęto pięć wielkości jako kryteria oceny efektywności procesu szlifowania w zależności od proporcji nanoproszków zawieszonych w PCS: porównanie składowych  $F_t$  i  $F_n$  siły szlifowania (rys. 2.26a); porównanie współczynników tarcia  $\mu$  (rys. 2.26c) oraz porównanie wartości parametrów chropowatości materiału obrobionego  $Ra$  i  $Rsm$  (rys. 2.26b i d). Wykazano

lepszą efektywność procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 w przypadku, gdzie do procesu użyto mieszaniny nanoproszków z MoS<sub>2</sub> i CNT jako PCS w porównaniu do procesu, w którym wykorzystano te nanoproszki osobno. Optymalna proporcja mieszaniny MoS<sub>2</sub>/CNT powinna wynosić 2:1, natomiast jej stężenie w PCS powinno wynosić 6% wag. Dla mieszaniny MoS<sub>2</sub>/CNT użytych w proporcji 1:1, jej stężenie w PCS powinno wynosić 8% wag [133]. Zhang i inni podobne wyniki uzyskali stosując mieszaninę nanoproszków Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC, również najlepszą efektywność udało się uzyskać stosując mieszaninę Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC w proporcji 2:1, przy 6% koncentracji składników [135].

Sinha i inni [100] przedstawili bardziej proekologiczny sposób wykorzystania nanoproszków jako nanopłynów używanych w metodzie MQL. W badaniach jako PCS zaproponowali wodę destylowaną z dodatkiem detergentu oraz nanoproszek srebra (Ag) i tlenek cynku II (ZnO) jako substancje redukujące adhezję materiału obrabianego do CPS. Wyniki procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z wykorzystaniem dyspersji wodnych nanoproszków jako PCS w metodzie MQL odnieśli do procesu szlifowania na sucho. Analiza EDS czynnej powierzchni ściernic po szlifowaniu potwierdziła słuszność wysuniętej hipotezy. W przypadku szlifowania na sucho dochodzi do mikropęknięć na powierzchni obrabianej, znacznego utleniania powierzchni materiału obrabianego oraz ponownego osadzania się zeszlifowanego materiału na jego powierzchni. W przypadku zastosowania dyspersji wodnej srebra lub tlenku cynku II obserwuje się niemal całkowite wyeliminowanie tych niekorzystnych zjawisk.

### 2.2.5. Obróbka hybrydowa

Jednym z kierunków badań nad doskonaleniem procesów szlifowania nadstopów niklu jest prowadzenie obróbki hybrydowej, łączącej kilka technik obróbkowych. Przykładem takiego podejścia jest praca [6] przedstawiająca możliwości zastosowania procesu elektroerozyjnego szlifowania EDM (ang. *electrical discharge machining*) w połączeniu z obróbką wysoko wydajną HSM (ang. *high speed machining*) podczas szlifowania wgłębnej powierzchni płaskich i kształtowych w stopach Inconel<sup>®</sup> alloy 718 i Udimet<sup>®</sup> alloy 720 z użyciem małogabarytowej ( $d_s = 15$  mm) galwanicznej ściernicy trzpieniowej. Badania wykazały, że możliwe jest uzyskanie w takiej obróbce wartości ubytku materiału  $V_w = 120$  cm<sup>3</sup> i chropowatości rzędu  $Ra = 1,2$  μm dla stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

W pracy [25] zastosowano inny typ obróbki hybrydowej – szlifowanie elektrochemiczne ECM (ang. *electrochemical machining*) powierzchni płaskich i kształtowych wykonanych ze

stopu Udimet<sup>®</sup> alloy 720 z użyciem małogabarytowych ( $d_s = 10-15$  mm) ściernic trzpieniowych z ziarnami diamentowymi i z cBN. W badaniach porównano ściernice ze spoiwem żywicznym, metalowym (brąz) i galwanicznym (Typ A i B). Najkorzystniejsze rezultaty procesu szlifowania elektro-chemicznego uzyskano przy zastosowaniu ściernicy ze spoiwem żywicznym, jednak przy największym zużyciu ściernicy. Spośród pozostałych narzędzi najlepsze rezultaty uzyskano ściernicami galwanicznymi, przy czym wykazano duże znaczenie wielkości ziarna i związanych z nią objętości przestrzeni międzyziarnowych na stabilność procesu ECM. Spośród porównywanych gatunków ziaren ściernych korzystniejsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu ziaren cBN, dla których uzyskano najwyższe wartości wskaźnika szlifowania  $G$ , jednak zaobserwowano również umiarkowaną utratę ścierniwa z powierzchni ściernicy. W przypadku ściernic z ziarnami diamentowymi wystąpiło znaczne wygładzenie wierzchołków aktywnych ziaren ściernych.

W pracy [14,15] opisano wyniki badań procesu szlifowania z posuwem pełzającym stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 wspomaganego drganiami o częstotliwości ultradźwięków. Zastosowano stół wibrujący z częstotliwością  $\sim 20$  kHz, w którym wibracje w kierunku wzdłużnym, wzbudzone były przy pomocy piezoelektrycznego systemu przetwornik-generator o mocy 1 kW. Przy wspomaganiu szlifowania drganiami o częstotliwości ultradźwięków uzyskano znaczące zmniejszenie wartości składowych normalnej  $F_n$  i stycznej  $F_t$  siły szlifowania w zakresie 23-43%, ograniczenie zużycia promieniowego ściernicy, zwiększenie wartości wskaźnika szlifowania  $G$  w zakresie od 7 do 45% oraz zmniejszenie wartości parametru  $Sa$  opisującego chropowatość powierzchni obrobionej nawet o 45%. Analiza obrazów mikroskopowych SEM powierzchni obrobionej wykazała większy udział poślizgów bocznych oraz pokrywanie śladów obróbkowych przy zastosowaniu wibracji. Pomiary mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy wykazały, że stosowanie szlifowania wspomaganego ultradźwiękami wpływa również na zwiększenie liczby aktywnych wierzchołków skrawających ściernicy [14,15].

Również badania Abdullaha i innych [1] wykazały, że w szlifowaniu powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 738LC wspomaganym drganiami wzdłużnymi o częstotliwości ultradźwięków (w tym przypadku częstotliwość drgań wynosiła  $f = 25$  kHz) możliwe jest znaczące zredukowanie wartości składowych normalnej  $F_n$  i stycznej  $F_t$  siły szlifowania. W badaniach uzyskano zmniejszenie o 27% wartości składowej normalnej siły szlifowania  $F_n$  i o 22% wartości składowej stycznej  $F_t$ , w porównaniu do procesu bez wibracji. Przeprowadzone analizy wykazały również, że zastosowanie drgań o częstotliwości ultradźwięków pozwala na zmniejszenie ryzyka wystąpienia defektów cieplnych na powierzchni obrobionej, nawet w przypadku szlifowania na sucho.

Batako i Tsiakoumis [13] przedstawili wyniki badań doświadczalnych procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z wykorzystaniem drgań mechanicznych (wibracji) w połączeniu z metodą MQL. W tym celu opracowali specjalny piezoelektryczny uchwyt szlifierski do szlifowania powierzchni płaskich, który podczas szlifowania wprowadzał w rezonans materiał obrabiany z częstotliwością 275 Hz. Chłodzenie metodą MQL z wydatkiem płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS} = 30 \text{ cm}^3/\text{h}$  wspomagane oscylacjami pozwoliło tylko nieznacznie obniżyć wartości siły szlifowania wyrażone składowymi  $F_t$  i  $F_n$  dla głębokości szlifowania  $a_e$  w zakresie 15 do 25  $\mu\text{m}$  w stosunku do szlifowania bez oscylacji. Przy szlifowaniu z głębokościami 30  $\mu\text{m}$  i więcej obserwuje się odwrócenie tendencji. Autorzy tłumaczą ten fakt, przy szlifowaniu z głębokościami powyżej 30  $\mu\text{m}$  bez oscylacji, występowaniem odkształconych plastycznie fragmentów/obszarów powierzchni obrabianej pojawiających się przy podwyższonych temperaturach, najczęściej w środkowej części materiału obrabianego. Natomiast szlifowanie z wibracjami zapobiegło powstaniu deformacji plastycznych. Stosowanie tego typu obróbki hybrydowej pozwoliło również na zwiększenie efektywności obróbki wyrażonej przez parametr  $Ra$ .

#### **2.2.6. Monitorowanie i diagnostyka procesu szlifowania nadstopów niklu**

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 są prace Liu i innych [58,57], w których przedstawiono możliwości identyfikacji powstawania przypaleń szlifierskich w procesie szlifowania stopu CSMX-4 z użyciem sygnału emisji akustycznej AE (ang. *acoustic emission*). Wyniki badań wykazały, że istotne cechy sygnału AE mogą być ekstrahowane za pomocą pakietowej transformaty falkowej, bazującej na analizie częstotliwości w domenie czasu. Na podstawie doświadczeń określono, że rozkład energii sygnałów AE 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 AE w celu wykrywania przypaleń szlifierskich w trakcie szlifowania nadstopów niklu.

#### **2.3. Impregnacja narzędzi ściernych substancjami antyadhezyjnymi w procesach szlifowania**

Impregnacja ściernicy to proces polegający na wprowadzeniu do CPS lub w przestrzenie międzyziarnowe gotowego narzędzia ściernego dodatkowych substancji mających najczęściej za zadanie obniżenie wytrzymałości powierzchni obrabianej (chemiczne rozdzielanie świeżo obna-

zonej powierzchni obrabianej od wiórów i powierzchni narzędzia na drodze jej utlenienia i wprowadzenia warstw ochronnych; chemiczne trawienie powierzchni obrabianej prowadzące do zmniejszenia oporów skrawania), co zwiększa efektywność obróbki. Jako impregnaty stosowane są również substancje, których celem jest obniżenie temperatury w strefie skrawania ściernego (zmniejszenie tarcia pomiędzy materiałem ściernym i materiałem obrabianym poprzez powstawanie filmów smarujących oraz przebiegu reakcji endotermicznych), jak i zapobiegające adhezji wiórów do powierzchni obrabianej i materiału ściernego. Do procesu impregnacji najczęściej wybiera się substancje nieorganiczne lub mieszane. Według charakteru oddziaływania na proces obróbki ścierniej impregnaty można podzielić na następujące grupy [63,123,124] :

- bierne chemiczne (węglowodory, żywice itp.),
- powierzchniowo-czynne (detergenty, mydła itp.),
- aktywne korozyjne (elektrolity),
- aktywne chemicznie (tworzące związki chemiczne np. z siarką).

### **2.3.1. Metody impregnacji narzędzi ściernych**

Coraz trudniejsze zadania stawiane współczesnym narzędziom ściernym wymuszają poszukiwania coraz doskonalszych materiałów ściernych, jak i stałe udoskonalanie już istniejących. Na stabilność procesu szlifowania oraz powstawanie defektów szlifierskich w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych decydujący wpływ ma temperatura w strefie szlifowania [16,61,127]. Na efekt obróbki ścierniej w dużym stopniu mogą wpływać substancje celowo wprowadzane do strefy obróbki np. w postaci stałych smarów lub środków antyadhezyjnych jak grafit, disiarczek molibdenu, heksagonalny azotek boru (hBN) czy teflon (PTFE). Sproszkowany stały smar można wprowadzić do czynnej powierzchni ściernicy (CPS) jako zawiesinę lub w postaci pasty wraz z płynem chłodząco-smarującym (PCS) przez specjalne dysze [5,45,79,93,94,96]. Chociaż dzięki tej metodzie uzyskuje się znaczne zmniejszenie siły szlifowania, to jej głównym ograniczeniem jest nieskuteczne usuwanie pasty wraz z wiórami z CPS, co może doprowadzić do powstawania zalepień. Stałe sproszkowane smary również mogą być wprowadzane do narzędzi ściernych w postaci wypełniaczy stanowiących integralny składnik narzędzia ściernego, niebędące ziarnem ściernym, ani spoiwem łączącym ścierniwo w narzędziu [92,95,115]. Opisaną modyfikację najczęściej stosuje się przy produkcji ściernic ze spoiwem żywicznym, w przypadku ściernic o spoiwie ceramicznym stosuje się impregnację ściernic przez wprowadzenie stopionego impregnatu do CPS lub stosowanie sproszkowanych stałych smarów.

W ostatnich latach wśród autorów publikacji uwidacznia się nowy trend stosowania substancji antyadhezyjnych czy proszków smarnych tj. użycie ich w postaci zawiesiny z dodatkiem

emulgatorów a następnie wykorzystanie spreparowanej dyspersji jako PCS w metodzie MQL. Jako fazy rozpraszającej można użyć zarówno oleje, emulsje wodne jak również wodę destylowaną [49,97,100,101,118,133,134,135].

Znane są prace dotyczące zmniejszenia adhezji materiału obrabianego do ściernic przez impregnację ściernic dodatkowymi substancjami w przemyśle przez użytkowników narzędzi (ang. *treatment*). Nie jest to nowa metoda udoskonalania narzędzi ściernych (o impregnacji siarką pisał już w 1927 roku Miner L. Hartmann [40]) ale stosowana jest do dziś. W przemyśle obróbczym stali wysokogatunkowych przy produkcji łożysk tocznych i w przemyśle metalurgicznym do szlifowania metali nieżelaznych stosuje się impregnację siarką, miedzią, parafiną, woskiem, disiarczkiem molibdenu, kalafonią i innymi substancjami [32,60,61,63,123,124]. Firmy ze światowej czołówki produkujące narzędzia ściernic (Super Abrasives, Global Systec Shur Grind Segments, Grier Abrasive, Inc., Joto Abrasives PVT.LTD, Norton Company) posiadają w swojej ofercie ściernice impregnowane. W ofercie można znaleźć ściernice impregnowane siarką, żywicą lub woskami. Nieznana jest jednak dokładna charakterystyka, ich przeznaczenie i metody wprowadzania impregnatów do ściernicy oraz kryterium wyboru impregnatów. Ze względu na swoje właściwości antyadhezyjne siarka stosowana jest jako środek czynnie wpływający na warunki kontaktu w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym już od lat dwudziestych XX w. [33,40,46,47]. Obecnie związki siarki najczęściej stosowane są jako dodatki do płynów obróbkowych [32,60,61,103] oraz wprowadzane do ściernic w formie impregnatu [36,48,77,108,110].

Jedną z łatwiejszych metod ingerencji w budowę narzędzi ściernych stosowaną w przemyśle jest ich impregnowanie przez bezpośrednie wprowadzenie stopionego impregnatu w pory ściernicy. Po samoczynnym ostygnięciu impregnatu ściernica może zostać użyta jako narzędzie ściernic. Proces impregnacji mogą przeprowadzać producenci narzędzi, jak też ich użytkownicy, dostosowując skład impregnatu do bieżących potrzeb technologicznych przez co proces impregnacji staje się bardziej uniwersalny w porównaniu ze stosowaniem wypełniaczy.

#### **2.4. Ocena efektywności procesów szlifowania**

Efektywność to pojęcie trudne do jednoznacznego zdefiniowania, praktycznie każdy z autorów inaczej go rozumie [38]. Według Stonera i innych [106] efektywność jest miarą sprawności i skuteczności w osiągnięciu zamierzonych celów. Kowalski [52] uważa, że prawdziwe znaczenie efektywności wynika z kontekstu analizy lub dodatkowego komentarza. Podobnie myśli Pasour [82]. Uważa on, że efektywność jest zawsze pojęciem subiektywnym oraz nie powinna być definiowana, a także mierzona bez skonkretyzowania celu i bez wiedzy decydentów. Efektywność jest terminem złożonym, mającym wiele synonimów [20].



Nie próbując od nowa definiować ani uzasadniać przyjęcia określonej terminologii założono (zgodnie z dywagacjami w pracy [37,38]), że efektywność jest kompozycją dwóch składowych:

- sprawności, rozumianej jako stosunek otrzymanych efektów do poniesionych nakładów;
- skuteczności, określanej jako stopień osiągnięcia założonego na wstępie celu.

Obróbka ścierna (szlifowanie) jest podstawowym sposobem obróbki wydajnego i dokładnego kształtowania przedmiotów, zwłaszcza tych o dużej twardości i wytrzymałości. Efektywność procesu szlifowania uwarunkowana jest w dużej mierze jej topografią, czyli stanem czynnej powierzchni ściernicy. Stan CPS determinuje właściwości użytkowe ściernic i tym samym ich zdolności skrawne, czyli zdolność do usuwania nadmiaru obróbkowego. Od kształtu, liczebności i położenia wierzchołków ziaren ściernych oraz ilości i wielkości przestrzeni wiórowych zależą wielkości przekrojów warstw skrawanych oraz sprężyste i plastyczne odkształcenia powierzchni obrabianej. To z kolei wpływa na wielkość i rozkład energii cieplno-mechanicznej w strefie skrawania i decyduje o energetyce procesu szlifowania [35,53,86]. Postępująca utrata zdolności skrawnych ściernic w procesie szlifowania, wskutek zużycia i zalepiania CPS produktami szlifowania, wpływa na pogorszenie wyników obróbki, w tym dokładności wymiarowo-kształtowej i stanu warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego. Istnieje zatem potrzeba monitorowania i oceny zdolności skrawnych ściernic w procesie szlifowania [35]. Właściwości skrawne ściernicy zależą od bardzo wielu czynników, które związane są, m.in. z rodzajem obrabiarki i rodzajem narzędzia ściernego, warunkami obróbki, przedmiotem obrabianym, sposobem przygotowania narzędzia czy sposobem chłodzenia. W zależności od charakteru obróbki, na powierzchni ściernicy ziarna podlegają zjawisku samoostrzenia lub tępienia. Podczas szlifowania zgrubnego, zdolność skrawna ściernicy może utrzymywać się przez dłuższy czas na niezmiennym poziomie. Z kolei podczas szlifowania precyzyjnego, gdy warstwy skrawane i siły szlifowania są niewielkie, ziarna ściernic ulegają tępieniu, wtedy zmniejsza się zdolność skrawna narzędzia [53].

Efektywność szlifowania, rozumianą w kategoriach technologicznych i ekonomicznych, określa się jako relację uzyskanych efektów obróbki do nakładów poniesionych na ich osiągnięcie [34,67,76]. Ilościową ocenę efektywności procesu szlifowania można określić za pomocą parametrów, charakteryzujących wyniki procesu szlifowania. Z powodu dużej ilości tych parametrów istnieje w praktyce duża dowolność w ich doborze. W literaturze przedmiotu spotkać można kilkadziesiąt różnych wskaźników stosowanych do pośredniej, ilościowej oceny efektywności procesu szlifowania. Wskaźniki te można pogrupować na jakościowe, wydajnościowe, kosztów szlifowania, przebiegu szlifowania i skojarzone (syntetyczne) [34,53,76]. Dokładna analiza tych wskaźników została przedstawiona w pracy Nizankowskiego [76].

Zatem efektywność procesu szlifowania można rozumieć przez porównanie parametrów charakteryzujących wyniki procesu szlifowania w odniesieniu do parametrów wzorca, uzyskanych podczas szlifowania ściernicą referencyjną. Efekty realizacji procesów szlifowania (parametry) możemy podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Podział taki został przedstawiony w tabeli 2.5 [35,53].

Tab. 2.5. Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania [35,53]

<i>Parametry pośrednie</i>	<i>Parametry bezpośrednie</i>
siła szlifowania	chropowatość i błędy kształtu powierzchni materiału obrobionego
moc szlifowania	naprężenia przypowierzchniowe i mikrotwardość warstwy wierzchniej materiału obrobionego
energochłonność właściwa procesowi szlifowania	zmiany kształtu i wymiarów przedmiotu obrobionego
temperatura w strefie szlifowania	makro- i mikrozużycie narzędzia ściernego
drżania układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie	wielkość zalepień czynnej powierzchni ściernicy
wartość emisji akustycznej i jej zmiany	
wydajność szlifowania	
wskaźniki szlifowania	

W przypadku oceny efektywności obróbki ścierniczej zasadnicze znaczenie, w odniesieniu do efektów szlifowania, ma jakość powierzchni obrobionej, uzyskana wydajność ubytkowa oraz zużycie narzędzia ściernego. Natomiast najważniejszymi czynnikami opisującymi nakłady są moc szlifowania i czas obróbki, które bezpośrednio wpływają na koszty procesu [35,53,76].

## 2.5. Podsumowanie i wnioski

Na szlifowalność superstopów niklu zasadniczy wpływ mają duża ciągliwość, mała 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 tych stopów. To niekorzystne zjawisko powoduje ograniczenie zdolności skrawnej narzędzi, skrócenie czasu ich pracy, a także może doprowadzić do powstawania defektów szlifierskich na powierzchni materiału obrabianego. Autorzy prac dotyczących szlifowania stopów na osnowie niklu coraz częściej poszukują możliwości modyfikacji narzędzi, które mają za zadanie zapobiec tym niepożądanym zjawiskom w trakcie obróbki aby wydłużyć ich okres trwałości. Jednak badania te dotyczą szlifowania powierzchni płaskich, szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych oraz szlifowania głębokiego z posuwem

pełzającym. Badania dotyczące efektywności szlifowania wewnętrznego materiałów wykonanych z superstopów niklu zostaje całkowicie pominięty. Szlifowanie wewnętrzne czyli szlifowanie otworów i innych średnic wewnętrznych należy do trudniejszych operacji szlifierskich.

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

1. 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.
2. Chłodzenie zalewowe nie zawsze zapewnia uzyskanie powierzchni przedmiotu o wymaganych właściwościach.
3. W procesach szlifowania stopów niklu coraz częściej stosowane są ściernice z jednowarstwowym nasypem ściernym z supertwardymi ziarnami ściernymi (cBN, diament) związanymi galwanicznie z korpusem narzędzia.
4. Ściernice ze spoiwem galwanicznym charakteryzują się odmiennym mechanizmem zużycia w porównaniu do ściernic ze spoiwem ceramicznym lub żywicznym. Spoiwo galwaniczne może wykazywać duże powinowactwo chemiczne do materiału ściernego i PCS, przez co ściernice z takim spoiwem szybciej się zużywają.
5. 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.
6. W przemyśle najczęściej stosuje się ściernice korundowe ze spoiwem ceramicznym.
7. Ściernice ze spoiwem żywicznym wykazują największe zużycie.
8. Najczęściej opisywanym w literaturze stopem niklu jest Inconel<sup>®</sup> alloy 718.
9. Inconel<sup>®</sup> alloy 718 stawia największe wymagania dotyczące obróbki stopów niklu.
10. Wydaje się, że minimalizacja PCS i skierowanie go bezpośrednio do strefy szlifowania będzie miało korzystny wpływ na efektywność procesu szlifowania.
11. Brak wyników dotyczących szlifowania otworów wykonanych ze stopów niklu.
12. Zużycie adhezyjne występuje w każdym procesie szlifowania stopów niklu, niezależnie od rodzaju użytej ściernicy, dlatego też operatorzy coraz częściej skupiają się na możliwości wpływania na obniżenie adhezji wiórów materiału obrabianego do CPS na drodze modyfikacji narzędzi ściernych.

13. Impregnacja ściernicy ze spoiwem ceramicznym może być dobrym sposobem na poprawę wartości współczynnika szlifowania  $G$ .
14. Obecnie prowadzi się coraz więcej prac dotyczących impregnacji, ponieważ stosowanie płynów chłodząco-smarujących staje się coraz bardziej problematyczne ze względów ekonomicznych, czy też ochrony środowiska.
15. Należy opracować nowe metody impregnacji ściernic, ponieważ te stosowane nie są dobre, odnoszą się najczęściej do obróbki typowych stali stopowych, skomplikowana i niewygodna w eksploatacji aparatura do impregnacji ściernic, impregnat często reaguje z materiałem obrabianym, ulega szybko zużyciu, źle odprowadza ciepło itp.
16. Należy wyznaczyć zależność pomiędzy wartością parametrów technologicznych szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu a efektami obróbki jak średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu  $Ra$  dla materiału obrobionego czy przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$ .

Analiza materiałów źródłowych, dotyczących metod oceny efektywności procesu szlifowania oraz sposobów ilościowego wyrażenia właściwości eksploatacyjnych ściernic, pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków.

1. W literaturze przedmiotu spotkać można kilkadziesiąt różnych wskaźników stosowanych do pośredniej, ilościowej oceny efektywności procesu szlifowania. Wskaźniki te można pogrupować na jakościowe, wydajnościowe, kosztów szlifowania, przebiegu szlifowania i skojarzone (syntetyczne).
2. Efektywność procesu szlifowania można rozumieć przez porównanie parametrów charakteryzujących wyniki procesu szlifowania w odniesieniu do parametrów wzorca, uzyskanych podczas szlifowania ściernicą referencyjną. Z powodu dużej ilości tych parametrów istnieje w praktyce duża dowolność w ich doborze, przy określaniu efektywności.
3. Na potrzeby niniejszej pracy wytypowano grupę podstawowych wskaźników do oceny efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy: średnia wartość wydajności szlifowania  $Q_{wśr.}$ ; średnia wartość przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_{śr.}$ ; stopień zalepienia CPS; średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr.}$ ; średnia wartość czasu szlifowania  $t_{śr.}$ ; stosunek średniej wartości ubytku materiału  $V_{wśr.}$  do średniej wartości teoretycznego ubytku materiału  $V_{wtśr.} - V_{wśr.}/V_{wtśr.}$ , które w sposób kompleksowy ujmują podstawowe wielkości wyjściowe procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych takie jak:  $V_s$ ,  $V_w$ ,  $P$ ,  $Q_w$  i  $Ra$ .

### **3. CELE, PROBLEMY, HIPOTEZY I ZAKRES PRACY**

#### **3.1. Cele pracy**

W niniejszej dysertacji wyodrębniono trzy cele pracy: poznawczy, użyteczny i metodyczny.

1. Cel poznawczy – określenie wpływu impregnacji ściernicy substancjami antyadhezyjnymi na intensywność powstawania zalepień na CPS podczas szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu.
2. Cel użyteczny – zwiększenie efektywności procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu.
3. Cel metodyczny – opracowanie metody, która w sposób łatwy, kontrolowalny oraz powtarzalny umożliwi impregnację ściernicy substancjami antyadhezyjnymi.

#### **3.2. Sformułowanie problemu głównego oraz problemów szczegółowych**

Cele służą do realizacji problemu głównego, który może być opisany w postaci pytania badawczego:

Jaki jest wpływ impregnacji ściernicy substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania stopów niklu?

Tak sformułowany problem główny może być zweryfikowany przez uzyskanie odpowiedzi na poniższe problemy szczegółowe:

1. Czy impregnacja ściernicy ze spoiwem ceramicznym pozwala w znaczący sposób ograniczyć intensywność zalepiania CPS wiórami materiału obrabianego podczas szlifowania wewnętrznego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów Inconel<sup>®</sup> alloy 600 oraz Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup>?
2. Jakie metody impregnacji ściernicy ze spoiwem ceramicznym zastosować do szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
3. Jak wprowadzić impregnat w przestrzenie międzyziarnowe ściernicy ze spoiwem ceramicznym?
4. Jakie parametry obróbkowe zastosować podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?

5. Czy impregnacja ściernicy substancjami antyadhezyjnymi wpływa na wydłużenie okresu jej trwałości podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
6. Jakie zastosować kryterium końca okresu trwałości ściernicy?
7. Czy impregnacja ściernicy substancjami antyadhezyjnymi wpływa na zmniejszenie stopnia jej zalepienia podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
8. Czy impregnacja ściernicy substancjami antyadhezyjnymi wpływa na zmniejszenie mocy szlifowania podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
9. Czy impregnacja ściernicy substancjami antyadhezyjnymi wpływa na jakość powierzchni obrobionej podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
10. Który impregnat pozwala na osiągnięcie najlepszych efektów obróbki podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?
11. Czy masa/objętość impregnatu w ściernicy wpływa na efektywność procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718?

### **3.3. Hipotezy badawcze**

Z tak sformułowanego problemu głównego i problemów szczegółowych może wynikać założenie badawcze przyjmowane jako hipotezy pracy.

1. Jeżeli wprowadzi się na powierzchnię czynną ściernicy, lub w jej przestrzenie międzyziarnowe dodatkowe substancje chemiczne jako impregnaty, można spodziewać się wydłużenia jej okresu trwałości.
2. Jeżeli wprowadzi się na powierzchnię czynną ściernicy, lub w jej przestrzenie międzyziarnowe dodatkowe substancje chemiczne jako impregnaty, można spodziewać się, że istnieje pewien stopień zapełnienia wolnych przestrzeni w ściernicy impregnatem, dla którego okres trwałości jest najdłuższy.

### **3.4. Zakres pracy**

Tak sformułowane problemy badawcze (główne i szczegółowe) oraz hipoteza badawcza prowadzą do realizacji następującego zakresu badań.

1. Studia literaturowe z zakresu szlifowania stopów niklu.
2. Studia literaturowe z zakresu impregnowania ściernic.
3. Opracowanie metodyki badań doświadczalnych.
4. Badania przygotowawcze – opracowanie autorskich metod impregnowania ściernic substancjami antyadhezyjnymi.
5. Badania zjawisk elementarnych zużycia ściernic impregnowanych siarką (stosowanych standardowo) w procesie wglębnego szlifowania stopów niklu
6. Badania rozpoznawcze – ustalenie najkorzystniejszych, ze względu na moc szlifowania i jakość powierzchni obrobionej, wartości parametrów szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.
7. Badania właściwe zużycia narzędzi ściernych w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.
8. Opracowanie wyników badań wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.
9. Opracowanie wniosków końcowych oraz określenie kierunków dalszych badań.

## 4. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

### 4.1. Cel i zakres badań

Celem badań doświadczalnych procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopów niklu ściernicami impregnowanymi było między innymi:

- opracowanie metod impregnacji ściernic substancjami antyadhezyjnymi;
- przygotowanie ściernic impregnowanych (min. dwa impregnaty w min. trzech koncentracjach każdy);
- badanie zjawisk elementarnych zużycia ściernic impregnowanych w procesie wewnętrznego szlifowania stopów niklu;
- ustalenie najkorzystniejszych, ze względu na efektywność procesu i jakość powierzchni szlifowanej, warunków i parametrów szlifowania;
- wyznaczenie okresu trwałości badanych ściernic impregnowanych;
- określenie efektywności realizacji procesu prostoliniowo-zwrotnego szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami impregnowanymi;
- odniesienie wyników realizacji badanego procesu z zastosowaniem ściernic impregnowanych do efektów szlifowania ściernicami nieimpregnowanymi.

Zamierzone cele badawcze osiągnięto, realizując prace w czterech etapach obejmujących badania przygotowawcze, podstawowe, rozpoznawcze i właściwe.

Celem pierwszego etapu badań doświadczalnych było opracowanie własnych metod impregnacji ściernic substancjami antyadhezyjnymi oraz przygotowanie ściernic impregnowanych (min. dwa impregnaty w min. trzech koncentracjach każdy).

Zakres badań przygotowawczych obejmował:

- opracowanie metody impregnacji ściernic ceramicznych siarką, w której ostatnim etapem jest odwirowanie nadmiaru siarki;
- opracowanie metody impregnacji ściernic ceramicznych węglem amorficznym;
- opracowanie metody impregnacji ściernic ceramicznych grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu oraz ocena stopnia wypełnienia CPS impregnatem;
- impregnacja ściernic ceramicznych.

Celem drugiego etapu badań doświadczalnych (badań podstawowych) było określenie wpływu impregnacji ściernicy siarką na intensywność powstawania zalepień na CPS w procesie wewnętrznego szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 i Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup> oraz stali 100Cr6 jako materiału referencyjnego.



Celem trzeciego etapu badań doświadczalnych (badań rozpoznawczych) było rozpoznanie warunków i efektów realizacji procesu prostoliniowo-zwrotnego szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z udziałem ściernicy referencyjnej (nieimpregnowanej).

Zakres badań rozpoznawczych obejmował:

- ustalenie zależności pomiędzy średnim arytmetycznym odchyleniem rzędnych profilu  $Ra$  dla materiału obrobionego oraz przyrostem mocy szlifowania  $\Delta P$  od parametrów technologicznych szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718: prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$ ;
- wyznaczenie modeli matematycznych opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  oraz chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażonej parametrem  $Ra$  w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z wykorzystaniem ściernic korundowych ze spoiwem ceramicznym;
- ustalenie najkorzystniejszych, ze względu na przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$  i jakość powierzchni szlifowanej wyrażonej parametrem  $Ra$ , wartości parametrów wejściowych procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 z wykorzystaniem ściernic korundowych ze spoiwem ceramicznym ( $v_{fa}$ ,  $t$ );
- wytyczenie zakresu badań właściwych.

Celem badań właściwych było wykazanie wpływu impregnacji ściernic o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10-9A5X60L10VE01PI-50 na efektywność procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Parametry procesu szlifowania ustalono w badaniach rozpoznawczych.

Zakres badań właściwych obejmował:

- wyznaczenie okresu trwałości badanych ściernic impregnowanych grafitem i dwusiarczkiem molibdenu o różnych koncentracjach impregnatu w ściernicy podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718;
- określenie wpływu zawartości impregnatów w postaci dwusiarczku molibdenu oraz grafitu w masie ściernicy na przebieg i efekty procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718;
- ocena efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

## 4.2. Charakterystyka użytych materiałów w procesie szlifowania otworów

W badaniach podstawowych, próby szlifowania przeprowadzono na powierzchniach wewnętrznych pierścieni wykonanych z dwóch stopów trudno skrawalnych: Inconel® alloy 600 i Incoloy® alloy 800HT®. Jako materiał referencyjny do badań włączono również stal łożyskową 100Cr6 o twardości 62±2 HRC. W tabeli 4.1 zamieszczono charakterystykę szlifowanych materiałów.

Tab. 4.1. Charakterystyka materiałów poddanych obróbce [17]

<i>Lp.</i>	<i>Stop</i>	<i>Nr. Materiałowy</i>	<i>Norma</i>	<i>Skład pierwiastkowy, %</i>
1.	Inconel® alloy 600	2.4816	UNS N06600 ASTM B167	Ni + Co 72.0 min. Cr 14,0 – 17,0 Fe 6,0 – 10,0 Mn 1,0 max Cu 0,50 max Si 0,50 max C 0,15 max S 0,015 max
2.	Incoloy® alloy 800HT®	1.4876	UNS N08811 ASTM B407	Ni 30,0 – 35,0 Fe 39,5 min Cr 19,0 – 23,0 Mn 1,50 max Si 1.0 max Cu 0,75 max C 0,6 – 0,10 S 0,015 max Al 0,15 – 0,60 Ti 0,15 – 0,60 Al + Ti 0,85 – 1,20
3.	Stal 100Cr6	1.3505	BS 2S135 AFNOR 100C6 SAE 52100	Fe reszta Cr 1,30 – 1,65 C 0,95 – 1,10 Cu 0.30 max Ni 0,3 max Mn 0,25 – 0,45 Si 0,15 – 0,35 P 0,025 max S 0,025 max

Podczas analizy literatury dokonano zestawienia najważniejszych wartości parametrów technologicznych stosowanych do szlifowania stopów niklu, ściernic oraz przedmiotów szlifowanych, opisywanych w wybranych źródłach literaturowych dotyczących procesów szlifowania nadstopów niklu (załącznik 1.). Kompletność przedstawionych w załączniku 1. informacji wynika z danych zawartych w poszczególnych publikacjach [1-3,6,7,9,10,13-15,22,25,27,30,39,44,50,54,55-59,73,80,81,83,84,87,88,91,98,100-102,107,116-118,127,129-136]. Z zebranych danych wynika, że Inconel<sup>®</sup> alloy 718 jest jednym z najtrudniejszych w obróbce stopów niklu, dlatego też w badaniach rozpoznawczych oraz właściwych postanowiono wykorzystać ten materiał.

Materiałem, który poddano obróbce były pierścienie wykonane ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 o średnicy wewnętrznej  $d_w = 40$  mm i średnicy zewnętrznej  $d_z = 55$  mm. W tabeli 4.2 przedstawiono charakterystykę opisanego stopu [17].

Tab. 4.2. Charakterystyka stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 [17]

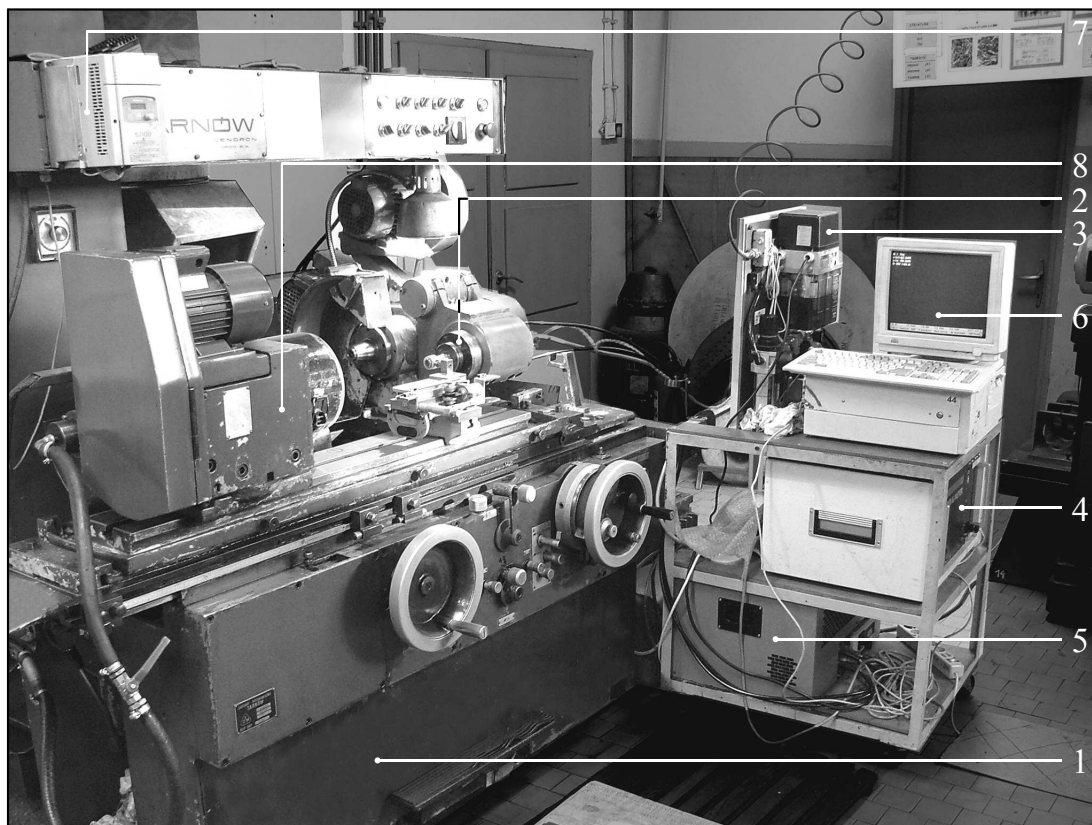
<i>Lp.</i>	<i>Stop</i>	<i>Nr. Materiałowy</i>	<i>Norma</i>	<i>Skład pierwiastkowy, %</i>
1.	Inconel <sup>®</sup> alloy 718	2.4668	UNS N07718 ASTM B637 API 6A 718	Ni + Co 50,0 – 55,0 Cr 17,0 – 21,0 Fe reszta Nb + Ta 4,75 – 5,5 Mo 2,8 – 3,3 Ti 0,65 – 1,15 Al 0,2 – 0,8 Co 1,0 max Mn 0,35 max Si 0,35 max Cu 0,03 max P 0,015 max S 0,015 max C 0,08 max B 0,006 max

Jest to utwardzalny wydzieleniowo stop niklowo-chromowy zawierający także żelazo, niob, molibden jak również, w mniejszych ilościach, glin i tytan. Łączy on w sobie odporność korozyjną i dużą wytrzymałość z doskonałą spawalnością, włączając w to odporność na pęknięcie po spawaniu. Stop ten ma doskonałą wytrzymałość na pełzanie w temperaturach do 700°C (1300°F). Stosowany jest do budowy: turbin gazowych, silników raketowych, promów kosmicznych, reaktorów jądrowych, pomp, oprzyrządowania obrabiarek.

### 4.3. Stanowisko badawcze i systemy pomiarowe

#### 4.3.1. Stanowisko do szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych

Badania doświadczalne procesu szlifowania zostały zrealizowane na stanowisku badawczym wyposażonym w szlifierkę RUP 28P, przedstawionym na rysunku 4.1.



Rys. 4.1 Stanowisko badawcze: 1 – szlifierka uniwersalna RUP 28P, 2 – elektro-wrzeciono firmy Fischer EV-70/70-2WB, 3 – układ dozowania mieszanki powietrznoolejowej IG 54-2, 4 – przetwornica częstotliwości Sieb&Meyer 21.60, 5 – agregat chłodzący IK-V07, 6 – komputer z programem sterującym, 7 – przemiennik częstotliwości SJ100 sterujący silnikiem prądu stałego wrzeciona przedmiotu, 8 – wrzeciono przedmiotu obrabianego

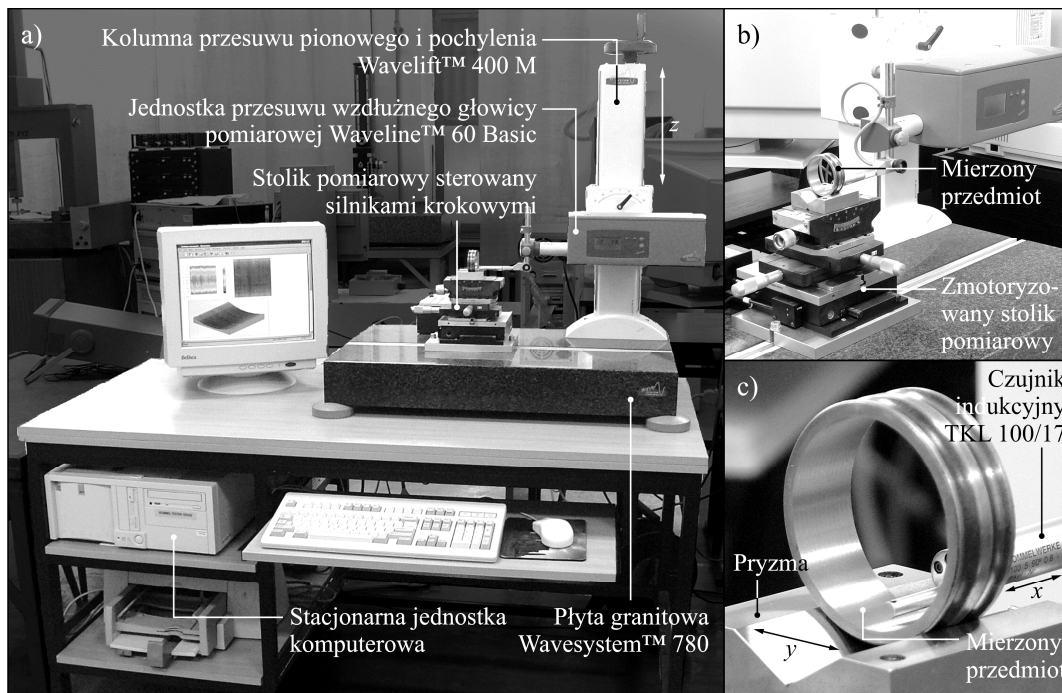
Na potrzeby poszczególnych badań wyposażenie stanowiska uzupełniono dodatkowo o następujące elementy:

- system doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego od wewnątrz ściernicy;
- oraz przyrządy i urządzenia pomiarowe.

Stanowisko to umożliwiało realizację procesów szlifowania otworów w kinematyce szlifowania prostoliniowo-zwrotnego.

#### 4.3.2. System do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni obrobionej

Pomiar mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH z jednostką przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic (rys. 4.2).



Rys. 4.2 System do pomiaru profili chropowatości oraz mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrabianych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) widok ogólny stanowiska; b) obszar pomiarowy; c) widok mierzonej powierzchni

Profilometr ten pozwala na wykonywanie pomiarów zarówno w ujęciu dwuwymiarowym (rejestracja profilu chropowatości powierzchni), jak i przestrzennym (rejestracja mikrotopografii powierzchni). Urządzenie wyposażone było w jednostkę przesuwu głowicy pomiarowej Waveline™ 60 Basic o zakresie pomiarowym w osi  $x$  wynoszącym 60 mm. Głowica zamontowana była na kolumnie Wavelift™ 400 M, służącej do jej przesuwu w osi  $z$  (w zakresie 400 mm) oraz do pochylania głowicy w zakresie  $\pm 45^\circ$ . Kolumna zamocowana była na płycie granitowej Wavesystem™ 780. W płycie znajdowała się szyna mocująca zmotoryzowany stolik pomiarowy wyposażony w silnik krokowy, przeznaczony do realizacji precyzyjnych przemieszczeń w osi  $y$ .

Pomiarów wewnętrznych powierzchni walcowych pierścieni po szlifowaniu dokonywano przy użyciu czujnika indukcyjnego TKL 100/17 z diamentowym ostrzem odwzorowującym w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym równym  $90^\circ$  i promieniu wierzchołka  $r = 2,5 \mu\text{m}$ .

Podczas badań korzystano z oprogramowania Turbo Roughness for Windows w wersji 3.1 oraz HommelMap Basic w wersji 3.1.0, służącego do sterowania elementami urządzenia (głowica pomiarowa) oraz dokonywania pomiarów. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych mikrotopografii powierzchni zastosowany został program TalyMap Silver 4.1.2, wykorzystujący Mountain Technology™ firmy Digital Surf, który na podstawie wprowadzonych danych wejściowych obliczał wartości parametrów chropowatości powierzchni.

### 4.3.3. System do rejestracji obrazów metodą mikroskopii konfokalnej

Do oceny struktury geometrycznej CPS, wykorzystano konfokalną laserową mikroskopię skaningową, Mikroskop konfokalny LEXT OLS 4000 firmy OLYMPUS (rys. 4.3).



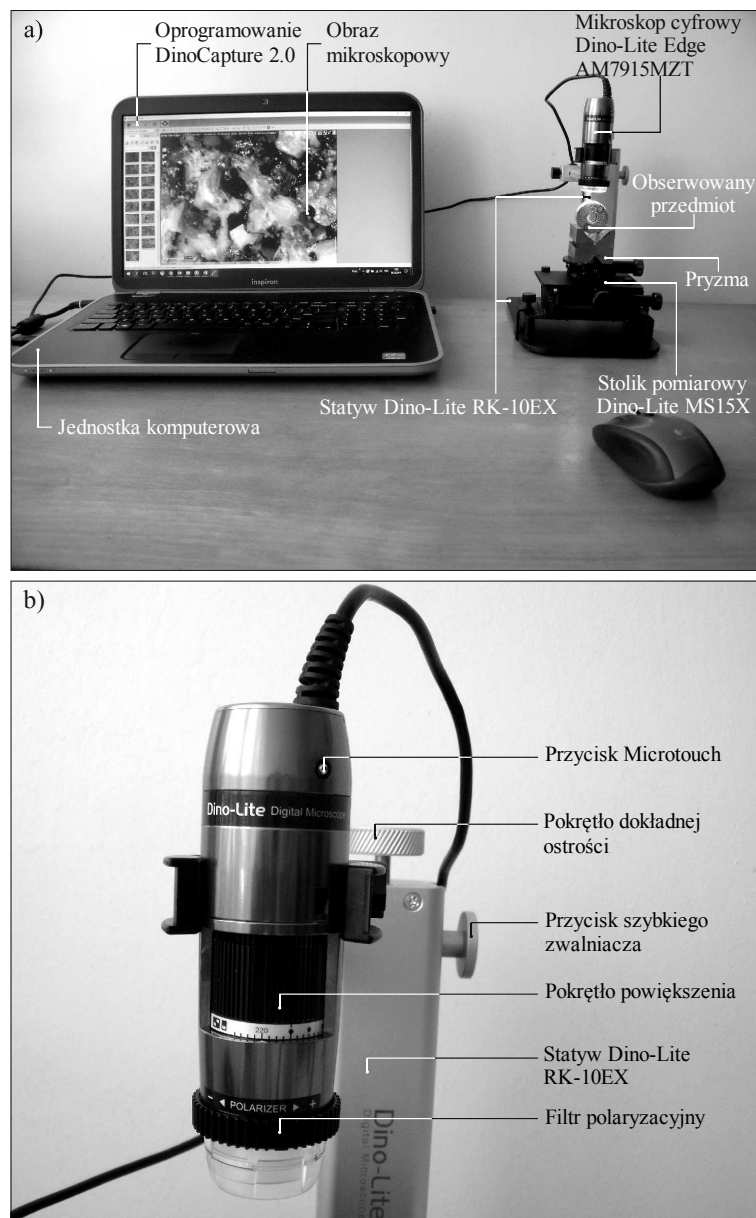
Rys. 4.3 Konfokalny laserowy mikroskop skaningowy LEXT OLS4000 firmy Olympus [113]

Działanie mikroskopu LEXT OLS4000 w trybie konfokalnym, opiera się na generowaniu obrazu na podstawie światła odbitego od płaszczyzny ogniskowania. Światło odbite poza tę płaszczyznę (tworzące obraz o różnej głębokości ogniskowania) jest pomijane za pomocą kołowej przysłony konfokalnej. Głębokość ogniskowanego przekroju jest funkcją średnicy otworu i długości fali padającego światła. Mikroskop LEXT OLS4000 wykorzystuje wiązkę światła o długości fali  $\lambda = 405 \text{ nm}$  (barwa fioletowa), generowaną przez diodę laserową klasy II [113].

Głowica pomiarowa znajduje się w zmotoryzowanej kolumnie przesuwu pionowego, umożliwiając realizację precyzyjnych przemieszczeń w zakresie pionowym wynoszącym 70 mm. Akwizycja obrazu odbywa się w kolejnych przekrojach, które są tak przetwarzane, aby uzyskać przestrzenne odwzorowanie badanego obiektu. Operacje na obrazach wykonywano z zastosowaniem oprogramowania firmy Olympus Corp., o nazwie LEXT OLS4000 w wersji 2.1.3 [113].

### 4.3.4. System do rejestracji obrazów metodą mikroskopii cyfrowej

Ocenę stanu czynnej powierzchni ściernicy przed i po szlifowaniu przeprowadzono na podstawie obrazów zarejestrowanych z wykorzystaniem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation (rys. 4.4).



Rys. 4.4 Cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) widok ogólny stanowiska do obserwacji mikroskopowych; b) widok ogólny mikroskopu

Za pomocą tego mikroskopu można rejestrować obrazy w powiększeniu od  $10$  do  $220 \times$  o rozdzielczości  $5 \text{ Mpx}$  ( $2592 \times 1944$ ) oraz rejestrować sekwencje wideo. Ręczny mikroskop jest zasilany przez port USB z komputera klasy PC. Mikroskop wyposażony jest w osiem zintegrowanych diod LED (ang. *Light-Emitting Diode*) z możliwością sterowania ich oświetleniem FLC (ang. *Flexible Led Control*). Z funkcją Rozszerzonego Zakresu Dynamicznego EDR (ang. *Extended Dynamic Range*) ciemniejsze bądź jaśniejsze obszary na obiekcie mogą być ujawnione przez nakładane obrazy o różnym poziomie ekspozycji. Ze względu na wbudowany filtr polaryzacyjny ten model nadaje się idealnie do pracy z błyszczącymi lub odbłaskowymi obiektami, takimi jak metal, tworzywa sztuczne, szkło, elementy elektroniki czy ściernice. W tabeli 4.3 przedstawiono specyfikację urządzenia.

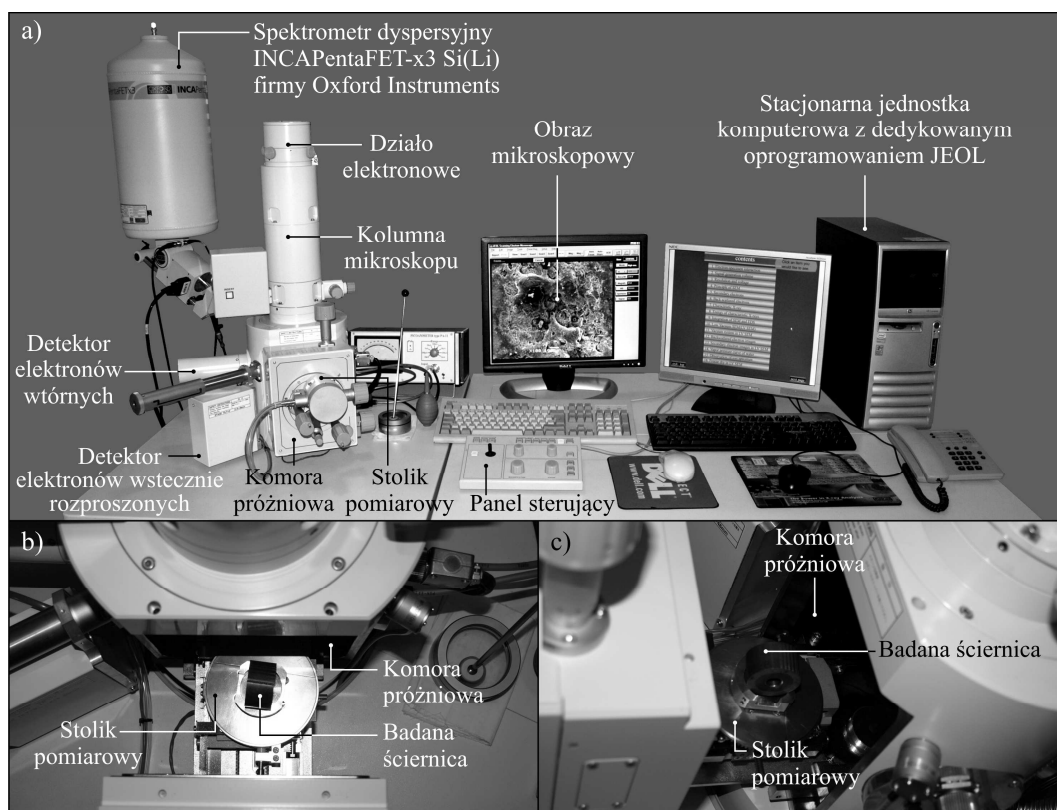
Tab. 4.3. Specyfikacja urządzenia Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation

Cyfrowy Mikroskop Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation		
Oświetlenie	Źródło światła	LED
	Barwa światła	Biała
	Liczba diod	8
	Możliwość przełączania diod	Tak
	Polaryzator	Tak (liniowy)
	Filtr podczerwieni	Tak (pow. 650nm)
Optyka	Powiększenie	10x – 220x
	Pole obserwacji	1,8 x 1,3 mm
	Typ obiektywu	Szkoło z warstwą antyrefleksyjną
Matryca	Typ matrycy	CMOS
	Rozdzielczość	5 Megapikseli (2592 x 1944)
	Klatki na sekundę	30 kl./s
Kompatybilność	Interfejs	USB 2.0
	System operacyjny	Windows XP; Vista, 7; 8; 10
	Dołączone oprogramowanie	DinoCapture 2.0
	Obsługiwany format plików graficznych	BMP; GIF; PNG; JPG; TIF; RAS; PNM; TGA; PCX; MNG; WBMP; JP2; JPC; PGX
	Obsługiwany format plików video	WMV; FLV; SWF
Obudowa	Materiał obudowy	Aluminium
	Blokada powiększenia	Tak
	Wymiary	10,5 x 3,2 cm (długość x średnica)
	Waga	137 g
Cechy urządzenia	Cechy szczególne	AMR; EDR; EDOF; FLC
	Możliwość dokonywania pomiaru obiektu	Tak
	Możliwość kalibracji urządzenia	Tak
	Funkcja Microtouch	Tak



#### 4.3.5. System do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronicznej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersyjnego promieniowania rentgenowskiego (EDS)

Do rejestracji obrazów mikroskopowych użyto elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd – rys. 4.5.

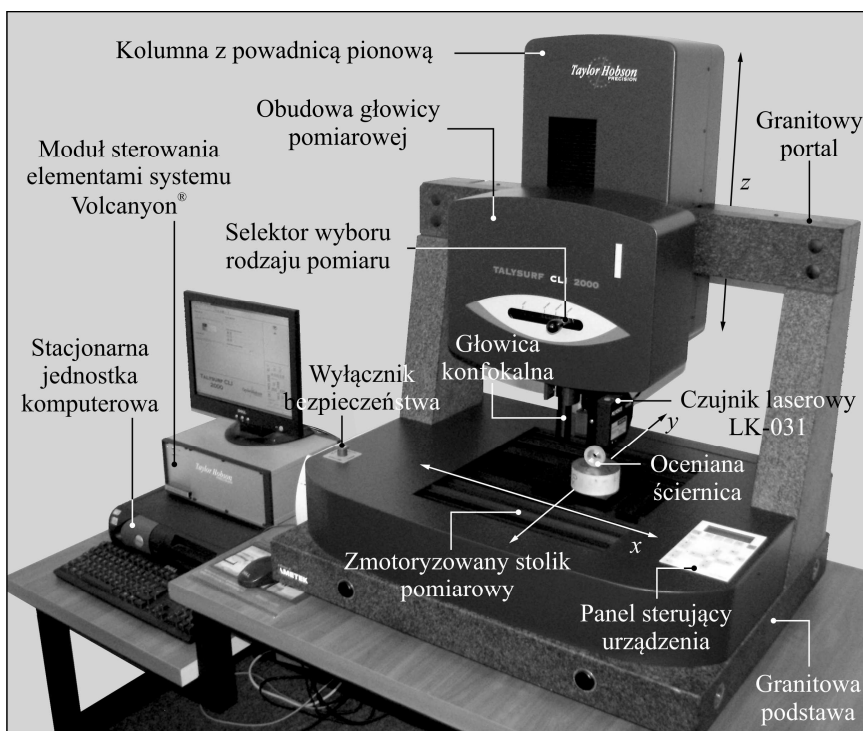


Rys. 4.5 Elektronowy mikroskop skaningowy JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. wyposażony w moduł energodispersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments: a) widok ogólny mikroskopu; b-c) widok ściernicy przeznaczanej do badań ustawionej na stoliku pomiarowym

Urządzenie to charakteryzowało się następującymi parametrami: zakres powiększeń od  $18\times$  do  $300000\times$ , zdolność rozdzielcza od 4,0 nm (tryb wysokiej próżni) do 5,0 nm (tryb niskiej próżni), przy napięciu przyspieszającym 30 kV, ciśnienie w komorze próżniowej od 10 do 270 Pa, napięcie przyspieszające od 0,5 do 30 kV. Uzyskiwane obrazy mikroskopowe charakteryzowały się następującymi parametrami: rozdzielczość  $1280 \times 960$  pikseli, głębia kolorów 8-bitowa, tryb szaroodcieniowy, format zapisu \*.bmp. Przed dokonaniem akwizycji i umieszczeniem na stoliku pomiarowym znajdującym się w komorze próżniowej mikroskopu, ściernica była każdorazowo, myta w myjce ultradźwiękowej w benzynie ekstrakcyjnej przez 3 minuty, następnie suszona i z kolei oczyszczana powierzchniowo sprężonym powietrzem.

#### 4.3.6. System do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy metodą topografii laserowej

Do pomiaru mikrotopografii CPS narzędzi ściernych zastosowano stanowisko pomiarowe wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd., przedstawione na rysunku 4.6.



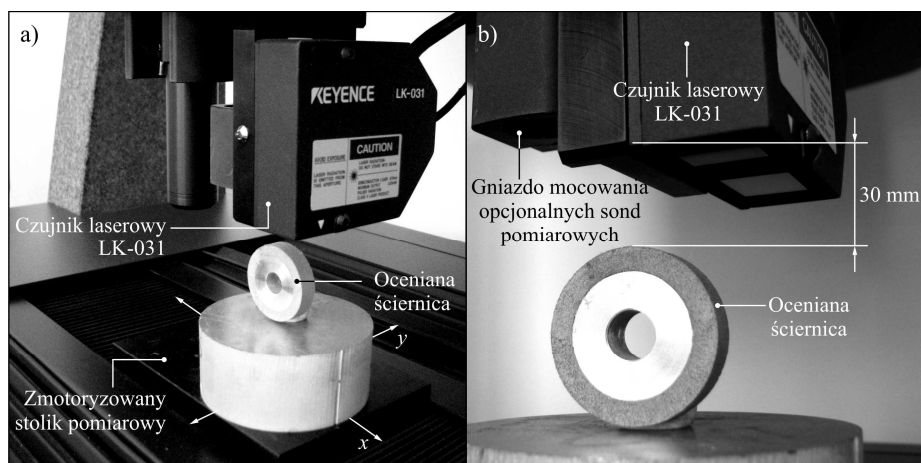
Rys. 4.6 System do bezstykowego pomiaru mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. [68-70]

System pomiarowy Talysurf CLI 2000 charakteryzuje się budową modułową. Podstawę urządzenia stanowi płyta granitowa z portalem, na którym zamocowana jest obudowa głowicy pomiarowej oraz prowadnica pionowa (oś  $z$ ). Głowica jest wyposażona w gniazda do mocowania opcjonalnych sond pomiarowych. W płycie umieszczony jest zmotoryzowany stolik pomiarowy realizujący ruch roboczy w osi  $x$  oraz  $y$  [68-70].

System Talysurf CLI 2000 umożliwia prowadzenie pomiarów topografii powierzchni w układzie 2D i 3D, z wykorzystaniem trzech metod stosowanych w zależności od zadania pomiarowego[70]:

- metodą stykową – pomiar czujnikiem indukcyjnym,
- metodą optyczną – konfokalną, opartą na zjawisku aberracji chroma-tycznej *CLA* (ang. *Chromatic Length Aberration*),
- metodą optyczną – wykorzystującą triangulację laserową.

W celu poprawnej rejestracji mikrotopografii czynnej powierzchni ściernic o otwartej strukturze zastosowano metodę triangulacji laserowej. Pomiary triangulacyjne realizowane były przez bezstykowy czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence (rys. 4.7). Współpracował on z kontrolerem LK-2001 tej samej firmy i pozwalał na uzyskanie rozdzielczości pomiarów rzędu 1  $\mu\text{m}$  [68-70].



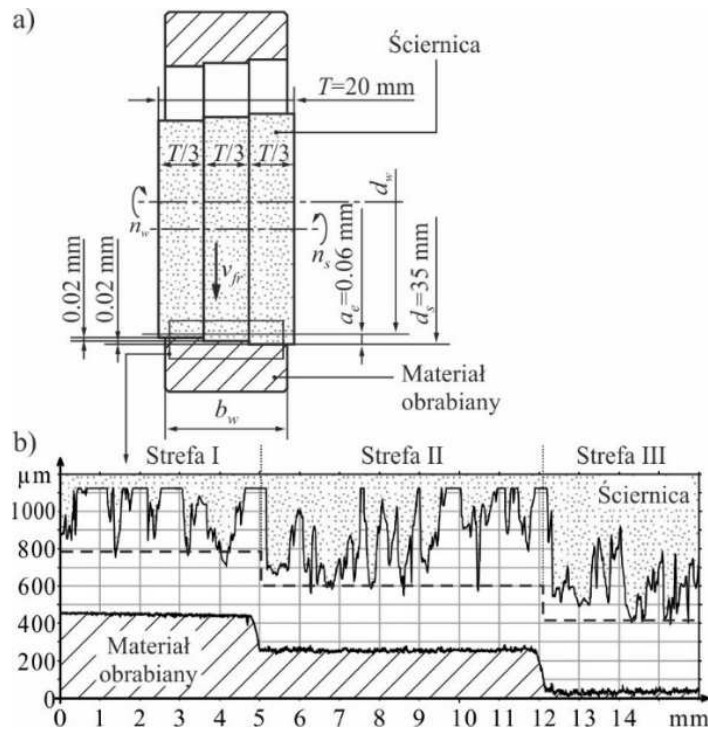
Rys. 4.7 Bezstykowy czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence stosowany do pomiarów topografii powierzchni narzędzi ściernych metodą triangulacji: a) widok ogólny czujnika, b) widok ściernicy przygotowanej do przeprowadzenia pomiaru [133]

Pomiarów dokonano za pomocą dostarczonego przez producenta oprogramowania Tallyscan CLI 2000 w wersji 2.6.1. Natomiast do analizy i wizualizacji zarejestrowanych danych pomiarowych posłużono się oprogramowaniem TalyMap Platinum w wersji 4.0.5.3985 wykorzystującym Mountains Technology™ firmy Digital Surf. Ten sam producent dostarcza także moduł sterowania poszczególnymi elementami systemu pod nazwą Volcanyon® [68-70].

#### 4.4. Metodyka badań podstawowych

Aby sprawdzić czy impregnacja siarką ściernicy ze spoiwem ceramicznym skutecznie może wpływać na efektywność procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopów niklu postanowiono przeprowadzić próby z użyciem ściernic ceramicznych impregnowanych siarką, której pewna ilość w ostatnim etapie procesu impregnacji została odwirowana aby pozostawić część wolnych przestrzeni międzyziarnowych na CPS. Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu impregnacji ściernicy siarką na intensywność powstawania zalepień na CPS w procesie wglębnego szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 600 i Incoloy® alloy 800HT® oraz stali 100Cr6 jako materiału referencyjnego.

Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wglębnego [68,71]. Jej istota polega na przeprowadzeniu krótkiego testu szlifowania, trwającego np. 3 sekundy, specjalnie ukształtowaną ściernicą, w kinematyce szlifowania wglębnego (rys. 4.8).



Rys. 4.8 Charakterystyka metody oceny zdolności skrawnej ściernicy: a) przykładowe parametry wyjściowe do badania zdolności skrawnej ściernicy o stopniowanej średnicy zewnętrznej; b) poglądowe uwidocznienie wyników geometrycznych wykonania zabiegu szlifowania wglębnego, w wyniku którego powstaje materiał badawczy [68,71]

Istotną cechą metody jest pominięcie etapu szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania. Ściernica wykonuje ruch roboczy z zadaną prędkością posuwu wglębnego  $v_{fr}$ , po czym niezwłocznie zostaje odsunięta od obrabianego materiału. Ma to na celu jak najdokładniejszą identyfikację procesów zużycia CPS, a także procesów usuwania materiału, formowania wióra, tworzenia wypływek, bruzdowania itp.

W tabeli 4.4 podano szczegółową charakterystykę warunków przeprowadzonych badań doświadczalnych szlifowania wglębnego.

Tab. 4.4. Charakterystyka warunków szlifowania wglębnego

Proces	Szlifowanie wglębne walcowych powierzchni wewnętrznych
Szlifierka	Szlifierka uniwersalna RUP-28P, Zakłady Mechaniczne „Tarnów” SA z układem sterowania elektrownicą EV-70/70-2WB, FISCHER, Szwajcaria (max. rpm. 60 000 1/min, moc szlifierki 5.2 kW)
Obciążacz i parametry kondycjonowania ściernicy	Jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie $Q_d = 1,25$ kt; $n_{sd} = 12\ 000$ obr./min; $v_{fd} = 10$ m/s; $a_d = 0,0125$ mm
Parametry szlifowania	$t_s = 3$ s; $v_s = 60$ m/s; $v_w = 0,75$ m/s; $v_{fr} = 0,02$ mm/s; $a_e = 0,6$ mm,
Płyn chłodząco-smarujący (PCS)	5% wodny roztwór oleju Castrol Syntilo RHS podawany metodą zalewową
Wydatek PCS	$Q_{PCS} = 3$ dm <sup>3</sup> /min

Zastosowana w opracowanej metodzie modyfikacja makrogeometrii ściernicy polega na uformowaniu na jej czynnej powierzchni kilku, np. trzech, stref o różnej średnicy w zabiegu obciągania. Specjalne ukształtowanie makrogeometrii ściernicy powoduje, że poszczególne strefy jej czynnej powierzchni pracują z różnym czasem i usuwają różną objętość materiału  $V_w$ . Co za tym idzie, w poszczególnych strefach CPS proces zużycia ziaren ściernych i spoiwa, zjawiska formowania wióra czy też zalepiania przestrzeni międzyziarnowych przebiegają z różną intensywnością i mogą przyjmować odmienne formy.

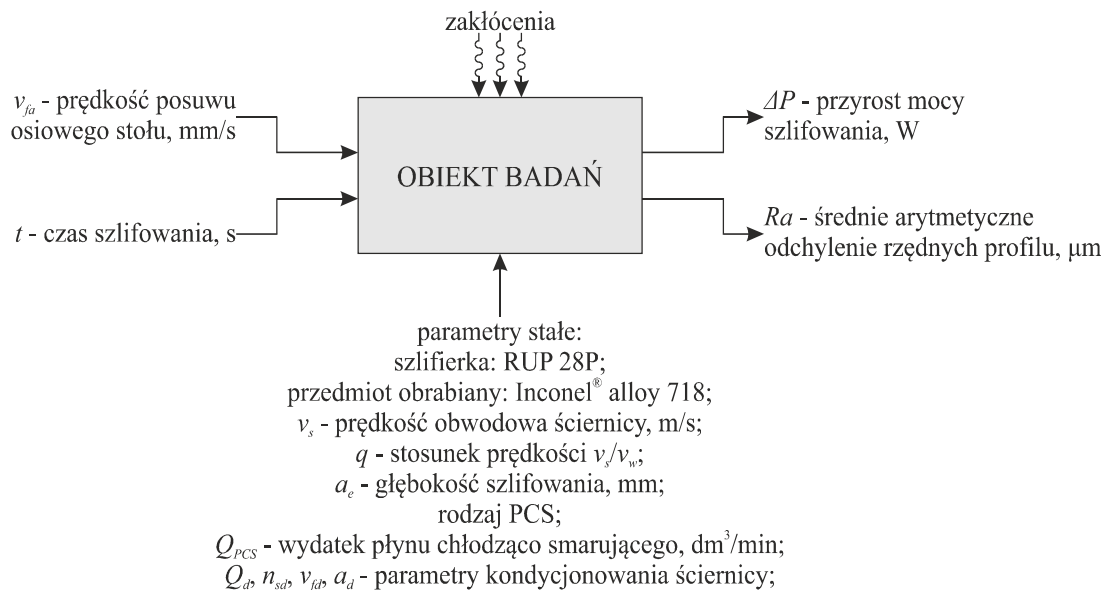
#### 4.4.1. Ściernice użyte w badaniach

Do badań użyto ściernic zbudowanych z ziaren mikrokryształicznego korundu spiekanego o numerze 46 oraz szklanokryształicznego spoiwa ceramicznego [41,42,43]. Ściernice o oznaczeniu technicznym 1-25×20×10-SG/F46G10VTO charakteryzujące się bardzo otwartą strukturą wykonane zostały w Katedrze Fizyki Technicznej i Nanotechnologii Wydziału Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej i pochodziły z tej samej partii produkcyjnej. Narzędzia następnie poddano procesowi impregnowania siarką wg autorskiej metody opisanej w podrozdziale 5.1. W wyniku procesu nasiarczania masa ściernicy zwiększyła się z 24,28 g do 26,90 g co stanowiło koncentrację  $C_s = 9,74\%$ . Jako odniesienie do badań włączono ściernicę nieimpregnowaną.

#### 4.5. Metodyka badań rozpoznawczych

Na podstawie informacji zawartych w załączniku 1. zestawiono wykaz najważniejszych parametrów technologicznych, ściernic oraz przedmiotów szlifowanych, opisywanych w wybranych źródłach literaturowych dotyczących procesów szlifowania jednego z najtrudniejszych w obróbce stopów niklu, Inconelu<sup>®</sup> alloy 718 (załącznik 2). Z danych tych wynika, że najczęściej do zwiększania wydajności procesu szlifowania wykorzystuje się trzy parametry: prędkość ściernicy  $v_s$ , prędkość przedmiotu obrabianego  $v_w$  oraz głębokość szlifowania  $a_e$ . Jednak wartości tych parametrów z przeanalizowanych publikacji charakteryzują się bardzo dużym rozrzutem:  $v_{smin} = 5$  m/s,  $v_{smax} = 90$  m/s;  $v_{wmin} = 0,05$  m/min,  $v_{wmax} = 22$  m/min;  $a_{emin} = 0,005$  mm,  $a_{emax} = 1$  mm. Dodatkowo odnoszą się do różnych odmian kinematycznych procesu szlifowania. Żadna z przeanalizowanych publikacji nie dotyczyła szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych.

Badania zostaną przeprowadzone według schematu opisanego na rysunku 4.9.



Rys. 4.9 Szczegółowy schemat badań rozpoznawczych w postaci czarnej skrzynki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718

K. Ocoż i J. Porzycki [78] piszą, że moc szlifowania  $P$  wzrasta ze zwiększeniem prędkości szlifowania powodując jednocześnie zwiększenie temperatury przedmiotu. Mniejsze jest natomiast zużycie ściernicy na skutek mniejszych obciążeń ziaren i krótszego czasu styku. Natomiast odchyłki kształtu i chropowatość powierzchni osiągają mniejsze wartości, gdyż mniejsze są siły szlifowania i zużycie ściernicy. Potwierdziły to również badania wstępne podczas szlifowania stopów niklu. Chcąc ograniczyć koszty i czas badań rozpoznawczych postanowiono zawęzić zakres badań poprzez pozostawienie parametru  $v_s$  na stałym poziomie. W całym obszarze badań wartość prędkości szlifowania  $v_s$  została ustalona na wartość maksymalną 45 m/s z uwagi na ograniczenia sprzętowe i wielkość ściernicy ( $d_s = 35$  mm) użytą w badaniach. W związku z tym postanowiono wybrać dwa parametry  $v_{fa}$  oraz  $t$ , które posłużyły do określenia efektywności w obszarze przeprowadzonej analizy procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 według planu badań zdeteterminowanego – kompletnego. Nastawy tych parametrów, przy których uzyskana została najwyższa wartość wskaźnika efektywności procesu zostaną wykorzystane w badaniach właściwych.

#### 4.5.1. Ściernice użyte w badaniach

W badaniach użyto małogabarytowych ściernic typu 1. z mieszaniny dwóch ziaren ściernych, mikrokryształicznego korundu spiekane SG i elektrokorundu szlachetnego w proporcji 1:1, ze spoiwem ceramicznym o oznaczeniu technologicznym: 1-35×10×10 9A5X60L10V. Wykorzystane w badaniach ściernice pochodziły z tej samej partii produkcyjnej.

#### 4.5.1. Określenie zbiorów czynników badanych, stałych, zakłócających i wynikowych

Badania rozpoznawcze miały na celu ustalenie zależności pomiędzy średnim arytmetycznym odchyleniem rzędnych profilu  $Ra$  dla materiału obrobionego oraz przyrostem mocy szlifowania  $\Delta P$  od parametrów technologicznych szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718: prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$ . Równania te mają następującą postać jakościową:

$$Ra = Ra(\bar{v}_{fa}, \bar{t}) \quad (2)$$

$$\Delta P = \Delta P(\bar{v}_{fa}, \bar{t}) \quad (3)$$

Funkcje obiektów badań (równanie 2 i 3) są nieznanne w postaci analitycznej. W celu określenia postaci tych funkcji przeprowadzone zostały odpowiednie badania analityczne i doświadczalne. Postaci tych funkcji posłużą do określenia najkorzystniejszych wartości wskaźników efektywności, w obszarze przeprowadzonej analizy, procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

W wyniku przeprowadzonej analizy literaturowej oraz badań wstępnych określono zbiór następujących czynników mających istotny wpływ na czynniki wynikowe  $Ra$  i  $\Delta P$ .

##### 1. Zbiór czynników badanych $\bar{X}(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ :

- $\bar{x}_1 = \bar{v}_{fa}$ , osc./min – prędkość posuwu osiowego stołu;
- $\bar{x}_2 = \bar{t}$ , s – czas szlifowania.

##### 2. Zbiór czynników stałych $C(c_1, c_2, \dots, c_{12})$ :

- $c_1$  – szlifierka: RUP 28P;
- $c_2 = Q_d = 1,25$  kr – masa obciążacza diamentowego;
- $c_3 = n_{sd} = 12\ 000$  obr./min – prędkość obrotowa ściernicy przy obciążaniu;
- $c_4 = v_{fd} = 10$  mm/s – prędkość posuwu osiowego przy obciążaniu;
- $c_5 = a_d = 0,0125$  mm – styk roboczy obciążania;
- $c_6$  – PCS – rodzaj PCS (emulsja 5%);
- $c_7 = Q_{PCS} = 2,7$  dm<sup>3</sup>/min – wydatek PCS;
- $c_8$  – przedmiot obrabiany (Inconel<sup>®</sup> alloy 718);
- $c_9 = v_s = 45$  m/s – prędkość obwodowa ściernicy;
- $c_{10} = q = 80$  – stosunek prędkości  $v_s/v_w$ ;

- $c_{11} = a_e = 0,005$  mm – styk roboczy;
- $c_{12} = a_{e\text{ calk.}} = 0,1$  mm – całkowita głębokość szlifowania.

3. Zbiór czynników zakłócających  $H(h_1, h_2, h_3, h_4)$

- $h_1$  – losowe fluktuacje nastawionych parametrów szlifowania;
- $h_2$  – niedokładność mocowania próbek;
- $h_3$  – niejednorodność materiału próbek;
- $h_4$  – niekontrolowana zmiana wymiarów próbek.

4. Zbiór czynników wynikowych  $\bar{Y}(\bar{y}_1, \bar{y}_2)$ :

- $\bar{y}_1 = \overline{Ra}$ ,  $\mu\text{m}$  – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu;
- $\bar{y}_2 = \overline{\Delta P}$ , W – przyrost mocy szlifowania.

#### 4.5.2. Ustalenie przedziału zmienności czynników badanych

Przedział zmienności czynników badanych został określony na podstawie wcześniejszych wielu prób procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718, których wyniki nie zostały umieszczone w niniejszej dysertacji i wynosi:

- $\bar{x}_1 = \bar{v}_{fa}$ : 10–30 mm/s (20–40 osc./min);
- $\bar{x}_2 = \bar{t}$ : 40–120 s.

#### 4.5.3. Przyjęcie klasy modelu matematycznego obiektu badań

Zależność średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu  $Ra$  od parametrów technologicznych procesu szlifowania opisuje równanie regresji Maslova w postaci funkcji potęgowej [64]. W przypadku przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  postanowiono również przyjąć model zależności w postaci funkcji potęgowej (równanie 4 i 5) oraz zakładając dla obu modeli poziom istotności  $\alpha = 0,05$ :

$$Ra = a_1 \cdot x_1^{a_2} \cdot x_2^{a_3}; \quad (4)$$

$$\Delta P = a_1 \cdot x_1^{a_2} \cdot x_2^{a_3}. \quad (5)$$



#### 4.5.4. Realizacja badań rozpoznawczych – plan eksperymentu

Realizacja programu kompozycyjnego trójpoziomowego odbyła się według planu badań zdeterminowanego – kompletnego. Liczba zmiennych wejściowych  $s = 2$ . Schemat realizacji badań dla dwóch zmiennych przedstawia tabela 4.4.

Tab. 4.5. Schemat realizacji planu badawczego kompletnego

Liczba pomiarów	Lp.	Numer doświadczenia	Czynniki badane			
			zakodowane		rzeczywiste	
			$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_1 = \bar{v}_{fa}$	$\bar{x}_2 = \bar{t}$
$N_c = 9$	1	01	-1	+1	10	120
	2	02	-1	0	10	80
	3	03	-1	-1	10	40
	4	04	0	+1	20	120
	5	05	0	0	20	80
	6	06	0	-1	20	40
	7	07	+1	+1	30	120
	8	08	+1	0	30	80
	9	09	+1	-1	30	40

Jako zmienne wejściowe analizowane były następujące parametry: prędkość posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  w przedziale  $v_{fa} = (10, 30 \text{ mm/s})$  oraz czas szlifowania  $t$  w przedziale  $t = (40, 120 \text{ s})$ . Natomiast liczba odpowiadających im wartości zmiennych wynosiła  $L = 3$ . Jako kryterium oceny efektywności posłużyły dwie zmienne wyjściowe: wyznaczenie chropowatości powierzchni w układzie 2D dla materiału obrobionego wyrażone parametrem  $Ra$  oraz wyznaczenie przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$ . Łącznie wymagane jest przeprowadzenie  $N_c = 9 \cdot r$  pomiarów zgodnie ze wzorem:

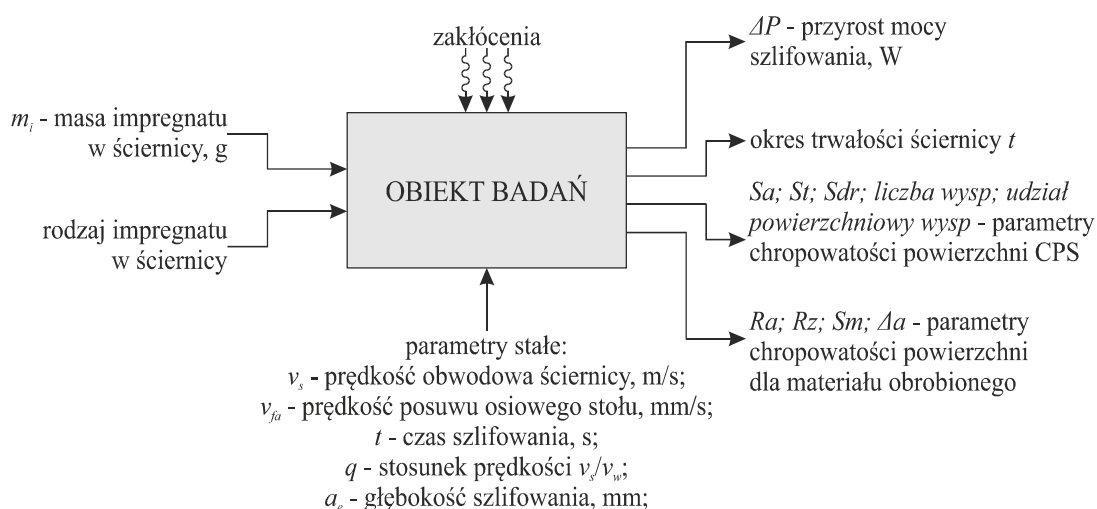
$$N_c \cdot r = L^s \cdot r = 3^2 \cdot r = 9 \cdot r, \quad (6)$$

w którym  $r$  jest liczbą powtórzeń pomiarów dla każdego układu. W niniejszym planie badania powtarzano trzy razy i obliczano średnią arytmetyczną z uzyskanych wyników prób.

#### 4.6. Metodyka badań właściwych

Najkorzystniejsze parametry obróbkowe z przeprowadzonych badań rozpoznawczych posłużyły do analizy wpływu ściernicy impregnowanej z wykorzystaniem metody zalewowej

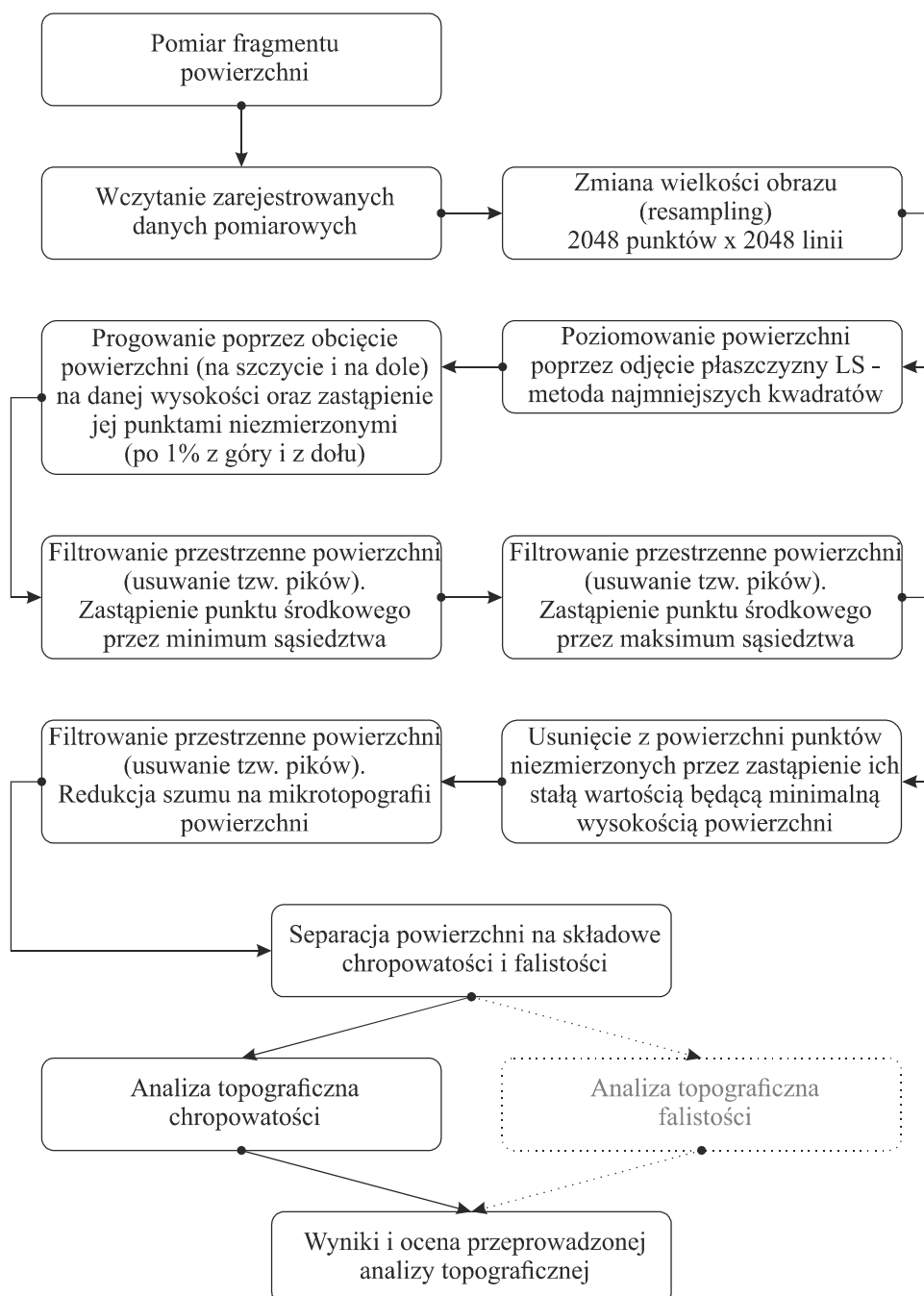
podawania PCS na efektywność procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 4.10. Wyniki zostały odniesione do wyników uzyskanych podczas szlifowania w tych samych warunkach ściernicą referencyjną – nieimpregnowaną. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem różnych impregnatów oraz różnych ich udziałów masowych/objętościowych na jednostkę masy/objętości ściernicy. Analizowane zostały parametry struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy, mikrotopografie powierzchni przedmiotów obrobionych, wartości mocy szlifowania oraz parametry opisujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy.



Rys. 4.10 Szczegółowy schemat badań właściwych w postaci czarnej skrzynki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718

W trakcie badań dla każdego rodzaju ściernicy rejestrowano przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$ , zużycie objętościowe ściernicy  $V_s$  oraz objętość zeszlifowanego materiału  $V_w$ . Ocenę stanu czynnej powierzchni ściernic po szlifowaniu przeprowadzono na podstawie obrazów zarejestrowanych z wykorzystaniem laserowego mikroskopu pomiarowego LEXT OLS4000 firmy Olympus (opis w podrozdziale 4.3.3) i cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation (opis w podrozdziale 4.3.4). Pomiary mikrotopografii czynnej powierzchni ściernic wykonano z zastosowaniem laserowego mikroskopu pomiarowego LEXT OLS4000 firmy Olympus (opis w podrozdziale 4.3.3). Dla ściernicy referencyjnej oraz ściernic impregnowanych dwusiarczkiem molibdenu rejestrowano mikrotopografie obszarów będących wycinkiem czynnej powierzchni ściernicy o rozmiarze ok.  $3,0 \times 3,0$  mm. Pomiar odbywał się w ok. 4650 przejściach. W jednym przejściu rejestrowanych było ok. 4650 punktów. Do analizy zarejestrowanych mikrotopografii wykorzystany został program TalyMap Platinum 4.0.5., który na podstawie wprowadzonych danych pomiaro-

wych obliczał wartości wybranych parametrów SGP. Z uwagi na sytuację, w której dla tej samej powierzchni analizowanej przez ten sam zestaw filtrów stosowanych w różnych kolejnościach, otrzymuje się niejednokrotnie różne wyniki, zaproponowano metodykę postępowania w zakresie analizy topograficznej według algorytmu przedstawionego na rys. 4.11 (na podstawie algorytmu postępowania zawartego w pracy Tomkowskiego i innych [114]).



Rys. 4.11 Schemat zastosowanej metodyki przeprowadzania analizy topograficznej w układzie 3D

Aby udowodnić postawione hipotezy badania podzielono na kolejne etapy:

- wyznaczenie kryterium zakończenia okresu trwałości ściernicy;

- przeprowadzenie badań właściwych;
- analiza wyników przeprowadzonych badań;
- ocena efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

#### 4.6.1. Wyznaczenie kryterium zakończenia okresu trwałości ściernicy

Według Oczosia i Porzyckiego [78] trwałość ściernicy to okres użytkowania narzędzia ściernego między dwoma, kolejnymi obciążeniami czyli czas, w którym zachowuje ono zdolność skrawną. Trwałość ściernicy  $T_c$  to zdolność do przeciwstawiania się procesom zużywania się tj. tępienia się jej ostrzy skrawających, zalepienia jej czynnej powierzchni i naruszania jej prawidłowego, geometrycznego kształtu. Intensywność tych procesów, czyli także okres trwałości ściernicy, zależy od jej charakterystyki, właściwości materiału i kształtu przedmiotu obrabianego, wielkości nastawczych szlifowania, sztywności i odporności na drgania szlifierki oraz ośrodka, w którym jest przeprowadzana operacja szlifierska. Autorzy wymieniają kilka kryteriów zużycia ściernicy, powodujących konieczność poddania jej procesowi kondycjonowania. Do tych kryteriów wlicza się:

- przekroczenie tolerancji przez przedmiot obrabiany w wyniku zmiany kształtu ściernicy;
- przekroczenie parametru chropowatości powierzchni obrobionej poza wartość dopuszczalną, spowodowane nierównomiernym zużyciem narzędzia ściernego, rozwijającą się falistością jej CPS czy intensywnością drgań;
- przekroczenie lub podwyższenie temperatury szlifowania poza wartość progową, w związku z tym niebezpieczeństwo pojawienia się przypaleń szlifierskich na powierzchni przedmiotu lub zmian strukturalnych w warstwie wierzchniej;
- obniżenie wydajności objętościowej procesu szlifowania spowodowane stępieniem ściernicy.

Autorzy stwierdzili, że na moment obciążenia, a pośrednio na okres trwałości ściernicy, ma wpływ ocena stopnia nasilenia objawów jej tępienia się. Do tych objawów zaliczyli:

- zmianę dźwięku szlifowania;
- zwiększenie się amplitudy drgań;
- wzrost naprężeń szczątkowych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego;
- zwiększenie się poboru mocy;
- zwiększenie sił lub temperatury szlifowania;
- zmianę wyglądu powierzchni szlifowanej.

Sposoby wyznaczania momentu obciążania ściernicy, na podstawie rejestracji wymienionych objawów, mogą znaleźć zastosowanie tylko w warunkach ścisłego powiązania ich z odpowiednimi parametrami jakości szlifowanych powierzchni lub dokładności ich wymiarów. Z uwagi, że poszczególne rodzaje i odmiany szlifowania są związane z różnymi kryteriami, uwzględniającymi jeden lub więcej parametrów jakościowych obróbki, żaden z nich nie ma charakteru uniwersalnego. Obowiązuje więc następująca zasada wyboru właściwego kryterium: „*należy wiedzieć jaki parametr charakteryzujący jakość lub dokładność obróbki jest dla danej operacji szlifierskiej limitujący i dopiero potem wybierać sposób określenia momentu obciążania ściernicy, z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych*”.

W związku z tym określono zbiór następujących czynników wynikowych, które mogłyby decydować o zakończeniu okresu trwałości ściernicy.

Zbiór czynników badanych  $\bar{Y}(\bar{y}_1, \bar{y}_2)$ :

- $\bar{y}_1 = \overline{Ra}$ ,  $\mu\text{m}$  – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu;
- $\bar{y}_2 = \overline{\Delta P}$ , W – przyrost mocy szlifowania;
- $\bar{y}_3 = T_{\text{max}}$ , K – maksymalna temperatura szlifowania w obszarze roboczym.

Z wyżej wymienionych kryteriów tylko dla parametru chropowatości  $Ra$  można wyznaczyć wartość graniczną korzystając z danych literaturowych – dla szlifowania dokładnego wartość  $Ra = 0,63 \mu\text{m}$ . Jednak z technologicznego punktu widzenia parametr ten jako kryterium oceny końca okresu trwałości jest mało wygodny, ponieważ wiąże się z przerywaniem procesu i okresowym pomiarem chropowatości materiału obrobionego, co znacznie wydłuża czas badań oraz wprowadza zaangażowanie się dodatkowej osoby (metrolog) do planu badawczego, przez co skoordynowanie pracy staje się utrudnione (operator szlifierki – badacz – metrolog). W związku z powyższym postanowiono sprawdzić czy istnieje pewna graniczna moc szlifowania (wyrażona przyrostem mocy szlifowania  $\Delta P$ ) oraz temperatura szlifowania (wyrażona maksymalną temperaturą szlifowania w obszarze roboczym  $T_{\text{max}}$ ), po przekroczeniu których chropowatość powierzchni materiału obrobionego wyrażona parametrem  $Ra$  przekroczy wartość  $0,63 \mu\text{m}$ .

Badania przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch ściernic: referencyjnej oraz impregnowanej  $\text{MoS}_2$  zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.3 o koncentracji impregnatu w mieszaninie impregnującej  $C_i = 0,315$ . Jako kryterium okresu trwałości przyjęto przekroczenie wartości parametru chropowatości  $Ra$  ustalonej na poziomie  $Ra_{\text{gr.}} = 0,63 \mu\text{m}$ . Zbiorcze zestawienie parametrów obróbki przedstawiono w tabeli 4.6.

Tab. 4.6. Charakterystyka warunków szlifowania

Proces	Szlifowanie prostoliniowo-zwrotne walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718
Szlifierka	Szlifierka uniwersalna RUP-28P, Zakłady Mechaniczne „Tarnów” SA
Ściernica impregnowana	1-35×10×10-9A5X60L10VE01PI-50 impregnowana dwusiarczkiem molibdenu (MoS <sub>2</sub> ) wprowadzonym w wolne przestrzenie międzyziarnowe ściernicy, koncentracja $C_i = 0,315$
Ściernica referencyjna	1-35×10×10-9A5X60L10VE01PI-50 (nie modyfikowana)
Obciążacz i parametry kondycjonowania ściernicy	Jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie $Q_d = 1,25$ kt; $n_{sd} = 12\ 000$ obr./min; $v_{fd} = 10$ m/s; $a_d = 0,0125$ mm
Parametry szlifowania	$v_s = 45$ m/s; $q = 80$ ; $v_{fa} = 10,0$ mm/s; $v_{fr} = 0,05$ mm/min; $a_e = 0,01$ mm; $b_w = 20$ mm;
Płyn chłodząco-smarujący (PCS)	5% wodny roztwór oleju Castrol Syntilo RHS
Sposób podawania PCS	Chłodzenie zalewowe
Wydatek PCS	$Q_{PCS} = 2,7$ dm <sup>3</sup> /min

W trakcie badań rejestrowano moc szlifowania, parametry chropowatości powierzchni obrabianej z użyciem profilometru stykowego Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH oraz rejestrowano termogramy obszaru roboczego za pomocą kamery termowizyjnej Testo 890 firmy Testo AG. Badania polegały na tym, że w stałych odstępach czasu (co minutę) proces przerywano w celu pomiaru parametrów chropowatości materiału obrabianego. W tym samym czasie podczas procesu szlifowania mierzono dla każdego odstęp czasu (w każdych 60 sekundach procesu szlifowania) maksymalną moc szlifowania. W celu określenia ewentualnego wpływu temperatury szlifowania na wartość parametru chropowatości  $R_a$ , co 30 sekund rejestrowano termogramy obszaru roboczego w trakcie obróbki badanymi ściernicami.

#### 4.6.2. Ściernice użyte w badaniach

W badaniach użyto małogabarytowych ściernic typu 1. z mieszaniny dwóch ziaren ściernych, mikrokryształicznego korundu spiekane SG i elektrokorundu szlachetnego w proporcji 1:1, ze spoiwem ceramicznym o oznaczeniu technologicznym: 1-35×10×10 9A5X60L10V, które następnie poddano procesowi impregnacji grafitem, dwusiarczkiem molibdenu o różnych ich zawartościach w masie/objętości ściernicy. Ściernicę nieimpregnowaną również włączono do badań jako ściernicę referencyjną.

Tabela 4.7 prezentuje charakterystyki ściernic użytych w badaniach.

Tab. 4.7. Charakterystyki ściernic użytych w badaniach

Oznaczenie ściernicy	Rodzaj impregnatu	Nr ściernicy	Masa fazy rozpraszającej $m_{fi}$ , g	Masa impregnatu w preparacie $m_i$ , g	Koncentracja w preparacie $C_i$ , g/gmasy nośnika	Masa ściernicy $m_s$ , g	Masa ściernicy (bezp. po wyjęciu) $m_{pw}$ , g	Masa ściernicy (po odparowaniu fazy rozpraszającej) $m_{po}$ , g	Masa teoretyczna samego impregnatu w ściernicy $m_t$ , g	Ubytek masy nośnika (wyznaczony doświadczalnie) $\Delta m_n$ , -	Masa rzeczywista samego impregnatu w ściernicy $m_{rz}$ , g	Zawartość procentowa impregnatu w ściernicy $C_{pi}$ , %	Stożek zapełnienia impregnatem WPM w ściernicy $C_{zi}$ , %		
1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50	Brak	Ref.	-	-	-	17,64	-	-	-	-	-	-	-		
	Grafit	3G10	63,5	10	0,157	17,77	20,85	18,36	0,42	0,907	0,33	1,82	4,86		
		3G20		20	0,315	17,74	20,89	18,65	0,75		0,68	3,65	10,02		
		1G30		30	0,472	17,51	21,15	18,71	1,17		0,73	3,97	10,76		
	MoS <sub>2</sub>	2M10		10	0,157	17,72	20,96	18,41	0,44		0,43	2,33	3,83		
		2M20		20	0,315	17,77	21,18	18,87	0,82		0,86	4,57	7,66		
		2M30		30	0,472	17,68	21,65	19,25	1,27		1,32	6,88	11,76		
		2M40		40	0,630	17,46	22,13	19,55	1,80		1,83	9,34	16,30		
	$m_{rz} = \frac{(m_{po} - m_s) - (m_{pw} - m_s) \cdot (1 - \Delta m_n)}{\Delta m_n};$														

Dążąc do jak najbardziej wiarygodnego określenia wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania, szlifowanie prowadzono w tych samych warunkach obróbkowych wyznaczonych w badaniach rozpoznawczych (rozdział 7), natomiast impregnację przeprowadzono na ściernicach z tej samej partii produkcyjnej.

## 5. AUTORSKIE METODY IMPREGNOWANIA ŚCIERNIC SUBSTANCJAMI ANTYADHEZYJNYMI

Jedną z łatwiejszych metod impregnacji narzędzi ściernych stosowaną w przemyśle jest bezpośrednio wprowadzenie stopionego impregnatu w pory ściernicy. Po samoczynnym ostygnięciu impregnatu ściernica może zostać użyta jako narzędzie ścierne. Proces impregnacji mogą przeprowadzać producenci narzędzi, jak też ich użytkownicy.

Impregnacja ściernicy ma głównie na celu zmniejszenie intensywności zalepiania CPS materiałem obrabianym, a tym samym wydłużenie okresu jej trwałości, oraz wpływa pozytywnie na jakość powierzchni obrabianej. Ściernice impregnowane znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle łożyskowym i motoryzacyjnym. Szacuje się, że aż 70 do 80% oselek do honowania jest impregnowana siarką [48]. Znane z literatury [24,33,40,46,47,123,124] metody impregnacji ściernic w warunkach grawitacyjnych lub podwyższonego ciśnienia posiadają trzy zasadnicze wady:

- impregnat wypełnia wszystkie przestrzenie międzyziarnowe ściernicy, przez co narzędzie traci zdolność transportowania PCS do strefy szlifowania i usuwania produktów procesu;
- nierównomierne rozłożenie impregnatu w objętości ściernicy;
- skomplikowana i niewygodna w eksploatacji aparatura do impregnacji ściernic [123,124].

W przypadku szlifowania materiałów trudno skrawalnych jak stopy niklu ważne jest stosowanie ściernic o dużej porowatości w celu zapewnienia skutecznego transportu długich i ciągłych wiórów poza strefę obróbki. Impregnowanie ściernic w sposób tradycyjny spowodowałoby utratę dużej otwartości struktury CPS. Dlatego też w rozdziale tym opracowano nowe metody impregnowania ściernic substancjami antyadhezyjnymi takimi jak: siarka, węgiel amorficzny, grafit oraz dwusiarczek molibdenu.

### 5.1. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych polegająca na częściowym odwirowaniu impregnatu z objętości ściernicy

Zaproponowana metoda impregnacji ściernic polega na wprowadzeniu siarki, wosku, parafiny i innych do ściernicy podobnie jak w metodzie zaproponowanej przez Woźniaka [123], czyli impregnacja następuje w naczyniu pod zmniejszonym ciśnieniem, co powoduje że impregnat wypełnia wszystkie przestrzenie międzyziarnowe ściernicy. Następnie ściernicę wprowadza się w ruch wirowy w celu odwirowania nadmiaru impregnatu. Zmieniając parametry odwirowania (prędkość wirowania  $n_r$  oraz czas wirowania  $t_r$ ) można wpływać na ostateczną zawartość impregnatu i jednocześnie regulować porowatość ściernicy.

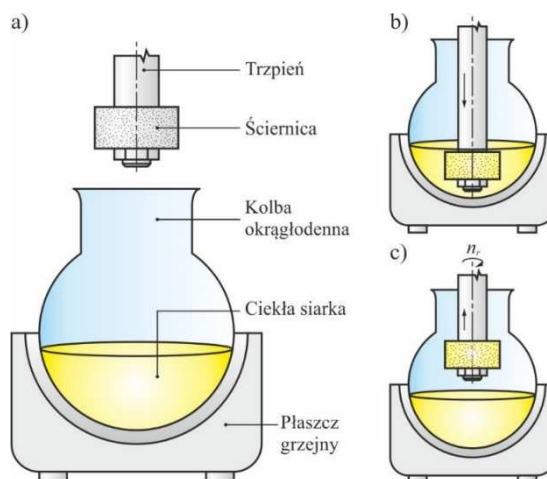
Aby wprowadzić określoną ilość siarki do ściernicy, w celu pozbycia się ewentualnej wilgoci, ściernicę należy suszyć przez ok. 30 min. w suszarce laboratoryjnej w temperaturze



ok. 80°C (353 K). Po tym czasie ściernicę należy umieścić natychmiast w eksykatorze i pozostawić do ostygnięcia. Po ostygnięciu ściernicę należy zważyć na wadze analitycznej. Następnie przystępuje się do nasiarczania. Siarka w temperaturze pokojowej jest ciałem stałym. Jej temperatura topnienia wynosi ok. 115°C (388 K). Proces nasiarczania prowadzi się w przedziale temperatur od 120°C (393 K) do 160°C (433 K).

Stałą siarkę należy umieścić w naczyniu ze szkła termoodpornego i ogrzewać na łaźni elektrycznej. Natomiast zważoną ściernicę przykręcić do metalowego trzpienia zamontowanego w mieszadło mechanicznym z możliwością przesuwu w pionie oraz regulacją obrotów. Gdy temperatura w naczyniu osiągnie 150°C (423 K) ściernicę zanurza się w płynnej siarce. Po ok. 10 minutach należy podnieść ściernicę na ok. 3 do 4 cm nad lustro ciekłej siarki i włączyć mieszadło w celu odprowadzenia nadmiaru siarki (obroty można regulować). Jeżeli pod wpływem siły odśrodkowej siarka nie będzie już wydostawać się na zewnątrz narzędzia, wyłączyć łaźnię i wirować aż do osiągnięcia temperatury krzepnięcia siarki. Dzięki temu zabiegowi siarka rozłoży się cienką warstwą, promieniowo w ściernicy. Tak spreparowane narzędzie zważyć ponownie w celu oznaczenia zawartości siarki w ściernicy.

Na rysunku 5.1 przedstawiono schemat stanowiska do nasiarczania ściernic ceramicznych. Głównym elementem stanowiska był płaszcz grzejny typu CMUT1000/CE firmy Thermo Fisher Scientific Inc. (USA). Został on zastosowany do wytworzenia i utrzymania żądanej temperatury w okrągłodennej kolbie laboratoryjnej, w której prowadzono nasiarczanie.



Rys. 5.1 Schemat stanowiska do nasiarczania ściernic: a) główne elementy stanowiska; b) ustawienie w fazie nasiarczania; c) ustawienie w fazie odwirowywania

Na rysunku 5.2 przedstawiono porównanie widoków mikroskopowych CPS przed (rys. 5.2a) i po procesie nasiarczania (przed odwirowaniem – rys. 5.2b oraz po procesie nasiarczania po odwirowaniu – rys. 5.2c). Ściernice o oznaczeniu technicznym: 1-25×20×10-SG/F46G10VTO nasiarczano zgodnie z opisaną metodą.



Rys. 5.2 Obrazy mikroskopowe SEM CPS z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane go o rozmiarze 46: a) przed nasiarczaniem; po nasiarczaniu bez odwirowania b) i z odwirowaniem c), z zaznaczonymi obszarami, na których widoczna jest siarka

W tabeli 5.1 zamieszczono dane dotyczące zmiany masy ściernic na skutek impregnacji. Masa ściernicy nienasiarczonej wynosiła  $m_1 = 24,28$  g, masa ściernicy po impregnacji, przed procesem odwirowania nadmiaru siarki wynosiła  $m_2 = 31,91$  g. W celu odwirowania nadmiaru siarki ściernicę wprowadzono w ruch obrotowy z prędkością  $n_r = 1200$  1/min, masa ściernicy po odwirowaniu nadmiaru siarki wynosiła  $m_3 = 26,90$  g. Oznacza to, że koncentracja siarki w ściernicy po procesie odwirowania wyniosła  $C_s = 9,74\%$ , a ubytek masy  $\Delta m$  siarki na skutek odwirowania wyniósł 34,34%. Najważniejszą różnicą widoczną po porównaniu obrazów mikroskopowych CPS nienasiarczonej (rys. 5.2a) i po nasiarczaniu przed odwirowaniem (rys. 5.2b) jest duży udział siarki na powierzchni ściernicy oraz niemal całkowite wypełnienie objętości wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Zauważyć jednak należy, że wypełnienie porów ściernicy powoduje ograniczenie pozytywnych skutków stosowania ściernic o otwartej strukturze, czy też ściernic wielkoporowych. Analizując widok mikroskopowy CPS po nasiarczaniu oraz po procesie odwirowania nadmiaru siarki (rys. 5.2c) udział siarki na powierzchni ściernicy zmalał, jednak nadal jest on znaczący, w porównaniu do widoku CPS nasiarczonej przed procesem odwirowania.

Tab. 5.1. Zmiany masy ściernicy wywołane procesem impregnacji siarką

Masa $m_1$ przed impregnacją	Masa $m_2$ po impregnacji siarką (przed odwirowaniem)	Masa $m_3$ po impregnacji siarką (po odwirowaniu)	Ubytek masy $\Delta m$ siarki na skutek odwirowania	Koncentracja $C_s$ siarki ( $(m_3 - m_1) / m_3 \cdot 100\%$ )
24,28 g	31,91 g	26,90 g	34,34%	9,74%

Po odwirowaniu nadmiaru siarki nastąpiło zwiększenie otwartości struktury geometrycznej powierzchni CPS, pojawiły się wolne przestrzenie międzyziarnowe. Ilość siarki w ściernicy po odwirowaniu zależy ściśle od prędkości wirowania. Dzięki odwirowaniu siarka rozprowadzana jest równomiernie w całej masie ściernicy. Nie dochodzi do wypełnienia siarką wszystkich przestrzeni międzyziarnowych, które ułatwiają docieranie płynu chłodząco-smarującego do strefy szlifowania

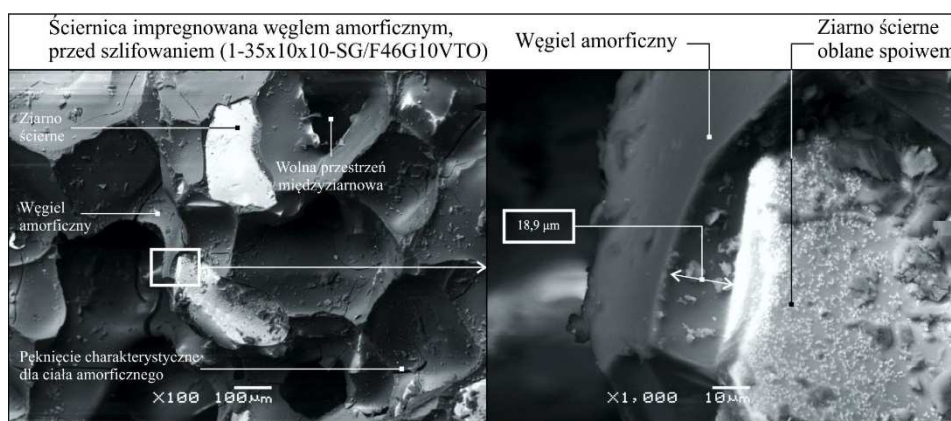
oraz usuwanie z niej produktów procesu. Fakt, że siarka w znacznym stopniu wypełniła pory ściernicy w porównaniu ze ściernicą nieimpregnowaną gwarantuje, że zabiegi obciążania, kondycjonowania i ostrzenia ściernicy nie wpłyną znacząco na udział siarki w procesie szlifowania.

## 5.2. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych węglem amorficznym

Węgiel bezpostaciowy, podobnie jak węgiel w postaci grafitu, jest mało reaktywny, dlatego też mógłby spełniać rolę impregnatu o działaniu antyadhezyjnym. Węgiel w postaci amorficznej wprowadzono do objętości ściernicy na drodze termicznego rozkładu związków organicznych, w tym przypadku węglowodanów, zgodnie z autorską metodą zawartą w zgłoszeniu patentowym nr P. 395441 [99].

Sposób modyfikacji ściernic ceramicznych przez impregnację węglem amorficznym, polega na tym, że ściernicę nasącza się stopionym albo rozpuszczonym związkiem organicznym. Do tego celu można użyć stopionej sacharozy ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) lub wodnego roztworu krystalicznego kwasu cytrynowego ( $C_6H_8O_7$ ). Następnie ściernicę praży się bez dostępu powietrza doprowadzając do rozkładu tego związku z wydzieleniem i osadzeniem węgla w porach modyfikowanego narzędzia ściernego. Efektem tego sposobu jest wprowadzenie do CPS oraz w przestrzenie międzyziarnowe ściernicy cienkiej warstwy amorficznego węgla o grubości ok. 19  $\mu m$  (rys. 5.3), która powinna umożliwić uzyskiwanie lepszej jakości powierzchni obrabianego materiału, zmniejszenie oporów szlifowania, wydłużenie okresu trwałości narzędzia, znacznego zmniejszenia adhezji wiórów do CPS.

Na rysunku 5.3 przedstawiono widoki mikroskopowe CPS po procesie impregnacji węglem amorficznym. Węgiel amorficzny na drodze impregnacji wprowadzono do czynnej powierzchni ściernicy o oznaczeniu technicznym: 1-35 $\times$ 10 $\times$ 10-SG/F46G10VTO zgodnie z opisaną metodą na drodze termicznego rozkładu sacharozy.



Rys. 5.3 Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy przed szlifowaniem, po impregnowaniu węglem amorficznym

W tabeli 5.2 zamieszczono dane dotyczące zmiany masy ściernicy na skutek impregnacji. Masa ściernicy przed impregnacją wynosiła  $m_1 = 17,23$  g, masa ściernicy po impregnacji  $m_2 = 18,28$  g. Oznacza to, że koncentracja węgla amorficznego w ściernicy po procesie impregnacji wyniosła  $C_{wa} = 5,74\%$ .

Tab. 5.2. Zmiany masy ściernicy wywołane procesem impregnacji węglem amorficznym

<i>Masa <math>m_1</math> przed impregnacją</i>	<i>Masa <math>m_2</math> po impregnacji węglem</i>	<i>Koncentracja <math>C_{wa}</math> węgla <math>((m_2 - m_1) / m_2 \cdot 100\%)</math></i>
17,23 g	18,28 g	5,74%

Wizualna analiza obrazów mikroskopowych czynnej powierzchni ściernicy po procesie impregnowania wskazuje, że impregnat został równomiernie rozprowadzony na całej CPS a także w całej jej objętości. Cecha ta jest szczególnie istotna z punktu widzenia eksploatacji ściernicy w procesie szlifowania, w którym konieczne jest okresowe odnawianie zdolności skrawnej ściernicy w zabiegu obciążania. Wprowadzenie impregnatu do całej objętości ściernicy gwarantuje jego ciągły udział w procesie usuwania materiału niezależnie od liczby obciążeń. Zarejestrowane obrazy mikroskopowe SEM (rys. 5.3) pokazują również, że dobrany stopień impregnacji zapewnił pozostawienie niezapełnionych części przestrzeni międzyziarnowych (porów). Przestrzenie te odgrywają bardzo ważną rolę w procesie szlifowania materiałów trudno skrawalnych, w którym wpływają na bardziej wydajne usuwanie ciągliwych wiórów ze strefy obróbki oraz wpływają na lepsze doprowadzenie do niej płynu chłodząco-smarującego. W przypadku całkowitego zapełnienia porów przez substancję impregnującą ta cecha ściernicy zostałaby utracona.

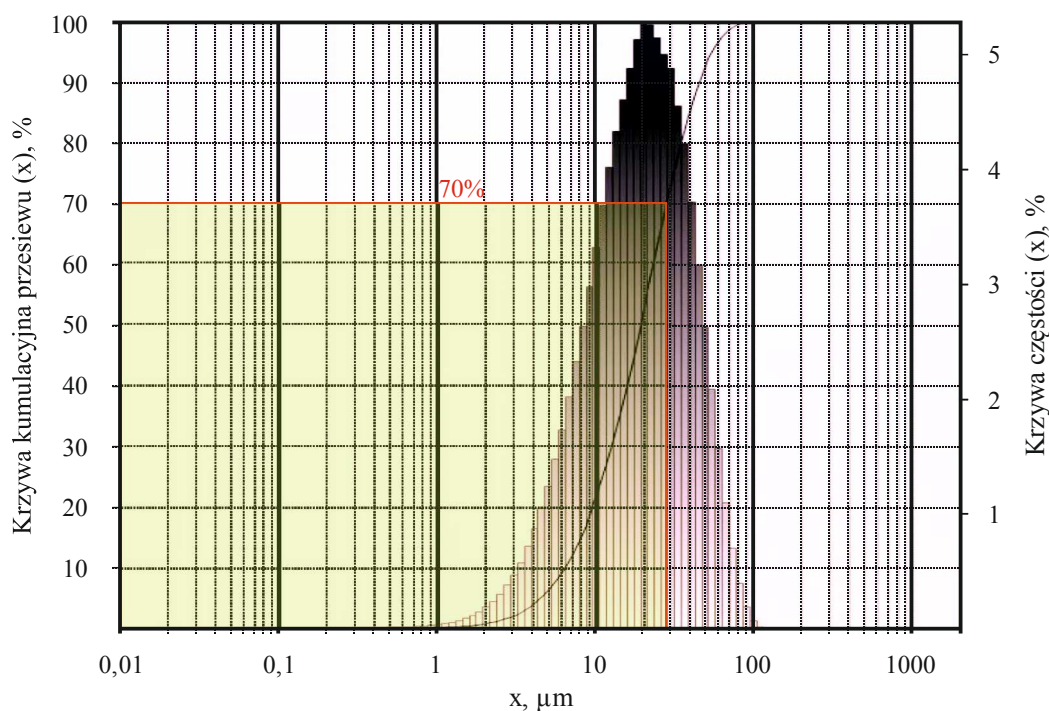
### **5.3. Metoda impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi i/lub smarnymi**

Zaproponowany sposób modyfikacji ceramicznych narzędzi ściernych przez wprowadzenie w strukturę ściernicy dodatkowej substancji w postaci środka antyadhezyjnego lub stałego smaru, polega na tym, że narzędzie ścierne nasącza się przez zanurzenie w przygotowanej zawieszynie: grafitu,  $\text{MoS}_2$ , hBN i innych proszków (faza rozproszona). Jako fazy rozpraszającej można użyć rozpuszczalnika organicznego z niewielką ilością lakieru (dla uzyskania lepszego trzymania impregnatu w ściernicy). Efektem tego sposobu jest wytworzenie cienkiej warstwy substancji przylegającej do powierzchni. Zaproponowana metoda impregnacji pozwala na kontrolowanie ilości wprowadzanego impregnatu w strukturę ściernicy, przez co użytkownik może dostosować jej ilość do określonego procesu obróbki.

Cztery rodzaje ściernic o jednakowej strukturze, różnych twardościach i numerach ziaren ściernych o oznaczeniach technicznych poddano procesowi impregnacji grafitem oraz MoS<sub>2</sub>:

- 1-35×10×10-9A5X60L10VE01PI-50;
- 1-35×20×10-9A5X60G10VE01PI-50;
- 1-35×20×10-9A5X80G10VE01PI-50;
- 1-35×20×10-9A5X46G10VE01PI-50.

Aby do ściernicy wprowadzić impregnaty początkowo przygotowano naważki stałych smarów (10-30 g grafitu oraz 10-45 g MoS<sub>2</sub>). Następnie z każdej naważki sporządzono zawiesinę (preparat) składającą się z 50 cm<sup>3</sup> rozpuszczalnika nitro oraz 25 cm<sup>3</sup> lakieru SOLAK NC 352520 PÓLMAT jako fazy rozpraszającej (nośnika) każda. Dodatkowo przygotowano sam roztwór rozpuszczalnika i lakieru w tych samych proporcjach objętościowych (2:1) w celu oznaczenia ubytku masy ściernicy wywołanej na skutek niecałkowitego odparowania fazy rozpraszającej. Następnie w każdej z zawiesin impregnowano po 3 ściernice z każdego rodzaju zapisując masy ściernicy przed impregnacją, zaraz po wyjęciu z preparatu oraz po całkowitym odparowaniu nośnika w ściernicy (kilkukrotnie ważąc do stałej masy). Masy rejestrowano na wadze laboratoryjnej Radwag PS 2100.R2 z dokładnością do 0,01 g. Do impregnacji grafitem użyto proszku grafitowego, w którym ponad 70% ziaren znajdowało się w przedziale 0-30 μm (rys. 5.4) natomiast do impregnacji MoS<sub>2</sub> użyto proszku Molykote<sup>®</sup> Microsize 0,65-0,75 μm (Fischer).



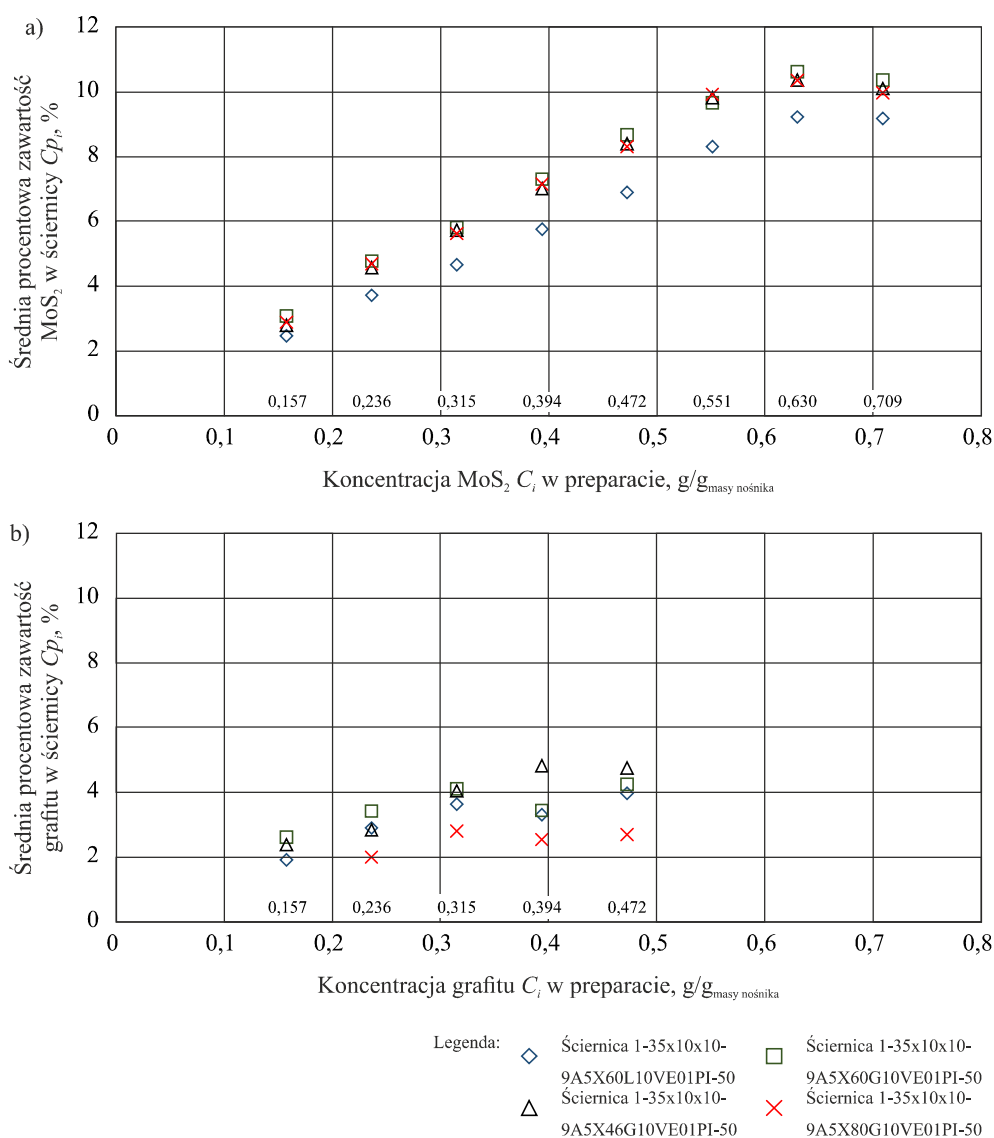
Rys. 5.4 Krzywa kumulacyjna uziarnienia grafitu – wykres w skali logarytmicznej przedstawiający udział poszczególnych frakcji uziarnienia grafitu w pyłe grafitowym



Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono wykres zależności średniej procentowej zawartości impregnatu w masie ściernicy  $Cp_i$  (równanie 7) w funkcji koncentracji impregnatu  $C_i$  w preparacie  $Cp_i=f(C_i)$ , która pozwoliła na ustalenie maksymalnego nasycenia impregnatu (disiarczku molibdenu – rys. 5.5a oraz grafitu – rys. 5.5b) na jednostkę masy ściernicy:

$$Cp_i = \frac{m_i}{m_{po}} \cdot 100\% , \quad (7)$$

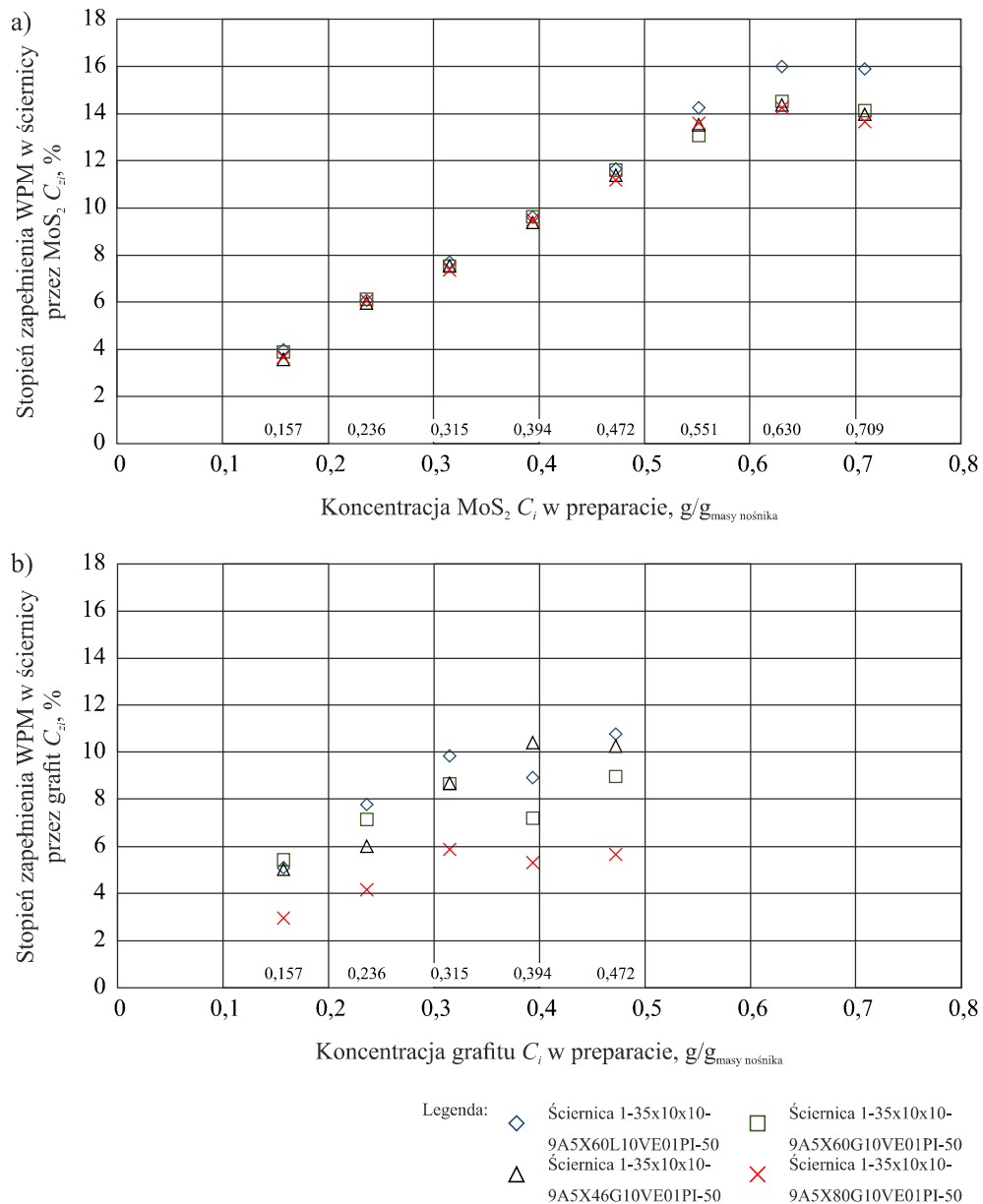
gdzie:  $Cp_i$  oznacza średnia procentowa zawartość impregnatu w masie ściernicy;  $m_i$  – masa czystego impregnatu (stałego smaru) w strukturze ściernicy;  $m_{po}$  – masa ściernicy po procesie impregnacji i ewentualnym całkowitym lub częściowym odparowaniu fazy rozpraszającej.



Rys. 5.5 Wykres zależności średniej procentowej zawartości impregnatu w masie ściernicy  $Cp_i$  od koncentracji impregnatu w preparacie  $C_i$ : a) dla MoS<sub>2</sub>, b) dla grafitu

Na podstawie tych samych danych opracowano drugi wykres zależności (rys.5.6), wydaje się bardziej zrozumiały z punktu widzenia procesu technologicznego wytwarzania narzędzi

ściernych, gdzie na osi rzędnych umieszczono stopień zapelnienia impregnatem wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy  $C_{zi}$ . Natomiast na osi odciętych umieszczono koncentrację impregnatu w preparacie impregnującym  $C_i$ . Gęstości grafitu i dwusiarczku molibdenu wynoszą odpowiednio  $1,97 \text{ g/cm}^3$  i  $3,26 \text{ g/cm}^3$ . Udział wolnych przestrzeni międzyziarnowych dla ściernicy o strukturze 10 i twardości G wynosi  $0,465 \text{ obj.}$  ściernicy natomiast udział wolnych przestrzeni międzyziarnowych dla ściernicy o strukturze 10 i twardości L wynosi  $0,39 \text{ obj.}$  ściernicy.



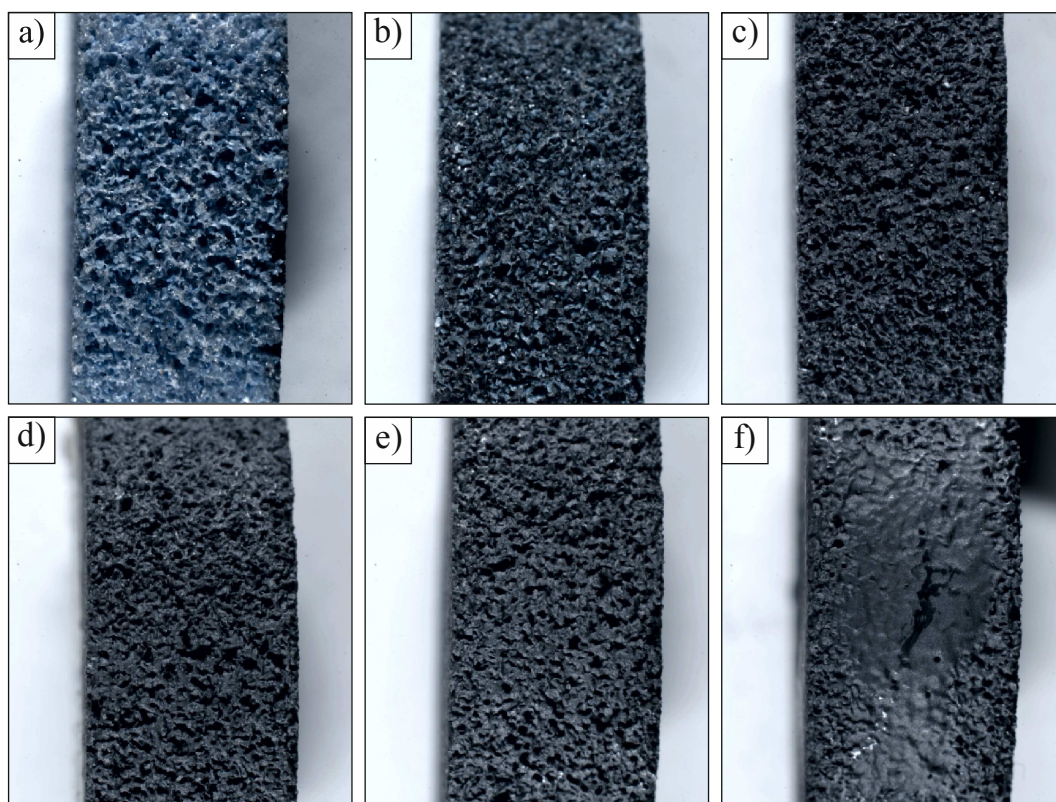
Rys. 5.6 Zmiana stopnia zapelnienia wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy przez impregnat  $C_i$  w zależności od koncentracji impregnatu w preparacie  $C_i$ : a) dla dwusiarczku molibdenu, b) dla grafitu

Stopień zapelnienia impregnatem wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy  $C_{zi}$  wyznaczono z równania 8:

$$C_{zi} = \frac{m_i}{d_i \cdot X_{WPM} \cdot V_s} \cdot 100\% , \% \text{ obj}, \quad (8)$$

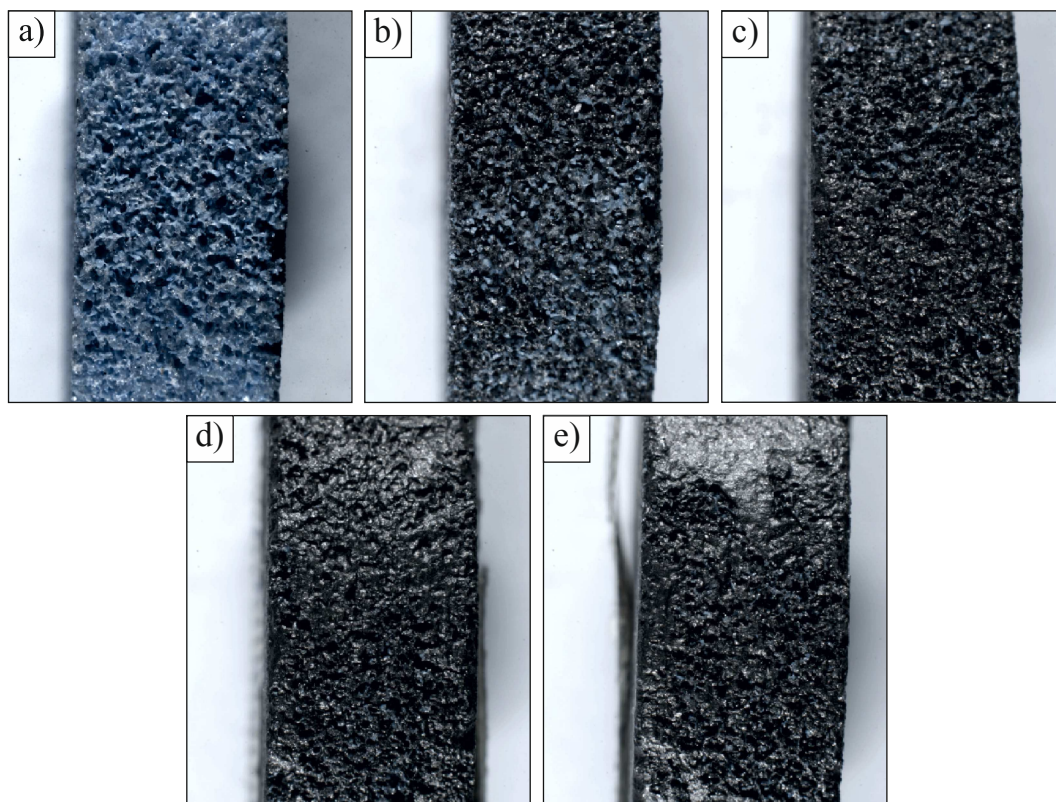
gdzie:  $C_{zi}$  – stopień zapelnienia impregnatem wolnych przestrzeni międzyziarnowych;  $m_i$  – masa impregnatu wprowadzonego do ściernicy;  $d_i$  – gęstość impregnatu;  $X_{WPM}$  – udział objętościowy WPM w ściernicy (wynika ze struktury oraz twardości ściernicy), –;  $V_s$  – objętość ściernicy. W przypadku impregnacji ściernic dwusiarczkiem molibdenu stopień zapelnienia WPM w ściernicy jest większy. Przy niskich koncentracjach  $\text{MoS}_2$  w preparacie twardość, struktura oraz wielkość ziaren ściernych nie ma znaczenia na stopień zapelnienia wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy. Cechy te zaczynają być istotne powyżej koncentracji  $C_i = 0,5$ . W procesie impregnacji grafitem cechy techniczne jak twardość, struktura oraz wielkość ziaren ściernych mają duże znaczenie. Im mniej otwarta struktura ściernicy tym w większym stopniu można ją zapelnąć impregnatem jednak masa impregnatu będzie mniejsza – rys. 5.5 i 5.6. należy oczekiwać, że istnieje minimalna wielkość struktury narzędzia ściernego, która pozwala na jego impregnację.

Wykonano również makrofotografie CPS przed i po procesie impregnacji  $\text{MoS}_2$  (rys. 5.7) oraz grafitem (rys. 5.8).



Rys. 5.7 Makrofotografie CPS o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50 przed i po procesie impregnacji  $\text{MoS}_2$  przy różnych koncentracjach impregnatu w mieszaninie impregnującej: a) nieimpregnowana (referencyjna); b)  $C_i = 0,157$ ; c)  $C_i = 0,315$ ; d)  $C_i = 0,472$ ; e)  $C_i = 0,630$ ; f)  $C_i = 0,709$





Rys. 5.8 Makrofotografie CPS o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50 przed i po procesie impregnacji grafitem przy różnych koncentracjach impregnatu w mieszaninie impregnującej: a) nieimpregnowana (referencyjna); b)  $C_i = 0,157$ ; c)  $C_i = 0,315$ ; d)  $C_i = 0,394$ ; e)  $C_i = 0,472$

Obserwacje CPS oraz wyniki badań wykazały, że w przypadku impregnacji proszkami smarnymi istnieje graniczna masa impregnatu (charakterystyczna dla każdej substancji) jaką można rozprowadzić w określonej masie fazy rozpraszającej. Po przekroczeniu tej granicy preparat nie jest zdolny do penetracji w całej objętości ściernicy, większa ilość impregnatu gromadzi się na powierzchni ściernicy tworząc „zacieki” – rys. 5.7f oraz 5.8e.

Dla wszystkich rodzajów ściernic impregnowanych  $\text{MoS}_2$  osiągnięto maksymalny przyrost masy przy jednakowej koncentracji impregnatu w preparacie (rys. 5.5). Wraz ze wzrostem twardości ściernicy udział spoiwa w ściernicy wzrasta a maleje objętość wolnych przestrzeni międzyziarnowych, co przyczynia się do spadku masy impregnatu na jednostkę masy narzędzia. Podczas impregnacji proszkami stałego smaru decydującą rolę odgrywa wielkość ziaren proszku. Dla impregnacji  $\text{MoS}_2$  (wielkość ziaren rzędu poniżej  $1 \mu\text{m}$ ) ilość wprowadzonego impregnatu nie zależy od wielkości ziaren ściernych. Inaczej jest w podcazas impregnacji grafitem (wielkość ziaren do  $30 \mu\text{m}$ ) ilość grafitu wprowadzonego do ściernicy zależy od wielkości ziaren ściernych. Im większe ziarno ściernie tym większe przestrzenie międzyziarnowe natomiast ich udział objętościowy jest stały. W związku z czym do ściernicy o takiej samej strukturze lecz mniejszym numerze ziarna ściernego można wprowadzić więcej grafitu. Wniosek ten potwierdza fakt, że najwięcej grafitu można wprowadzić do ściernicy o numerze ziarna 46,

w przypadku mniejszych ziaren możliwości impregnacji grafitem maleją (za duża wielkość cząstek grafitu) — rys. 5.5 i 5.6. Zatem można domniemać, że gdy użyje się proszków o podobnej wielkości ziaren, można spodziewać się, że impregnat w jednakowym stopniu (objętościowym) wypełni przestrzenie międzyziarnowe ściernicy niezależnie od rodzaju proszku. Przyrost masy ściernicy będzie zależny od gęstości użytego proszku.

#### **5.4. Wnioski oraz wybór metody, która zostanie wykorzystana w badaniach właściwych**

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych podczas opracowywania metod impregnacji ściernic ze spoiwem ceramicznym substancjami antyadhezyjnymi sformułowano następujące wnioski.

1. Brak możliwości łatwego kontrolowania ilości odwirowanej siarki w metodzie impregnacji ściernicy siarką polegającej na częściowym jej odwirowaniu z objętości ściernicy.
2. Mała powtarzalność wyników wynikająca z trudności w utrzymaniu stałych parametrów podczas odwirowywania siarki z objętości ściernicy.
3. Kosztowny proces prażenia substancji organicznych.
4. W przypadku impregnacji ściernicy przez rozkład termiczny związków organicznych ilość wprowadzonego węgla amorficznego do objętości ściernicy jest niewielka.
5. Możliwość łatwego sterowania procesem impregnacji ściernic z użyciem stałych sproszkowanych środków antyadhezyjnych.
6. W przypadku impregnacji stałymi sproszkowanymi środkami antyadhezyjnymi istnieje możliwość dostosowania ilości impregnatu w ściernicy.

W tabeli 5.3 zastosowano siedem kryteriów oceny charakteru aplikacyjnego opracowanych metod impregnacji ściernic ceramicznymi substancjami antyadhezyjnymi, którymi sugerowano się aby wybrać najkorzystniejszą metodę, która z kolei została wykorzystana w badaniach właściwych pracy. Z uwagi na agresywność siarki postanowiono wyłączyć ściernice impregnowane siarką z badań właściwych. Drugim argumentem sugerującym wyłączenie ściernic impregnowanych siarką był fakt, że rozwiązanie polegające na częściowym odwirowaniu płynnego impregnatu powoduje, że nie dochodzi do wypełnienia impregnatem wszystkich przestrzeni międzyziarnowych narzędzia, co z punktu widzenia samego procesu szlifowania jest korzystne. Jednak ta metoda przysparza pewne problemy związane z procesem odwirowania, koniecznością ciągłego kontrolowania temperatury podczas odwirowywania, ze względu na możliwość zapłonu samego impregnatu (siarka, parafina) przez co jej potencjał aplikacyjny

w przemyśle jest ograniczony. Problemy te skłoniły autora do opracowania innych, bardziej uniwersalnych metod impregnacji ceramicznych narzędzi ściernych, które mogłyby przeprowadzać nie tylko producenci narzędzi, ale też ich użytkownicy, dostosowując skład impregnatu do bieżących potrzeb technologicznych opisane w rozdziale 5.2 oraz rozdziale 5.3.

Tab. 5.3. Ocena charakteru aplikacyjnego opracowanych metod impregnacji ściernic ceramicznych substancjami antyadhezyjnymi

Kryterium \ Metoda impregnacji	Metoda impregnacji ściernic ceramicznych polegająca na odwirowaniu impregnatu z objętości ściernicy	Metoda impregnacji ściernic ceramicznych węglem amorficznym	Metoda impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi i/lub smarnymi
Rodzaj impregnatu	Siarka, parafina, wosk	Węgiel amorficzny	Grafit, MoS <sub>2</sub> , hBN
Sterowanie procesem impregnowania	Utrudnione	Utrudnione	Łatwe
Kontrolowanie ilości wprowadzonego impregnatu do objętości ściernicy	Utrudnione	Łatwe	Łatwe
Zapełnienie WPM w ściernicy impregnatem	Częściowe do całkowitego	Częściowe	Częściowe do całkowitego
Agresywność impregnatu	Duża (siarka) / Mała (pozostałe)	Mała	Mała
Możliwość zastosowania metody impregnacji ściernic ceramicznych przez producentów ściernic	Tak	Tak	Tak
Możliwość zastosowania metody impregnacji ściernic ceramicznych przez użytkowników ściernic	Utrudniona	Utrudniona	Łatwa

Z zestawienia przedstawionego w tabeli 5.3 wynika, że wszystkie kryteria spełniła metoda impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi i/lub smarnymi. Charakter aplikacyjny tej metody impregnacji ściernic ze spoiwem ceramicznym wydaje się być najbardziej obiecujący. W związku z tym w badaniach właściwych wytypowano metodę impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi i/lub smarnymi, według której ściernice zostały zaimpregnowane. Do impregnacji ściernic o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50 wykorzystano trzy różne koncentracje grafitu oraz cztery różne koncentracje dwusiarczku molibdenu w preparacie impregnującym.

## 6. BADANIA ZJAWISK ELEMENTARNYCH ZUŻYCIA ŚCIERNIC IMPREGNOWANYCH SIARKĄ (STOSOWANYCH STANDARDOWO) W PROCESIE WGLĘBNEGO SZLIFOWANIA STOPÓW NIKLU

### 6.1. Analiza wyników badań

Uzyskane wyniki badań przedstawiono oddzielnie dla każdego z trzech materiałów obrabianych (podrozdziały 6.1.1-6.1.3) a następnie w podrozdziale 6.1.4 dokonano ich porównania.

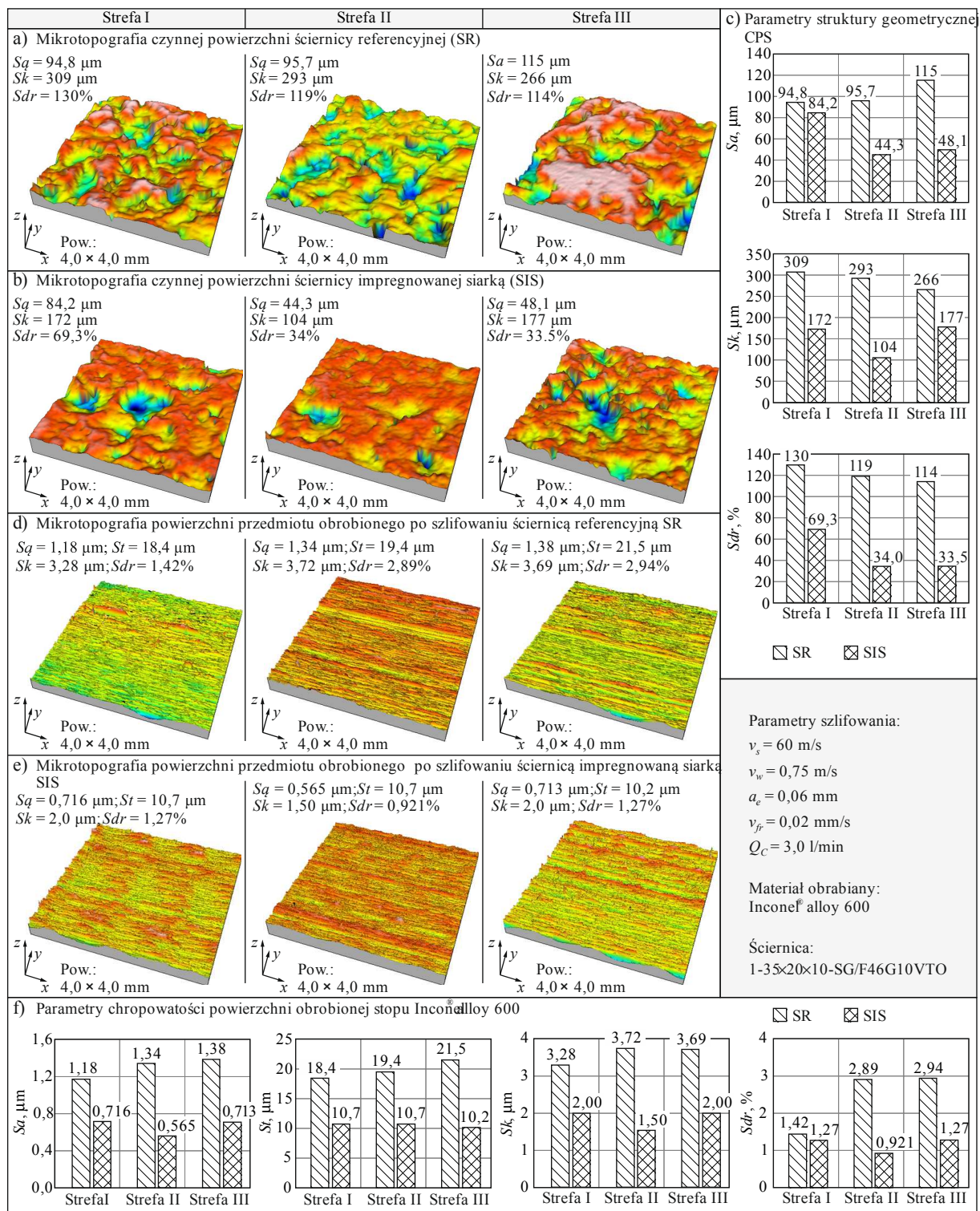
#### 6.1.1. Inconel<sup>®</sup> alloy 600

Zestawienie wyników analiz struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy nieimpregnowanej oraz impregnowanej siarką, której pewna ilość została odwirowaną, po szlifowaniu stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 przedstawiono na rysunkach 6.3a-c. Na rysunku 6.3d-f pokazano mikrotopografie trzech stref powierzchni stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 po szlifowaniu z użyciem ściernicy referencyjnej SR – rys. 6.1d oraz ściernicy impregnowanej siarką SIS – rys. 6.1e. Dodatkowo zamieszczono porównanie wybranych parametrów struktury geometrycznej poszczególnych stref powierzchni obrabianej (rys. 6.1f).

Porównując stan czynnej powierzchni ściernic SR i SIS po szlifowaniu (rys. 6.1c) widać wyraźną różnicę w wysokości nierówności ( $Sa$ ), strukturze ( $Sdr$ ) oraz nośności ( $Sk$ ). Wyznaczone wartości wybranych parametrów chropowatości CPS świadczą o średnio 42% zmniejszeniu wysokości wzniesień (ziaren ściernych), zmniejszeniu o 63% otwartości struktury oraz zmniejszeniu o 48% wartości parametru  $Sk$ , opisującego wysokość chropowatości rdzenia. Zmiany te były skutkiem wprowadzenia siarki w wolne przestrzenie międzyziarnowe ściernicy i nie zauważono na nie wyraźnego wpływu zmiennego czasu szlifowania w poszczególnych strefach ściernicy.

Analizując uzyskane wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej poszczególnych stref powierzchni stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 po szlifowaniu (rys. 6.1f), można zauważyć znaczne zredukowanie chropowatości powierzchni obrabianej ściernicą impregnowaną siarką, w porównaniu do wyników szlifowania ściernicą nieimpregnowaną. Wartości wyznaczonych parametrów były o około 50% mniejsze (średnia zmiana dla strefy I-III:  $Sa \approx 49\%$ ,  $St \approx 47\%$ ,  $Sk \approx 49\%$ ,  $Sdr \approx 52\%$ ) dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ściernicą impregnowaną siarką. Tendencja ta dotyczy w podobnym stopniu wszystkich trzech stref obróbkowych, przy czym najwyraźniej ujawniła się w przypadku strefy III, w której szlifowanie odbywało się najdłużej.

Może to wskazywać na znaczący wpływ obecności siarki w strefie szlifowania, na mechanizm formowania wiórów, powstawania wypływek, bruzdowania i inne decydujące o ostatecznej geometrii powierzchni stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 po szlifowaniu.



Rys. 6.1 Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrabianej stopu Inconel® alloy 600 (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabionego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabionego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrabionego po obróbce

### 6.1.2. Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT

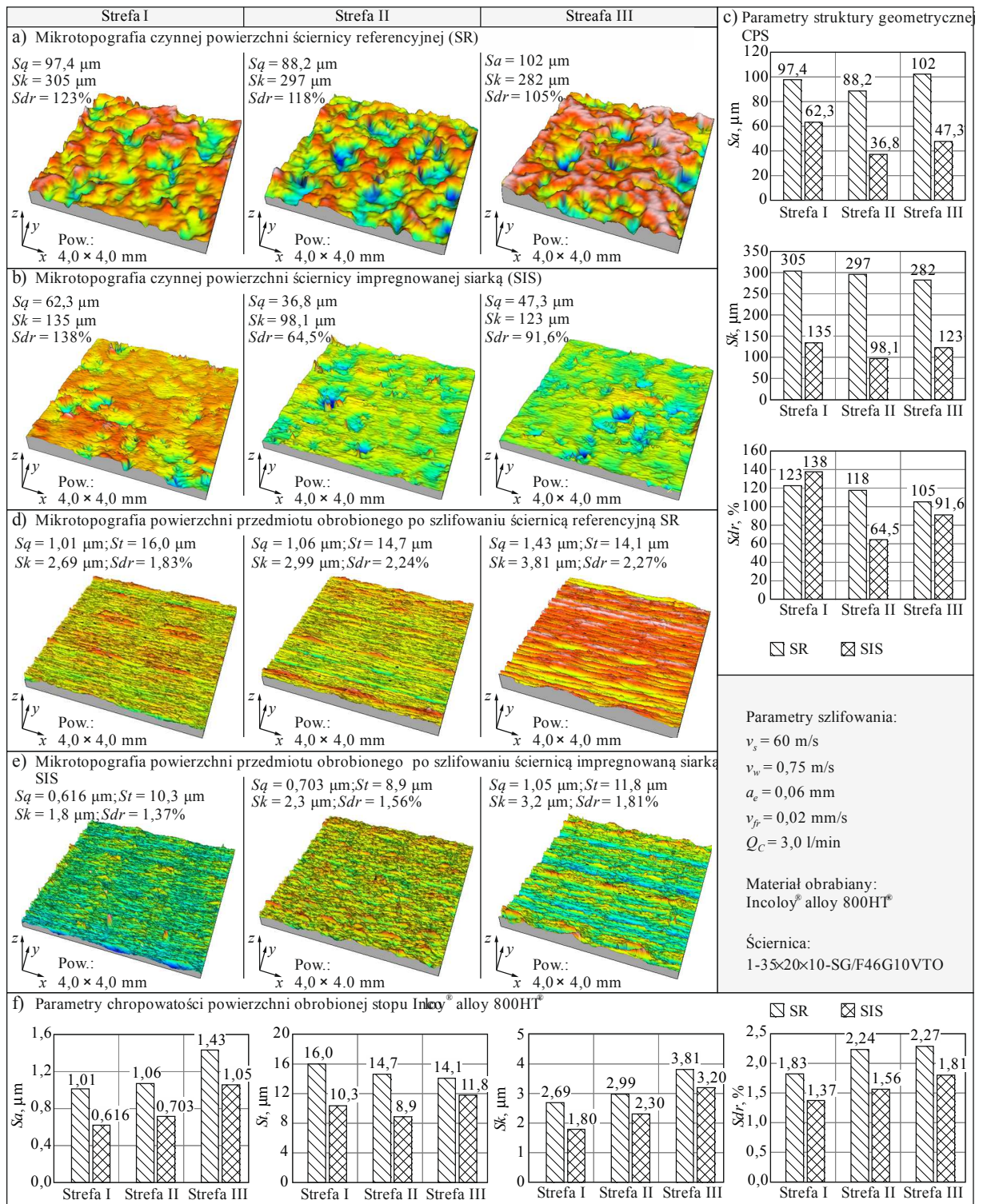
Na rys. 6.2 przedstawiono zbiorcze zestawienie wyników analiz struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej SR i impregnowanej siarką SIS (rys. 6.2a-c) oraz mikrotopografie z wartościami wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni poszczególnych stref stopu Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup> po szlifowaniu (rys. 6.2d-f).

Zarejestrowany charakter zmian parametrów opisujących mikrogeometrię ściernic jest analogiczny jak w przypadku ściernic po szlifowaniu stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600. Wartości wszystkich analizowanych parametrów są mniejsze w przypadku ściernic impregnowanych siarką. W porównaniu do wyników uzyskanych po szlifowaniu stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600, odnotowano nieznacznie większe różnice w wartościach parametru  $Sa$  (zmniejszenie o średnio 49%) oraz  $Sk$  (zmniejszenie o średnio 60%). Natomiast wartość parametru  $Sdr$ , opisującego stopień rozwinięcia struktury geometrycznej CPS, była w tym przypadku tylko o średnio 15% mniejsza dla ściernicy SIS (rys. 6.2c).

Podobnie jak w przypadku wyników szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600, również dla stopu Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup>, stwierdzono znaczące zredukowanie chropowatości powierzchni po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką. Średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni  $Sa$  dla wszystkich trzech stref charakteryzowało się spadkiem wartości wyznaczonych dla powierzchni ukształtowanej ściernicy SIS o około 27-39%, w odniesieniu do wyników uzyskanych dla powierzchni po szlifowaniu z użyciem ściernicy SR (rys. 6.2f). Pozostałe parametry opisujące chropowatość powierzchni obrobionej dla trzech stref roboczych zmieniały się następująco:  $St \approx 16-39\%$ ,  $Sk \approx 16-33\%$  i  $Sdr \approx 20-30\%$ . Oznacza to, około dwukrotne zmniejszenie korzystnego wpływu stosowania ściernicy SIS na jakość powierzchni obrobionej (średnia zmiana dla strefy I-III:  $Sa \approx 32\%$ ,  $St \approx 28\%$ ,  $Sk \approx 23\%$ ,  $Sdr \approx 25\%$ ) w porównaniu do wyników szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600 (rys. 6.1f). Wynikać to może z mniejszej gęstości (Inconel<sup>®</sup> alloy 600: 8,47 Mg/m<sup>3</sup>, Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup>: 7,94 Mg/m<sup>3</sup>) oraz większej wytrzymałości na rozciąganie (Inconel<sup>®</sup> alloy 600: 655 MPa, Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup>: 786 MPa) stopu Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup> [18,19,104,105].

Warto również zauważyć, że najmniejsze różnice pomiędzy parametrami chropowatości powierzchni stopu Incoloy<sup>®</sup> alloy 800HT<sup>®</sup> po szlifowaniu z użyciem ściernic SIS i SR zarejestrowano w strefie III. Świadczyć to może o tym, że czas pracy ściernicy i zjawiska zużycia CPS mogą wpływać na skuteczność oddziaływania siarki w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym.





Rys. 6.2 Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrabianej stopu Incoloy® alloy 800HT® (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabianego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabianego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego po obróbce

### 6.1.3. Stal 100Cr6

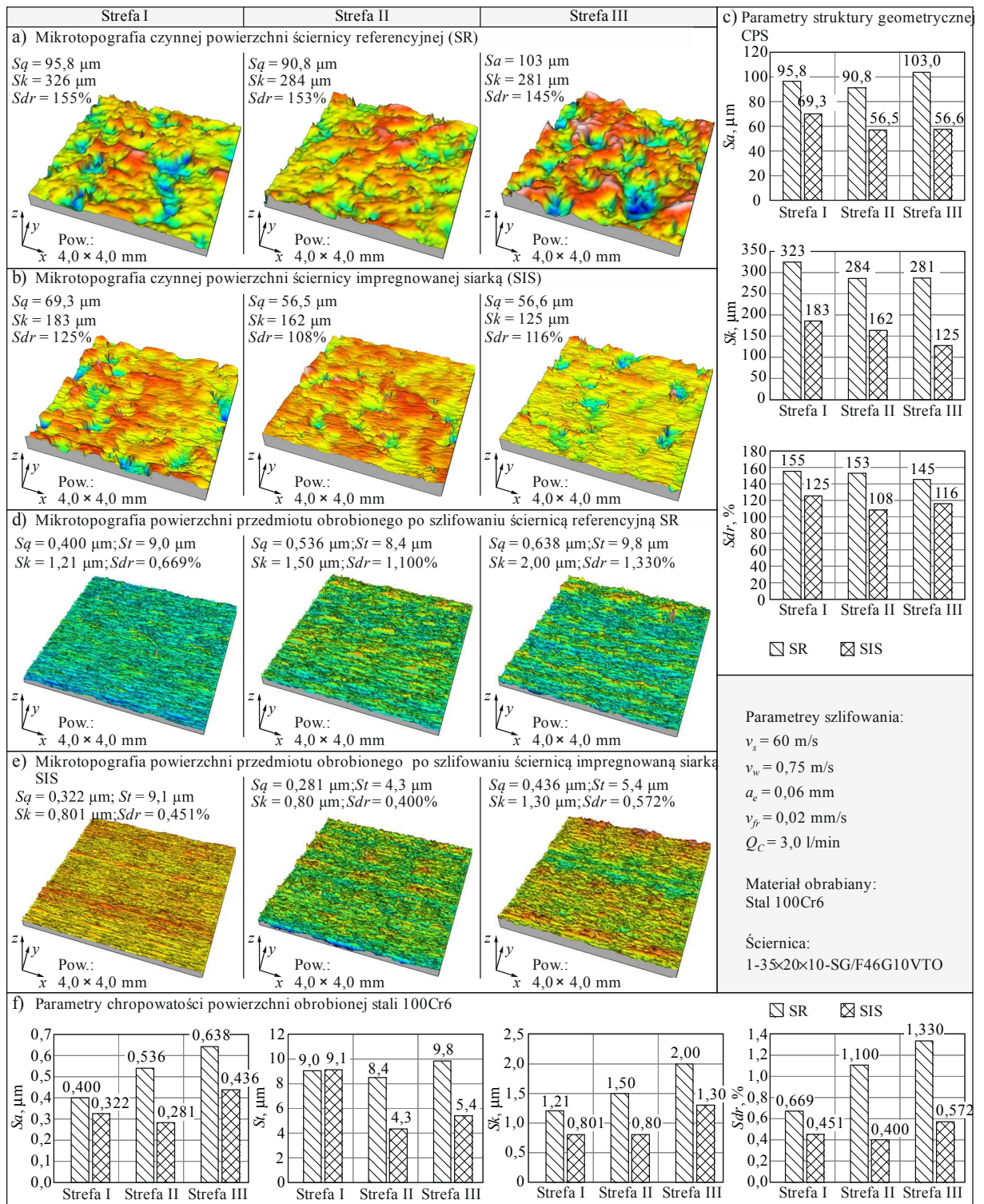
Zbiór mikrotopografii czynnej powierzchni ściernic SR i SIS oraz mikrotopografii powierzchni stali 100Cr6 po szlifowaniu zamieszczono na rysunku 6.3. Przedstawiono na nim również wykresy zmian wybranych parametrów chropowatości charakteryzujących CPS (rys. 6.3c) i powierzchnię obrobioną (rys. 6.3f).

Również w przypadku ściernicy zastosowanej do szlifowania stali 100Cr6 wartości parametrów opisujących cechy stereometryczne powierzchni ściernicy SIS były znacząco niższe w porównaniu do wartości wyznaczonych z pomiarów powierzchni ściernicy SR (rys. 6.3c). Różnica ta dla rozpatrywanych parametrów wynosiła odpowiednio (po uśrednieniu wartości z trzech badanych stref roboczych): 37% dla  $Sa$ , 47% dla  $Sk$  i 23% dla  $Sdr$ . Należy dodać, że nie uwidoczniła się w tym przypadku wyraźna tendencja w różnicach wartości pomiędzy analizowanymi trzema stopniami ściernicy.

Stal 100Cr6 została włączona do programu badań jako materiał referencyjny, stanowiący odniesienie dla wyników szlifowania materiałów trudno skrawalnych. Zastosowana stal poddana została wcześniej obróbce cieplnej typowej dla elementów łożysk tocznych. Szlifowane pierścienie były hartowane w temperaturze 830-840°C w gorącym oleju, z końcowym chłodzeniem w wodzie, a następnie poddane odpuszczaniu niskiemu w temperaturze 160-180°C przez okres 2h. W efekcie szlifowana stal charakteryzowała się twardością wynoszącą  $62 \pm 2$  HRC, co oznacza, że materiał ten był w tzw. stanie twardym. W trakcie szlifowania takich materiałów powstają krótkie łamliwe wióry, które łatwo są transportowane w przestrzeniach międzyziarnowych poza strefę szlifowania, dzięki czemu zalepienia czynnej powierzchni ściernicy powstają ze znacznie mniejszą intensywnością niż w przypadku szlifowania materiałów trudno skrawalnych, przy którym formują się długie i ciągliwe wióry. Dla porównania twardość stopów Inconel® alloy 600 i Incoloy® alloy 800HT® zawiera się w przedziale 24-34 HRC [18,19,104,105].

W procesie szlifowania wglębno stali 100Cr6 uzyskano zdecydowanie najniższą chropowatość powierzchni obrobionej. Wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażonej parametrem  $Sa$  zmieniały się w zakresie 0,400-0,638  $\mu\text{m}$  po szlifowaniu ściernicą SR i 0,281-0,436  $\mu\text{m}$  z użyciem ściernicy SIS (rys. 6.3d-f). Maksymalna zmierzona wartość parametru  $Sa$  dla powierzchni obrobionej w strefie III wynosiła 0,638  $\mu\text{m}$ , a dla powierzchni ukształtowanej ściernicą impregnowaną była w tym samym obszarze o około 32% mniejsza i wynosiła 0,436  $\mu\text{m}$  (rys. 6.3f). Jest to rezultat bardzo korzystny zważywszy na fakt, że w zastosowanej metodzie badawczej szlifowanie przerywane było na etapie szlifowania zgrubnego z pominięciem szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania.



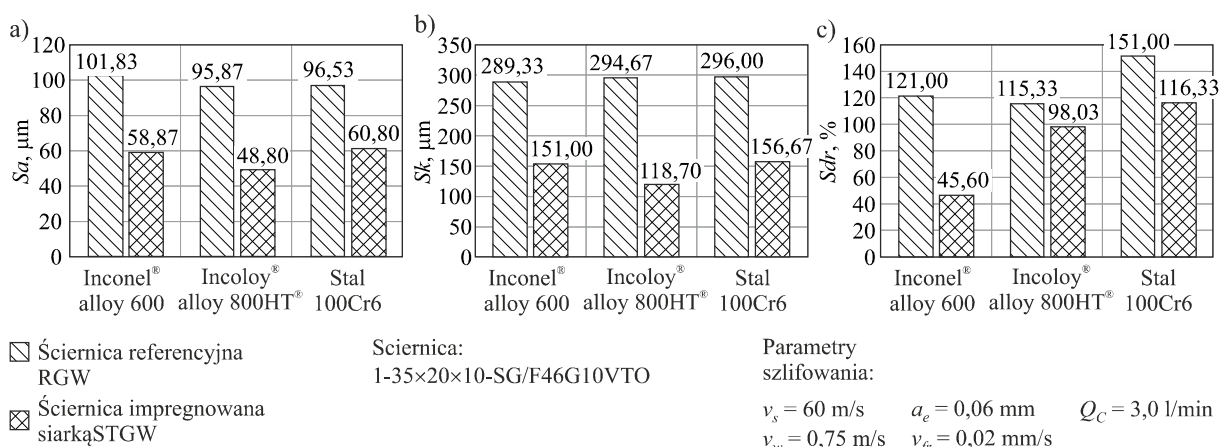


Rys. 6.3 Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrabianej stali 100Cr6 (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabionego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrabionego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrabionego po obróbce

### 6.1.4. Podsumowanie wyników badań

Wyznaczone wartości trzech analizowanych parametrów ( $Sa$ ,  $Sk$  i  $Sdr$ ) struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej SR oraz ściernicy impregnowanej siarką SIS uśredniono dla kolejnych stref roboczych (strefa I, II, III) i przedstawiono w formie wykresów na rysunku 6.4.

Porównanie wartości parametrów chropowatości CPS powierzchni SR i SIS wskazuje, że wprowadzenie siarki w pory ściernicy w opracowanym procesie impregnacji z odśrodkowym wirowaniem, skutkuje znaczącym zmniejszeniem otwartości struktury geometrycznej badanych ściernic. Wartości parametru  $Sa$  zmniejszyły się średnio o 43% (rys. 6.4a),  $Sk$  o 50% (rys. 6.4b) a  $Sdr$  o 34% (rys. 6.4c). Uzyskane wyniki pomiarów w głównej mierze zależały od warunków procesu impregnacji.



Rys. 6.4 Parametry struktury geometrycznej CPS referencyjnej oraz impregnowanej siarką, dla wszystkich analizowanych materiałów (wartości uśrednione z 3 stref szlifowania): a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni  $Sa$ ; b) wysokość chropowatości rdzenia  $Sk$ ; c) współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Sdr$

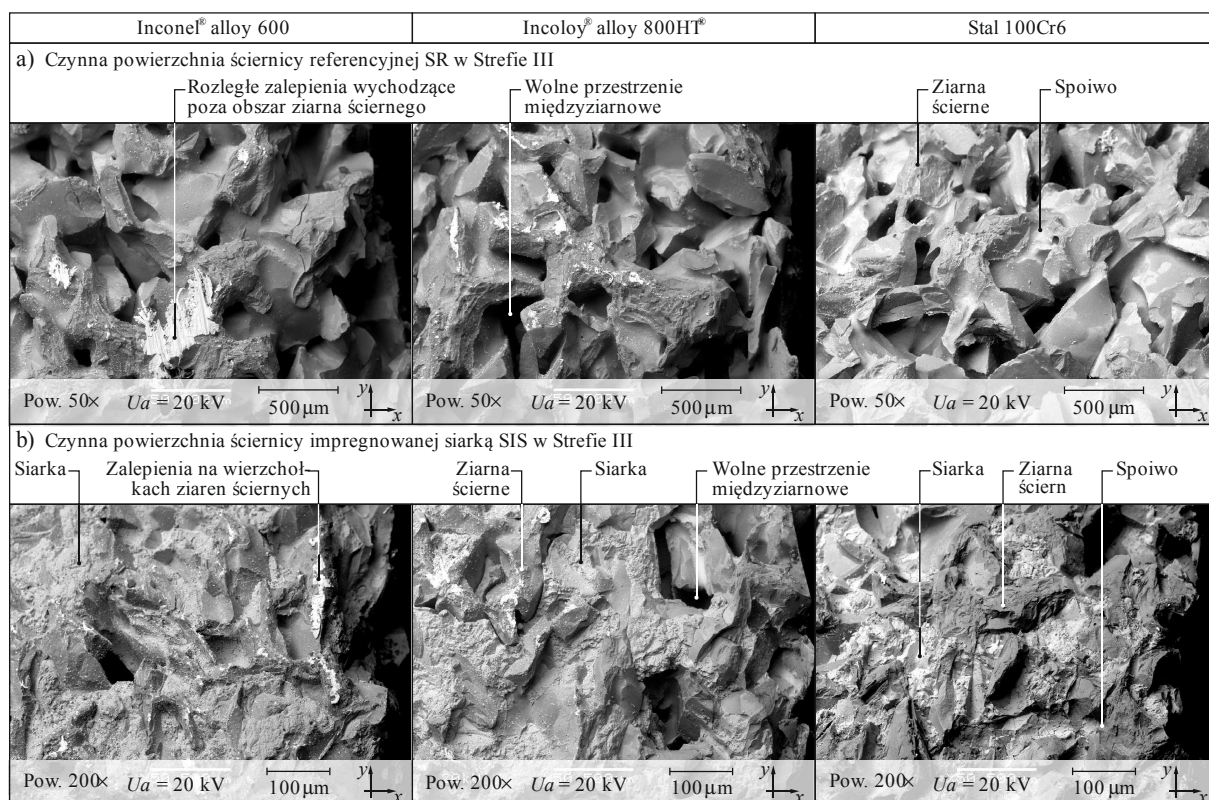
Na parametry opisujące cechy stereometryczne CPS miały również wpływ zalepienia powierzchni wiórami materiału obrabianego. W celu identyfikacji formy oraz liczby zalepień przeprowadzono obserwacje czynnych powierzchni badanych ściernic z użyciem elektronicznego mikroskopu skaningowego. Na rysunku 6.5 przedstawiono wybrane widoki mikroskopowe SEM czynnej powierzchni strefy III SR i SIS po procesie szlifowania włąbnego trzech rozpatrywanych materiałów.

Porównanie widoków mikroskopowych SEM czynnej powierzchni strefy III ściernicy referencyjnej (rys. 6.5a) i widoków mikroskopowych czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej (rys. 6.5b) po szlifowaniu, wskazuje na ograniczenie intensywności powstawania rozle-

głych zalepień międzyziarnowych. Efekt ten jest szczególnie dobrze widoczny przy porównaniu widoków SEM czynnej powierzchni ściernicy SR i SIS po szlifowaniu stopu Inconel® alloy 600.

Wprowadzenie siarki nie zapobiegło jednak powstawaniu zalepień mikroobszarów na wierzchołkach ziaren ściernych mikrokryształicznego korundu spiekane (rys. 6.5b). W przypadku wszystkich szlifowanych materiałów na czynnej powierzchni badanych obserwowano takie mikrozalepienia, jednak na czynnej powierzchni ściernicy SIS było ich znacznie mniej.

Wynika z tego, że mimo, że impregnowanie siarką powoduje znaczące zmniejszenie objętości przestrzeni międzyziarnowych co wyrażone zostało m.in. parametrami struktury geometrycznej CPS (rys. 6.1 do 6.4), antyadhezyjne właściwości siarki spowodowały, że na czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej siarką SIS nie powstały duże zalepienia przestrzeni międzyziarnowych a mikrozalepień wierzchołków aktywnych ziaren ściernych powstało znacznie mniej (rys. 6.5).



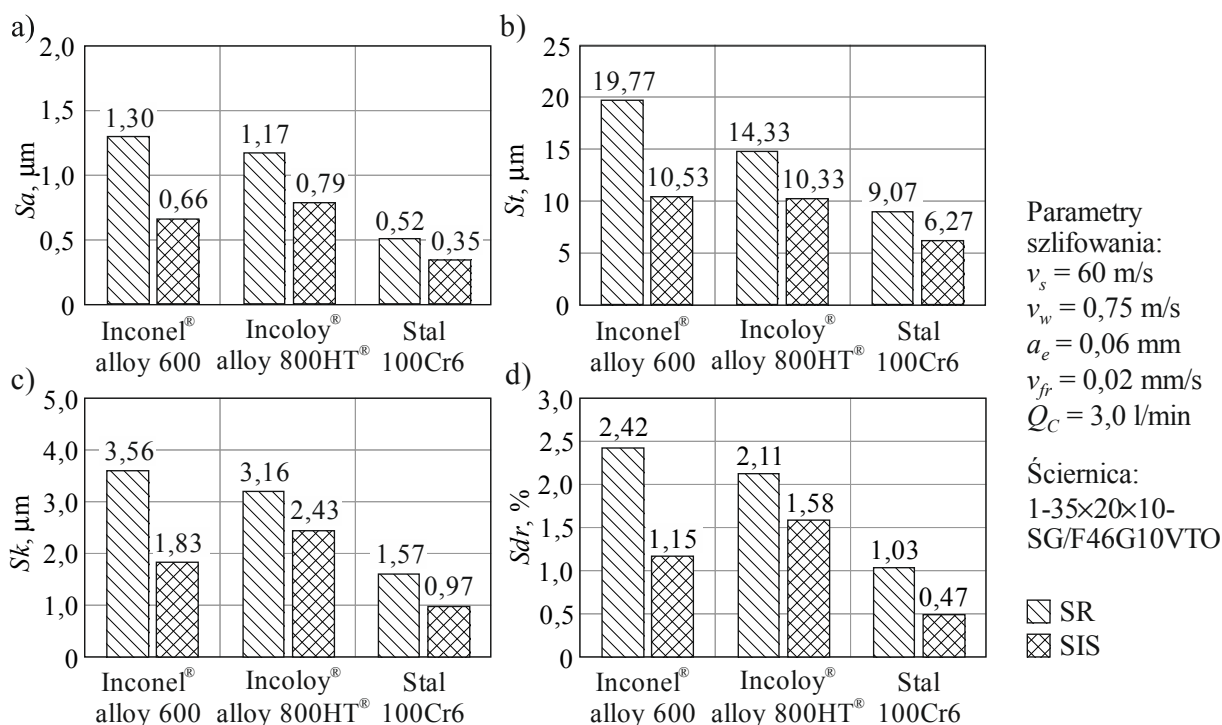
Rys. 6.5 Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej SR i ściernicy impregnowanej siarką SIS w strefie III po szlifowaniu w głębnym stopu Inconel® alloy 600, Incoloy® alloy 800HT® i stali 100Cr6: a) ściernica referencyjna; b) ściernica impregnowana siarką

Na rysunku 6.6 przedstawiono zbiorcze wykresy wartości parametrów  $S_a$ ,  $S_t$ ,  $S_k$  oraz  $S_{dr}$ , uśrednione z wyników uzyskanych dla poszczególnych stref roboczych (strefa I, II i III), obliczone na podstawie pomiarów mikrotopografii powierzchni materiałów obrobionych z użyciem



SR i SIS. Sporządzone wykresy pozwalają stwierdzić, że w przypadku wyników szlifowania stopów niklu, chropowatość powierzchni obu tych materiałów była zbliżona i uśredniając ponad dwukrotnie większa niż w przypadku powierzchni dobrze skrawalnej stali 100Cr6 (rys. 6.6).

W przypadku wszystkich rozpatrywanych parametrów chropowatości powierzchni obrabianej uzyskano korzystniejsze wartości w przypadku zastosowania SIS. Uwzględniając wyniki dla wszystkich badanych materiałów uzyskano zmniejszenie wartości parametru  $Sa$  o 38% (rys. 6.6a),  $St$  o 35% (rys. 6.6b),  $Sk$  o 36% (rys. 6.6c) a  $Sdr$  o 44% (rys. 6.6d). Można zatem stwierdzić, że wyznaczone różnice były znaczące i obecność siarki w strefie szlifowania w korzystny sposób wpłynęła na uzyskaną chropowatość powierzchni po szlifowaniu zarówno trudno skrawalnych stopów niklu jak i stali 100Cr6.



Rys. 6.6 Parametry struktury geometrycznej powierzchni materiału obrabianego po obróbce z wykorzystaniem ściernicy referencyjnej I impregnowanej siarką dla wszystkich badanych materiałów (wartości uśrednione z 3 stref szlifowania): a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni  $Sa$ ; b) całkowita wysokość nierówności powierzchni; c) wysokość chropowatości rdzenia  $Sk$ ; d) współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Sdr$

## 6.2. Wnioski z przeprowadzonych badań

Podsumowując należy podkreślić, że zaproponowany sposób wprowadzenia siarki do czynnej powierzchni ściernicy, polegający na grawitacyjnym wprowadzaniu siarki do objętości ściernic ceramicznych i następnym odwirowaniu, pozwolił na skuteczną modyfikację właściwości skrawnych ściernicy.

Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych zamieszczono poniżej.

1. Impregnacja pozwala w znaczący sposób ograniczyć intensywność zalepiania CPS włórami materiału obrabianego.
2. Korzystny efekt ograniczenia intensywności powstawania zalepień CPS dotyczy szczególnie ograniczenia tworzenia najbardziej niekorzystnych technologicznie, rozległych zalepień przestrzeni międzyziarnowych.
3. Obecność siarki w masie ściernicy jedynie w ograniczonym stopniu wpłynęła na intensywność powstawania zalepień w mikroobszarach wierzchołków ziaren ściernych.
4. Wykazano korzystny wpływ impregnowania ściernic siarką na uzyskiwane chropowatości przedmiotów obrobionych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 600, Incoloy alloy 800HT<sup>®</sup> oraz materiału referencyjnego – stali 100Cr6; W badaniach uzyskano różnice w wartości parametru *Sa* w zakresie 32-49% na korzyść powierzchni szlifowanych ściernicami impregnowanymi siarką.
5. Uzyskane wyniki eksperymentów wskazują, że kolejne prace powinny obejmować badania eksploatacyjne w typowych odmianach kinematycznych obwodowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w materiałach trudno skrawalnych z wykorzystaniem ściernic impregnowanych.

## 7. BADANIA ROZPOZNAWCZE PROCESU SZLIFOWANIA OTWORÓW ZE STOPU INCONEL® ALLOY 718

### 7.1. Wyniki eksperymentu

Wyniki eksperymentu wykonanego zgodnie z programem zdeterminowanym – kompletnym zestawiono w tabeli 8.2.

Tab. 7.1. Wyniki badań średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu  $Ra$  powierzchni przedmiotów obrobionych oraz przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718

Numer doświadczenia	Czynnik wynikowy							
	$y'_1$	$y'_2$	$y'_3$	$y'_{sr.}$	$y''_1$	$y''_2$	$y''_3$	$y''_{sr.}$
	$Ra_1, \mu\text{m}$	$Ra_2, \mu\text{m}$	$Ra_3, \mu\text{m}$	$Ra_{sr.}, \mu\text{m}$	$\Delta P_1, \text{W}$	$\Delta P_2, \text{W}$	$\Delta P_3, \text{W}$	$\Delta P_{sr.}, \text{W}$
01	0,28	0,22	0,23	0,24	340	330	300	323,3
02	0,40	0,32	0,36	0,36	420	375	400	398,3
03	0,52	0,56	0,55	0,54	510	555	530	531,7
04	0,30	0,28	0,32	0,30	360	405	390	385
05	0,42	0,45	0,36	0,41	370	515	410	431,7
06	0,55	0,58	0,56	0,56	560	650	590	600
07	0,35	0,28	0,30	0,31	420	330	385	378,3
08	0,47	0,39	0,46	0,44	510	460	480	483,3
09	0,55	0,65	0,60	0,60	660	700	650	670

### 7.2. Eliminacja wyników obarczonych błędem grubym

W celu wyeliminowania wyników pomiarów obarczonych błędem grubym wykonano test  $Q$ -Dixona. W tym celu otrzymane wartości wyjściowe obiektu dla poszczególnych prób uporządkowano w ciąg niemalejący. Macierz uporządkowaną wyników eksperymentu przedstawiono w tabelicy 14. Następnie obliczono wartość rozstępu  $R$  zgodnie ze wzorem:

$$R = y_n - y_1 \quad (9)$$

oraz obliczyć parametry  $Q_1$  i  $Q_n$  według wzorów:

$$Q_1 = \frac{y_2 - y_1}{R} \quad \text{i} \quad Q_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{R} \quad (10)$$

W kolejnym etapie porównano otrzymane wartości z wartością  $Q_{kr}$  odczytaną z tablic rozkładu  $Q$ -Dixona (dla  $Q_{kr}(\alpha = 0,05; r = 3) = 0,941$ ). Jeśli któryś z obliczonych parametrów przekroczył

wartość krytyczną  $Q_{kr}$  to wynik na podstawie, którego został obliczony ( $y_n$  lub  $y_l$ ) odrzucano jako obarczony błędem grubym.

Tab. 7.2. Uporządkowana macierz wyników eksperymentu, test  $Q$ -Dixona

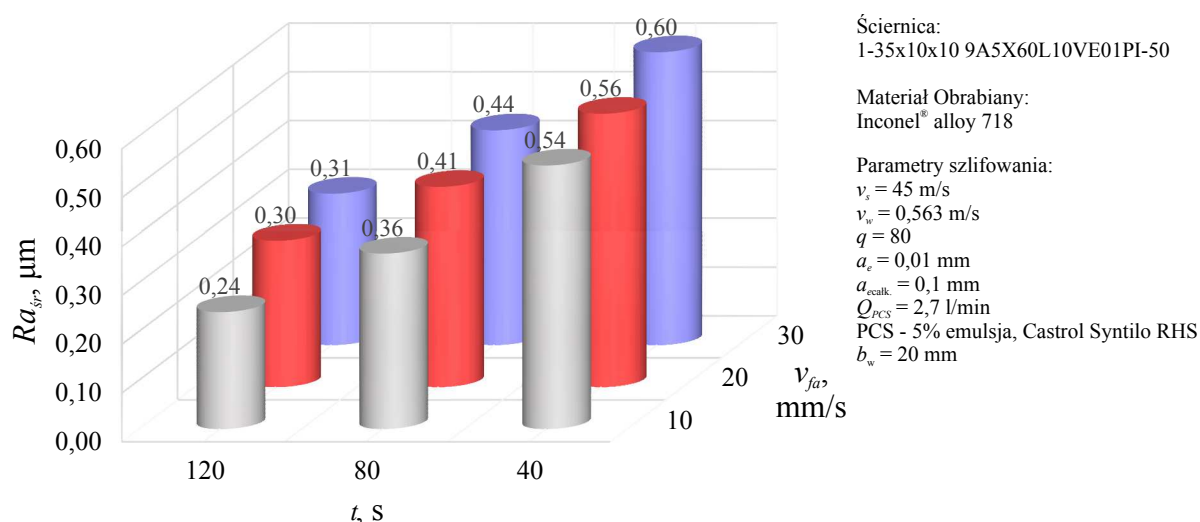
Numer doświadczenia	Czynnik wynikowy			Test $Q$ -Dixona				
	$y'_1$	$y'_2$	$y'_3$	$R$	$Q_l$	$Q_n$	$Q_l < Q_{kr}^*$	$Q_n < Q_{kr}^*$
	$Ra_1, \mu\text{m}$	$Ra_2, \mu\text{m}$	$Ra_3, \mu\text{m}$					
01	0,22	0,23	0,28	0,06	0,17	0,83	TAK	TAK
02	0,32	0,36	0,40	0,08	0,50	0,50	TAK	TAK
03	0,52	0,55	0,56	0,04	0,75	0,25	TAK	TAK
04	0,28	0,30	0,32	0,04	0,50	0,50	TAK	TAK
05	0,36	0,42	0,45	0,09	0,67	0,33	TAK	TAK
06	0,55	0,58	0,56	0,03	0,33	0,67	TAK	TAK
07	0,28	0,30	0,35	0,07	0,29	0,71	TAK	TAK
08	0,39	0,46	0,47	0,08	0,88	0,12	TAK	TAK
09	0,55	0,60	0,65	0,10	0,50	0,50	TAK	TAK
Numer doświadczenia	Czynnik wynikowy			Test $Q$ -Dixona				
	$y''_1$	$y''_2$	$y''_3$	$R$	$Q_l$	$Q_n$	$Q_l < Q_{kr}^*$	$Q_n < Q_{kr}^*$
	$\Delta P_1, \text{W}$	$\Delta P_2, \text{W}$	$\Delta P_3, \text{W}$					
01	300	330	340	40,00	0,75	0,25	TAK	TAK
02	375	400	420	45,00	0,56	0,44	TAK	TAK
03	510	530	555	45,00	0,44	0,56	TAK	TAK
04	360	390	405	45,00	0,67	0,33	TAK	TAK
05	370	410	515	145,00	0,28	0,72	TAK	TAK
06	560	590	650	90,00	0,33	0,67	TAK	TAK
07	330	385	420	90,00	0,61	0,39	TAK	TAK
08	510	460	480	50,00	0,40	0,60	TAK	TAK
09	650	660	700	50,00	0,20	0,80	TAK	TAK

\*  $Q_{kr} (\alpha = 0,05; r = 3) = 0,941$

Ponieważ dla wszystkich wierszy macierzy wyników eksperymentu (tab. 7.2) spełniony jest warunek  $Q_l < Q_{kr}$  nie ma podstaw do odrzucenia minimalnych wartości wyników eksperymentu otrzymanych dla poszczególnych punktów planu. Analogicznie nie ma podstaw do odrzucenia maksymalnych wartości wyników, ponieważ zachowany jest warunek  $Q_n < Q_{kr}$ .

### 7.3. Wyznaczenie modelu matematycznego dla zmian chropowatości powierzchni $Ra$

Wyniki pomiarów uśrednionych wartości średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu  $Ra$  przedmiotów obrobionych w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$  przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1 Wyniki badań doświadczalnych wpływu prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$  na uśrednione (dla 3 prób) wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażone parametrem  $Ra$  podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718

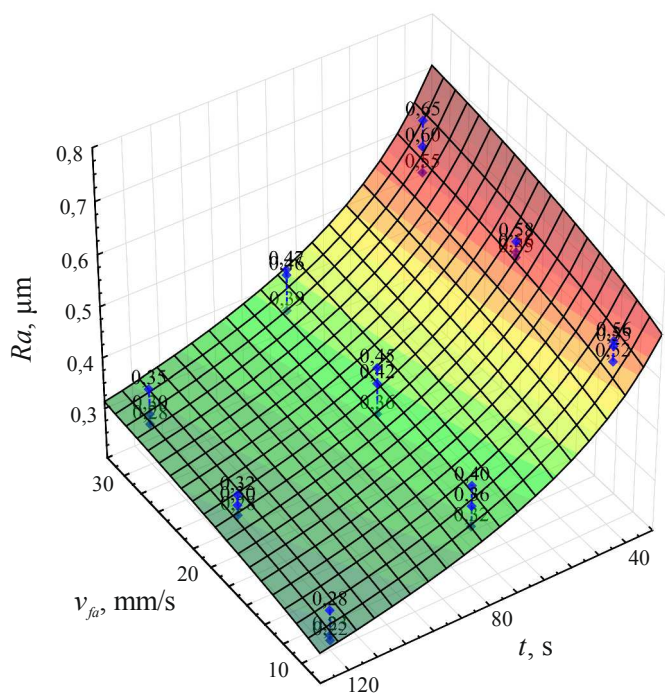
Na podstawie danych eksperymentalnych i przy pomocy programu *Statistica* wersja 12 wyznaczono równanie regresji, przyjmując model zależności w postaci funkcji potęgowej (równanie 6) oraz zakładając poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . W tym celu wyznaczono wartości parametrów  $a_1$ ,  $a_2$  i  $a_3$ . Estymowane równanie regresji ma postać (rys. 7.2):

$$\widehat{Ra} = 0,528305 \cdot v_{fa}^{0,134063} \cdot t^{-0,583435}. \quad (11)$$

Kwadrat współczynnika korelacji  $R^2 = 0,9179$  jest wysoki, co świadczy o dobrym dopasowaniu potęgowego równania regresji do danych doświadczalnych. Obliczone wartości statystyki  $t$  dla wszystkich współczynników ( $t_{a1} = 30,7771$ ;  $t_{a2} = 3,5722$ ;  $t_{a3} = -15,3803$ ) znacznie przekraczają wartość krytyczną  $t_{0,05; 24} = 2,0639$  dla dwudziestu czterech stopni swobody i przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Należy zatem odrzucić hipotezę o nieistotności zależności między



parametrem chropowości  $Ra$  dla materiału obrobionego a posuwem osiowym stołu  $v_{fa}$  i czasem szlifowania  $t$ . Świadczą też o tym wartości  $p$  dla każdego współczynnika ( $p_{a1} = 0,000000$ ;  $p_{a2} = 0,001540$ ;  $p_{a3} = 0,000000$ ), które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności  $\alpha$ . Do podobnego wniosku można dojść, biorąc pod uwagę obliczoną wartość statystyki  $F = 1207,925$ , która też znacznie przekracza wartość krytyczną  $F_{kr} = F_{0,05; 3; 24} = 3,01$  przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  dla 3 stopni swobody licznika i 24 stopni swobody mianownika.



**Model matematyczny:**

Funkcja potęgowa:  
 $Ra = 0,528 \cdot v_{fa}^{0,134} \cdot t^{0,583}$

Współczynnik korelacji:  
 $R = 0,9581$

Współczynnik determinacji:  
 $R^2 = 0,9179$

**Istotność współczynnika  $R$ :**

Wartość testu  $F$ :  $F = 1207,925$

Wartość krytyczna testu  $F$ :

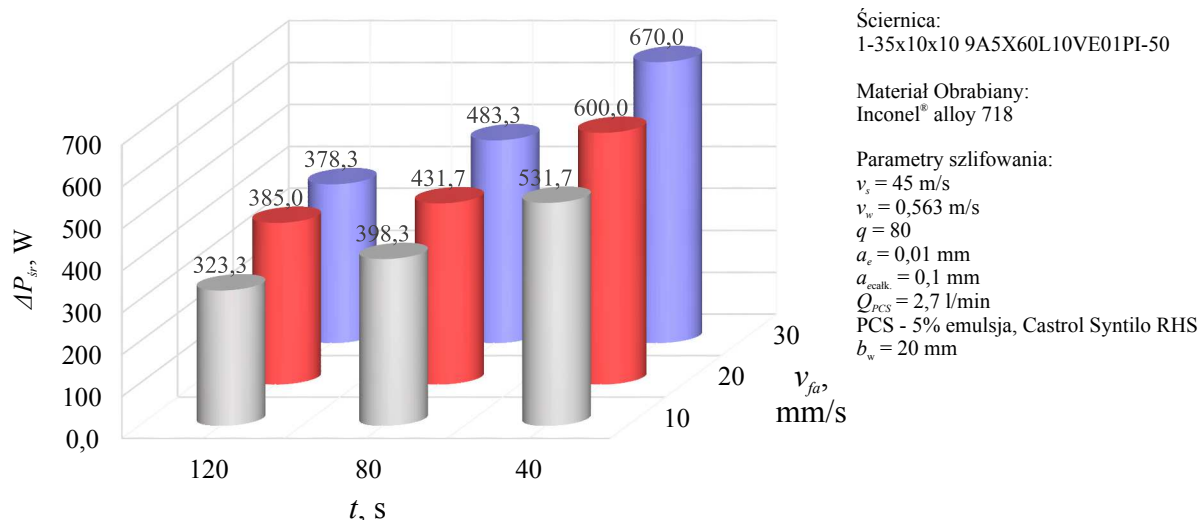
$F_{kr} = 3,01$

Ponieważ  $F \geq F_{kr}$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o istotności współczynnika  $R$ .

Rys. 7.2 Wykres modelu matematycznego opisującego badany proces wraz z parametrami oceniającymi dopasowanie danej funkcji do wyników badań rozpoznawczych: model matematyczny dla zmian chropowości powierzchni wyrażony parametrem  $Ra$

### 7.3.2. Wyznaczenie modelu matematycznego dla zmian przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$

Wyniki pomiarów uśrednionych wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$  przedstawiono na rys. 7.3.

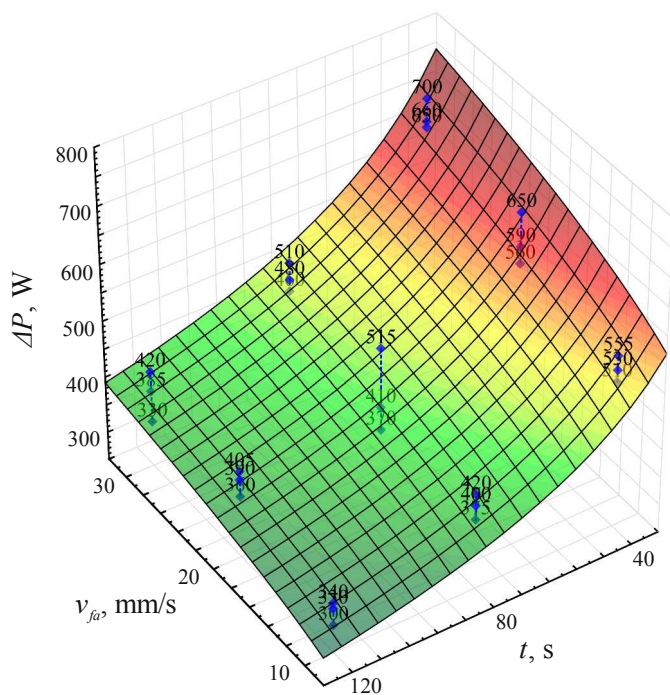


Rys. 7.3 Wyniki badań doświadczalnych wpływu prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  i czasu szlifowania  $t$  na uśrednione (dla 3 prób) wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718

Na podstawie danych eksperymentalnych i przy pomocy programu *Statistica* wersja 12 wyznaczono równanie regresji, przyjmując model zależności w postaci funkcji potęgowej (równanie 7) oraz zakładając poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . W tym celu wyznaczono wartości parametrów  $a_1$ ,  $a_2$  i  $a_3$ . Estymowane równanie regresji ma postać (rys. 7.4):

$$\widehat{\Delta P} = 535,531 \cdot v_{fa}^{0,187737} \cdot t^{-0,461045}. \quad (12)$$

Kwadrat współczynnika korelacji  $R^2 = 0,9130$  jest wysoki, co świadczy o dobrym dopasowaniu potęgowej regresji do danych doświadczalnych. Obliczona wartość statystyki  $t$  dla wszystkich współczynników ( $t_{a1} = 34,7158$ ;  $t_{a2} = 5,8180$ ;  $t_{a3} = -14,7068$ ) znacznie przekraczają wartość krytyczną  $t_{0,05; 24} = 2,0639$  dla dwudziestu czterech stopni swobody i przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Należy zatem odrzucić hipotezę o nieistotności zależności między chropowatością a posuwem osiowym stołu i czasem szlifowania. Świadczą też o tym wartości  $p$  dla każdego współczynnika ( $p_{a1} = 0,000000$ ;  $p_{a2} = 0,000005$ ;  $p_{a3} = 0,000000$ ), które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności  $\alpha$ . Do podobnego wniosku można dojść, biorąc pod uwagę obliczoną wartość statystyki  $F = 1676,543$ , która też znacznie przekracza wartość krytyczną  $F_{kr} = F_{0,05; 3; 24} = 3,01$  przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  dla 3 stopni swobody licznika i 24 stopni swobody mianownika.



#### Model matematyczny:

Funkcja potęgowa:  
 $\Delta P = 535,531 \cdot v_{fa}^{0,188} \cdot t^{-0,461}$

Współczynnik korelacji:  
 $R = 0,9555$

Współczynnik determinacji:  
 $R^2 = 0,9130$

#### Istotność współczynnika $R$ :

Wartość testu  $F$ :  $F = 1676,543$

Wartość krytyczna testu  $F$ :

$F_{kr} = 3,01$

Ponieważ  $F \geq F_{kr}$  nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o istotności współczynnika  $R$ .

Rys. 7.4 Wykres modelu matematycznego opisującego badany proces wraz z parametrami oceniającymi dopasowanie danej funkcji do wyników badań rozpoznawczych: model matematyczny dla zmian przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$

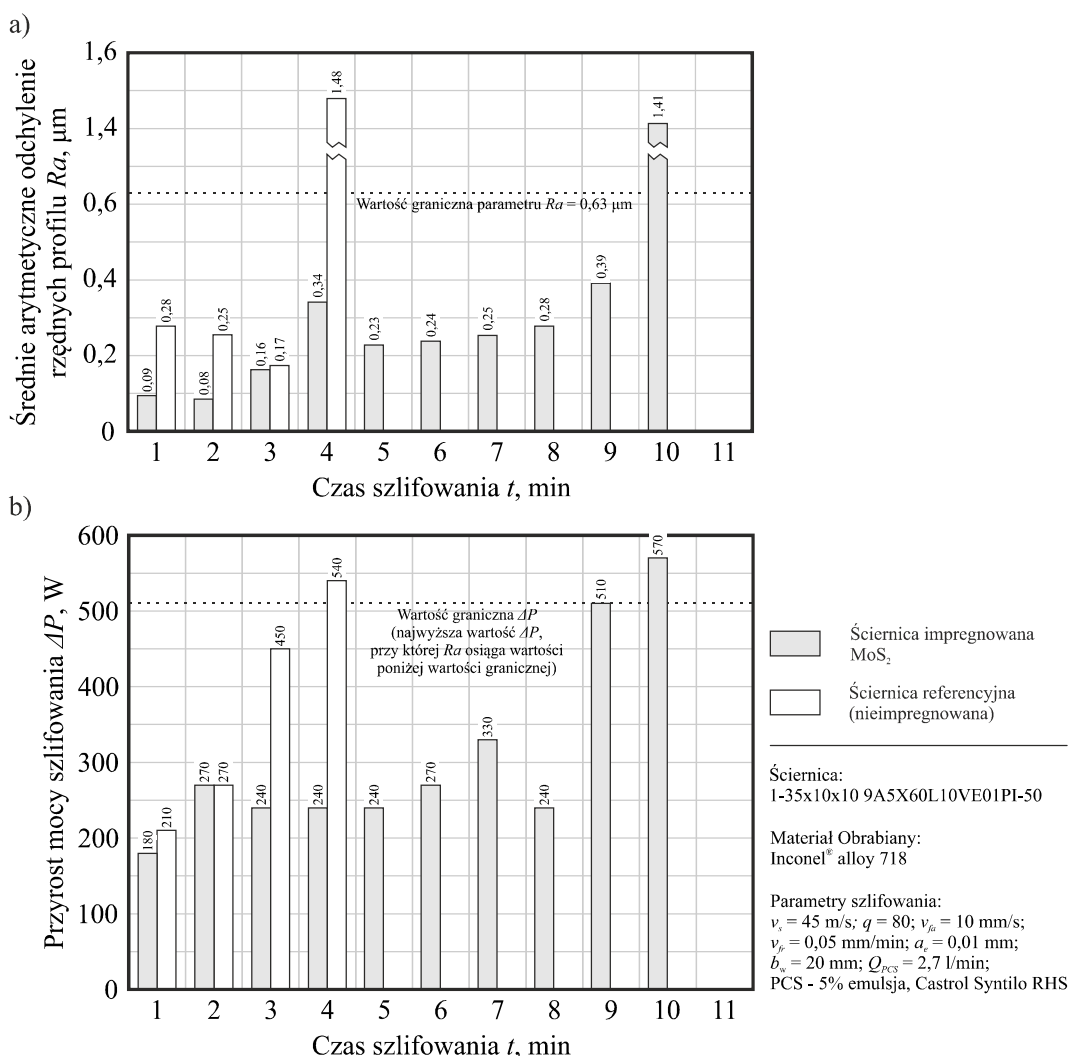
## 7.4. Analiza wyników i podsumowanie

Funkcje (11) i (12) stanowią model matematyczny identyfikujący proces szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 w określonych warunkach jego realizacji, dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ . Z funkcji tych, mających postać potęgową, wynika, że wraz ze wzrostem czasu szlifowania  $t$  oraz zmniejszaniem prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  obserwuje się wzrost efektywności procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu niklu (Inconel<sup>®</sup> alloy 718) wyrażonej parametrem  $Ra$  oraz parametrem  $\Delta P$  (zmniejszenie wartości tych parametrów). Tłumaczyć to można tym, że wraz ze zwiększaniem czasu szlifowania  $t$  oraz zmniejszaniem prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  zwiększają się przekroje warstw skrawanych przypadające na pojedynczy wierzchołek aktywny CPS oraz liczba przeszlifowań  $U$ . Wraz ze zmniejszaniem przyrostu mocy szlifowania można domniemać, że również zmniejsza się zużycie objętościowe ściernicy  $V_s$ . Najkorzystniejsze efekty procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu niklu można uzyskiwać stosując czas szlifowania  $t = 120$  s co przekłada się na  $v_{fr} = 0,05$  mm/min oraz prędkość posuwu osiowego stołu  $v_{fa} = 10$  mm/s (20 osc/min) i takie nastawy tych parametrów postanowiono zastosować w badaniach właściwych pracy.

## 8. BADANIA WŁAŚCIWE ZUŻYCIA NARZĘDZI ŚCIERNYCH W PROCESIE SZLIFOWANIA OTWORÓW ZE STOPU INCONEL<sup>®</sup> ALLOY 718

### 8.1. Wyniki badań właściwych

Na podstawie przeprowadzonych badań procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 można stwierdzić, że istnieje zależność pomiędzy chropowatością powierzchni materiału obrabianego wyrażoną parametrem  $Ra$  a mocą szlifowania wyrażoną przyrostem mocy szlifowania  $\Delta P$  (rys. 8.1).

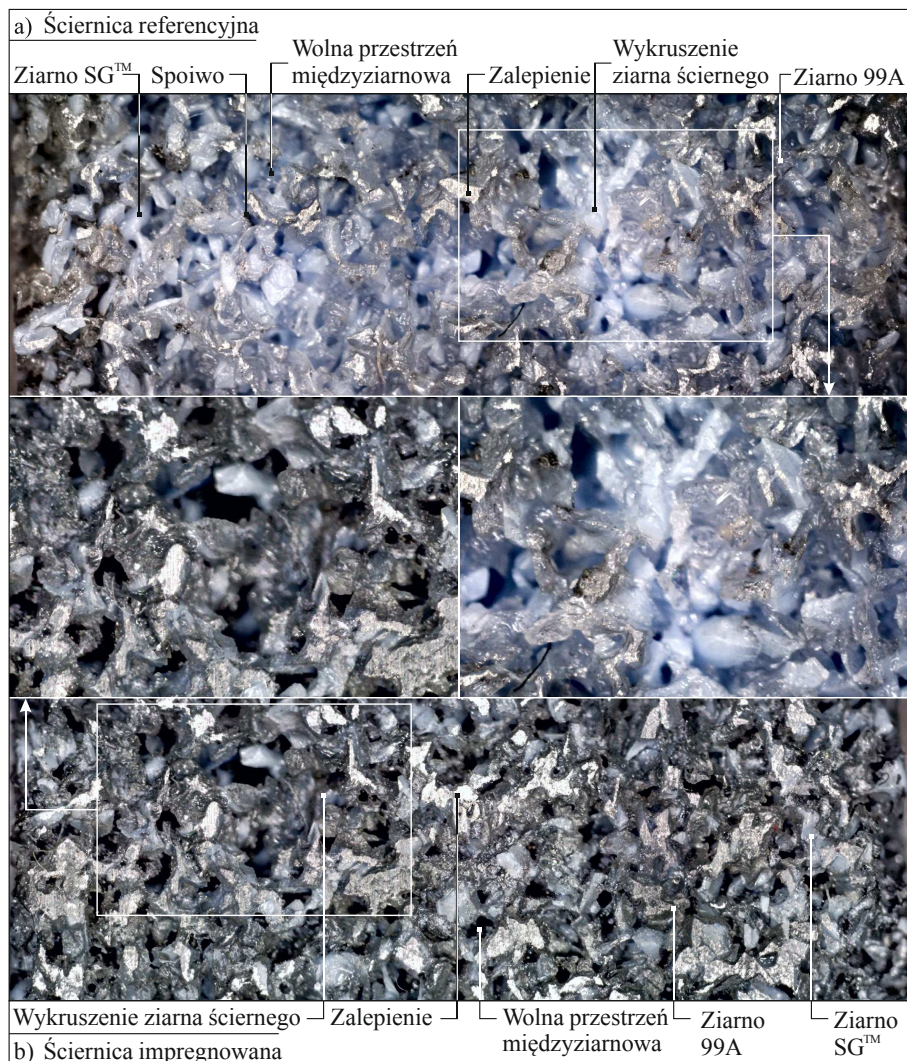


Rys. 8.1 Wyznaczenie okresu trwałości dla ściernicy referencyjnej oraz ściernicy impregnowanej  $\text{MoS}_2$ :  
 a) wykres zależności średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu  $Ra$  od czasu szlifowania  $t$ ;  
 b) wykres zależności przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$

W obu przypadkach, tj. w przypadku stosowania ściernicy referencyjnej oraz ściernicy impregnowanej  $\text{MoS}_2$  istnieje pewna moc graniczna szlifowania, po przekroczeniu której uzyskuje się wartości chropowatości dla materiału obrabianego dużo powyżej wartości granicznej



–  $Ra_{gr.} = 0,63 \mu\text{m}$ . Okres trwałości dla ściernicy referencyjnej zakończył się w 4. minucie ( $Ra = 1,479 \mu\text{m}$ ) natomiast w przypadku ściernicy impregnowanej przekroczono wartość graniczną parametru  $Ra$  ( $Ra = 1,413 \mu\text{m}$ ) dopiero w 10. minucie (rys. 8.1a). Dla każdego przypadku, zarówno podczas szlifowania z użyciem ściernicy referencyjnej jak i z użyciem ściernicy impregnowanej zmiany wartości parametru  $Ra$  w czasie miały podobny charakter. Zmniejszenie chropowatości powierzchni spowodowane jest tępieniem wierzchołków aktywnych ziaren ściernych, jednocześnie następuje zwiększenie mocy szlifowania, natomiast zwiększenie chropowatości powierzchni prowadzi do zmniejszenia mocy szlifowania, co świadczy o właściwościach samostrzących narzędzia ściernego. Jednak w momencie wystąpienia pierwszego rozległego zalepienia na CPS, zaobserwowano zwiększenie wartości parametru  $Ra$  oraz wartości mocy szlifowania (rys. 8.1a i b) spowodowane najprawdopodobniej nie tyle samostrzeżeniem narzędzia, co oderwaniem większych fragmentów ściernicy (rys. 8.2).



Rys. 8.2 Obrazy mikroskopowe CPS wykonane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation (powiększenie: ok. 100×): a) obraz mikroskopowy CPS referencyjnej; b) obraz mikroskopowy CPS impregnowanej dwusiarczkiem molibdenu

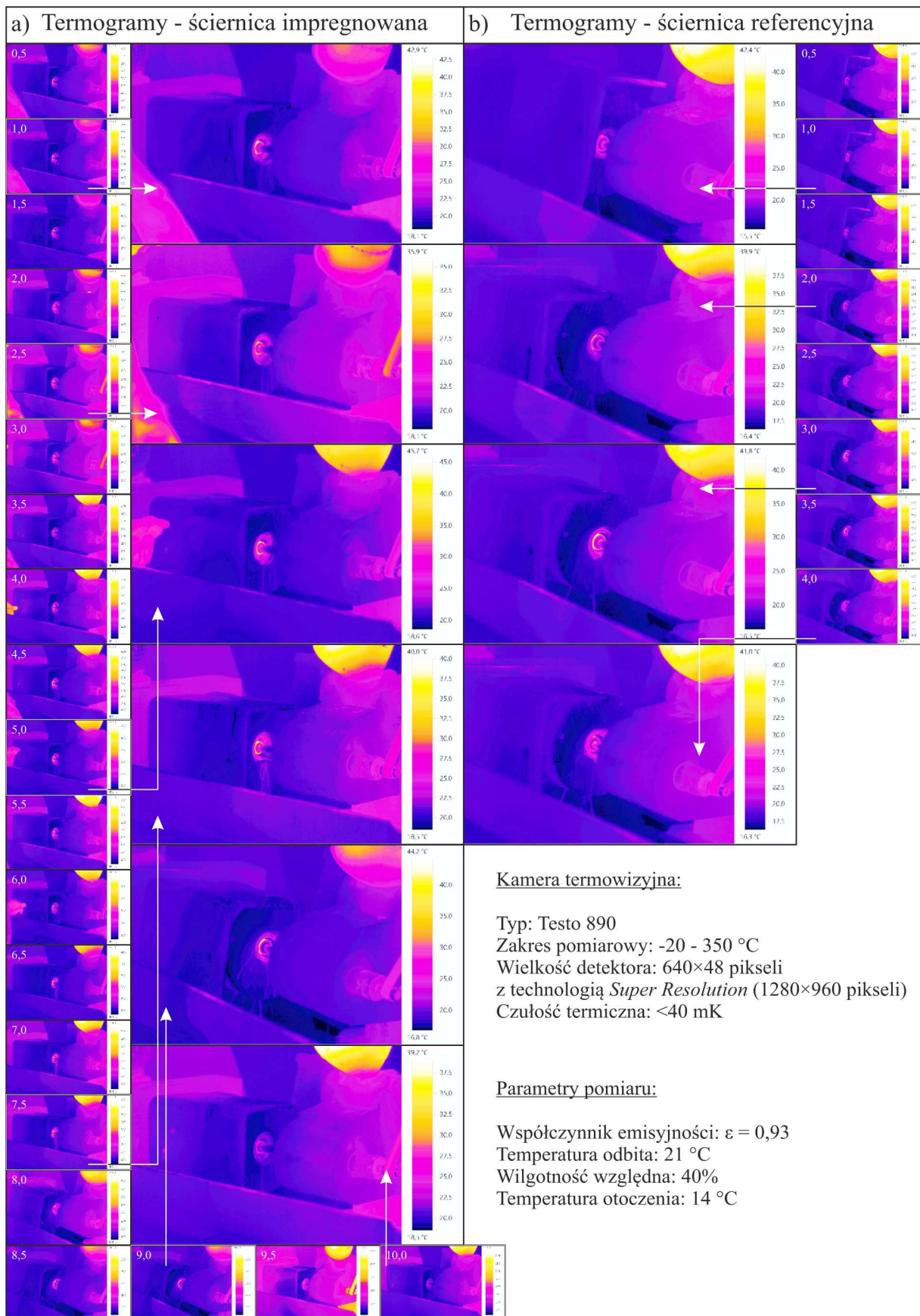
Zatem mechanizmy zużycia ściernego w przypadku szlifowania stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy referencyjnej oraz impregnatem mają podobny charakter. Różnica polega na tym, że w przypadku szlifowania ściernicą impregnowaną impregnat wprowadzony w WPM ściernicy, ze względu na swoje właściwości antyadhezyjne, przyczyna się do zmniejszenia zużycia aktywnych ziaren ściernych na CPS co decyduje o wydłużeniu jej okresu trwałości w porównaniu do wyników uzyskanych w procesie szlifowania z użyciem ściernicy referencyjnej.

Ze względu na podstawową rolę PCS, polegającą na odbieraniu ciepła ze strefy szlifowania, szczególną uwagę poświęcono zbadaniu wpływu temperatury w strefie szlifowania na wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażoną parametrem  $Ra$  i tym samym na okres trwałości ściernicy. W badaniach wykorzystano termogramy rejestrowane z wykorzystaniem kamery termowizyjnej Testo 890 firmy Testo AG.

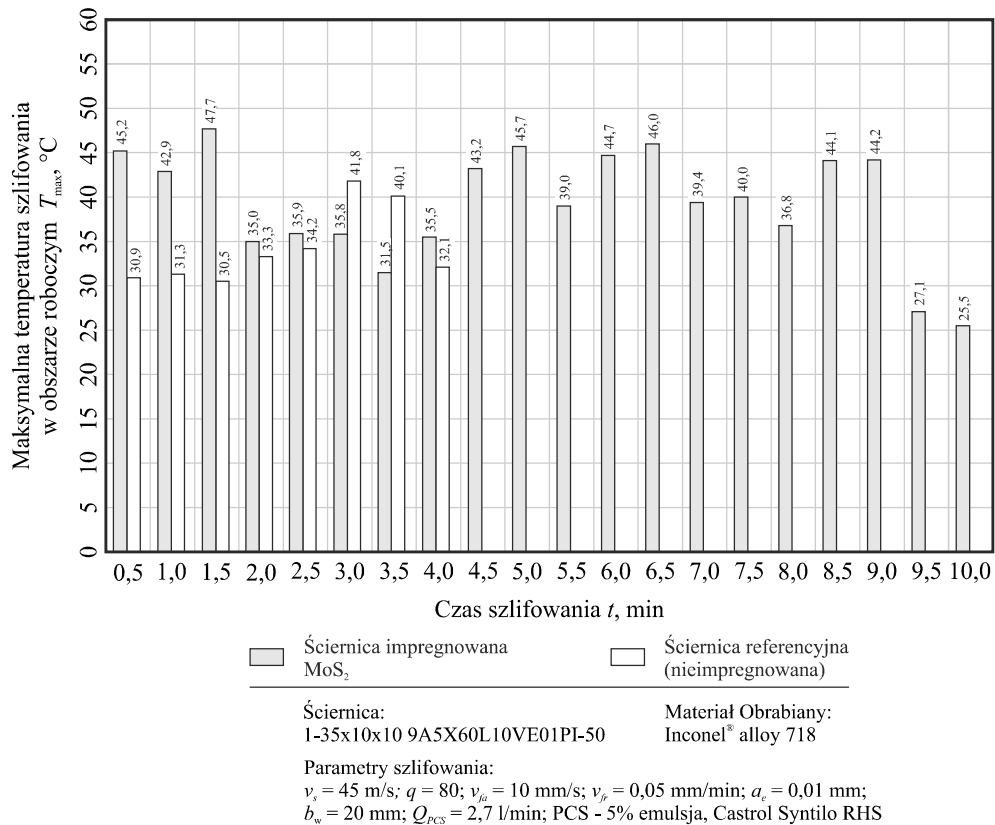
Przy analizie zarejestrowanych termogramów przyjęto wartości współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  dla ściernicy na poziomie  $\varepsilon = 0,93$  (przyjęto wartość uśrednioną z podawanych w literaturze jako właściwe dla białego  $Al_2O_3$  oraz kwarcu [66]), charakteryzującego ilość energii emitowanej z obiektu w stosunku do ilości wypromieniowywanej przez ciało czarne.

Rysunek 8.3 przedstawia wyniki pomiarów kamerą termowizyjną, przeprowadzone w trakcie procesu szlifowania, przy podawaniu PCS metodą zalewową. Na podstawie zarejestrowanych termogramów obszaru roboczego badanego procesu szlifowania wyznaczono zależność maksymalnej temperatury  $T_{max}$  w strefie szlifowania od czasu szlifowania  $t$  – rys. 8.4. Analizując wartości maksymalnych temperatury w strefie szlifowania można zauważyć, że stosując ściernicę impregnowaną obserwuje się nieco większe wartości temperatury. Tłumaczyć to można tym, że impregnat może wpływać na zmianę przewodnictwa cieplnego ściernicy, jednak to stwierdzenie wymagałoby przeprowadzenia dodatkowych badań. Obserwuje się również w obu przypadkach (przy szlifowaniu z użyciem ściernicy referencyjnej oraz ściernicy impregnowanej) zwiększenie wartości temperatury wraz ze zwiększeniem czasu szlifowania. Wiąże się to z wypłaszczaniem aktywnych ziaren ściernych na CPS i zwiększeniem udziału tarcia w strefie szlifowania, powodującym również zwiększenie wartości mocy szlifowania (rys. 8.1 i 8.4). Przy końcu okresu trwałości ściernicy następuje zmniejszenie wartości temperatury co związane jest z dużym zużyciem objętościowym narzędzia (ściernica przestaje szlifować). Jednak na podstawie otrzymanych wyników nie można znaleźć związku temperatury w strefie szlifowania z okresem trwałości narzędzia ściernego czy chropowatością powierzchni materiału obrabianego. Jednym z powodów jest to, że uzyskiwane wyniki pomiarów w trakcie szlifowania, w znacznym stopniu zakłócały przez płyn chłodząco-smarujący, którego duży wydatek przesłaniał obiekty, których dotyczył pomiar.





Rys. 8.3 Termogramy prezentujące zmianę temperatury ściernicy w czasie  $t$  (w przedziale czasowym co 0,5 min), zarejestrowane w trakcie procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 ściernicą impregnowaną (a) oraz ściernicą referencyjną (b)



Rys. 8.4 Wykres zmian temperatury szlifowania w obszarze roboczym podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego stopu Inconel® alloy 718 badanymi ściernicami

Druga kwestia to sam moment wykonania termogramu: wartość temperatury w strefie szlifowania, która z uwagi na zakłócenia związane wydatkiem PCS jest niewielka (rzędu  $40^\circ\text{C}$ ) w znacznym stopniu uzależniona była od położenia ściernicy względem pierścienia, a to mogłoby przełożyć się na błąd przypadkowy pomiaru. Moment wykonywania termogramu powinien być skoordynowany z prędkością posuwu osiowego ściernicy  $v_{fa}$ . Takie badania zostaną podjęte w przyszłości.

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że po przekroczeniu pewnej wartości mocy szlifowania ( $450 \text{ W} < \Delta P > 510 \text{ W}$ ) siła adhezji materiału obrabianego do powierzchni czynnej ściernicy staje się na tyle duża, że przyczynia się to do wzrostu chropowatości powierzchni materiału obrabianego powyżej wartości granicznej a tym samym do zakończenia okresu trwałości narzędzia ściernego. Nie zauważono natomiast istotnego wpływu temperatury szlifowania mierzonej za pomocą kamery termowizyjnej na okres trwałości narzędzia ściernego. Wyniki pomiarów temperatury w trakcie szlifowania, w znacznym stopniu zakłócone były poprzez płyn chłodząco-smarujący, którego duży wydatek przesłaniał obiekty, których dotyczył pomiar. Zatem w dalszych badaniach postanowiono jako kryterium końca okresu trwałości ściernicy zastosować przyrost mocy szlifowania ustalony jako najwyższa wartość  $\Delta P$  (w zakresie przeprowadzonych badań), przy której obserwuje się wartości chropowatości wyrażone parametrem  $Ra$  jeszcze



poniżej wartości granicznej ustalonej na poziomie 0,63  $\mu\text{m}$ . Wartość tą przyjęto na poziomie:  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$ .

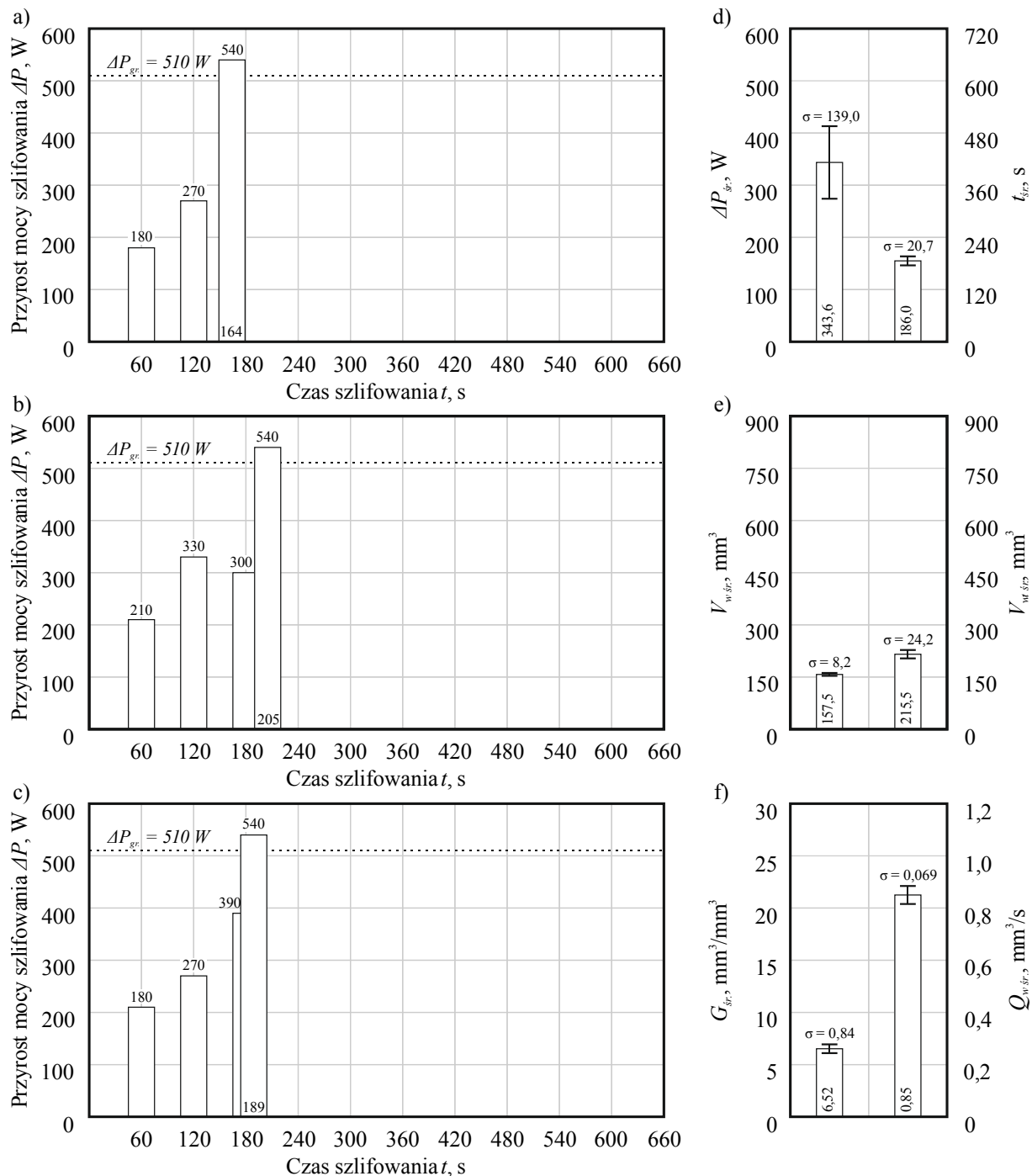
## 8.2. Analiza wyników procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicą referencyjną oraz ściernicami impregnowanymi wyznaczono dla każdej ściernicy zależność przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$ , będącego okresem trwałości ściernicy, notując dla każdej rozpoczętej minuty maksymalną wartość mocy szlifowania. Zależność taką wyznaczono dla trzech powtórzeń. Dodatkowo z wszystkich zebranych danych wyznaczono średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{\acute{s}r}$ , średni czas szlifowania  $t_{\acute{s}r}$ , średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\acute{s}r}$ , średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{wt\acute{s}r}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi), średnią wartość wskaźnika szlifowania  $G_{\acute{s}r}$  oraz średnią wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\acute{s}r}$  (rys. 8.5-8.12).

Szlifując wewnętrzne powierzchnie walcowe wykonane ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicą referencyjną graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  przekraczano średnio w 186 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{\acute{s}r}$  wyniósł 343,6 W (rys. 8.5a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\acute{s}r}$  wyniósł 157,5 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wt\acute{s}r}$  wynoszącym 215,5 mm<sup>3</sup> (rys. 9.6e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{\acute{s}r}$  kształtowała się na poziomie 6,52 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{w\acute{s}r}$  wyniosła 0,85 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.5f).

Dla tych samych warunków szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicą oznaczoną numerem 3G10 graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  przekroczone średnio w 230 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{\acute{s}r}$  wyniósł 347,5 W (rys. 8.6a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\acute{s}r}$  wyniósł 193,7 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wt\acute{s}r}$  wynoszącym 259,2 mm<sup>3</sup> (rys. 8.6e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{\acute{s}r}$  kształtowała się na poziomie 10,36 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{w\acute{s}r}$  wyniosła 0,85 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.6f).

W przypadku ściernicy oznaczonej numerem 3G20 graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  przekroczone średnio w 590 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{\acute{s}r}$  wyniósł 340,6 W (rys. 8.7a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\acute{s}r}$  wyniósł 507,9 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wt\acute{s}r}$  wynoszącym 659,1 mm<sup>3</sup> (rys. 8.7e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{\acute{s}r}$  kształtowała się na poziomie 9,53 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{w\acute{s}r}$  wyniosła 0,86 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.7f).



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{gr} = 10$  mm/s;

$v_{gr} = 0,05$  mm/min;  $\alpha_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{rcw} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica nieimpregnowana (referencyjna)

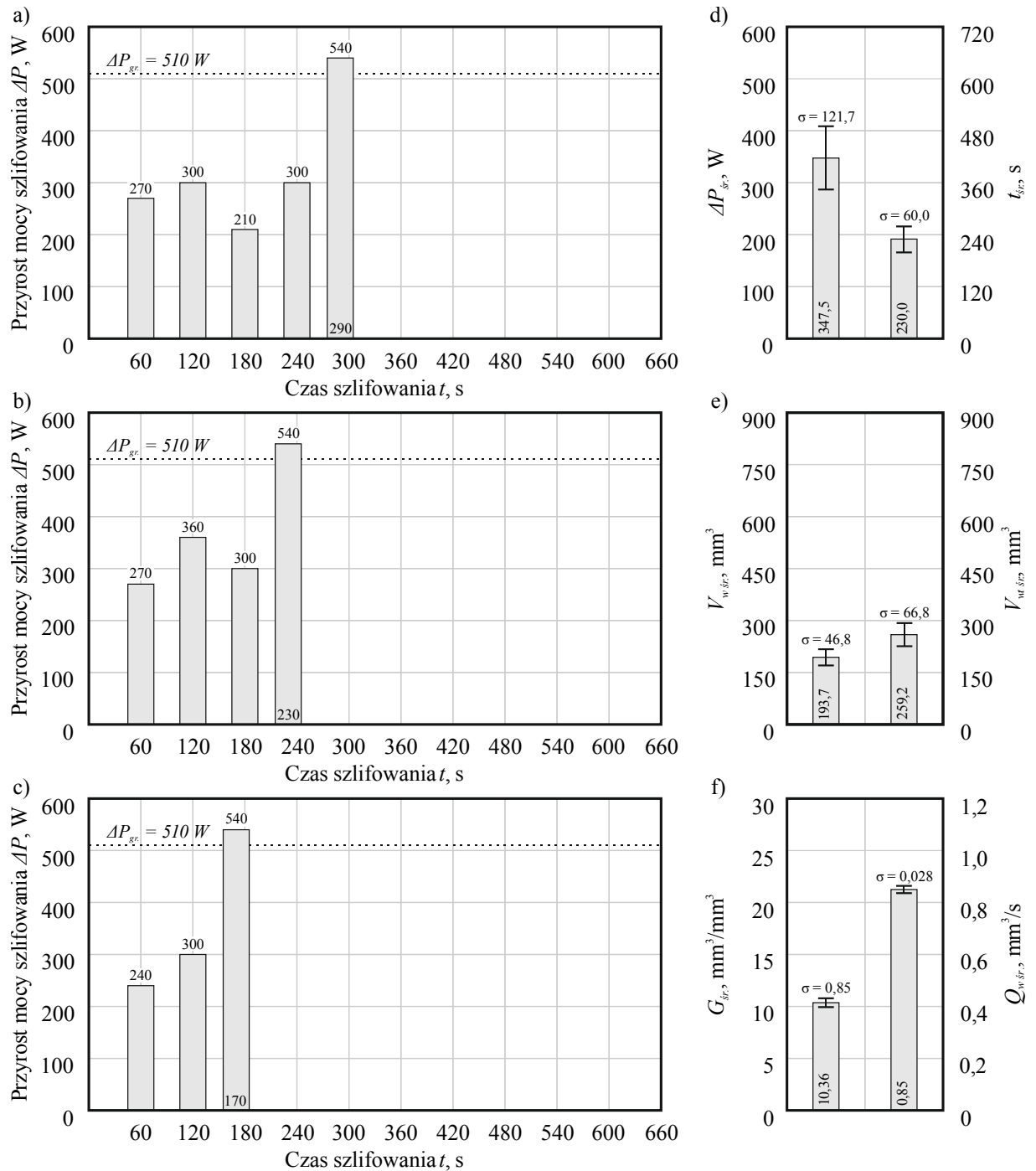
Ściernica:

1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.5 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy referencyjnej: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wsr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{wtsr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{wsr}$



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{ps} = 10$  mm/s;

$v_{ps} = 0,05$  mm/min;  $\alpha_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{rcw} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana  
grafitem (3G10)

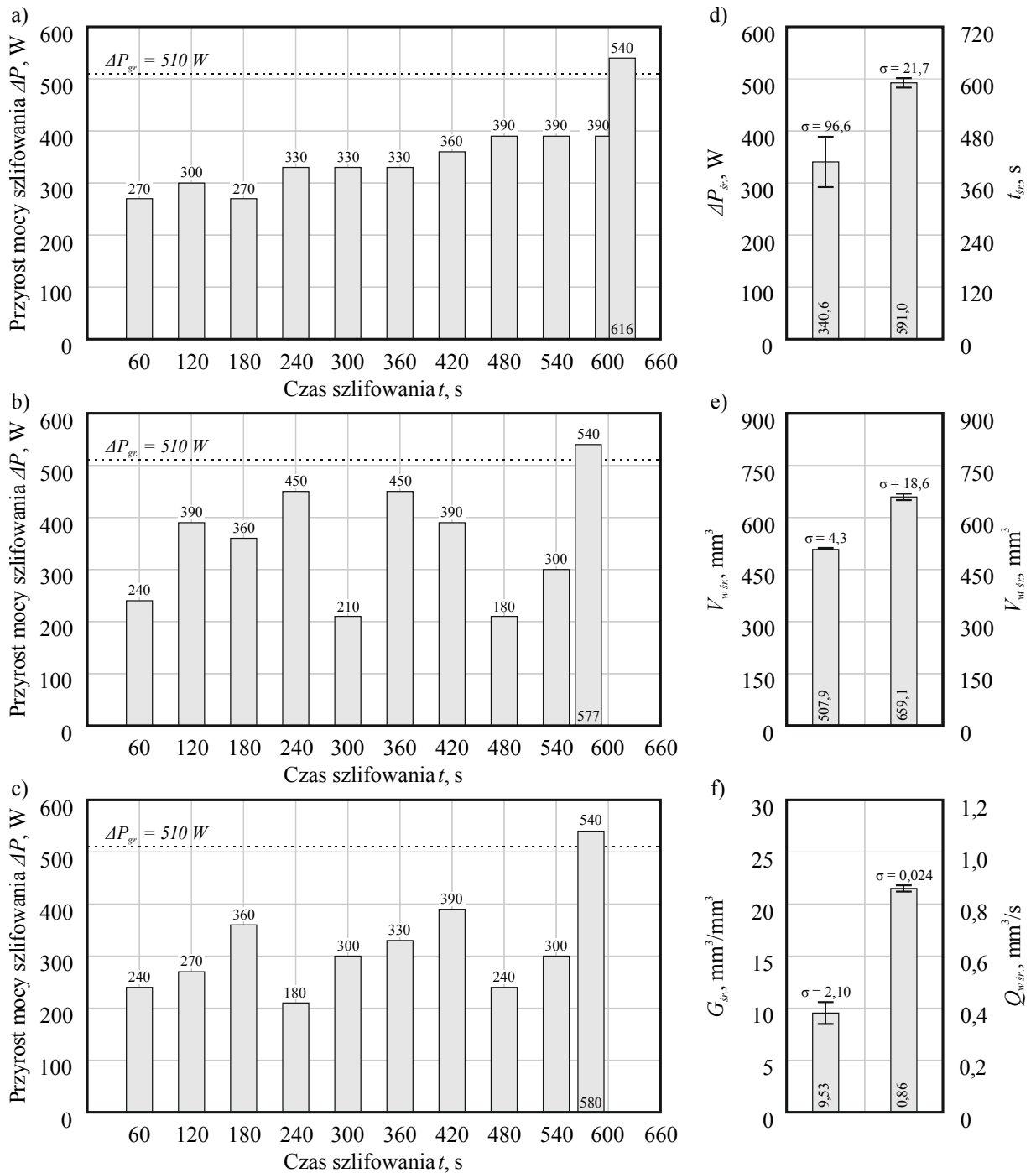
Ściernica:

1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.6 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 3G10: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\dot{s}r}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{w\dot{s}r}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\dot{s}r}$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{sp} = 10$  mm/s;

$v_{sp} = 0,05$  mm/min;  $\alpha_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{rcw} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana grafitem (3G20)

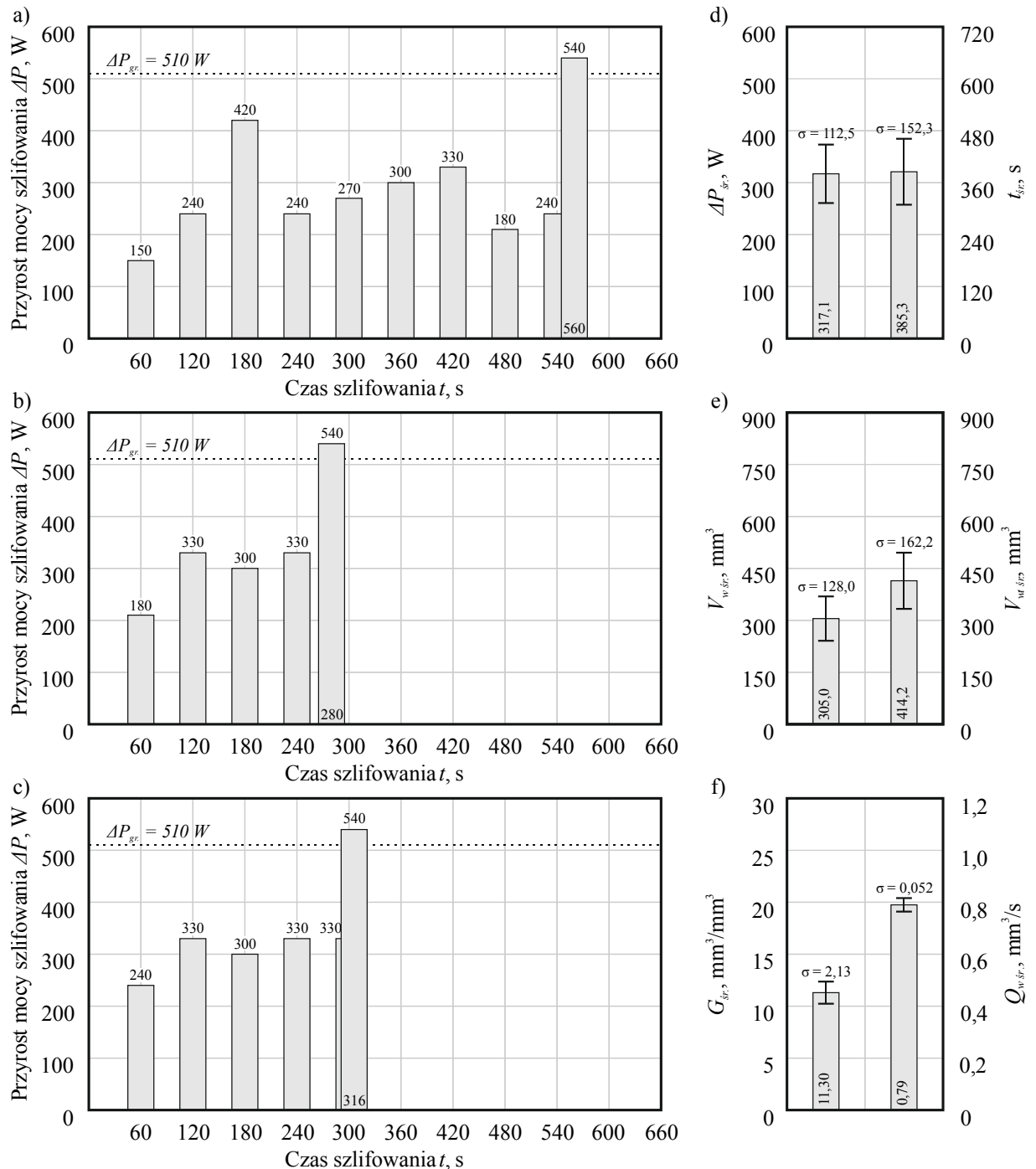
Ściernica:

1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.7 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 3G20: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w,śr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{wt,śr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w,śr}$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{gr} = 10$  mm/s;

$v_{gr} = 0,05$  mm/min;  $\alpha_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{w,gr} = 2,7$  l/min;

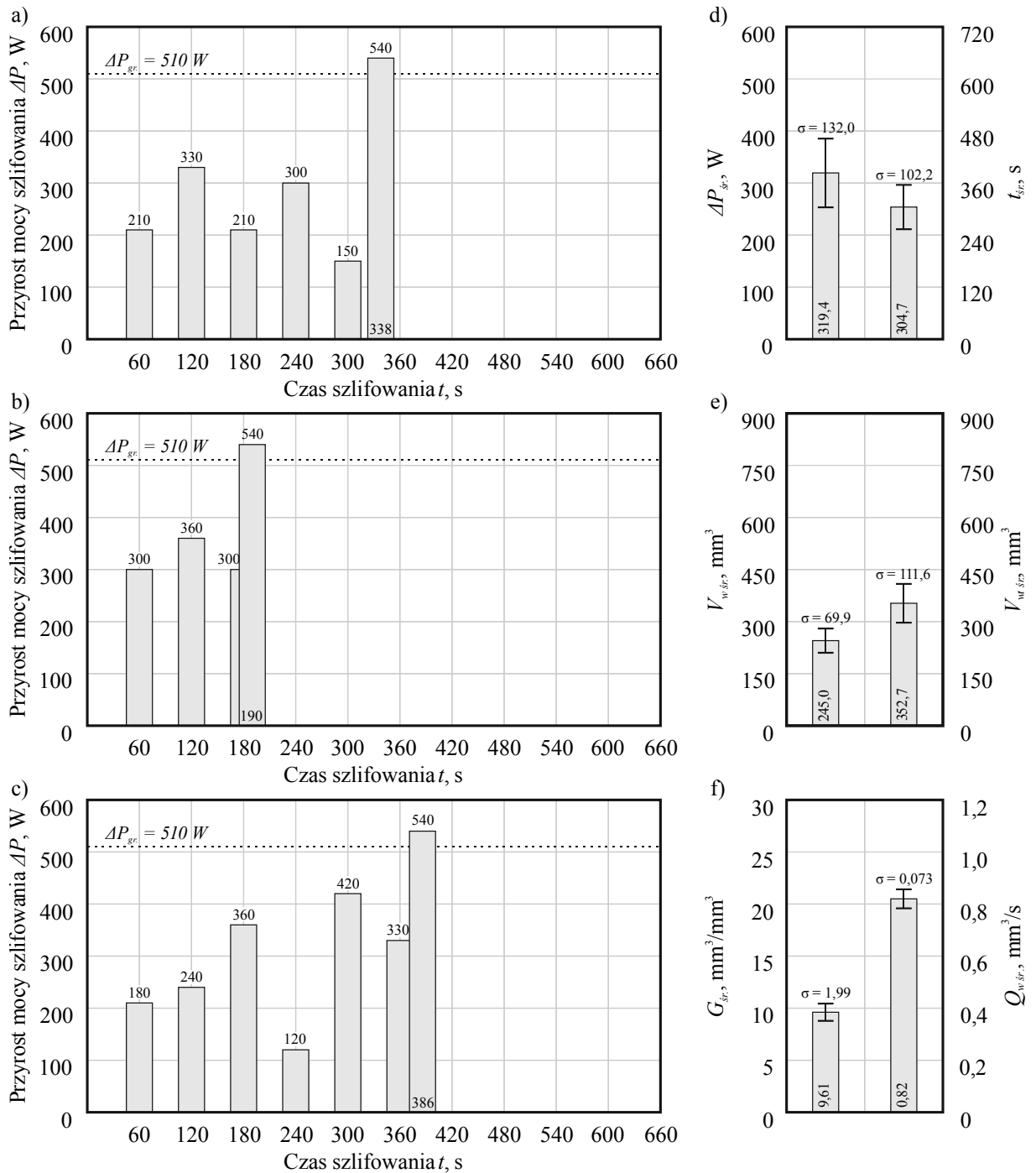
PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana  
grafitem (1G30)

Ściernica:  
1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:  
Inconel® alloy 718

Rys. 8.8 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 1G30: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w,sr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{w,tsr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w,sr}$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{gr} = 10$  mm/s;

$v_{gr} = 0,05$  mm/min;  $a_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{rcw} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana dwusiarczkiem molibdenu (2M10)

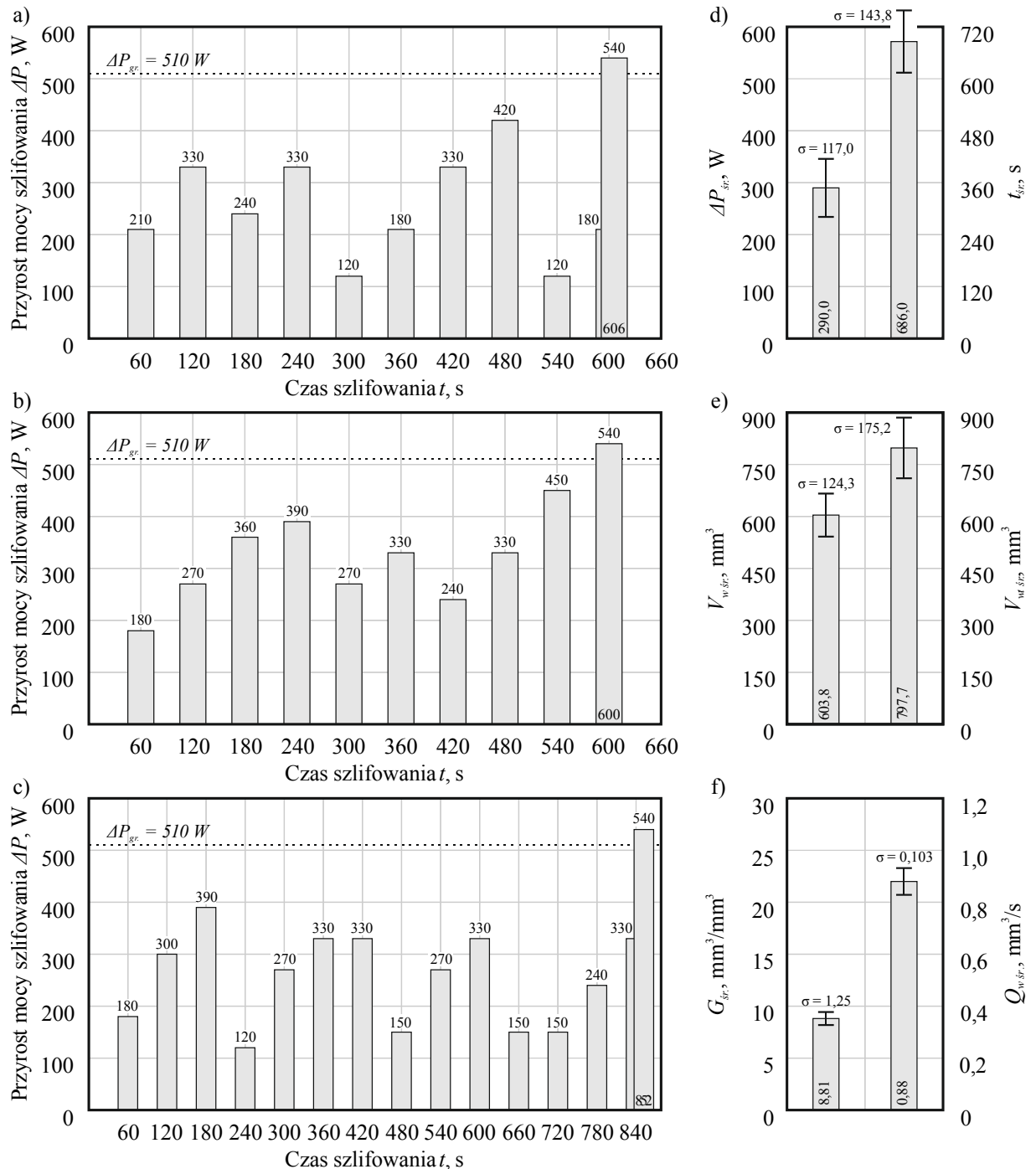
Ściernica:

1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.9 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 2M10: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w,śr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{w,śr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w,śr}$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 45 \text{ m/s}$ ;  $q = 80$ ;  $v_{ps} = 10 \text{ mm/s}$ ;

$v_{ps} = 0,05 \text{ mm/min}$ ;  $\alpha_s = 0,01 \text{ mm}$ ;

$b_s = 20 \text{ mm}$ ;  $Q_{rcw} = 2,7 \text{ l/min}$ ;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana dwusiarczkiem molibdenu (2M20)

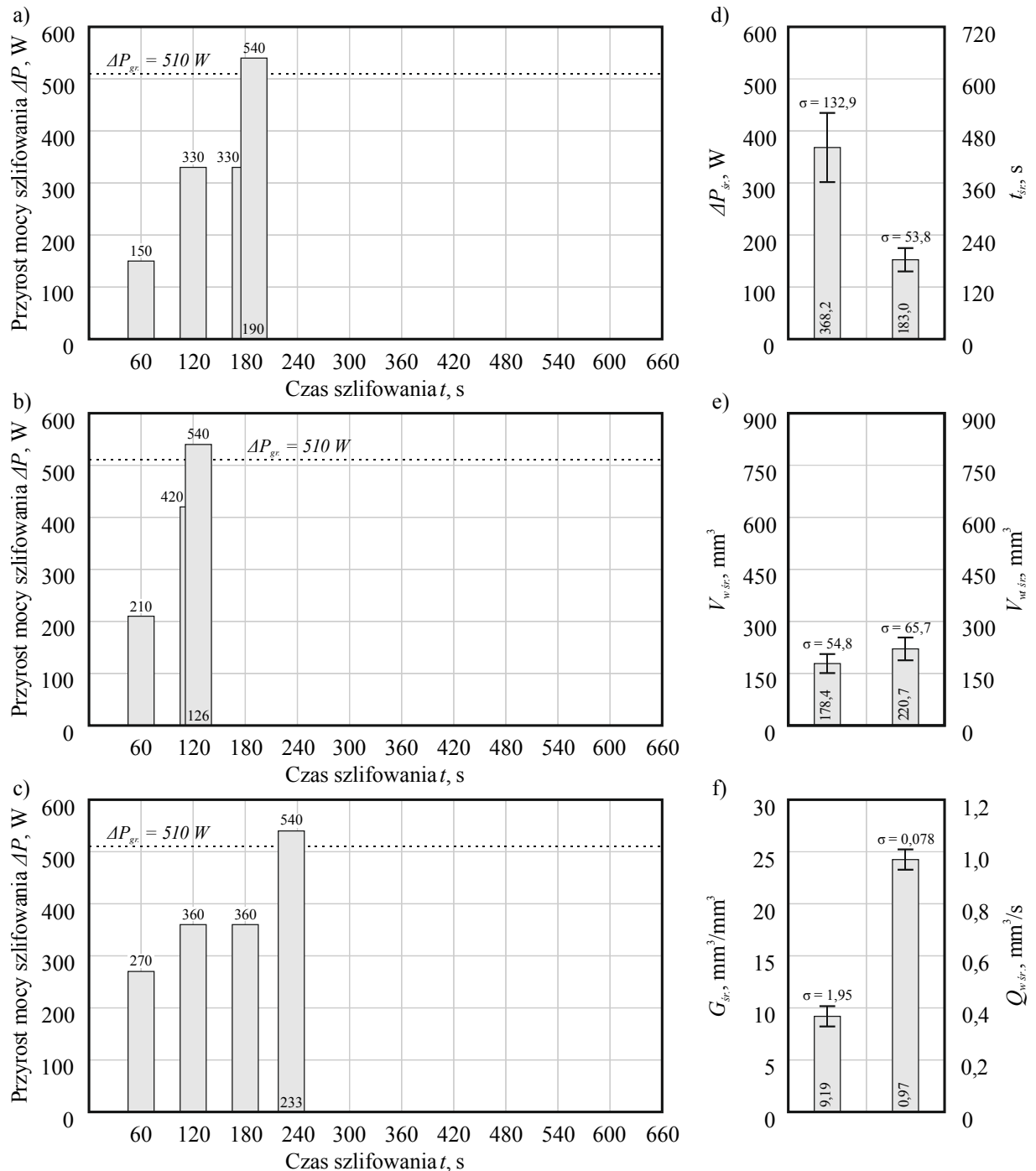
Ściernica:

1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.10 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 2M20: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w,sr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{w,tsr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w,sr}$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{w\dot{s}} = 10$  mm/s;

$v_{w\dot{i}} = 0,05$  mm/min;  $a_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{w\dot{c}s} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana dwusiarczkiem molibdenu (2M30)

Ściernica:

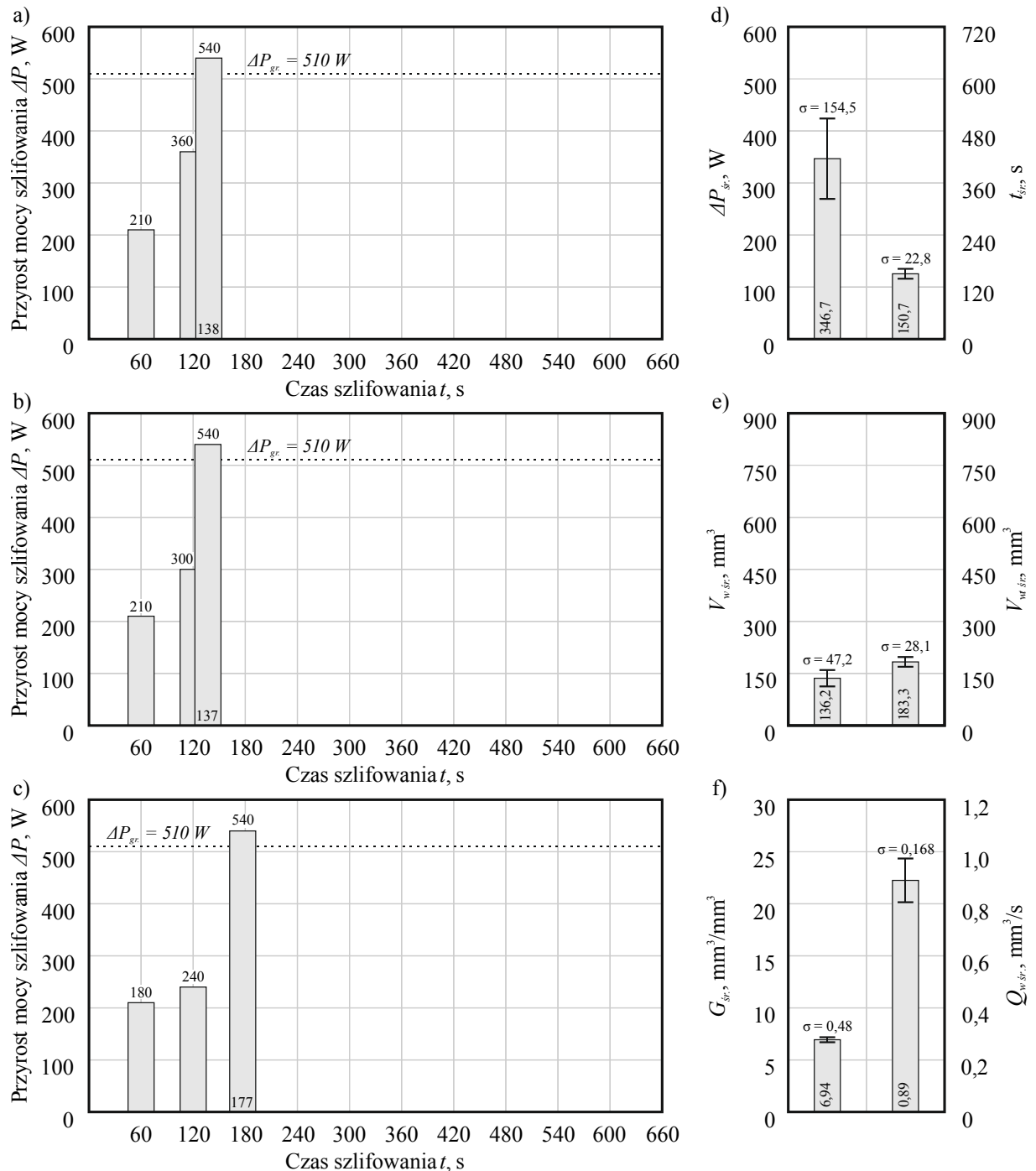
1-35x10x10 9A5X60L10VE01P1-50

Materiał Obrabiany:

Inconel® alloy 718

Rys. 8.11 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 2M30: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{w\dot{s}r}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{w\dot{i}s}r$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\dot{s}r}$ .





Parametry szlifowania:

$v_s = 45$  m/s;  $q = 80$ ;  $v_{gr} = 10$  mm/s;

$v_{gr} = 0,05$  mm/min;  $a_s = 0,01$  mm;

$b_s = 20$  mm;  $Q_{wśr} = 2,7$  l/min;

PCS - 5% emulsja, Castrol Syntilo RHS

Ściernica impregnowana dwusiarczkiem molibdenu (2M40)

Ściernica: 1-35x10x10 9A5X60L10VE01PI-50

Materiał Obrabiany: Inconel® alloy 718

Rys. 8.12 Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 2M40: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od czasu szlifowania  $t$  (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  oraz średni czas szlifowania  $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  oraz średni teoretyczny ubytek materiału  $V_{wśr}$  (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{sr}$  oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{wśr}$ .

Dla ściernicy oznaczonej numerem 1G30 graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr} = 510$  W przekroczone średnio w 386 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  wyniósł

317,1 W (rys. 8.8a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  wyniósł 305,0 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wtśr}$  wynoszącym 414,2 mm<sup>3</sup> (rys. 8.8e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  kształtowała się na najwyższym poziomie ze wszystkich testowanych ściernic ( $G_{śr} = 11,30 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ ), natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{wśr}$  wyniosła 0,79 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.8f).

W odniesieniu do ściernicy oznaczonej numerem 2M10 graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  przekroczone średnio w 305 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{śr}$  wyniósł 319,4 W (rys. 8.9a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  wyniósł 245,0 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wtśr}$  wynoszącym 352,7 mm<sup>3</sup> (rys. 8.9e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  kształtowała się na poziomie 9,61 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{wśr}$  wyniosła 0,82 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.9f).

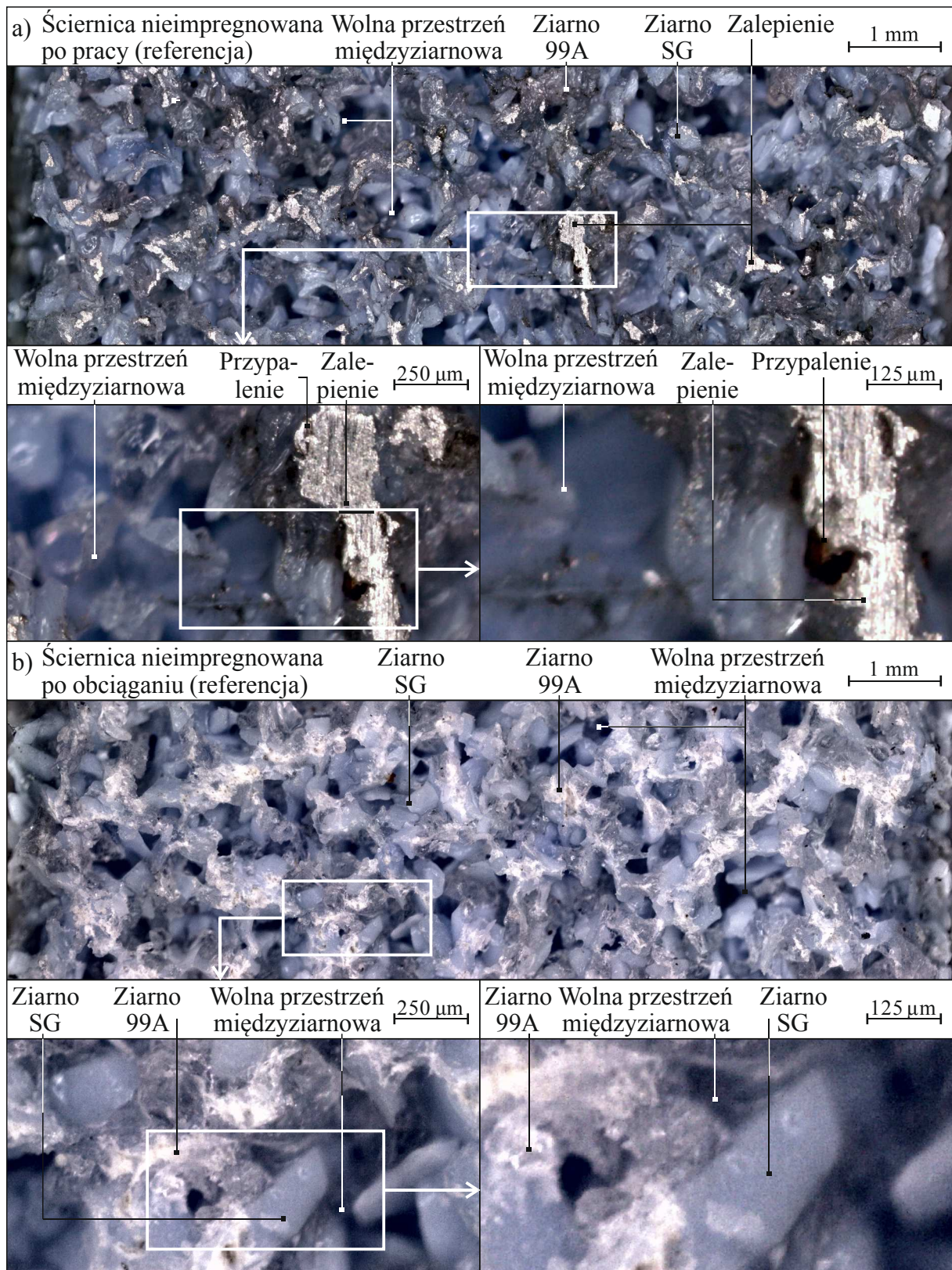
W przypadku ściernicy oznaczonej numerem 2M20 graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  przekroczone średnio w 686 sekundzie, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{śr}$  wyniósł 290,0 W (rys. 8.10a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  wyniósł 603,8 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wtśr}$  wynoszącym 797,7 mm<sup>3</sup> (rys. 8.10e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  kształtowała się na poziomie 8,81 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{wśr}$  wyniosła 0,88 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.10f).

Graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  dla przypadku szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicą oznaczoną numerem 2M30 przekroczone średnio w 183 sekundzie, co daje wynik gorszy w porównaniu do ściernicy referencyjnej, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{śr}$  wyniósł 368,2 W (rys. 8.11a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  wyniósł 178,7 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wtśr}$  wynoszącym 220,7 mm<sup>3</sup> (rys. 8.11e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  kształtowała się na poziomie 9,19 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>, natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{wśr}$  była najwyższa ze wszystkich testowanych ściernicy i wyniosła 0,97 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.11f).

Natomiast graniczną moc szlifowania  $\Delta P_{gr.} = 510 \text{ W}$  dla przypadku ściernicy oznaczonej numerem 2M400 przekroczone średnio w 151 sekundzie, co daje wynik najgorszy ze wszystkich testowanych ściernic, a średni przyrost mocy szlifowania  $\Delta P_{śr}$  wyniósł 346,7 W (rys. 8.12a-d). Średni rzeczywisty ubytek materiału  $V_{wśr}$  wyniósł 136,2 mm<sup>3</sup> przy średnim teoretycznym ubytku materiału  $V_{wtśr}$  wynoszącym 183,3 mm<sup>3</sup> co również jest najgorszym wynikiem (rys. 8.12e). Średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr}$  kształtowała się na poziomie 6,94 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup> (wartość najniższa ze wszystkich testowanych ściernic), natomiast średnia wydajność ubytkowa szlifowania  $Q_{wśr}$  wyniosła 0,89 mm<sup>3</sup>/s (rys. 8.12f).

### **8.2.1. Analiza obrazów mikroskopowych CPS użytych w badaniach po zakończeniu ich okresu trwałości**

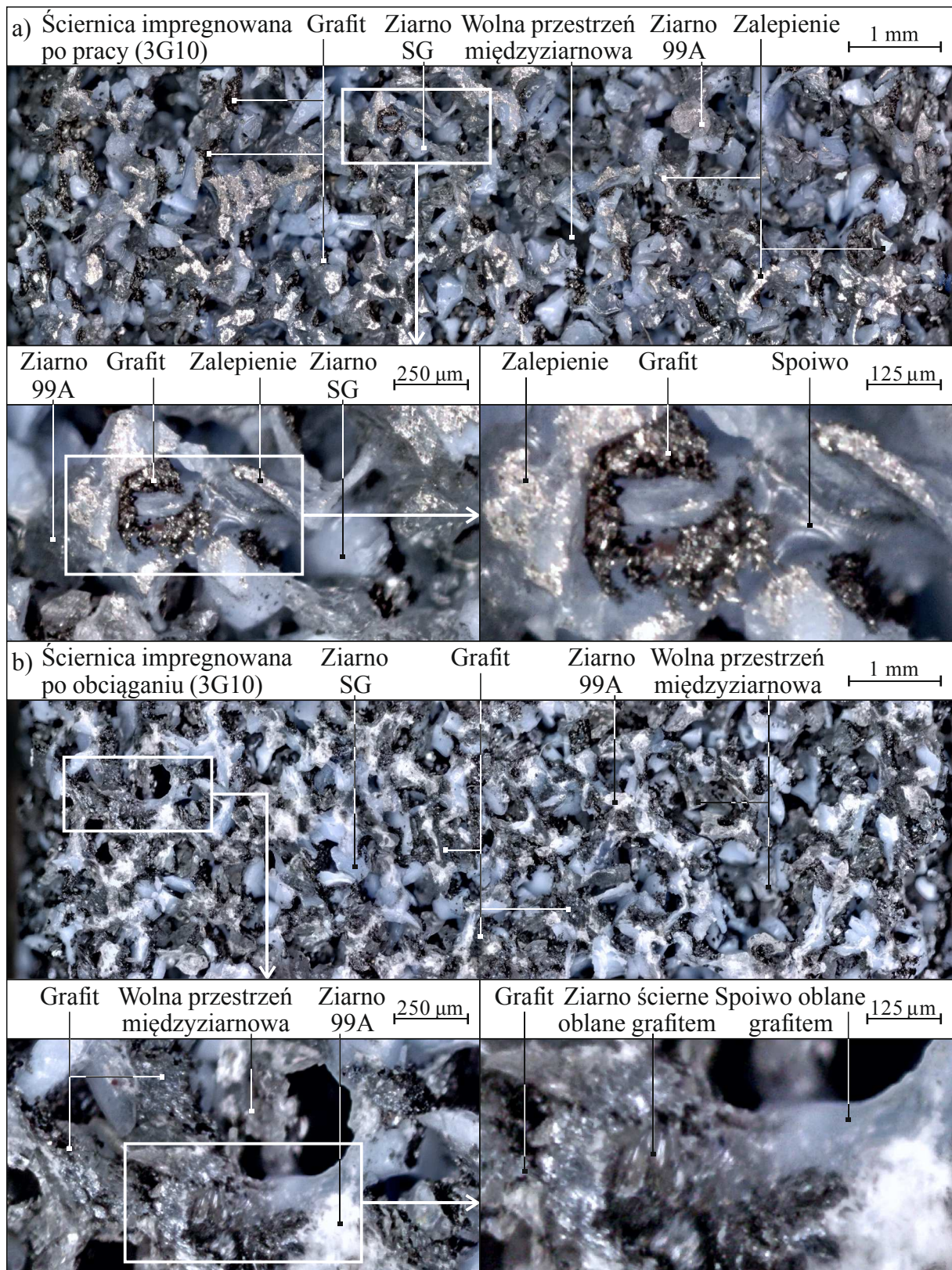
Na rysunku 8.13 zamieszczono obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej po procesie szlifowania (rys. 8.13a) oraz przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu (rys. 8.13b). Analizując zarejestrowane obrazy, można zauważyć otwartą strukturę ściernicy z dużą liczbą wolnych przestrzeni międzyziarnowych. W procesie szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami korundowymi ze spoiwem ceramicznym rzadko dochodzi do powstawania rozległych zalepień. Na rysunku 8.13a można zauważyć mikrozalepienia startych powierzchni wierzchołków ziaren ściernych materiałem obrabianym i produktami zużycia ściernicy, takimi jak wykruszone spoiwo czy fragmenty ziaren ściernych oraz nieliczne większe zalepienia, które wyszły poza obręb ziarna ściernego. Można to tłumaczyć tym, że gdy siła adhezji jaka towarzyszy zalepianiu jest wyższa niż siła oddziaływania spoiwo-ziarno ściernie lub siła oddziaływań międzycząsteczkowych w ziarnie ściernym dochodzi do wykruszania ziaren ściernych a nie do powstawania zalepień, natomiast gdy siła adhezji jest mniejsza powstaje zalepienie. Większe zalepienia powstają na ziarnie 99A. Związane jest to z budową ziarna ściernego, siła adhezji jaka towarzyszy zalepianiu jest mniejsza niż siła oddziaływania spoiwo-ziarno ściernie lub siła oddziaływań międzycząsteczkowych w ziarnie ściernym by doszło do makrowykruszenia czyli oderwania całego ziarna ściernego z CPS. Ziarno SG charakteryzuje się lepszym efektem samoostrzenia (powstają mikrowykruszenia – oderwanie części ziarna ściernego z CPS). Dodatkowo w obrębie zalepienia dochodzi do powstawania przypaleń (rys. 8.13a) co świadczy o małoefektywnym działaniu PCS podawanego metodą zalewową. Rejestracja obrazów mikroskopowych CPS referencyjnej po obciążeniu (rys. 8.13b) miała charakter poglądowy w odniesieniu do oceny efektywności impregnacji.



Rys. 8.13 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica referencyjna po procesie szlifowania ( $t = 189$  s); b) ściernica referencyjna przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu

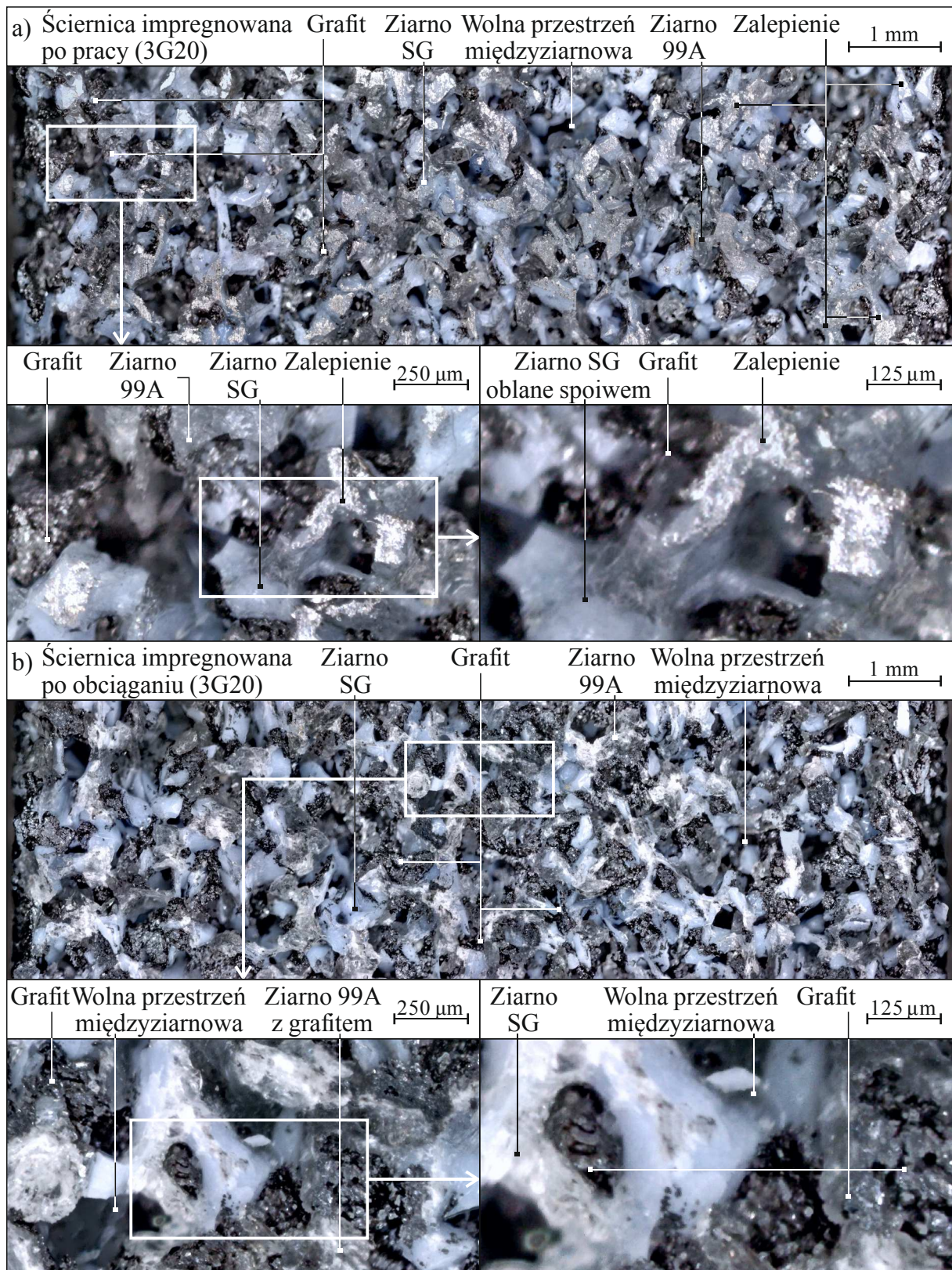
Na rysunkach 8.14-8.16 zamieszczono obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernic impregnowanych grafitem o numerach 3G10, 3G20 i 1G30 (odpowiednio rys. 8.14a, 8.15a, 8.16a), po procesie szlifowania oraz tych samych ściernic przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu (odpowiednio rys. 8.14b, 8.15b, 8.16b). Analizując zarejestrowane obrazy, można zauważyć, że impregnat został rozłożony równomiernie w całym przekroju ściernicy tylko w przypadku ściernicy oznaczonej numerem 3G10, jednak pozostały również wolne przestrzenie międzyziarnowe (rys. 8.14b). W przypadku ściernicy oznaczonej numerem 3G20 impregnat został rozłożony w całym przekroju ściernicy, jednak od czoła ściernicy zaczyna zarysowywać się wyraźna granica, gdzie impregnatu jest znacznie więcej (rys. 8.15b). W przypadku ściernicy oznaczonej numerem 1G30 granica jest jeszcze bardziej uwidoczniła (rys. 8.16b). Może to być wynikiem, że do impregnacji użyto zbyt dużych płatków grafitu, których, przez wielkość, przemieszczanie się w głąb ściernicy jest utrudnione. W obu przypadkach dla ściernicy 3G20 i 1G30 obserwuje się również zmniejszenie ilości wolnych przestrzeni międzyziarnowych (mniejsze przestrzenie zostały całkowicie wypełnione impregnatem) – rys. 8.15b i 8.16b. W procesie szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami korundowymi ze spoiwem ceramicznym impregnowanymi grafitem oznaczonych numerami 3G10, 3G20 i 1G30 impregnat ograniczył powstawanie rozległych zalepień (rys. 8.14b, 8.15b i 8.16b), a to wpłynęło na wydłużenie ich okresu trwałości. Jednak różna masa impregnatu w ściernicy miała wpływ na jej okres trwałości. Zaobserwowano najdłuższy okres trwałości dla ściernicy oznaczonej numerem 3G20 (okres trwałości ściernicy wydłużył się ponad trzykrotnie w odniesieniu do procesu szlifowania ściernicą referencyjną). W przypadku ściernicy 3G10 okres trwałości wydłużył się nieznacznie w odniesieniu do okresu trwałości ściernicy referencyjnej, a analizując rozrzut w czasie szlifowania pomiędzy kolejnymi powtórzeniami  $\sigma = 60$  s można przyjąć, niemal się nie zmienił w porównaniu ze ściernicą referencyjną (rys. 8.5d i 8.6d). W przypadku ściernicy 1G30 okres jej trwałości wydłużył się średnio ponad dwukrotnie w odniesieniu do wyników uzyskanych z użyciem ściernicy referencyjnej. Jednak obserwuje się duży rozrzut w czasie szlifowania pomiędzy kolejnymi powtórzeniami  $\sigma = 152$  s (rys. 8.7d). Analizując obrazy mikroskopowe zamieszczone na rys. 8.14a, 8.15a i 8.16a można zauważyć, że w trakcie pracy ściernicy impregnowanej grafitem dochodzi do powstawania tylko mikrozalepień na wierzchołkach aktywnych ziaren ściernych. Wraz ze zużywaniem się ziaren ściernych ubywa pewna ilość grafitu, który do nich przylega.





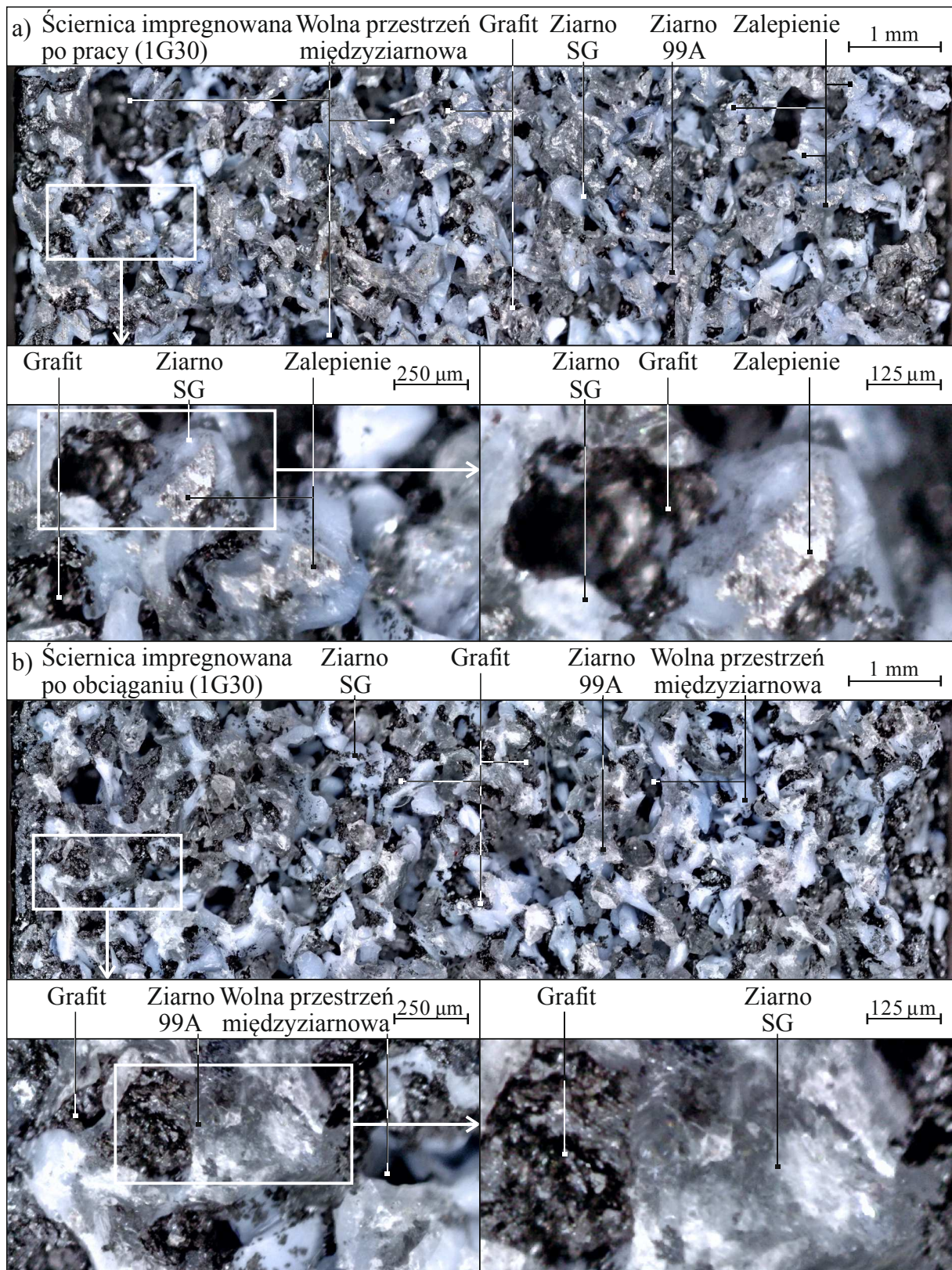
Rys. 8.14 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (3G10) po procesie szlifowania ( $t = 170$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (3G10) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu





Rys. 8.15 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (3G20) po procesie szlifowania ( $t = 580$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (3G20) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu

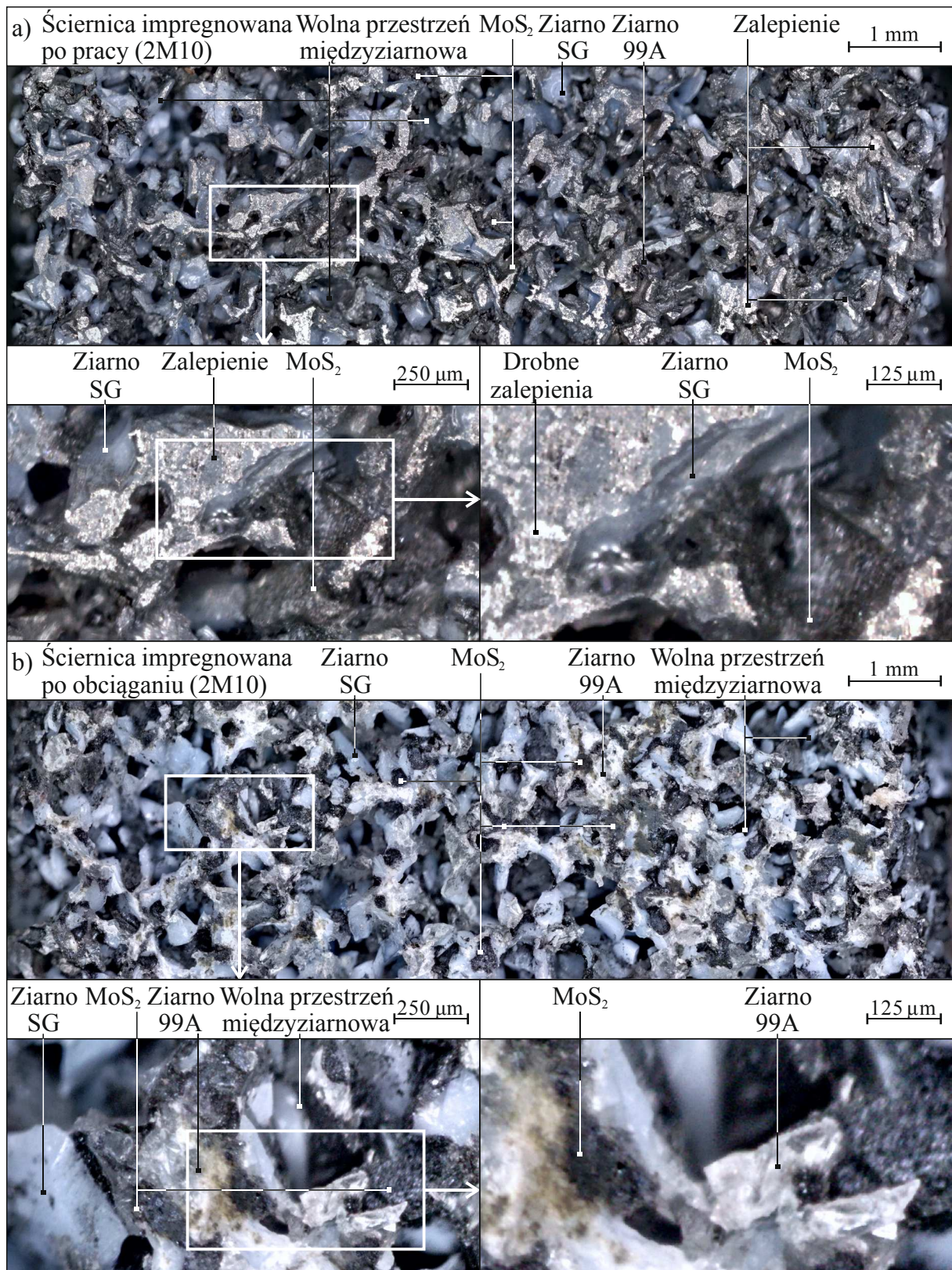




Rys. 8.16 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (1G30) po procesie szlifowania ( $t = 316$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (1G30) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu

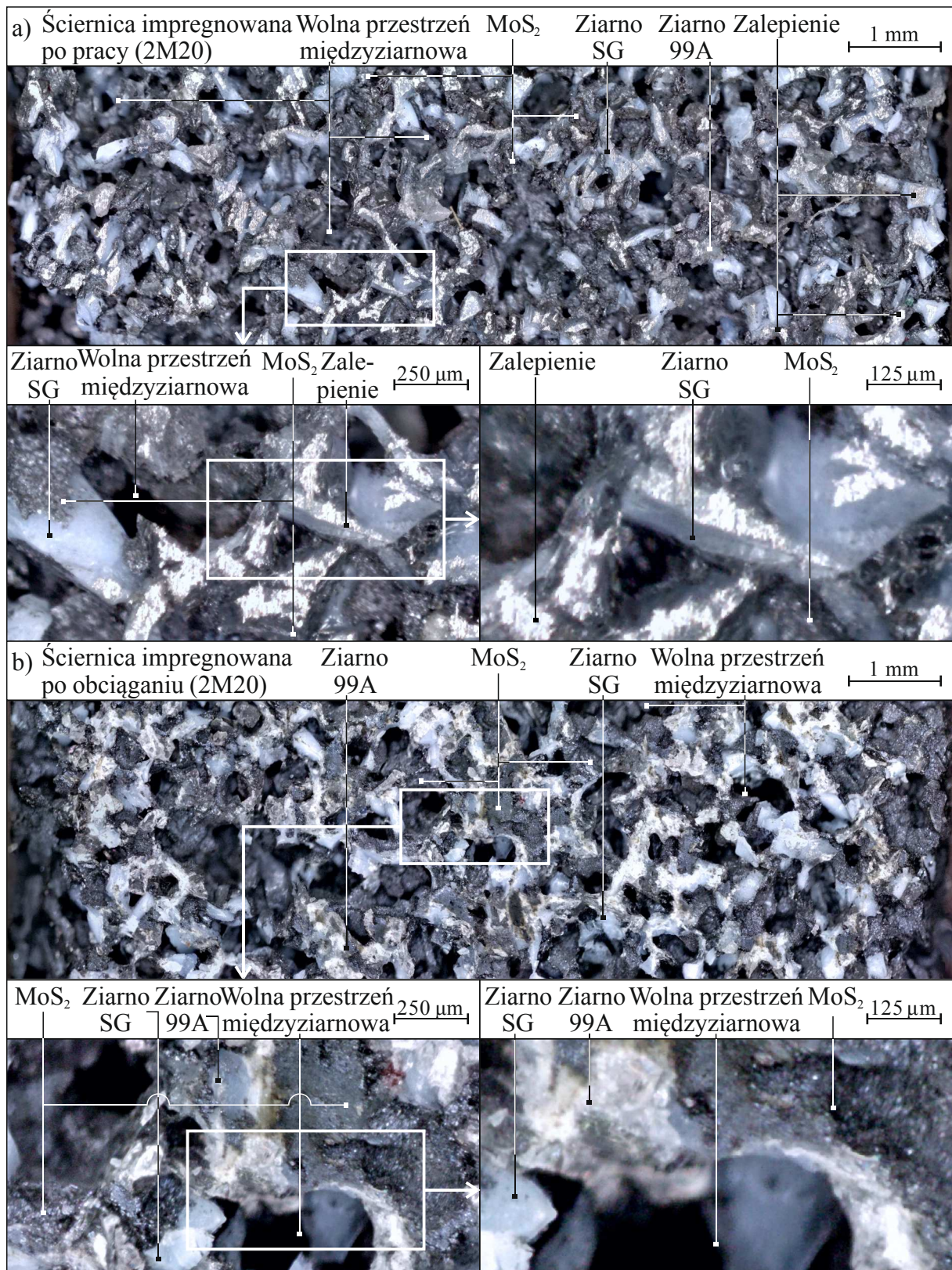


Podobną sytuację można zaobserwować w przypadku analizy CPS obrazów mikroskopowych ściernic impregnowanych dwusiarczkiem molibdenu. Na rysunkach 8.17-8.20 zamieszczono obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernic impregnowanych dwusiarczkiem molibdenu o numerach 2M10, 2M20, 2M30 i 2M40 (odpowiednio rys. 8.17a, 8.18a, 8.19a, 8.20a), po procesie szlifowania oraz tych samych ściernic przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu (odpowiednio rys. 8.17b, 8.18b, 8.19b, 8.20b). Analizując zarejestrowane obrazy CPS dla wszystkich ściernic impregnowanych dwusiarczkiem molibdenu, można zauważyć, że impregnat został rozłożony równomiernie w całym przekroju ściernicy. Obserwuje się również zmniejszenie ilości wolnych przestrzeni międzyziarnowych, mniejsze przestrzenie zostały całkowicie wypełnione impregnatem. Wraz ze wzrostem masy impregnatu w ściernicy więcej przestrzeni zostaje całkowicie wypełnionych impregnatem (rys. 8.17b - 8.20b). W procesie szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami korundowymi ze spoiwem ceramicznym nie w każdym przypadku dwusiarczek molibdenu ograniczył powstawanie rozległych zalepień, a okres trwałości ściernicy zależał głównie od masy wprowadzonego impregnatu. Rozległe zalepienia zaobserwowano tylko na CPS oznaczonej 2M40. Tłumaczyć to można tym, że gdy impregnat w zbyt dużym stopniu ograniczy ilość wolnych przestrzeni międzyziarnowych, to odprowadzanie produktów obróbki poza strefę szlifowania jest uciążliwe, rola antyadhezyjna impregnatu daje efekty odwrotne do spodziewanych. Wtedy dochodzi do powstania zalepienia i zakończenia okresu trwałości ściernicy. Natomiast, gdy impregnatu w ściernicy jest mniej (ilość WPM jest odpowiednia) jego efekt antyadhezyjny jest widoczny. Okres trwałości dla ściernicy 2M40 był najkrótszy ze wszystkich testowanych ściernic (rys. 8.12). Najdłuższy okres trwałości zaobserwowano dla ściernicy oznaczonej numerem 2M20 (okres trwałości ściernicy wydłużył się ponad trzykrotnie w odniesieniu do rezultatów uzyskanych z użyciem ściernicy referencyjnej, jednak zaobserwowano duży rozrzut w czasie szlifowania pomiędzy kolejnymi powtórzeniami  $\sigma = 143,8$  s) – rys. 8.10. Analizując rysunki 8.17a - 8.19a można zauważyć, że w trakcie pracy ściernicy dochodzi do powstawania tylko mikrozalepień na wierzchołkach aktywnych ziaren ściernych. Wraz ze zużywaniem ziaren ściernych ubywa pewna ilość dwusiarczku molibdenu, który do nich przylega.



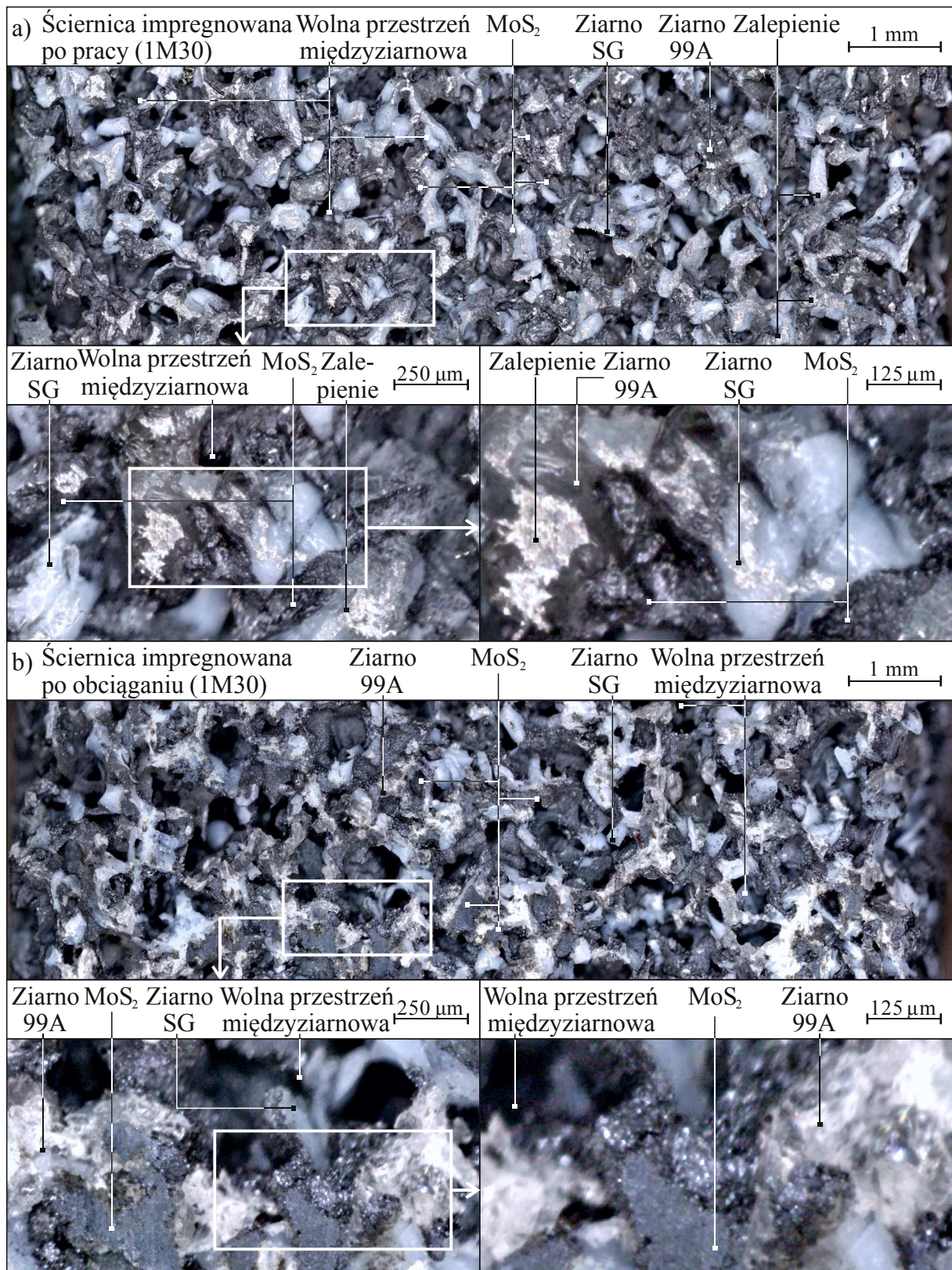
Rys. 8.17 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M10) po procesie szlifowania ( $t = 386$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M10) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu





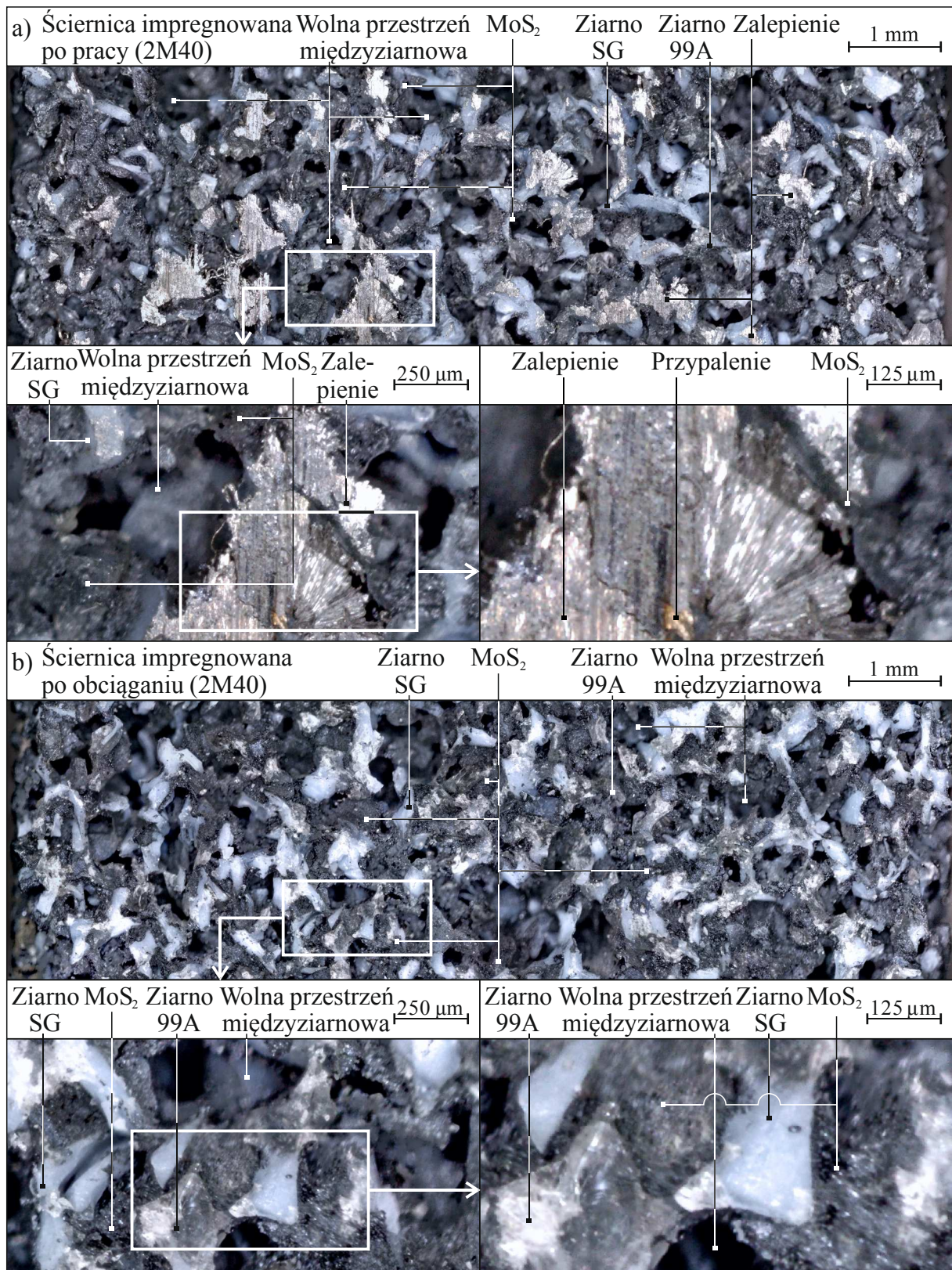
Rys. 8.18 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M20) po procesie szlifowania ( $t = 606$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M20) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu





Rys. 8.19 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M30) po procesie szlifowania ( $t = 233$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M30) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu



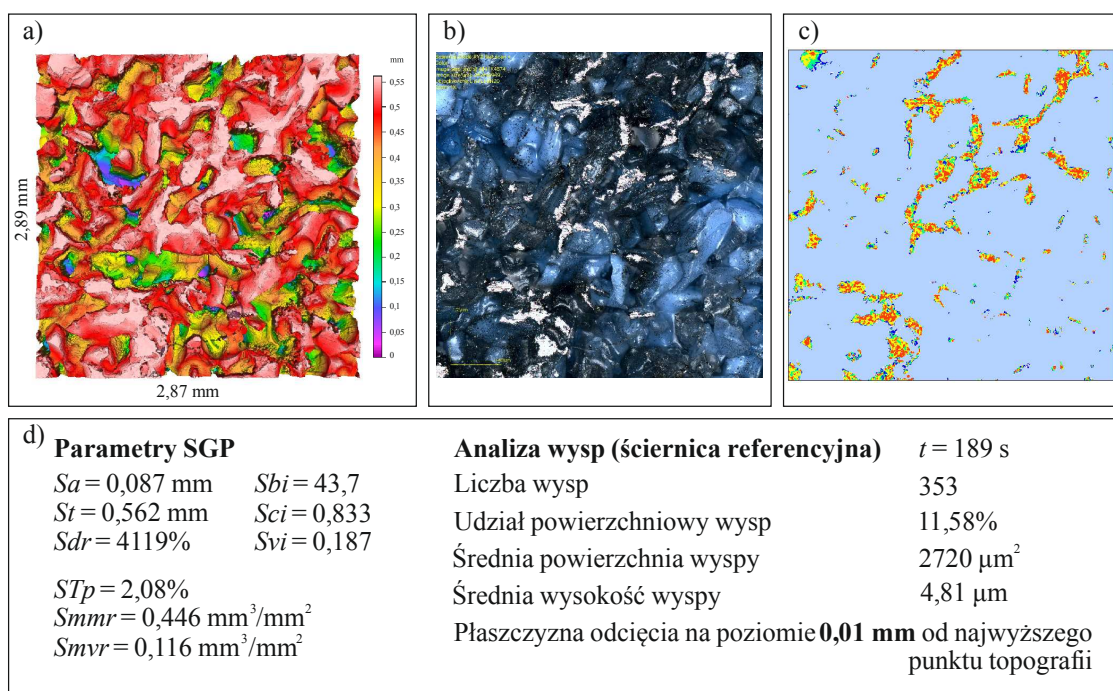


Rys. 8.20 Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane go zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M40) po procesie szlifowania ( $t = 177$  s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M40) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu

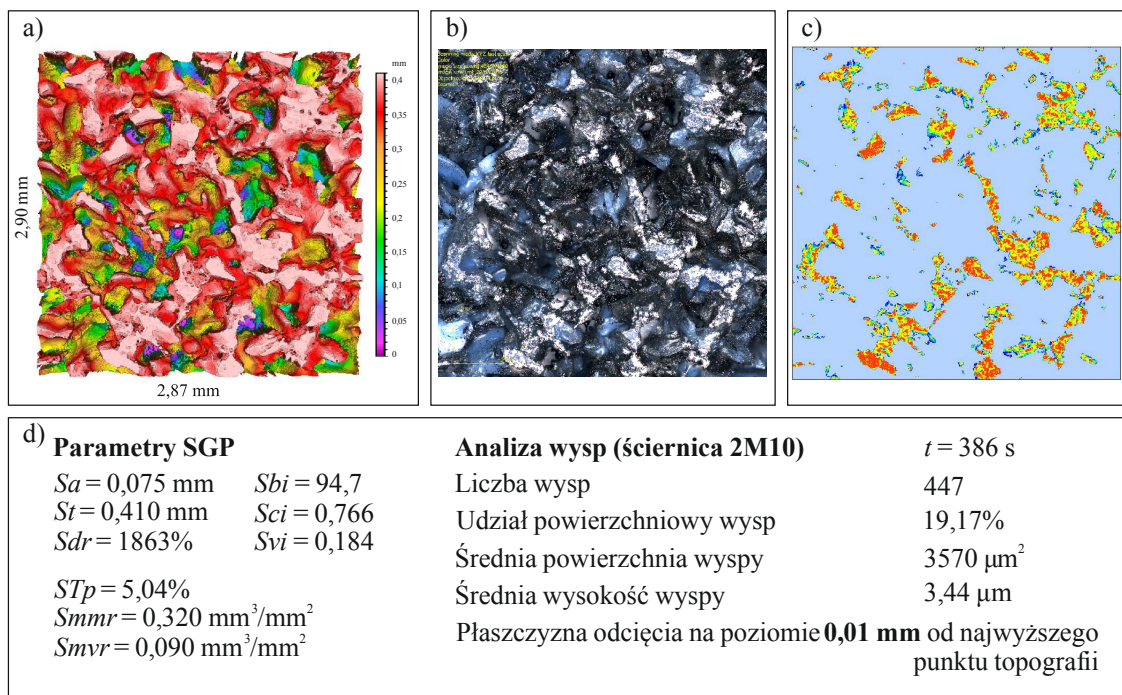


### 8.2.2. Ocena stopnia zalepienia czynnej powierzchni badanych ściernic po zakończeniu okresu trwałości

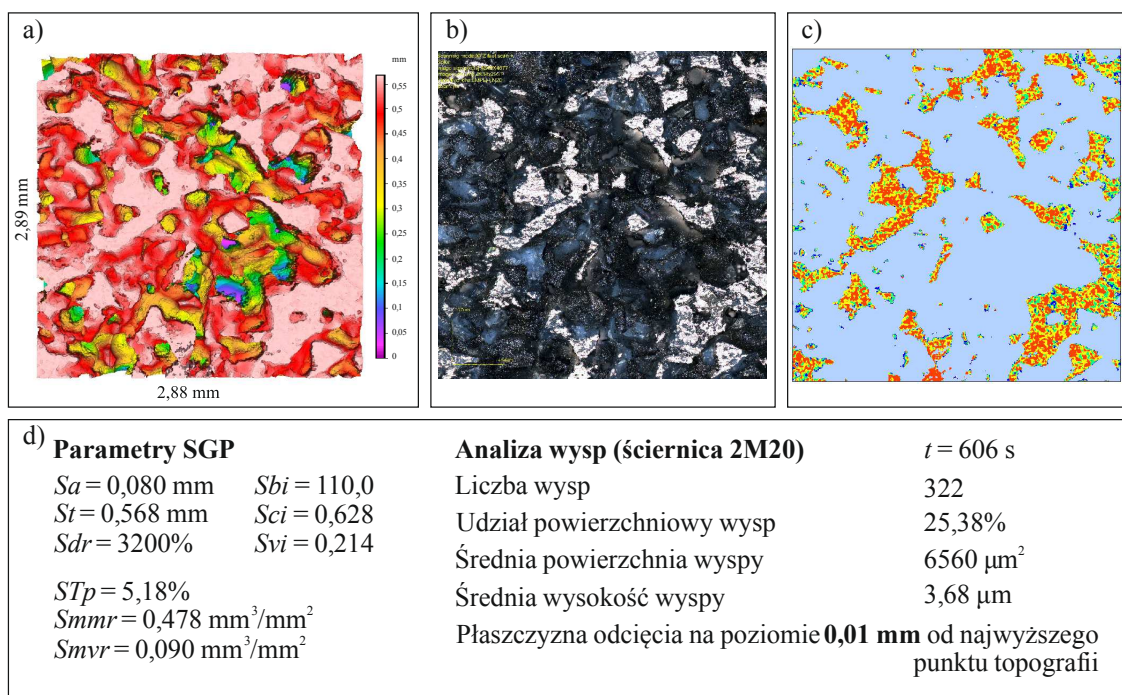
Do oceny stopnia zalepienia CPS, na podstawie zmierzonych mikrotopografii powierzchni ściernic po szlifowaniu, wytypowano następujące parametry struktury geometrycznej powierzchni: parametry amplitudowe  $Sa$  i  $St$ , parametr hybrydowy  $Sdr$ , parametry przestrzenne i objętościowe  $STp$ ,  $Smmr$  i  $Smvr$  oraz parametry funkcjonalne  $Sbi$ ,  $Sci$  i  $Svi$ . Dodatkowo posłużono się tzw. analizą wysp. Są to obszary wyodrębnione z zarejestrowanej mikrotopografii poprzez powierzchnię przecięcia przechodzącą równoległe do podstawy na zdefiniowanym przez użytkownika poziomie. W opisywanych badaniach wartość ta wynosiła 0,01 mm od najwyższego punktu topografii. W każdym przypadku obszary wyodrębnione w analizie wysp pokrywały się wizualnie z zalepieniami widocznymi na obrazach mikroskopowych co świadczyło o dobrym dopasowaniu wartości powierzchni przecięcia równoległej do podstawy oraz poprawności zastosowanego algorytmu (rys. 4.11). Analizę przeprowadzono tylko po zakończeniu okresu trwałości dla ściernicy referencyjnej (rys. 8.21) oraz ściernic impregnowanych dwusiarczkiem molibdenu (rys. 8.22-8.25). Na podstawie przeprowadzonej analizy na rysunku 8.26 zestawiono wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni badanych ściernic natomiast na rysunku 8.27 wartości parametrów z analizy wysp. Analiza ta ma charakter poglądowy, gdyż dla każdej ściernicy czas szlifowania był różny.



Rys. 8.21 Analiza czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp

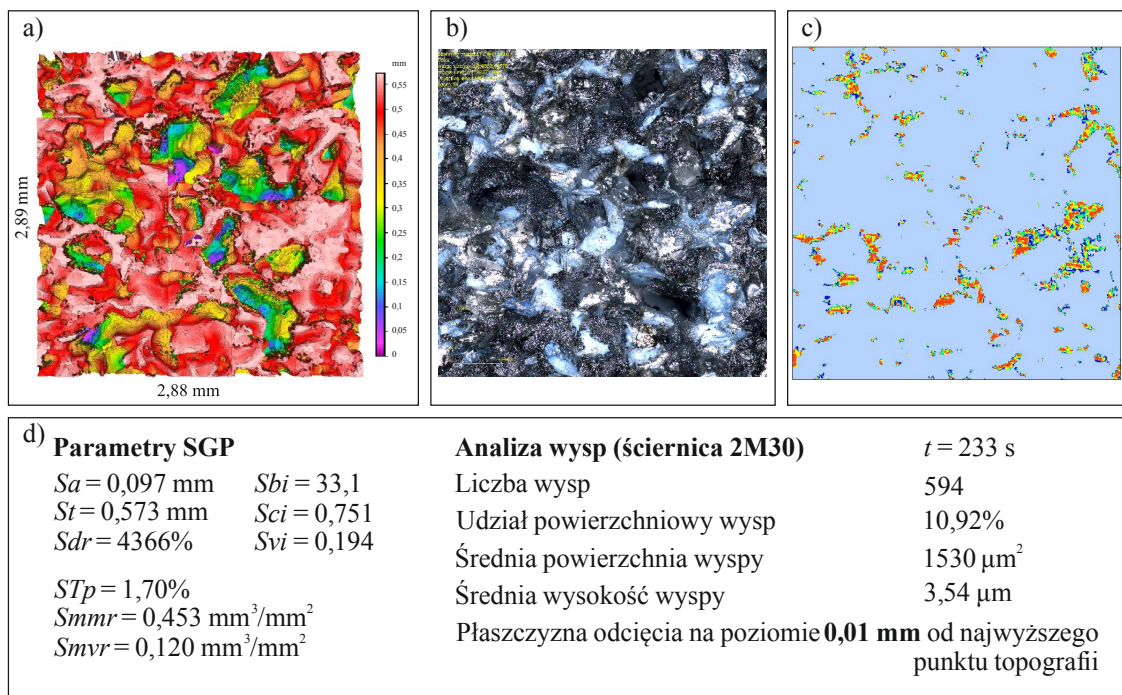


Rys. 8.22 Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M10: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp

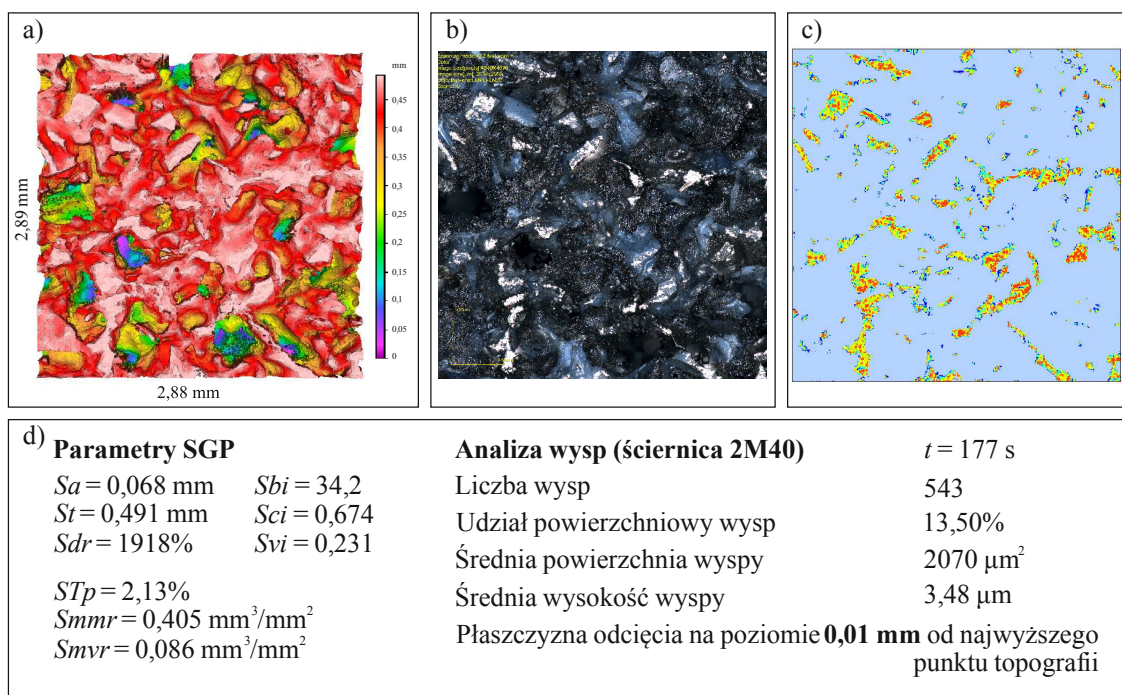


Rys. 8.23 Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M20: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp





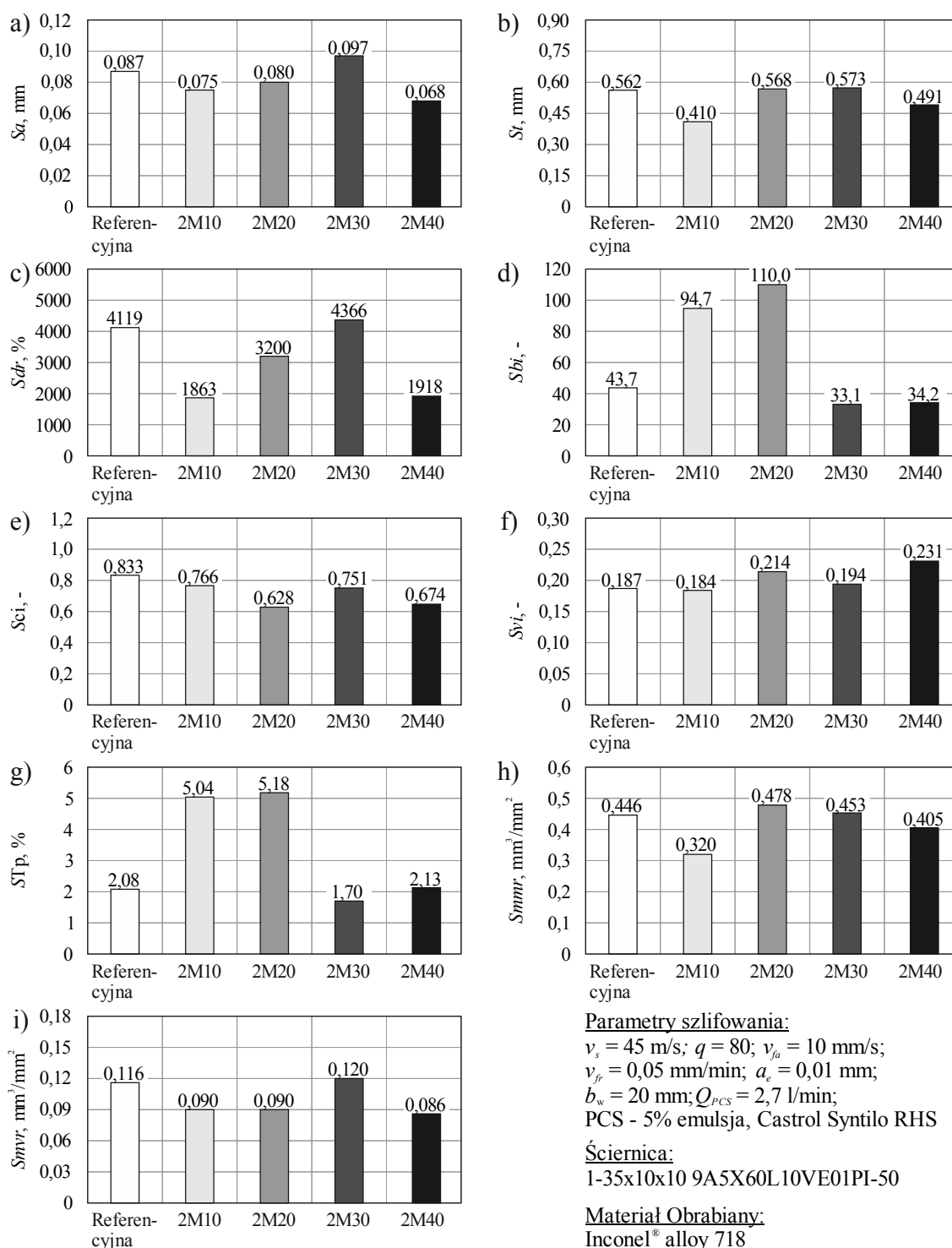
Rys. 8.24 Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M30: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp



Rys. 8.25 Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M40: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp

Z zestawienia przedstawionego na rys. 8.26 wynika, że impregnacja nie wpłynęła znacząco na zmianę wartości parametrów amplitudowych  $Sa$  i  $St$  struktury geometrycznej powierzchni ba-

danych ściernic (rys. 8.26a i b). Jedynie w przypadku ściernicy oznaczonej numerem 2M40 wartość średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni  $Sa$  była o około 22% niższa w porównaniu do ściernicy referencyjnej, a czas szlifowania ściernic był podobny.

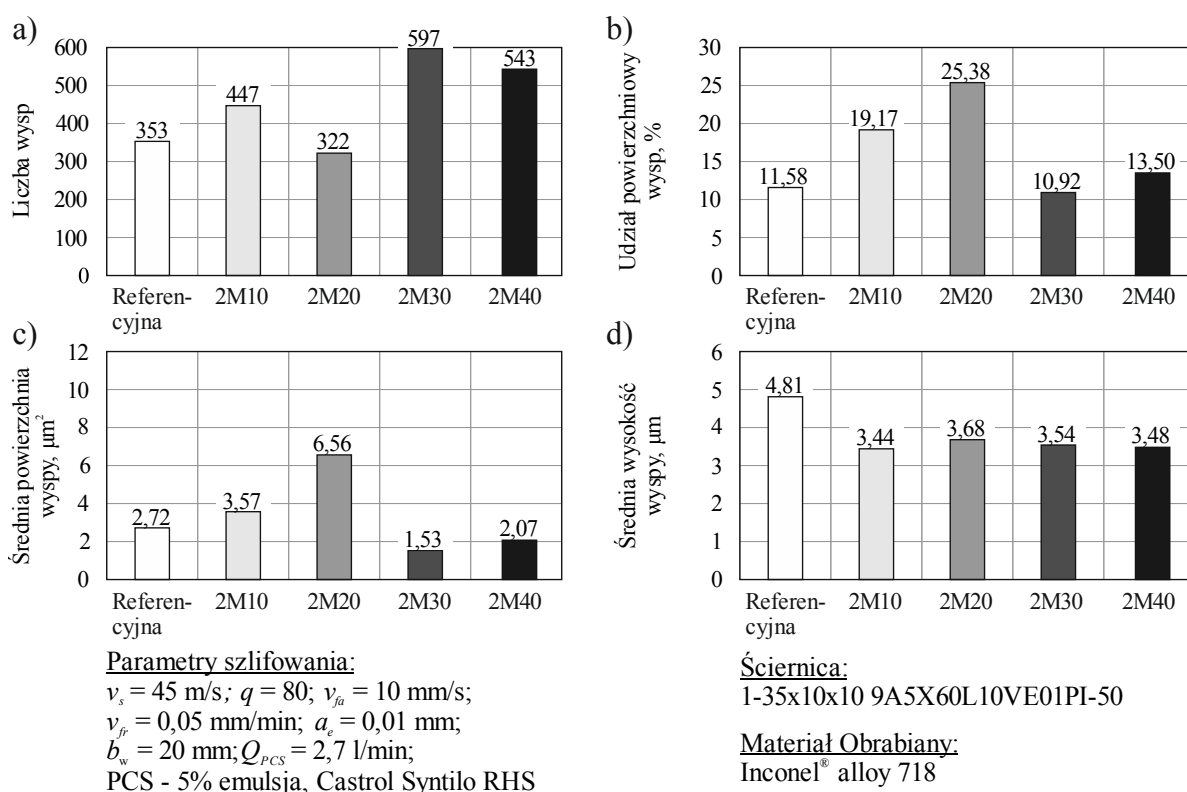


Rys. 8.26 Wartości parametrów SGP ocenianych czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni  $Sa$ ; b) całkowita wysokość nierówności powierzchni  $St$ ; c) współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Sdr$ ; d) wskaźnik nośności  $Sbi$ ; e) wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń  $Sci$ ; f) wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia  $Svi$ ; g) udział nośny na zadanej wysokości  $STp$  ( $1 \mu\text{m}$  poniżej najwyższego punktu powierzchni); h) średnia objętość materiału  $Smmr$ ; i) średnia objętość pustek  $Smvr$

Świadczy to o tym, że w ściernicy 2M40 ilość impregnatu była zdecydowanie za duża i zapełnił on większość wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Największą wartość współczynnika rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  zanotowano dla ściernicy oznaczonej numerem 2M30 (rys. 8.26c), ale ściernica ta w porównaniu do ściernicy referencyjnej pracowała o ponad 23% czasu dłużej. Największe wartości wskaźnika nośności  $Sbi$  oraz udziału nośnego na zadanej wysokości  $STp$  zanotowano dla ściernicy 2M10 oraz 2M20. Wartości te były odpowiednio o ponad 116% dla ściernicy 2M10 i 151% dla ściernicy 2M20 większe w porównaniu do ściernicy referencyjnej (rys. 8.26d i g), jednak ściernica 2M10 pracowała o ponad 104% czasu dłużej, natomiast ściernica 2M20 o ponad 220% czasu dłużej w odniesieniu do ściernicy referencyjnej co było powodem większego zużycia aktywnych ziaren ściernych. Można zauważyć również nieznaczne wahania wartości pozostałych parametrów poddanych ocenie w odniesieniu do kolejnych ściernic jak wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń  $Sci$ , wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia  $Svi$ , średnia objętość materiału  $Smmr$  i średnia objętość pustek  $Smvr$  (rys. 8.26e, f, h, i). Świadczy to o poprawnym doborze kryterium końca okresu trwałości.

Na rysunku 8.27 przedstawiono wykresy zmian wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni pięciu ocenianych ściernic po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w stopie Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Na podstawie wykresu prezentującego zmiany liczby wysp (rys. 8.27a) można przypuszczać, że impregnacja wpłynęła na zmniejszenie zużycia ściernicy, w przypadku szlifowania ściernicami impregnowanymi obserwuje się zwiększenie liczby wysp (liczby wierzchołków aktywnych ziaren ściernych). Jedynie dla ściernicy 2M20 liczba wysp jest mniejsza w porównaniu do ściernicy referencyjnej, jednak jest to wynikiem, że ściernica ta pracowała ponad trzykrotnie dłużej. Jeżeli przyrównać wartości liczby wysp ściernic, które pracowały w podobnym czasie (ściernica referencyjna z  $t = 198$  s, ściernica 2M30 z  $t = 233$  s, ściernica 2M40 z  $t = 177$  s) liczba wysp dla ściernicy 2M30 była o ok. 68% i ok. 54% dla ściernicy 2M40 większa niż liczba wysp ściernicy referencyjnej (rys. 8.27a). Świadczy to o spełnianiu roli antyadhezyjnej przez użyty impregnat. Impregnacja CPS przyczynia się do tego, że na CPS powstaje co prawda nieznacznie więcej zalepień (rys. 8.27b), jednak powstają one tylko na wierzchołkach aktywnych ziaren ściernych, a ich średnia powierzchnia jest mniejsza (rys. 8.27). Mniejsza powierzchnia zalepienia przyczynia się do mniejszego zużycia ściernicy, ponieważ istnieje mniejsze prawdopodobieństwo, że dojdzie do makrowykruszenia ziarna ściernego z CPS, w związku z czym ściernica dłużej posiada swoje właściwości skrawne. Przypuszczenie to potwierdzają również wartości średnie wskaźnika szlifowania  $G$  wyliczone dla ściernicy referencyjnej (rys. 8.5f) oraz dla ściernic impregnowanych (rys. 8.9f-9.12f), które w każdym przypadku były wyższe od wartości wskaźnika szlifowania

G uzyskiwanych dla ściernicy referencyjnej. Najniższą wartość udziału powierzchniowego wysp zanotowano dla ściernicy oznaczonej numerem 2M30 tj. 10,92%, natomiast najwyższą wartość tego parametru zarejestrowano dla ściernicy 2M20 tj. 25,38%. W przypadku innych ściernic impregnowanych wartości tego parametru były wyższe od wartości uzyskanej dla ściernicy referencyjnej. Udział powierzchniowy wysp (rys. 8.27b) oraz średnia powierzchnia wyspy (rys. 8.27c) w dużym stopniu zależne są od czasu szlifowania a tym samym od wypłaszczenia wierzchołków aktywnych ziaren ściernych, dlatego też na podstawie przeprowadzonej analizy nie można określić jednoznacznego wpływu impregnowania CPS na te parametry. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można jedynie stwierdzić, że impregnacja CPS oznaczonej numerem 2M20 sprawiła, że okres trwałości dla tej ściernicy zakończył się, gdy udział powierzchniowy wysp przekroczył wartość 25% (rys. 8.27b).



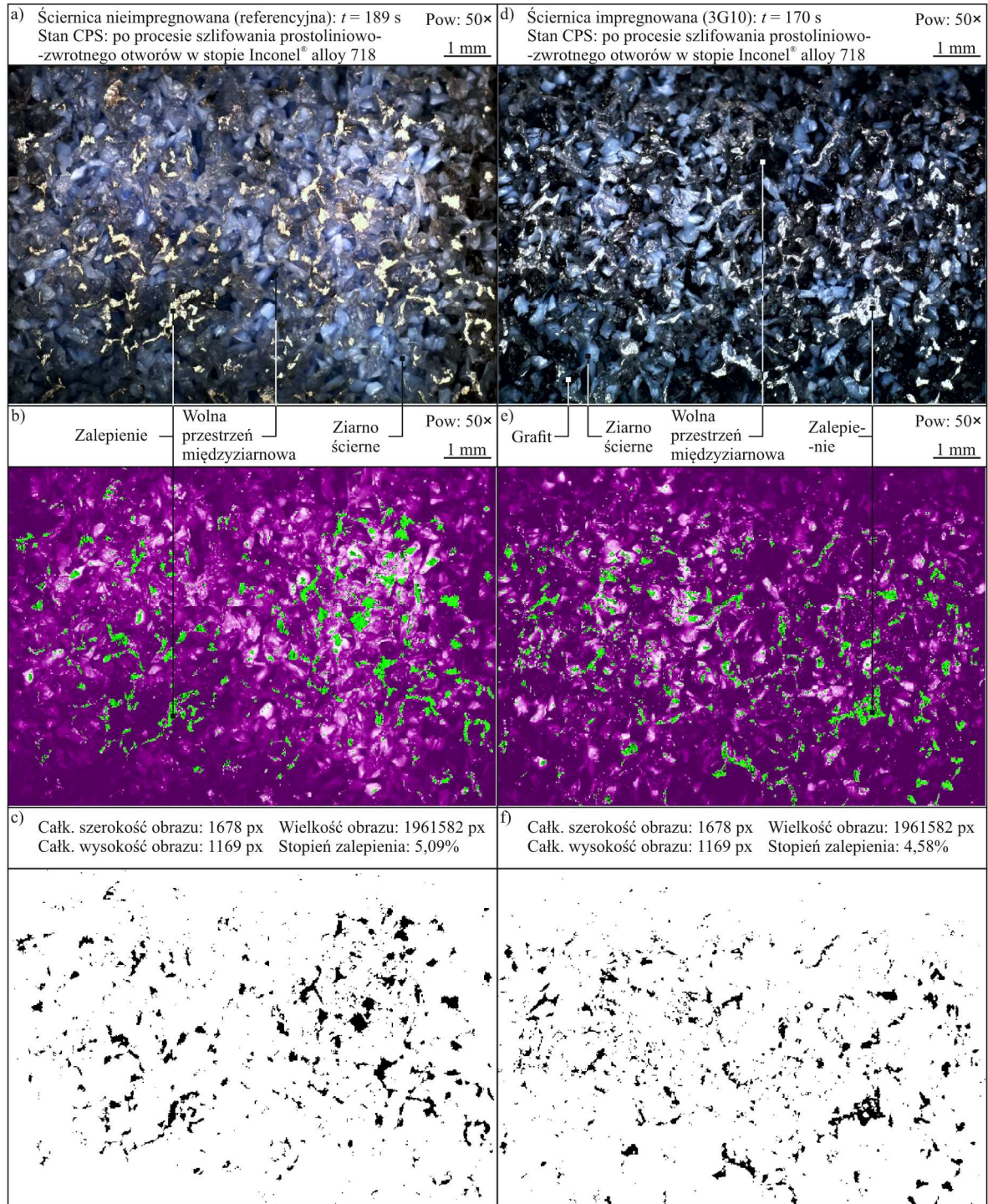
Rys. 8.27 Wartości parametrów SGP ocenianych czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) liczba wysp; b) udział powierzchniowy wysp; c) średnia powierzchnia wyspy; d) średnia wysokość wyspy

Do wyznaczenia udziału powierzchniowego wysp czyli stopnia zalepienia może również posłużyć przetworzenie obrazu, jak zostało to przedstawione w publikacji Adibiego i innych [2]. Aby uzyskać informacje o stopniu zalepienia także dla ściernic impregnowanych grafitem, postanowiono wykorzystać właśnie tą metodę (rys. 8.28-8.31). Do tego celu użyto programu



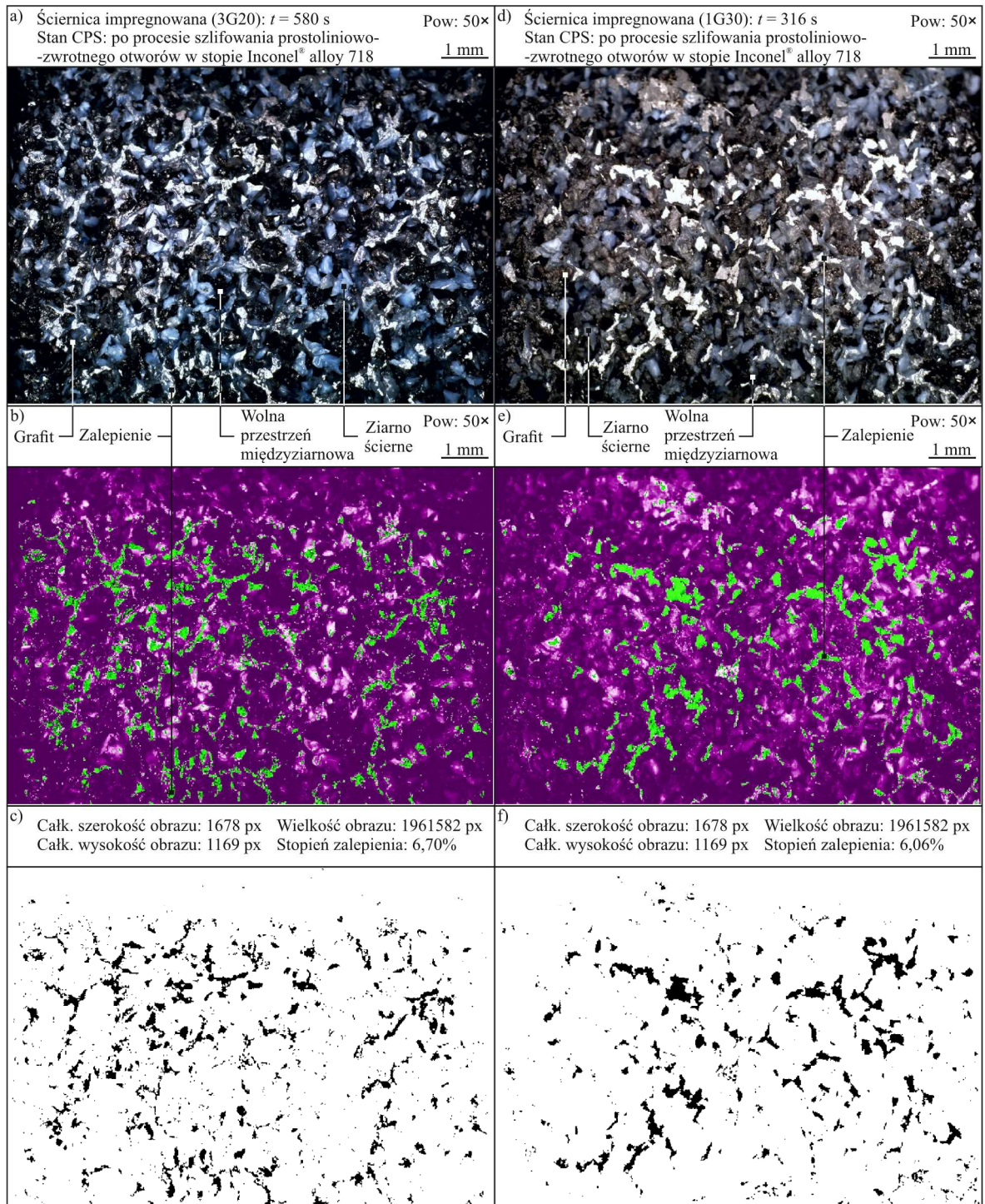
Matlab. Udział powierzchniowy wysp zdefiniowano jako stosunek liczby czarnych pikseli w obrazie do całkowitej liczby wszystkich pikseli w obrazie binarnym (równanie 13).

$$\text{Stopień zalepienia CPS} = \frac{\text{liczba czarnych pikseli}}{\text{całkowita liczba pikseli}} \cdot 100\% \quad (13)$$



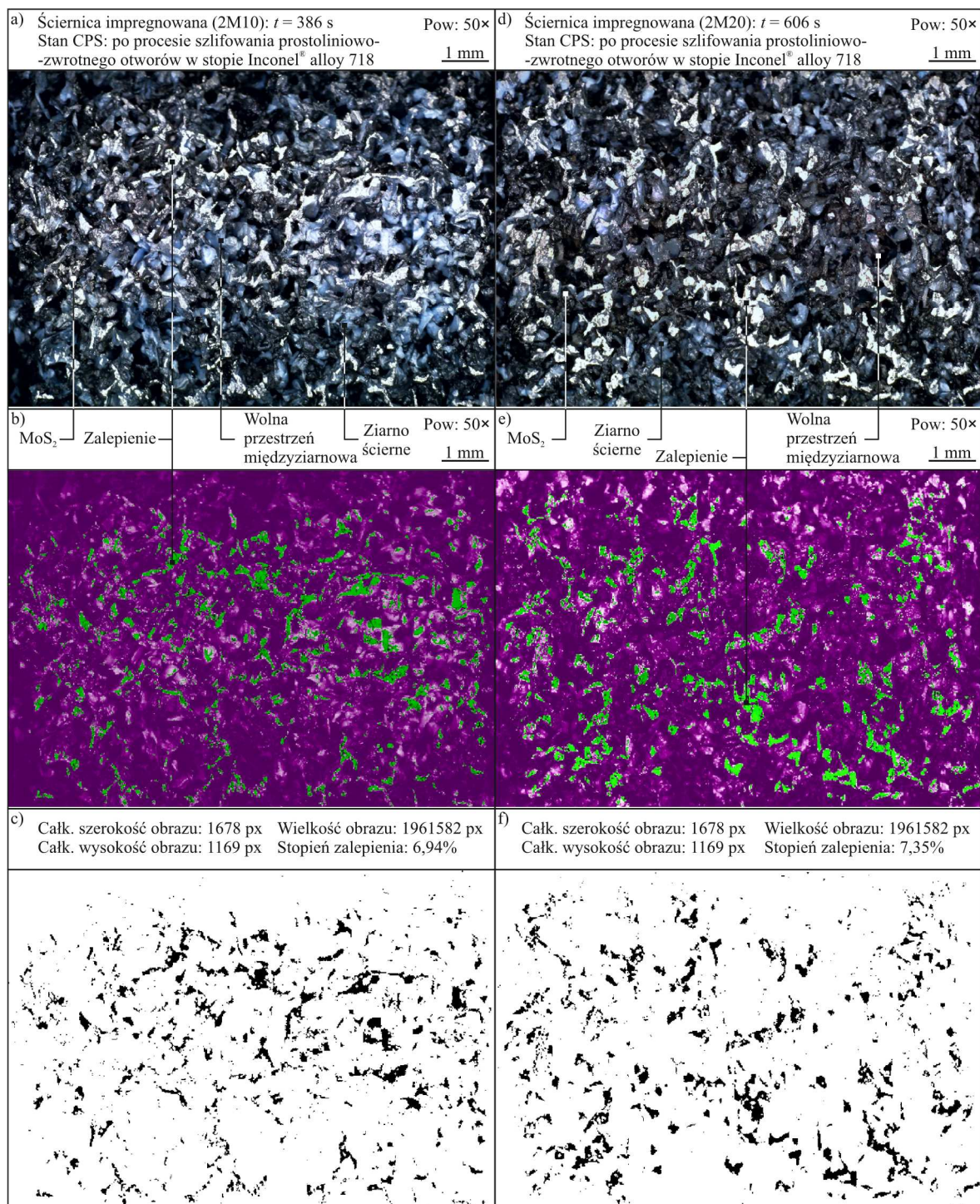
Rys. 8.28 Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej; b) obraz CPS referencyjnej z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica referencyjna); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 3G10; e) obraz CPS 3G10 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 3G10);





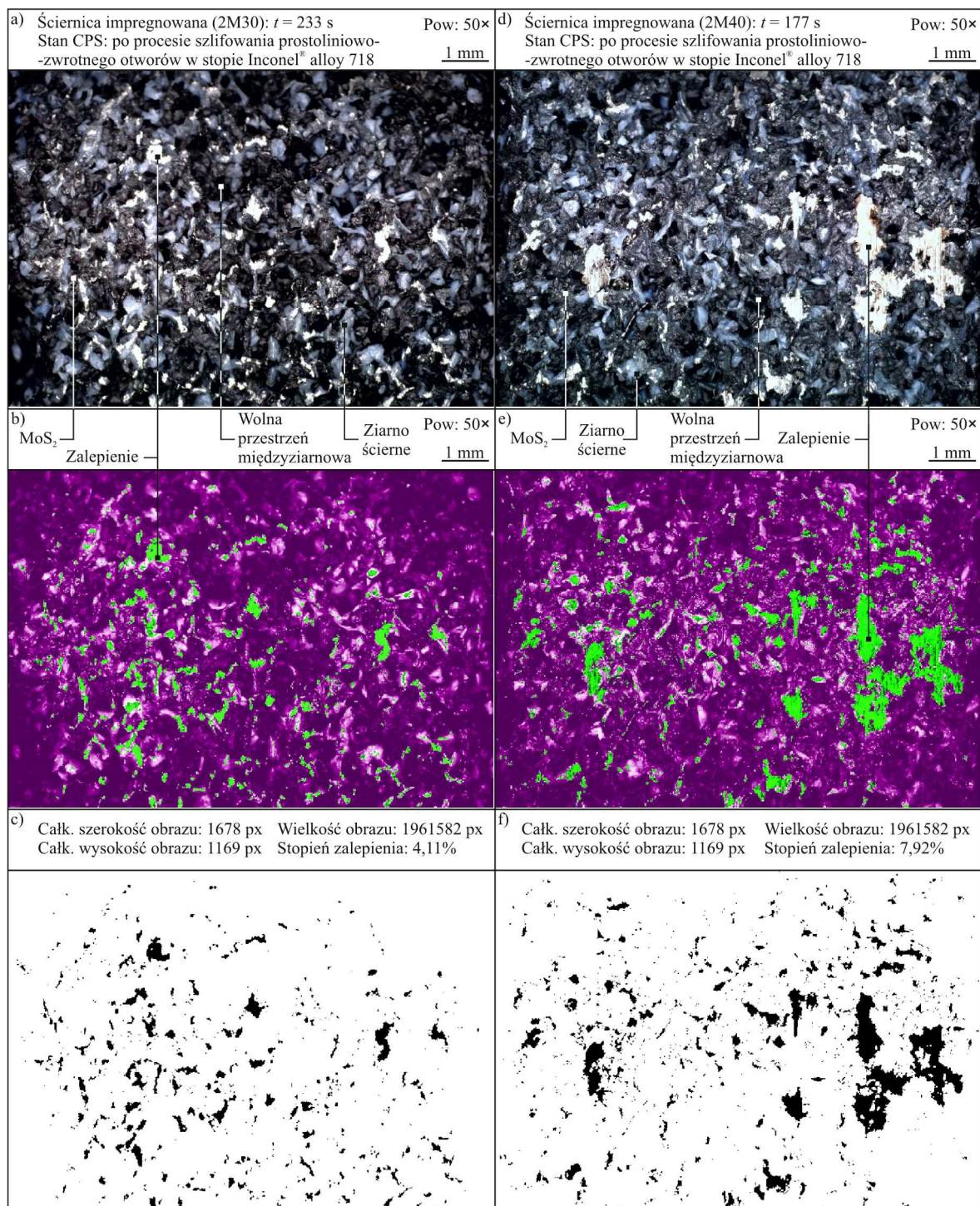
Rys. 8.29 Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 3G20; b) obraz CPS 3G20 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 3G20); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 1G30; e) obraz CPS 1G30 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 1G30);





Rys. 8.30 Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M10; b) obraz CPS 2M10 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M10); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M20; e) obraz CPS 2M20 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M20);

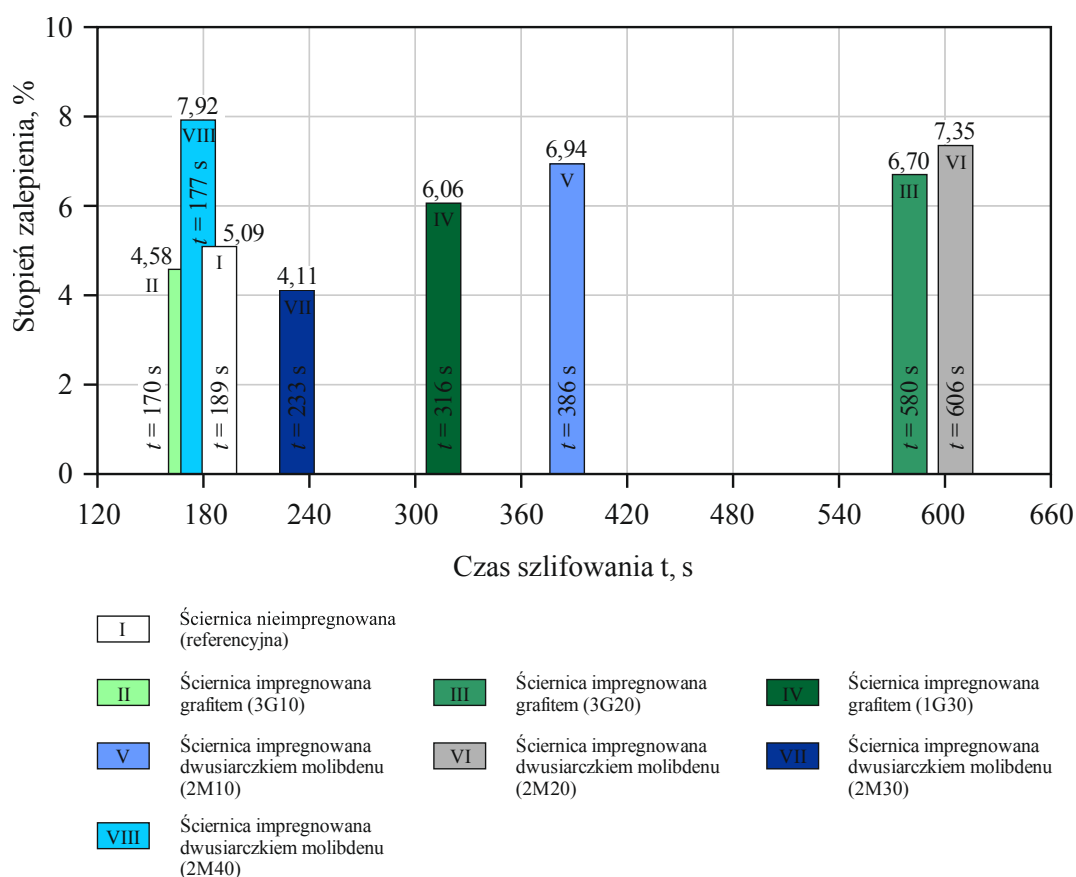




Rys. 8.31 Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M30; b) obraz CPS 2M30 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M30); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M40; e) obraz CPS 2M40 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M40);

Ze względu na to, że nie można określić jednoznacznego wpływu impregnowania CPS na udział powierzchniowy wysp czy stopień zalepienia, postanowiono przedstawić wartości tego parametru na końcu okresu trwałości dla różnych ściernic w funkcji czasu (rys. 8.32). Z wykresu przedstawionego na rysunku 8.32 wynika, że podczas szlifowania prostoliniowo-

zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 impregnacja grafitem lub dwusiarczkiem może wpływać na redukcję stopnia zalepienia jej CPS utrzymując okres trwałości na podobnym poziomie (ściernica 3G10 oraz 2M30) w odniesieniu do ściernicy nieimpregnowanej, gdy procentowy przyrost masy impregnatu w ściernicy wynosi odpowiednio ok. 2% wag. dla grafitu i ok. 7% wag. dla dwusiarczku molibdenu. Gdy procentowy przyrost masy dwusiarczku molibdenu w ściernicy jest większy od 7% wag. należy oczekiwać zwiększenia stopnia zalepienia CPS oraz skrócenia jej okresu trwałości (ściernica 2M40). Najkorzystniejsze rezultaty przy stosowaniu ściernic impregnowanych można uzyskiwać stosując ściernice, w których przyrost masy impregnatu wynosi odpowiednio ok. 3,5% wag. w przypadku stosowania grafitu oraz ok. 4,5% wag. w przypadku stosowania dwusiarczku molibdenu. Takie zawartości impregnatów w ściernicy, co prawda spowodowały, że stopień zalepienia CPS w odniesieniu do referencji (5,09%) zwiększył się o 32% dla ściernicy 3G20 oraz 44% dla ściernicy 2M20, natomiast okres trwałości tych ściernic wydłużył się ponad 300%.



Rys. 8.32 Stopień zalepienia dla wszystkich ocenianych ściernic na końcu okresu trwałości (w momencie przekroczenia granicznej wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta G_{gr.}$ ) w funkcji czasu szlifowania  $t$

Wynika z tego, że ilość impregnatu w ściernicy ma istotny wpływ na przebieg i efekty procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Im większa zawartość impregnatu w ściernicy, tym lepsza efektywność procesu szlifowania otworów wyrażona stopniem zalepienia ściernicy. Impregnat powoduje zmniejszenie zużycia objętościowego ściernicy  $V_s$ , powodując, że nie dochodzi do makrowykruszeń ziaren ściernych na CPS. Jednak po przekroczeniu pewnej zawartości impregnatu w objętości ściernicy (powyżej ok. 7% wag. w przypadku dwusiarczku molibdenu i ok. 4,5% wag. w przypadku grafitu), impregnat zapełnia tyle wolnych przestrzeni w ściernicy, że ściernica traci swoje właściwości skrawne. Wtedy obserwuje się odwrotne do zamierzonych skutki działania impregnatu, impregnat zamiast zwiększać efektywność procesu szlifowania, zmniejsza ją.

### 8.3. Ocena efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718

Efektywność procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami impregnowanymi grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu o różnych zawartościach masowych tych impregnatów, wyrażoną grupą sześciu wskaźników odniesiono do rezultatów uzyskanych z zastosowaniem ściernicą referencyjną. Ostateczny zbiór kryteriów, zastosowany do oceny efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 zawiera następujące wskaźniki z trzech grup:

- wydajnościowe: średnia wartość wydajności szlifowania  $Q_{wśr.}$ ;
- przebiegu szlifowania: średnia wartość przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_{śr.}$ , stopień zalepienia CPS;
- oraz syntetyczne: średnia wartość wskaźnika szlifowania  $G_{śr.}$ , średnia wartość czasu szlifowania  $t$ , stosunek średniej wartości ubytku materiału  $V_{wśr.}$  do średniej wartości teoretycznego ubytku materiału  $V_{wtśr.} - V_{wśr.}/V_{wtśr.}$ .

W tabeli 8.1 przedstawiono zestawienie wartości bezwzględnych oraz procentowego odniesienia wskaźników oceny efektywności wyznaczonych dla ściernic impregnowanych do wartości odpowiadających ściernicy referencyjnej. Wartości wskaźników oceny efektywności obliczono na podstawie wyników badań zamieszczonych w rozdziale 8. Wartości procentowe wskaźników odniesiono do wartości uzyskanych ściernicą referencyjną za wyjątkiem wskaźnika  $V_{wśr.}/V_{wtśr.}$ , gdzie wartość tego wskaźnika wynosi 100% w przypadku braku zużycia objętościowego ściernicy.

W celu zobrazowania wpływu impregnacji ściernicy grafitem i dwusiarczkiem molibdenu w zależności od masy danego impregnatu w ściernicy na wytypowane wskaźniki oceny

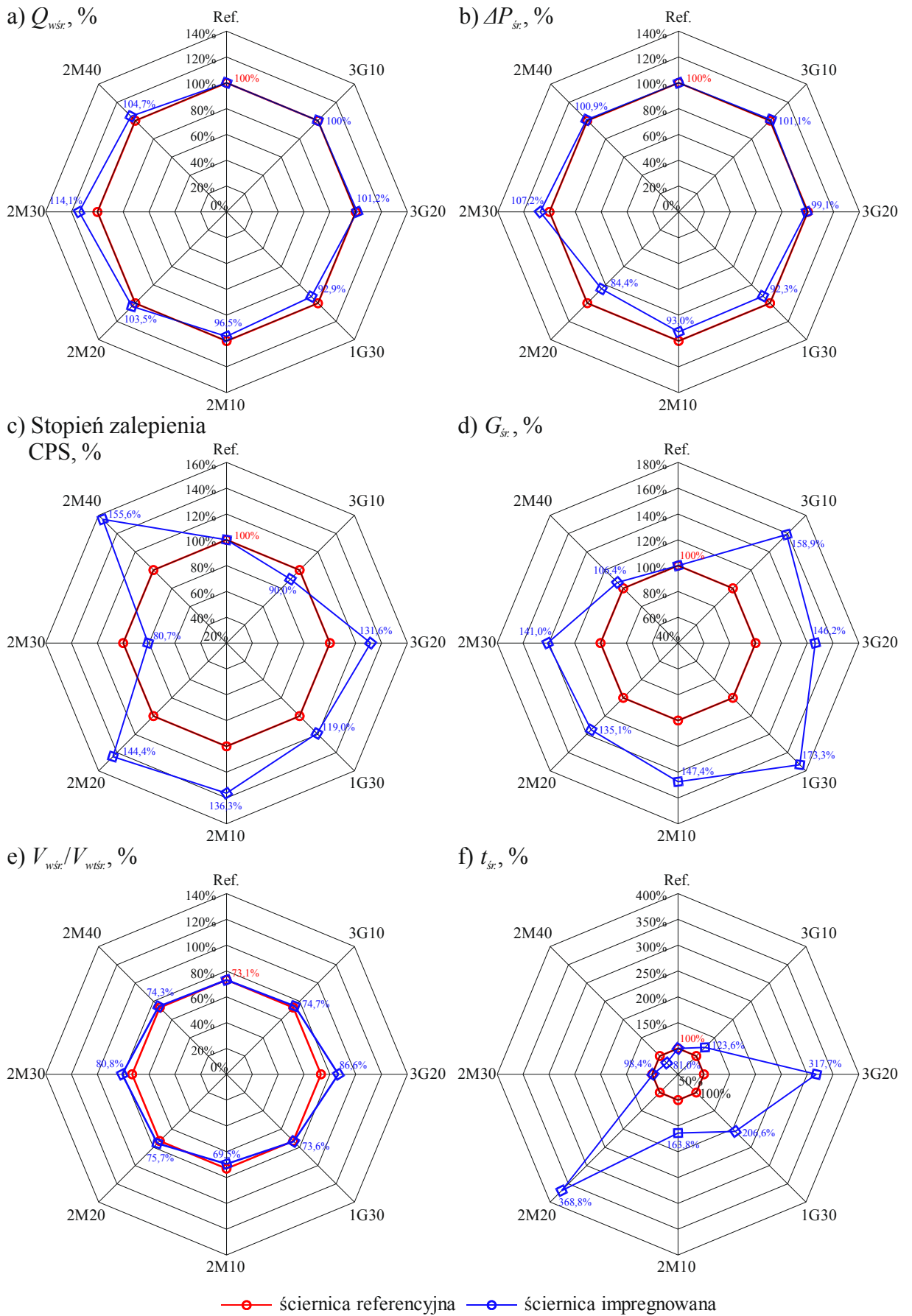
efektywności podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego otworów ze stopu Inconel® alloy 718, sporządzono wykresy radarowe wartości procentowych, które przedstawiono na rys. 8.33. Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 8.33 można wytypować taką ilość i rodzaj impregnatu, które w największym stopniu wpływają na dane kryterium oceny efektywności procesu szlifowania otworów.

Tab. 8.1. Wartości wskaźników oceny efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel® alloy 718 ściernicami impregnowanymi oraz ściernicą referencyjną

Oznaczenie techniczne ściernicy	Rodzaj impregnacji	Oznaczenie ściernicy	Wskaźniki oceny efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel® alloy 718						
			Wydajnościowe	Przebiegu szlifowania		Syntetyczne			
				$Q_{wśr.},$ mm <sup>3</sup> /s	$\Delta P_{śr.},$ W	Stopień zalepienia CPS, %	$G_{śr.},$ –	$V_{wśr.}/V_{wśr.},$ –	$t_{śr.},$ s
1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50	Brak (referencyjna)	Ref.	0,85	343,6	5,09	6,52	0,731	186	
			100%	100%	100%	100%	73,1%	100%	
	Grafit	3G10	0,85	347,5	4,58	10,36	0,747	230	
			100%	101,1%	90,0%	158,9%	74,7%	123,6%	
		3G20	0,86	340,6	6,70	9,53	0,866	591	
			101,2%	99,1%	131,6%	146,2%	86,6%	317,7%	
		1G30	0,79	317,1	6,06	11,30	0,736	385,3	
			92,9%	92,3%	119,0%	173,3%	73,6%	206,6%	
		MoS2	2M10	0,82	319,4	6,94	9,61	0,695	304,7
				96,5%	93,0%	136,3%	147,4%	69,5%	163,8%
	2M20		0,88	290	7,35	8,81	0,757	686	
			103,5%	84,4%	144,4%	135,1%	75,7%	368,8%	
	2M30		0,97	368,2	4,11	9,19	0,808	183	
			114,1%	107,2%	80,7%	141,0%	80,8%	98,4%	
	2M40		0,89	346,7	7,92	6,94	0,743	150,7	
			104,7%	100,9%	155,6%	106,4%	74,3%	81,0%	

Na podstawie zamieszczonych na rysunku 8.33 wykresów radarowych można zauważyć, że impregnacja, a dokładniej rodzaj impregnatu oraz jego zawartość w ściernicy, istotnie wpływa na efektywność procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel® alloy 718.





Rys. 8.33 Wartości procentowe wskaźników oceny efektywności dla ściernic impregnowanych względem ściernicy referencyjnej: a)  $Q_{wsr}$ ; b)  $\Delta P_{sr}$ ; c) stopień zalepienia CPS; d)  $G_{sr}$ ; e)  $V_{wsr}/V_{wsr?}$ ; f)  $t_{sr}$ .

Analizując wartości średniej wydajności szlifowania  $Q_{w\text{sr}}$ . (rys. 8.33a) dla ściernic, które poddano procesowi impregnacji, można zauważyć że wraz ze wzrostem masy impregnatu w ściernicy wydajność szlifowania  $Q_w$  zwiększa się by osiągnąć wartość największą, a później następuje jej zmniejszenie się. Na podstawie wykresu zamieszczonego na rys. 8.33a można stwierdzić, że impregnat w postaci dwusiarczku molibdenu oraz grafitu wpływa pozytywnie na zużycie wytrzymałościowe ściernicy, działając antyadhezyjnie ogranicza wykruszanie się ziaren ściernych co przyczynia się do wzrostu wydajności szlifowania.  $Q_w$ . Istnieje pewna optymalna objętość impregnatu, która powoduje maksimum wydajności szlifowania. Związane jest to ze stopniem zapełnienia WPM impregnatem, po zapełnieniu zbyt dużej liczby wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy, ściernica traci zdolność do odprowadzania produktów szlifowania poza strefę szlifowania, co przyczynia się do zmniejszenia wydajności szlifowania. Największą wydajność procesu szlifowania  $Q_w$  prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 można uzyskać, kiedy zastosuje się taką impregnację grafitem lub dwusiarczkiem molibdenu ściernicy ceramicznej, gdzie impregnat zapełnił ok. 10% wolnych przestrzeni ściernicy (rys. 5.6). Maksymalną średnią wydajność szlifowania uzyskano dla ściernicy impregnowanej grafitem o oznaczeniu 3G20, w objętości której znajdowało ok. 10% wag. grafitu, natomiast w przypadku szlifowania ściernicami impregnowanymi dwusiarczkiem molibdenu maksymalną średnią wydajność szlifowania uzyskano dla ściernicy impregnowanej MoS<sub>2</sub> o oznaczeniu 3M30, w objętości której znajdowało ok. 11% wag. MoS<sub>2</sub>.

Biorąc pod uwagę zmiany mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$ . (rys. 8.33b), najbardziej znaczące zmniejszenie tego wskaźnika (o 15,6%) jest możliwe w przypadku impregnacji MoS<sub>2</sub>, którego stopień zapełnienia WPM wynosi  $C_{zi} = 7,66\%$  (ściernica 2M20). Niewielki spadek wartości  $\Delta P_{sr}$ . (około 1-7%), w porównaniu ze ściernicą referencyjną, zanotowano dla ściernic: 3G20, 1G30, 2M10, natomiast wzrost wartości  $\Delta P_{sr}$ . o około 1-7% zanotowano dla pozostałych ściernic (3G10, 2M30, 2M40). Zmiany mocy szlifowania potwierdzają również, że grafit oraz dwusiarczki molibdenu posiadają właściwości smarne, zmniejszające tarcie w strefie obróbki.

Na podstawie rysunku 8.33c przedstawiającego zmiany stopnia zalepienia CPS impregnowanych na końcu ich okresu trwałości nie można określić jednoznacznego wpływu impregnowania CPS na stopień zalepienia (patrz podrozdział 8.2.3). Zmniejszenie wartości tego parametru o 10%, w porównaniu ze ściernicą referencyjną zanotowano dla ściernicy impregnowanej grafitem, w masie której znajdowało się 1,82% wag. grafitu ( $C_{zi} = 4,86\%$ ) oraz o 19,3% dla ściernicy impregnowanej dwusiarczkiem molibdenu, w masie której znajdowało się 6,88% wag. MoS<sub>2</sub> ( $C_{zi} = 11,76\%$ ). W przypadku szlifowania ściernicą 3G20 zanotowano zwiększenie wartości

stopnia zalepienia CPS o 31,6% przy jednoczesnym wydłużeniu okresu trwałości o 217,7%, w przypadku szlifowania ściernicą 2M20 zanotowano zwiększenie wartości tego wskaźnika o 44,4% przy jednoczesnym wydłużeniu okresu trwałości o 268,8%. Najmniej korzystne efekty przy ocenie tego wskaźnika uzyskano wykorzystując do procesu szlifowania ściernicę oznaczoną 2M40 (wzrost o 55,6%).

Znaczące różnice przemawiające na korzyść impregnacji można zauważyć przy ocenie zmian wartości wskaźnika szlifowania  $G$  podczas szlifowania otworów ze stopu niklu z użyciem ściernic impregnowanych oraz ściernicy referencyjnej – rys. 8.33d. W każdym przypadku stosowania ściernicy impregnowanej zanotowano zwiększenie wartości tego wskaźnika. Najwyższą wartość wskaźnika wszlifowania  $G$  uzyskano stosując ściernicę impregnowaną grafitem (o 73,3% wyższą w porównaniu do procesu szlifowania z wykorzystaniem ściernicy referencyjnej) o oznaczeniu 1G30, natomiast w przypadku stosowania dwusiarczku molibdenu jako impregnatu o 41%, gdy użyto ściernicy oznaczonej 2M30. Stopień zapełnienia WPM impregnatem w przypadku tych ściernic kształtował się na podobnym poziomie  $C_{zi} \approx 11\%$ .

Małe wartości wskaźnika zaproponowanego przez autora –  $V_{wsr.}/V_{wtśr.}$  (rys. 8.33e) są wynikiem tego, że stop Inconel® alloy 718 stawia wysokie wymagania, jeżeli chodzi o jego obróbkę. Konwencjonalne narzędzia ściernicze jak ściernica referencyjna użyta do badań w dużym stopniu ulegają zużyciu. Niemniej jednak z ekonomicznego punktu widzenia i tak są częściej wybierane przez użytkowników od ściernic wykonanych z materiałów supertwardych, gdzie zużycie ich jest dużo mniejsze. Modyfikacja ściernicy przez impregnację pozwala na poprawę efektywności procesu szlifowania stopów niklu wyrażonej tym parametrem w niemal (za wyjątkiem ściernicy 2M10) wszystkich przypadkach użytych w pracy ściernic impregnowanych. Największą wartość tego parametru zanotowano dla ściernicy 3G20. Zmiany wartości wskaźnika szlifowania  $G$  (rys. 8.33d) oraz wartości wskaźnika  $V_{wsr.}/V_{wtśr.}$  (rys. 8.33e) dla ściernic impregnowanych w stosunku do ściernicy referencyjnej potwierdzają właściwości antyadhezyjne użytych impregnatów. Zmniejszenie zużycia wytrzymałościowego ściernicy przyczynia się do wzrostu efektywności procesu szlifowania wyrażoną parametrami  $G$  oraz  $V_{wsr.}/V_{wtśr.}$ . Chociaż z drugiej strony obserwuje się pewną dysproporcję tego wskaźnika w porównaniu z efektywnością wyrażoną parametrami  $G$  i  $Q_w$ . Wydaje się że wszystkie trzy te parametry ( $V_{wsr.}/V_{wtśr.}$ ,  $G$  i  $Q_w$ ) powinny być ze sobą skorelowane, gdyż odnoszą się do objętości zeszlifowanego materiału  $V_w$ . Na podstawie zamieszczonych wykresów (rys. 8.33a,d,e) nie można zauważyć takiej analogii. Prawdopodobnie dzieje się to za sprawą tego, że podczas procesu szlifowania różnymi ściernicami mogło dojść do pojawienia błędów przypadkowych – np. odkształcania wrzeciona szlifierki.

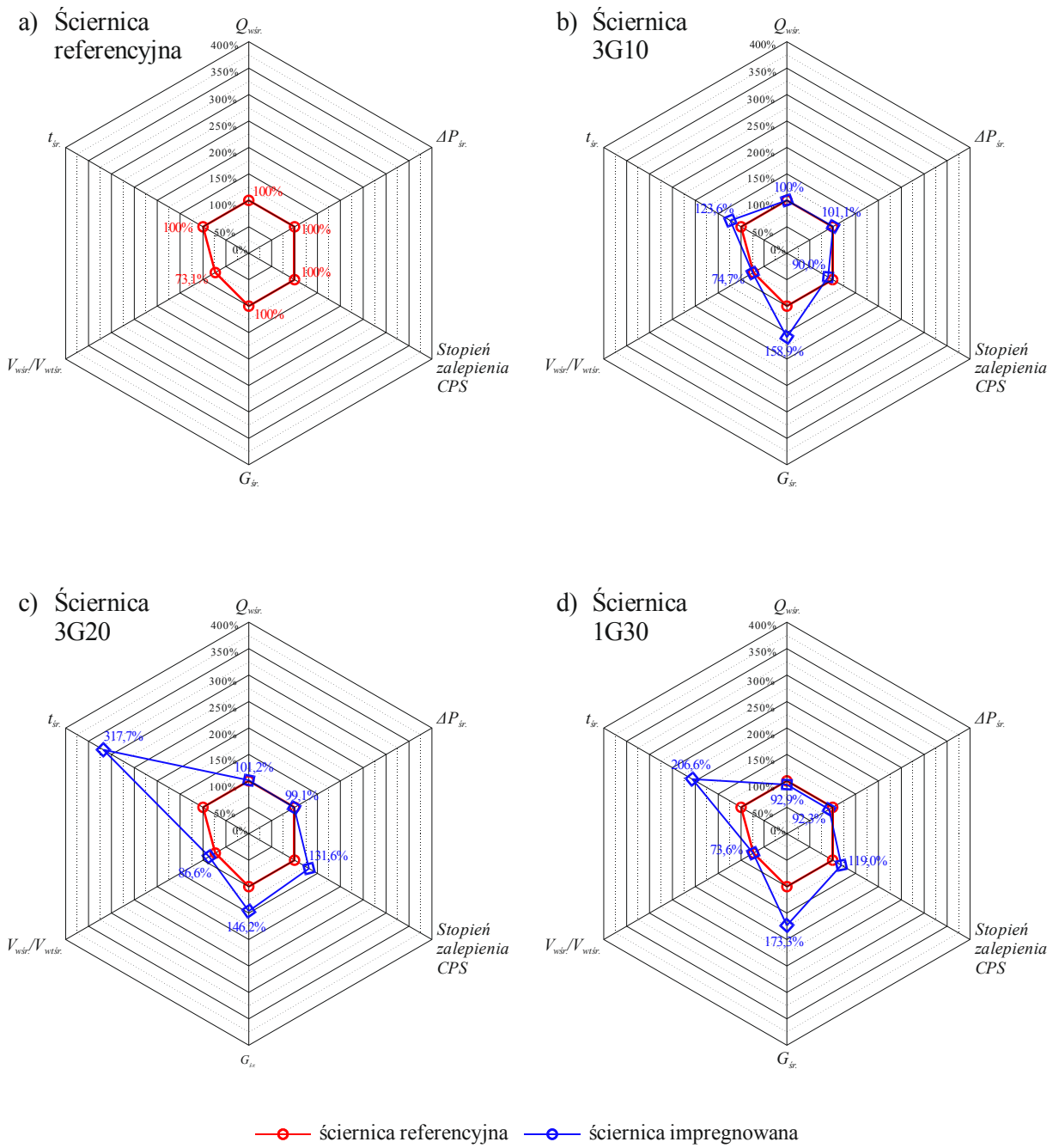
Kolejny wskaźnik efektywności procesu szlifowania otworów z użyciem ściernic impregnowanych, najbardziej istotny w badaniach, to średni czas szlifowania (okres trwałości)  $t_{sr}$  (rys. 8.33f). Wykazano wydłużenie okresu trwałości (o 217,7%) w przypadku ściernicy impregnowanej grafitem o oznaczeniu (3G20), gdzie w masie ściernicy znajdowało się 3,65% wag. grafitu ( $C_{zi} \approx 10\%$ ) oraz o 268,8% wydłużenie okresu trwałości w przypadku ściernicy impregnowanej  $MoS_2$  o oznaczeniu (2M20), gdzie w masie ściernicy znajdowało się 4,57% wag.  $MoS_2$  ( $C_{zi} \approx 7,5\%$ ) w porównaniu do efektów uzyskanych z użyciem ściernicy referencyjnej. Skrócenie okresu trwałości nastąpiło w przypadku ściernicy 2M30 o 1,6% w porównaniu do efektów uzyskanych z użyciem ściernicy referencyjnej oraz o 19% w przypadku ściernicy 2M40.

Na rysunkach 8.34 i 8.35 przedstawiono wykresy zmian procentowych wartości poszczególnych wskaźników oceny efektywności procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 wyznaczonych dla ośmiu rodzajów rozpatrywanych ściernic – ściernica referencyjna (rys. 8. 34a) oraz siedmiu rodzajów ściernic impregnowanych w odniesieniu do ściernicy referencyjnej (rys. 8.34b,c,d i 8.35a,b,c,d).

Dodatek w postaci 1,82% wag. grafitu w ściernicy (ściernica 3G10) pozwala na 58,9% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , 23,6% wydłużenie okresu trwałości ściernicy  $t$ , 10% zmniejszenie stopnia zalepienia CPS oraz niewielkie (1,6%) zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt.}$ . Nie wpływa na wydajność szlifowania  $Q_w$ , a moc szlifowania  $\Delta P$  nieznacznie zwiększa się (rys. 8.34b).

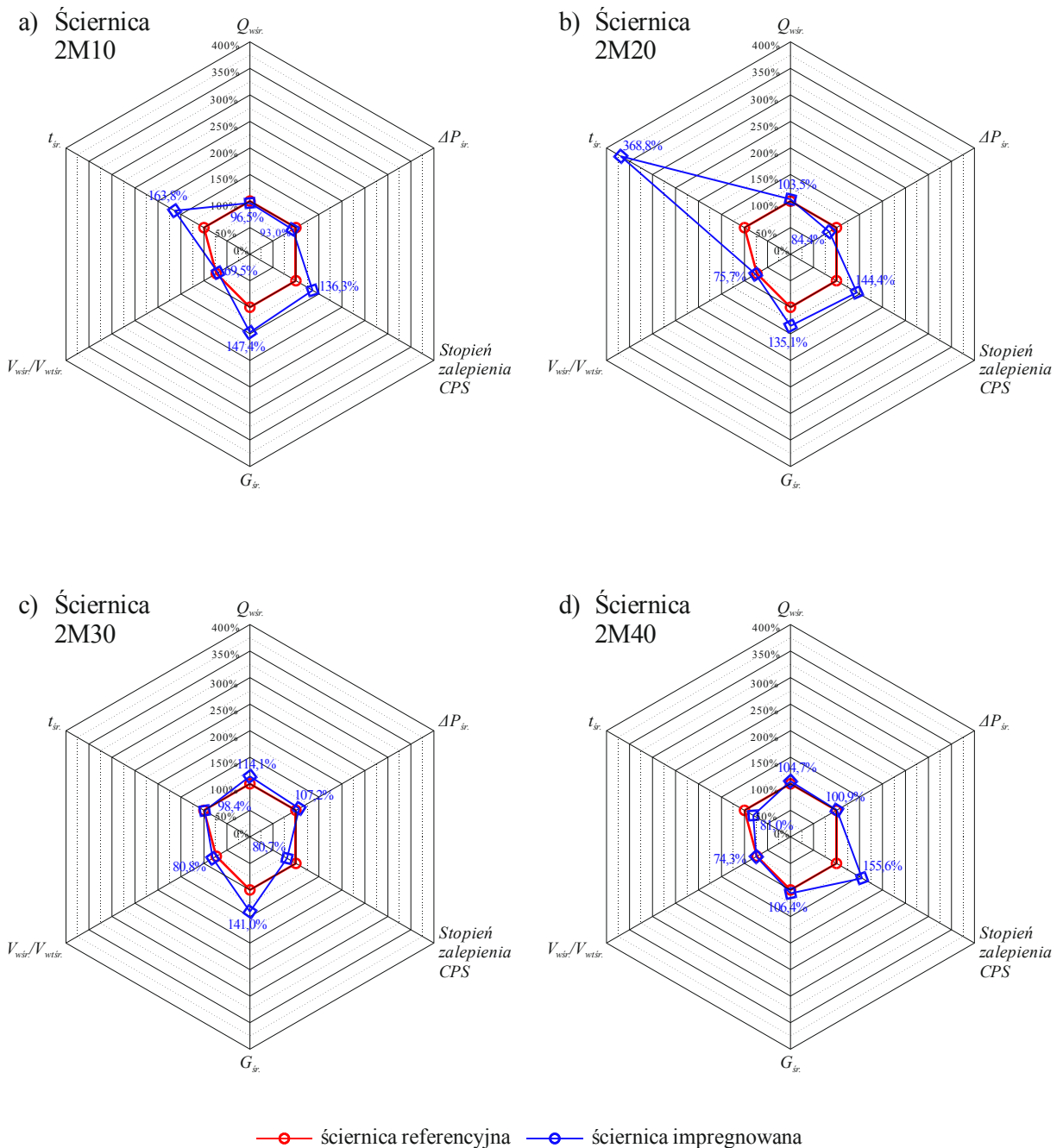
Dodatek w postaci 3,65% wag. grafitu w ściernicy (ściernica 3G20) pozwala na 46,2% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , wydłużenie okresu trwałości ściernicy  $t$  o 217,7%, 13,5% zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt.}$ , w niewielkim stopniu (o 0,9%) powoduje zmniejszenie mocy szlifowania  $\Delta P$  i (o 1,2%) zwiększenie wydajności szlifowania  $Q_w$ . Wpływa natomiast niekorzystnie na stopień zalepienia CPS (wzrost o 31,6%) – rys. 8.34c.

Dodatek w postaci 3,97% wag. grafitu w ściernicy (ściernica 1G30) pozwala na 73,3% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , wydłużenie okresu trwałości ściernicy  $t$  o 106,8%, 7,1% zwiększenie wydajności szlifowania  $Q_w$  oraz 7,7% zmniejszenie mocy szlifowania  $\Delta P$ . W niewielkim stopniu (o 0,5%) wpływa korzystnie na zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt.}$ . Nie obserwuje się wpływu na stopień zalepienia CPS (wzrost o 19%) – rys. 8.34d.



Rys. 8.34 Wskaźniki efektywności ściernic impregnowanych oraz ściernicy referencyjnej: a) ściernica referencyjna; b) ściernica 3G10; c) ściernica 3G20; d) ściernica 1G30





Rys. 8.35 Wskaźniki efektywności ściernic impregnowanych oraz ściernicy referencyjnej: a) ściernica 2M10; b) ściernica 2M20; c) ściernica 2M30; d) ściernica 2M40

Dodatek w postaci 2,33% wag.  $MoS_2$  w ściernicy (ściernica 2M10 – rys. 9.36a) pozwala na 47,4% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , wydłużenie okresu trwałości ściernicy  $t$  o 63,8% oraz 7% zmniejszenie mocy szlifowania  $\Delta P$ . Wpływa natomiast niekorzystnie na stopień zalepienia CPS (wzrost o 36,3%), 4,5% zmniejszenie się wydajności szlifowania  $Q_w$  oraz na 3,6% zmniejszenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt}$ .

Dodatek w postaci 4,57% wag.  $MoS_2$  w ściernicy (ściernica 2M20 – rys. 9.36b) pozwala na 35,1% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , wydłużenie okresu trwałości ściernicy

$t$  o 268,8%, 15,6% zmniejszenie mocy szlifowania  $\Delta P$ , 3,5% zwiększenie się wydajności szlifowania  $Q_w$  oraz 2,6% zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt}$ . Wpływa natomiast niekorzystnie na stopień zalepienia CPS (wzrost o 44,4%).

Dodatek w postaci 6,88% wag.  $\text{MoS}_2$  w ściernicy (ściernica 2M30 – rys. 9.36c) pozwala na 41% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , 19,3% zmniejszenie stopnia zalepienia CPS, 14,1% zwiększenie wydajności szlifowania  $Q_w$  oraz 7,7% zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt}$ . Wpływa natomiast niekorzystnie na moc szlifowania  $\Delta P$  (wzrost o 7,2%) oraz w niewielkim stopniu na skrócenie okresu trwałości ściernicy  $t$  (o 1,4%).

Najmniej korzystne efekty można uzyskać stosując ściernicę 2M40 – rys. 9.36d. W przypadku stosowania ściernicy oznaczonej 2M40 obserwuje się 6,4% zwiększenie wskaźnika szlifowania  $G$ , 4,7% zwiększenie wydajności szlifowania  $Q_w$  oraz 1,2% zwiększenie wartości wskaźnika  $V_w/V_{wt}$ . Jednocześnie obserwuje się niekorzystne zwiększenie się stopnia zalepienia CPS o 55,6%, znaczne skrócenie okresu trwałości ściernicy  $t$  (o 19%) oraz w niewielkim stopniu 0,9% zwiększenie mocy szlifowania  $\Delta P$ .

#### 8.4. Wnioski

Zastosowana wielokryterialna metodyka oceny efektywności procesu szlifowania prosto-liniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami impregnowanymi grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu o różnych ich zawartościach w ściernicy (tabela 4.6) bazowała na konfrontacji wyników otrzymanych dla ściernic impregnowanych z wynikami otrzymanymi dla ściernicy referencyjnej. Zaprezentowane w tabeli 8.1 i na rysunkach 8.33-9.35 wartości wskaźników efektywności pozwoliły na ocenę poszczególnych impregnatów (w zależności od ich rodzaju oraz ich zawartości w masie ściernicy), a także wskazanie ich mocnych i słabych stron. Do najważniejszych zalet ocenianych ściernic impregnowanych należy zaliczyć:

- wydłużenie okresu trwałości ściernicy  $t$  w zakresie od 23,6% do 268,8% (ściernice 3G10, 2M10, 1G30, 3G20, 2M20);
- najdłuższe okresy trwałości zanotowano dla ściernic impregnowanych grafitem i dwusiarczkiem molibdenu przy podobnym ich stopniu zapełnienia WPM impregnatem (ściernice 3G20 i 2M20);
- zwiększenie wartości wskaźnika szlifowania  $G$  w zakresie od 6,4% do 73,3% (ściernice 2M40, 2M20, 2M30, 3G20, 2M10, 3G10, 1G30);
- ograniczenie przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w zakresie od 0,9% do 15,6% (ściernice 3G20, 2M10, 1G30, 2M20);

- zwiększenie wydajności szlifowania  $Q_w$  w zakresie od 1,2% do 14,1% (ściernice 3G20, 2M20, 2M40, 2M30);
- zwiększenie wskaźnika objętości ubytku materiału do objętości teoretycznego ubytku materiału  $V_w/V_{wt}$  w zakresie od 0,5% do 13,5% (ściernica 1G30, 2M40, 3G10, 2M20, 2M30, 3G20).

Przedstawiona innowacyjna modyfikacja budowy ściernic polegająca na ich impregnacji grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu metodą zanurzeniową w postaci zawiesiny mikroproszku danego impregnatu w rozpuszczalniku organicznym z niewielką ilością środka zwiększającego przyczepność tego proszku do narzędzia ściernego daje możliwość dostosowania rodzaju impregnatu oraz jego zawartości w ściernicy przez operatora szlifierki do określonych potrzeb technologicznych w przypadku szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718.

## 9. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie uzyskanych wyników badań wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania stopów niklu można wyciągnąć następujące wnioski:

### 9.1. Wnioski dotyczące problemu głównego

1. Badania potwierdziły, że impregnacja substancjami antyadhezyjnymi może w znaczącym stopniu wpływać na efektywność procesu szlifowania stopów niklu, a w szczególności stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Nie ma więc podstaw do odrzucenia hipotezy 1.
2. Efektywność procesu szlifowania z udziałem ściernic impregnowanych zależy od rodzaju użytego impregnatu oraz od jego udziału masowego lub objętościowego w narzędziu ściernym. Nie ma więc podstaw do odrzucenia hipotezy 2.
3. Kryteriów oceny efektywności procesu szlifowania może być wiele, a ilość i rodzaj impregnatu w ściernicy mogą korzystnie wpływać tylko na niektóre z nich oraz nie mieć wpływu lub wpływać negatywnie na pozostałe, w związku z czym nie da się określić ilości i rodzaju impregnatu w ściernicy, który powodowały najlepszą efektywność procesu szlifowania. W niniejszej pracy została zastosowana wielokryterialna metodyka oceny efektywności procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami impregnowanymi grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu o różnych ich zawartościach w ściernicy. Daje to możliwość dostosowania rodzaju impregnatu oraz jego zawartości w ściernicy przez operatora szlifierki do określonych potrzeb technologicznych w przypadku szlifowania stopów niklu.

### 9.2. Wnioski dotyczące wpływu impregnacji ściernicy substancjami antyadhezyjnymi na intensywność powstawania zalepień na CPS podczas szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu (wnioski poznawcze)

1. Metoda impregnacji z odwirowaniem nadmiaru siarki pozwala w znaczący sposób ograniczyć intensywność zalepiania CPS wiórami materiału obrabianego podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego stopów niklu. Korzystny efekt ograniczenia intensywności powstawania zalepień CPS dotyczy szczególnie ograniczenia tworzenia najbardziej niekorzystnych technologicznie, rozległych zalepień przestrzeni międzyziarnowych.

2. Stopień zalepienia CPS w dużym stopniu zależy od czasu szlifowania a tym samym od wypłaszczenia wierzchołków aktywnych ziaren ściernych.
3. Podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 impregnacja grafitem lub dwusiarczkiem może wpływać na redukcję stopnia zalepienia jej CPS utrzymując okres trwałości na podobnym poziomie (ściernica 3G10 oraz 2M30) w odniesieniu do ściernicy nieimpregnowanej, gdy stopień zapełnienia impregnatem WPM w ściernicy wynosi odpowiednio  $C_{zi} = 4,86\%$  dla grafitu i  $C_{zi} = 10,02\%$  dla dwusiarczku molibdenu.
4. Gdy stopień zapełnienia WPM w ściernicy przez  $\text{MoS}_2$  jest większy od 16% należy oczekiwać zwiększenia stopnia zalepienia CPS (ściernica 2M40).
5. Najkorzystniejsze rezultaty przy stosowaniu ściernic impregnowanych można uzyskiwać stosując ściernice, w których stopień zapełnienia impregnatem WPM w ściernicy wynosi odpowiednio ok. 10% w przypadku stosowania grafitu oraz ok. 7,5% w przypadku stosowania dwusiarczku molibdenu. Takie zawartości impregnatów w ściernicy, co prawda spowodowały, że stopień zalepienia CPS w odniesieniu do referencji (ok. 5%) zwiększył się o ok. 30% dla ściernicy 2G20 i ok. 45% dla ściernicy 2M20, natomiast okres trwałości tych ściernic wydłużył się ponad 300%.
6. Ilość impregnatu w ściernicy ma istotny wpływ na przebieg i efekty procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. Im większa zawartość impregnatu w ściernicy, tym lepsza efektywność procesu szlifowania otworów wyrażona stopniem zalepienia ściernicy. Impregnat powoduje zmniejszenie zużycia objętościowego ściernicy  $V_s$ , powodując, że nie dochodzi do makrowykruszeń ziaren ściernych na CPS. Jednak po przekroczeniu pewnej zawartości impregnatu w objętości ściernicy (powyżej ok. 7% wag. w przypadku dwusiarczku molibdenu i ok. 4,5% wag. w przypadku grafitu), impregnat zapełnia tyle wolnych przestrzeni w ściernicy, że ściernica traci swoje właściwości skrawne. Wtedy obserwuje się odwrotne do zamierzonych skutki działa impregnatu, impregnat zamiast zwiększać efektywność procesu szlifowania, zmniejsza ją.



### **9.3. Wnioski dotyczące wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi na okres trwałości ściernicy podczas szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu (wnioski użytkownik)**

1. Wykazano ponadtrzykrotne wydłużenie okresu trwałości ściernicy po zastosowaniu ściernicy impregnowanej grafitem o oznaczeniu (3G20), gdzie w masie ściernicy znajdowało się 3,65% wag. grafitu, a stopień zapełnienia grafitem WPM  $C_{zi} = 10,02\%$ .
2. Wykazano ponad 3,5-krotne wydłużenie okresu trwałości ściernicy po zastosowaniu ściernicy impregnowanej dwusiarczkiem molibdenu o oznaczeniu (2M20), gdzie w masie ściernicy znajdowało się 4,57% wag.  $\text{MoS}_2$ , a stopień zapełnienia dwusiarczkiem molibdenu WPM  $C_{zi} = 7,66\%$ .
3. Skrócenia okresu trwałości ściernicy impregnowanej należy spodziewać się, gdy do procesu szlifowania stopów niklu zastosuje się ściernicę, w masie której będzie znajdowało się ponad 6,5% wag. dwusiarczku molibdenu lub gdy stopień zapełnienia dwusiarczkiem molibdenu WPM przekroczy wartość  $C_{zi} = 11\%$ .
4. Ściernice impregnowane według metody opisanej w niniejszej dysertacji z powodzeniem mogą być stosowane zarówno na obrabiarkach sterowanych numerycznie oraz konwencjonalnych szlifierkach.

### **9.4. Wnioski dotyczące metod impregnacji (wnioski wynikające z celu metodycznego pracy)**

1. W niniejszej pracy zastosowano 3 autorskie metody impregnacji narzędzi ściernych: metoda impregnacji siarką, polegająca na częściowym jej odwirowaniu z zaimpregnowanej ściernicy; metoda impregnacji narzędzi ściernych węglem amorficznym na drodze termicznego rozkładu związków organicznych oraz metoda impregnacji narzędzi ściernych proszkiem smarnym przez zanurzenie ściernicy w jego zawiesinie.
2. Rozwiązanie polegające na częściowym odwirowaniu płynnej siarki powoduje, że nie dochodzi do wypełnienia impregnatem wszystkich przestrzeni międzyziarnowych narzędzia, co z punktu samego procesu szlifowania jest korzystne. Jednak ta metoda przysparza pewne problemy związane z procesem odwirowania, koniecznością ciągłego kontrolowania temperatury podczas odwirowywania, ze względu na możliwość zapłonu samego impregnatu (siarka, parafina) przez co jej potencjał aplikacyjny w przemyśle jest znikomy.
3. Zaproponowana metoda impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi pozwala na kontrolowanie ilości wprowadzanego impregnatu w strukturę ściernicy, przez co użytkownik może dostosować jej ilość do określonego procesu obróbki.

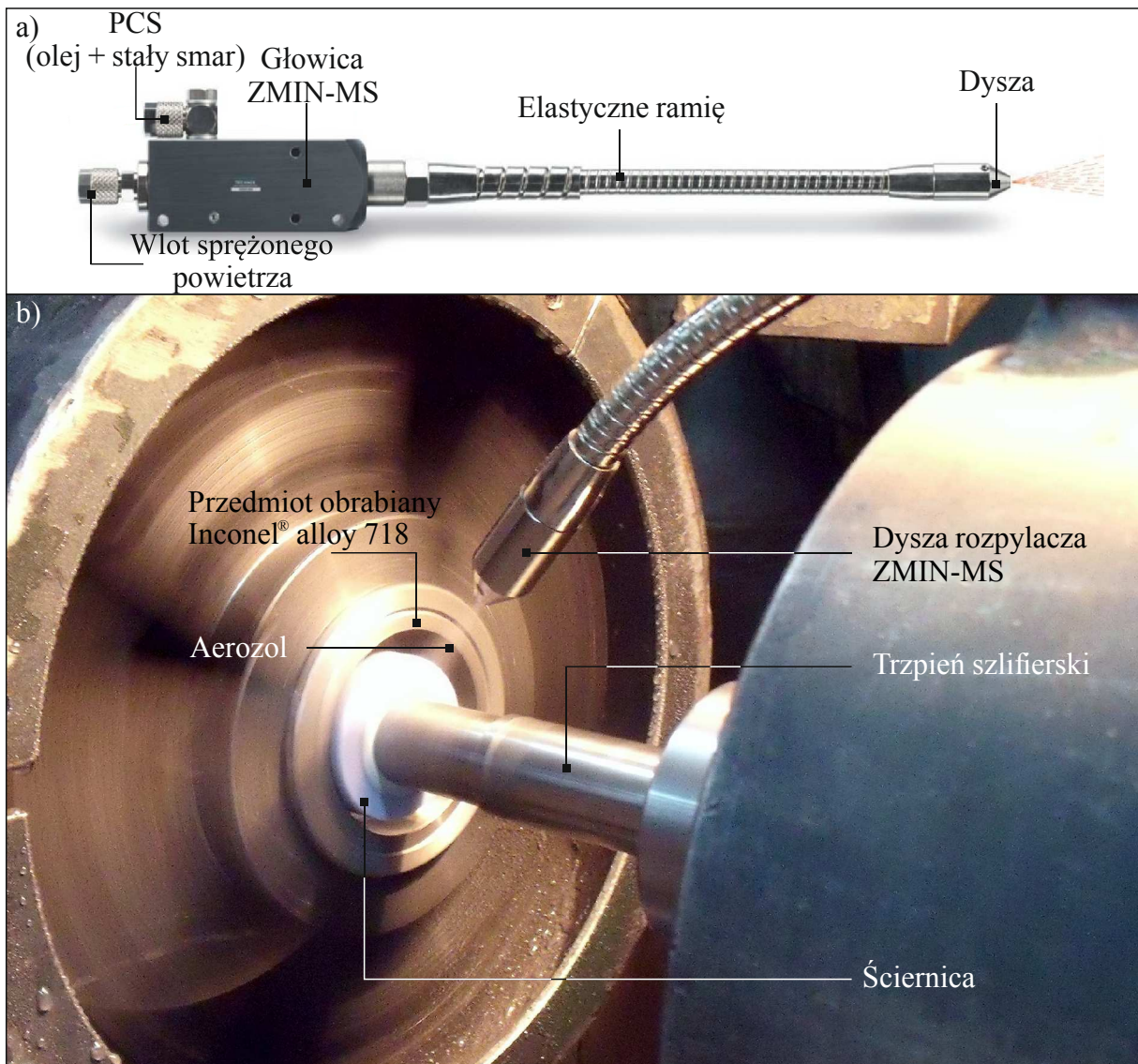
4. Wraz ze wzrostem twardości ściernicy udział spoiwa w ściernicy wzrasta a maleje objętość wolnych przestrzeni międzyziarnowych, co przyczynia się do spadku masy impregnatu na jednostkę masy narzędzia. Podczas impregnacji proszkami stałego smaru decydującą rolę odgrywa wielkość ziaren proszku.
5. Przy impregnacji ściernic ceramicznych proszkami antyadhezyjnymi o wielkości ziaren rzędu poniżej 1  $\mu\text{m}$  ilość wprowadzonego impregnatu nie zależy od wielkości ziaren ściernych.
6. W przypadku impregnacji proszkami smarnymi istnieje graniczna masa impregnatu (charakterystyczna dla każdej substancji) jaką można rozprowadzić w określonej masie fazy rozpraszającej. Po przekroczeniu tej granicy preparat nie jest zdolny do penetracji w całej objętości ściernicy, większa ilość impregnatu gromadzi się na powierzchni ściernicy tworząc „zacieki”.
7. W przypadku zastosowania metody impregnacji ściernic ceramicznych proszkiem z dwusiarczku molibdenu, przy niskich koncentracjach  $\text{MoS}_2$  w preparacie impregnującym twardość struktura oraz wielkość ziaren ściernych w ściernicy nie mają znaczenia na stopień wypełnienia jej wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Cechy te zaczynają być istotne powyżej koncentracji  $C_i = 0,5$ .
8. W procesie impregnacji grafitem cechy techniczne ściernicy jak twardość, struktura oraz wielkość ziaren ściernych mają duże znaczenie. Im mniej otwarta struktura ściernicy tym w większym stopniu można ją wypełnić impregnatem jednak masa impregnatu będzie mniejsza.

## 10. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Badania i analizy przeprowadzone w ramach niniejszej dysertacji nie wyczerpują zagadnienia wykorzystania impregnatów, a w szczególności stałych środków smarnych jako substancji antyadhezyjnych, korzystnie wpływających na efektywność procesu szlifowania niklu i nie tylko. Wśród dalszych kierunków badań można wymienić następujące grupy tematyczne:

- badania wpływu impregnacji ściernic substancjami antyadhezyjnymi na wydajność ubytkową  $Q_w$  procesu szlifowania;
- badania wpływu impregnacji ściernic substancjami antyadhezyjnymi na ich zużycie w trakcie procesu szlifowania;
- badania wpływu impregnacji ściernic substancjami antyadhezyjnymi na temperaturę  $T$  procesu szlifowania;
- zbadanie możliwości wykorzystania układów dyspersyjnych ze stałym środkiem smarnym jako środka chłodząco-smarującego w metodzie z ograniczonym wykorzystaniem płynu chłodząco smarującego do obróbki stopów niklu.

W przeprowadzonych badaniach stosowano ściernice, które zostały zaimpregnowane stałym środkiem smarnym w postaci grafitu i dwusiarczku molibdenu na długo przed przystąpieniem do procesu szlifowania. Inny sposób impregnacji narzędzi ściernych polega na impregnowaniu narzędzi ściernych bezpośrednio w trakcie procesu szlifowania przez dodanie impregnatów do płynów chłodząco smarujących, jak zostało to przedstawione w publikacjach [55,100-102,118,133-135]. Autorzy tych publikacji użyli nanoproszki smarne i tworząc z nich układy koloidalne wykorzystali je w metodzie MQL. Autorska propozycja polega na użyciu proszków smarnych o większej średnicy (mikroproszków), sporządzeniu z nich zawiesiny wodnej lub innej i podawaniu jej z ograniczonym wydatkiem (OW) przez dyszę ZMIN-MS rys.11.1.. W tym kierunku zostały już przeprowadzone badania wstępne, które dają bardzo obiecujące wyniki.



Rys. 10.1 System podawania mgły olejowej zawierającej cząsteczki stałego smaru do ściernicy małogabarytowej: a) elementy składowe standardowego zestawu MQL; b) widok głowicy MQL podczas pracy na stanowisku szlifierskim

## Spis rysunków

Rys. 1.1	Interakcje w procesie szlifowania [51] .....	10
Rys. 2.1	Masowy udział całkowitego wydobycia niklu [75] .....	12
Rys. 2.2	Wykres zmian właściwości mechanicznych w stopach niklu [75] .....	18
Rys. 2.3	Oddziaływania chemiczne podczas szlifowania (PCS – płyn chłodząco-smarujący) .....	19
Rys. 2.4	Obrazy mikroskopowe wykonane z użyciem optycznego mikroskopu metalograficznego (przekroje poprzeczne) próbek materiału obrabionego, a) próbka referencyjna, bez ciągłego kondycjonowania narzędzia; b) ciągle kondycjonowanie ściernicy, eksperyment CD4; c) ciągle kondycjonowanie ściernicy, eksperyment CD2 [80] .....	20
Rys. 2.5	Temperatury w strefie szlifowania podczas szlifowania pełzającego stopu Inconel® 738LC ( $\Delta T_f$ – temperatura plastycznego płynięcia; $T_s$ – temperatura w styku ściernicy z materiałem obrabianym; $T_{max}$ – temperatura maksymalna na powierzchni materiału obrabianego [80] .....	21
Rys. 2.6	Obrazy mikroskopowe SEM dla powierzchni obrobionej: a) bez przypaleń, temperatura 95°C; b) przypalenia w kolorze beżowym, temperatura 990°C; c) przypalenia w kolorze brązowofioletowym, temperatura 1440°C; d) przypalenia w kolorze hiacyntowym, temperatura 1600°C (widoczne mikropęknięcia) [128] .....	22
Rys. 2.7	Obraz mikroskopowy zalepienia (Inconel® alloy 718) na powierzchni czynnej ściernicy z ziarnami cBN [117] .....	24
Rys. 2.8	Model fizyczny tworzenia się zalepienia na powierzchni czynnej ściernicy: a) ostre ziarna ściernic, zaraz po obciążeniu ściernicy; b) powstanie warstwy adhezyjnej na wierzchołku ziarna ściernego; c) rozrost warstwy adhezyjnej na wierzchołkach ziaren ściernych; d) tworzenie powłoki deformacji plastycznych; e) wykruszanie ziarna ściernego [126] .....	26
Rys. 2.9	Porównanie wartości parametru chropowatości $Ra$ i wartości wskaźnika szlifowania $G$ podczas szlifowania współbieżnego powierzchni płaskich wykonanych ze stopu CMSX4 dla różnych typów ściernic przy ustalonych parametrach obróbkowych: a) $a_p = 0,05$ mm; b) $a_p = 2$ mm [56] .....	27
Rys. 2.10	Wykres zmian wartości współczynnika kosztów $\psi$ dla ściernic z ziarnami cBN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [56] .....	28
Rys. 2.11	Przetwarzanie obrazu czynnej powierzchni ściernicy: a) obraz zarejestrowany mikroskopem optycznym; b) obraz przetworzony z użyciem programu MATLAB® [2] .....	29
Rys. 2.12	Przykładowe kształty przedmiotów obrabianych po obróbce ściernic stopów Inconel® alloy 718 i Udimet® alloy 720: a-c) gniazdo do montażu łopatek turbin; d-f) zabierak pojedynczej łopatki turbiny [7] .....	31
Rys. 2.13	Profilowe ściernice galwaniczne z ziarnami cBN i ziarnami diamentowymi [7] .....	32
Rys. 2.14	Obrazy mikroskopowe CPS wykonanej z ziaren cBN o numerze B120: a) CPS nowej ściernicy przed przystąpieniem do procesu szlifowania; b) CPS po procesie szlifowania ( $V_w' \approx 9.300$ mm <sup>3</sup> /mm) [39] .....	32
Rys. 2.15	Wpływ głębokości szlifowania $a_p$ i prędkości ściernicy $v_s$ na wartości siły szlifowania (a); na wartości parametru $Ra$ materiału obrobionego (b); na temperaturę w strefie szlifowania (c) w procesie szlifowania stopu GH2132 [132] .....	33
Rys. 2.16	Zmiana wartości wskaźnika szlifowania $G$ w funkcji składowej stycznej siły szlifowania na ziarno ściernic $F_{t/g}$ [27] .....	33
Rys. 2.17	Wartości energii szlifowania na jednostkę objętości materiału $e_c$ w funkcji wartości wskaźnika szlifowania $G$ w procesie szlifowania ściernicami z ziarnami Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> z wykorzystaniem dwóch rodzajów spoiw (litery na rysunku odnoszą się do twardości ściernicy) [27] .....	34
Rys. 2.18	Widok CPS trzech ściernic z różnym udziałem ziaren cBN: a) ściernica T0; b) ściernica T1; c) ściernica T2 [22] .....	35
Rys. 2.19	Obrazy mikroskopowe SEM powierzchni przedmiotu obrobionego po procesie szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z prędkością ściernicy $v_s = 25$ m/s i prędkością przedmiotu obrabianego $v_w = 10$ m/min, przy zmiennych wartościach głębokości szlifowania $a_p$ : a-c) $a_p = 0,005$ mm; d-f) $a_p = 0,025$ mm; g-h) $a_p = 0,04$ mm [131] .....	37



Rys. 2.20	Ściernica segmentowa z ziarnami cBN i spoiwem galwanicznym: a) widok od czoła ściernicy; b) ziarna z cBN rozłożone na czynnej powierzchni ściernicy [30].....	39
Rys. 2.21	Obrazy mikroskopowe CPS: a) po wyważeniu ściernicy; b) po kondycjonowaniu ściernicy [136] ...	39
Rys. 2.22	Obrazy mikroskopowe powierzchni przedmiotu obrabianego ściernicą modyfikowaną o strukturze otwartej (a) i referencyjną (b) oraz obrazy mikroskopowe CPS modyfikowanej (c) i referencyjnej (d) [136].....	40
Rys. 2.23	Widok ogólny garnkowej ściernicy segmentowej ze spoiwem ceramicznym i z ziarnami cBN, w korpusie której ukształtowano otwory do chłodzenia odśrodkowego: a) widok od czoła ściernicy; b) widok ściernicy przymocowanej do trzpienia wrzeciona szlifierskiego [54] .....	42
Rys. 2.24	Wartości parametru chropowatości $R_a$ podczas szlifowania stopu Inconel® alloy 718 z użyciem konwencjonalnej metody zalewowej oraz metody MQL przy różnych głębokościach $a_e$ szlifowania [28].....	44
Rys. 2.25	Ocena efektywności procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 w zależności od rodzaju nanoproszków zawieszonych w PCS: a i b) porównanie składowych $F_t$ i $F_n$ właściwej siły szlifowania; c) porównanie wartości współczynników tarcia $\mu$ ; d) porównanie wartości energii właściwej szlifowania $e_c$ ; e) porównanie wartości wskaźników szlifowania $G$ ; f) porównanie chropowatości materiału obrabianego wyrażone parametrami $R_a$ i $R_{sm}$ [118] .....	46
Rys. 2.26	Ocena efektywności procesu szlifowania powierzchni płaskich wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 w zależności od proporcji nanoproszków zawieszonych w PCS: a) porównanie składowych $F_t$ i $F_n$ siły szlifowania; b) porównanie wartości parametru $R_a$ materiału obrabianego; c) porównanie współczynników tarcia $\mu$ ; d) porównanie wartości parametru $R_{sm}$ materiału obrabianego $R_{sm}$ [134] .....	47
Rys. 4.1	Stanowisko badawcze: 1 – szlifierka uniwersalna RUP 28P, 2 – elektro-wrzeciono firmy Fischer EV-70/70-2WB, 3 – układ dozowania mieszanki powietrznoolejowej IG 54-2, 4 – przetwornica częstotliwości Sieb&Meyer 21.60, 5 – agregat chłodzący IK-V07, 6 – komputer z programem sterującym, 7 – przemiennik częstotliwości SJ100 sterujący silnikiem prądu stałego wrzeciona przedmiotu, 8 – wrzeciono przedmiotu obrabianego.....	64
Rys. 4.2	System do pomiaru profili chropowatości oraz mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrabianych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) widok ogólny stanowiska; b) obszar pomiarowy; c) widok mierzonej powierzchni .....	65
Rys. 4.3	Konfokalny laserowy mikroskop skaningowy LEXT OLS4000 firmy Olympus [113].....	66
Rys. 4.4	Cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) widok ogólny stanowiska do obserwacji mikroskopowych; b) widok ogólny mikroskopu.....	67
Rys. 4.5	Elektronowy mikroskop skaningowy JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. wyposażony w moduł energo-dystrybucyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments: a) widok ogólny mikroskopu; b-c) widok ściernicy przeznaczonej do badań ustawionej na stoliku pomiarowym .....	69
Rys. 4.6	System do bezstykowego pomiaru mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. [68-70] .....	70
Rys. 4.7	Bezstykowy czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence stosowany do pomiarów topografii powierzchni narzędzi ściernych metodą triangulacji: a) widok ogólny czujnika, b) widok ściernicy przygotowanej do przeprowadzenia pomiaru [133] .....	71
Rys. 4.8	Charakterystyka metody oceny zdolności skrawnej ściernicy: a) przykładowe parametry wyjściowe do badania zdolności skrawnej ściernicy o stopniowanej średnicy zewnętrznej; b) poglądowe uwidocznienie wyników geometrycznych wykonania zabiegu szlifowania wgłębnego, w wyniku którego powstaje materiał badawczy [68,71] .....	72
Rys. 4.9	Szczegółowy schemat badań rozpoznawczych w postaci czarnej skrzynki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 .....	74

Rys. 4.10	Szczegółowy schemat badań właściwych w postaci czarnej skrzynki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 .....	78
Rys. 4.11	Schemat zastosowanej metodyki przeprowadzania analizy topograficznej w układzie 3D .....	79
Rys. 5.1	Schemat stanowiska do nasiarczania ściernic: a) główne elementy stanowiska; b) ustawienie w fazie nasiarczania; c) ustawienie w fazie odwirowywania .....	85
Rys. 5.2	Obrazy mikroskopowe SEM CPS z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane o rozmiarze 46: a) przed nasiarczaniem; po nasiarciu bez odwirowania b) i z odwirowaniem c), z zaznaczonymi obszarami, na których widoczna jest siarka .....	86
Rys. 5.3	Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy przed szlifowaniem, po impregnowaniu węglem amorficznym .....	87
Rys. 5.4	Krzywa kumulacyjna uziarnienia grafitu – wykres w skali logarytmicznej przedstawiający udział poszczególnych frakcji uziarnienia grafitu w pyłe grafitowym .....	89
Rys. 5.5	Wykres zależności średniej procentowej zawartości impregnatu w masie ściernicy $C_{pi}$ od koncentracji impregnatu w preparacie $C_i$ : a) dla $\text{MoS}_2$ , b) dla grafitu .....	90
Rys. 5.6	Zmiana stopnia zapelnienia wolnych przestrzeni międzyziarnowych w ściernicy przez impregnat $C_{zi}$ w zależności od koncentracji impregnatu w preparacie $C_i$ : a) dla dwusiarczku molibdenu, b) dla grafitu .....	91
Rys. 5.7	Makrofotografie CPS o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50 przed i po procesie impregnacji $\text{MoS}_2$ przy różnych koncentracjach impregnatu w mieszaninie impregnującej: a) nieimpregnowana (referencyjna); b) $C_i = 0,157$ ; c) $C_i = 0,315$ ; d) $C_i = 0,472$ ; e) $C_i = 0,630$ ; f) $C_i = 0,709$ .....	92
Rys. 5.8	Makrofotografie CPS o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10 9A5X60L10VE01PI-50 przed i po procesie impregnacji grafitem przy różnych koncentracjach impregnatu w mieszaninie impregnującej: a) nieimpregnowana (referencyjna); b) $C_i = 0,157$ ; c) $C_i = 0,315$ ; d) $C_i = 0,394$ ; e) $C_i = 0,472$ .....	93
Rys. 6.1	Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrobionej stopu Inconel® alloy 600 (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego po obróbce .....	97
Rys. 6.2	Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrobionej stopu Incoloy® alloy 800HT® (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego po obróbce .....	99
Rys. 6.3	Porównanie mikrotopografii oraz wybranych wartości parametrów struktury geometrycznej CPS (a, b, c) i powierzchni obrobionej stali 100Cr6 (d, e, f) po procesie szlifowania: a) mikrotopografia CPS referencyjnej (SR); b) mikrotopografia CPS impregnowanej siarką (SIS); c) porównanie wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS; d) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą referencyjną SR; e) mikrotopografia powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą impregnowaną siarką SIS; f) porównanie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego po obróbce .....	101
Rys. 6.4	Parametry struktury geometrycznej CPS referencyjnej oraz impregnowanej siarką, dla wszystkich analizowanych materiałów (wartości uśrednione z 3 stref szlifowania): a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni $Sa$ ; b) wysokość chropowatości rdzenia $Sk$ ; c) współczynnik rozwinięcia powierzchni $Sdr$ .....	102

Rys. 6.5	Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej SR i ściernicy impregnowanej siarką SIS w strefie III po szlifowaniu wgłębnym stopu Inconel® alloy 600, Incoloy® alloy 800HT® i stali 100Cr6: a) ściernica referencyjna; b) ściernica impregnowana siarką .....	103
Rys. 6.6	Parametry struktury geometrycznej powierzchni materiału obrobionego po obróbce z wykorzystaniem ściernicy referencyjnej I impregnowanej siarką dla wszystkich badanych materiałów (wartości uśrednione z 3 stref szlifowania): a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni $Sa$ ; b) całkowita wysokość nierówności powierzchni; c) wysokość chropowatości rdzenia $Sk$ ; d) współczynnik rozwinięcia powierzchni $Sdr$ .....	104
Rys. 7.1	Wyniki badań doświadczalnych wpływu prędkości posuwu osiowego stołu $v_{fa}$ i czasu szlifowania $t$ na uśrednione (dla 3 prób) wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażone parametrem $Ra$ podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 .....	108
Rys. 7.2	Wykres modelu matematycznego opisującego badany proces wraz z parametrami oceniającymi dopasowanie danej funkcji do wyników badań rozpoznawczych: model matematyczny dla zmian chropowatości powierzchni wyrażony parametrem $Ra$ .....	109
Rys. 7.3	Wyniki badań doświadczalnych wpływu prędkości posuwu osiowego stołu $v_{fa}$ i czasu szlifowania $t$ na uśrednione (dla 3 prób) wartości przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 .....	110
Rys. 7.4	Wykres modelu matematycznego opisującego badany proces wraz z parametrami oceniającymi dopasowanie danej funkcji do wyników badań rozpoznawczych: model matematyczny dla zmian przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ .....	111
Rys. 8.1	Wyznaczenie okresu trwałości dla ściernicy referencyjnej oraz ściernicy impregnowanej MoS <sub>2</sub> : a) wykres zależności średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu $Ra$ od czasu szlifowania $t$ ; b) wykres zależności przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ .....	112
Rys. 8.2	Obrazy mikroskopowe CPS wykonane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation (powiększenie: ok. 100×): a) obraz mikroskopowy CPS referencyjnej; b) obraz mikroskopowy CPS impregnowanej dwusiarczkiem molibdenu .....	113
Rys. 8.3	Termogramy prezentujące zmianę temperatury ściernicy w czasie $t$ (w przedziale czasowym co 0,5 min), zarejestrowane w trakcie procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 ściernicą impregnowaną (a) oraz ściernicą referencyjną (b) .....	115
Rys. 8.4	Wykres zmian temperatury szlifowania w obszarze roboczym podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego stopu Inconel® alloy 718 badanymi ściernicami .....	116
Rys. 8.5	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy referencyjnej: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	118
Rys. 8.6	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 3G10: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	119
Rys. 8.7	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 z użyciem ściernicy 3G20: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie	

	tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	120
Rys. 8.8	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy 1G30: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	121
Rys. 8.9	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy 2M10: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	122
Rys. 8.10	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy 2M20: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	123
Rys. 8.11	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy 2M30: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	124
Rys. 8.12	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania otworów wykonanych ze stopu Inconel <sup>®</sup> alloy 718 z użyciem ściernicy 2M40: okres trwałości ściernicy dla trzech kolejnych prób wyrażony zależnością przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ od czasu szlifowania $t$ (a-c); d) średni przyrost mocy szlifowania $\Delta P_{sr}$ oraz średni czas szlifowania $t_{sr}$ ; e) średni rzeczywisty ubytek materiału $V_{wsr}$ oraz średni teoretyczny ubytek materiału $V_{wtsr}$ (przy założeniu, że ściernica się nie tępi); f) średnia wartość wskaźnika szlifowania $G_{sr}$ oraz średnia wydajność ubytkową szlifowania $Q_{wsr}$ .....	125
Rys. 8.13	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica referencyjna po procesie szlifowania ( $t = 189$ s); b) ściernica referencyjna przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	128
Rys. 8.14	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (3G10) po procesie szlifowania ( $t = 170$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (3G10) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	130
Rys. 8.15	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (3G20) po procesie szlifowania ( $t = 580$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (3G20) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	131
Rys. 8.16	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation:	

	a) ściernica impregnowana grafitem (1G30) po procesie szlifowania ( $t = 316$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (1G30) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	132
Rys. 8.17	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekanego zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M10) po procesie szlifowania ( $t = 386$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M10) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	134
Rys. 8.18	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekanego zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M20) po procesie szlifowania ( $t = 606$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M20) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	135
Rys. 8.19	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekanego zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M30) po procesie szlifowania ( $t = 233$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M30) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	136
Rys. 8.20	Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekanego zmieszane w proporcji 1:1 o numerze ziarna 60 ze spoiwem ceramicznym, wykonane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation: a) ściernica impregnowana grafitem (2M40) po procesie szlifowania ( $t = 177$ s); b) ściernica impregnowana grafitem (2M40) przed procesem szlifowania, po kondycjonowaniu .....	137
Rys. 8.21	Analiza czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp .....	138
Rys. 8.22	Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M10: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp .....	139
Rys. 8.23	Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M20: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp .....	139
Rys. 8.24	Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M30: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp .....	140
Rys. 8.25	Analiza czynnej powierzchni ściernicy 2M40: a) mikrotopografia powierzchni; b) obraz mikroskopowy CPS zarejestrowany z użyciem mikroskopu LEXT OLS4000; c) analiza wysp CPS; d) parametry SGP oraz parametry analizy wysp .....	140
Rys. 8.26	Wartości parametrów SGP ocenianych czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni $Sa$ ; b) całkowita wysokość nierówności powierzchni $St$ ; c) współczynnik rozwinięcia powierzchni $Sdr$ ; d) wskaźnik nośności $Sbi$ ; e) wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń $Sci$ ; f) wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia $Svi$ ; g) udział nośny na zadanej wysokości $STp$ ( $1 \mu\text{m}$ poniżej najwyższego punktu powierzchni); h) średnia objętość materiału $Smmr$ ; i) średnia objętość pustek $Smvr$ .....	141
Rys. 8.27	Wartości parametrów SGP ocenianych czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) liczba wysp; b) udział powierzchniowy wysp; c) średnia powierzchnia wyspy; d) średnia wysokość wyspy .....	143
Rys. 8.28	Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy referencyjnej; b) obraz CPS referencyjnej z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica referencyjna); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 3G10; e) obraz CPS 3G10 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 3G10); .....	144
Rys. 8.29	Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 3G20; b) obraz CPS 3G20	

	z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 3G20); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 1G30; e) obraz CPS 1G30 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 1G30); .....	145
Rys. 8.30	Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M10; b) obraz CPS 2M10 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M10); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M20; e) obraz CPS 2M20 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M20); .....	146
Rys. 8.31	Komputerowa analiza obrazu czynnej powierzchni ściernicy poszlifowaniu stopu Inconel® alloy 718: a) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M30; b) obraz CPS 2M30 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M30); d) obraz mikroskopowy czynnej powierzchni ściernicy 2M40; e) obraz CPS 2M40 z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); f) wyizolowane z obrazu obiekty poddawane analizie (ściernica 2M40); .....	147
Rys. 8.32	Stopień zalepienia dla wszystkich ocenianych ściernic na końcu okresu trwałości (w momencie przekroczenia granicznej wartości przyrostu mocy szlifowania $\Delta G_{gr.}$ ) w funkcji czasu szlifowania $t$ .....	148
Rys. 8.33	Wartości procentowe wskaźników oceny efektywności dla ściernic impregnowanych względem ściernicy referencyjnej: a) $Q_{wsr.}$ ; b) $\Delta P_{sr.}$ ; c) stopień zalepienia CPS; d) $G_{sr.}$ ; e) $V_{wsr.}/V_{wsr.}$ ; f) $t_{sr.}$ .....	151
Rys. 8.34	Wskaźniki efektywności ściernic impregnowanych oraz ściernicy referencyjnej: a) ściernica referencyjna; b) ściernica 3G10; c) ściernica 3G20; d) ściernica 1G30 .....	155
Rys. 8.35	Wskaźniki efektywności ściernic impregnowanych oraz ściernicy referencyjnej: a) ściernica 2M10; b) ściernica 2M20; c) ściernica 2M30; d) ściernica 2M40.....	156
Rys. 10.1	System podawania mgły olejowej zawierającej cząsteczki stałego smaru do ściernicy małowabarytowej: a) elementy składowe standardowego zestawu MQL; b) widok głowicy MQL podczas pracy na stanowisku szlifierskim .....	164



## Spis tablic

Tab. 2.1.	Podstawowe zastosowania superstopów [31] .....	13
Tab. 2.2.	Rola dodatku stopowego w superstopach niklu [4] .....	14
Tab. 2.3.	Stopy niklu pogrupowane według obrabialności [75] .....	16
Tab. 2.4.	Zmiana zabarwienia powierzchni materiału obrobionego w funkcji temperatury w strefie szlifowania [128] .....	22
Tab. 2.5.	Parametry charakteryzujące efektywność procesu szlifowania [35,53] .....	54
Tab. 4.1.	Charakterystyka materiałów poddanych obróbce [17] .....	62
Tab. 4.2.	Charakterystyka stopu Inconel® alloy 718 [17] .....	63
Tab. 4.3.	Specyfikacja urządzenia Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Corporation .....	68
Tab. 4.4.	Charakterystyka warunków szlifowania wglębnego .....	72
Tab. 4.5.	Schemat realizacji planu badawczego kompletnego .....	77
Tab. 4.6.	Charakterystyka warunków szlifowania .....	82
Tab. 4.7.	Charakterystyki ściernic użytych w badaniach .....	83
Tab. 5.1.	Zmiany masy ściernicy wywołane procesem impregnacji siarką .....	86
Tab. 5.2.	Zmiany masy ściernicy wywołane procesem impregnacji węglem amorficznym .....	88
Tab. 5.3.	Ocena charakteru aplikacyjnego opracowanych metod impregnacji ściernic ceramicznych substancjami antyadhezyjnymi .....	95
Tab. 7.1.	Wyniki badań średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu $Ra$ powierzchni przedmiotów obrobionych oraz przyrostu mocy szlifowania $\Delta P$ podczas szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel® alloy 718 .....	106
Tab. 7.2.	Uporządkowana macierz wyników eksperymentu, test $Q$ -Dixona .....	107
Tab. 8.1.	Wartości wskaźników oceny efektywności procesu szlifowania otworów ze stopu Inconel® alloy 718 ściernicami impregnowanymi oraz ściernicą referencyjną .....	150

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Abdullah, A. Farhadi, and A. Pak, "Ultrasonic-assisted dry creep-feed up-grinding of superalloy Inconel738LC," *Experimental Mechanics*, vol. 52, no. 7, pp. 843-853, 2012.
- [2] H. Adibi, S. M. Rezaei, and A. D. Sarhan, "Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 473-485, 2013.
- [3] H. Adibi, S. M. Rezaei, and A. A. D. Sarhan, "Investigation on using high-pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded areas," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, pp. 2233-2240, 2014.
- [4] D.C. Agarwal, "Nickel and Nickel Alloys," in *The Handbook of Advanced Materials. Enabling New Designs*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004, ch. 7, pp. 217-270.
- [5] M. Alberts, K. Kalaitzidou, and S. Melkote, "An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 49, pp. 966-670, 2009.
- [6] D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, J. M. Burrows, M. A. Paul, and B. J. Davies, "Hybrid High Speed Machining (HSM): System design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 145-148, 2001.
- [7] 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. 355-338, 2007.
- [8] V. P. Astakhov, *Tribology of Metal Cutting*, First Edition ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2006.
- [9] K. V. Averkov, A. Yu. Popov, and D. S. Rechenko, "High speed diamond-abrasive grinding wheel, has diamond-abrasive polishing segment provided with front and rear fairings and fixed on casing, where inner side of casing is formed with annular groove that is filled with balancing liquid," RU101666-U1, 2010.
- [10] A. S. S. Balan, L. Vijayaraghavan, and R. Krishnamurthy, "Minimum quantity lubricated grinding of Inconel 751 alloy," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 4, pp. 430-435, 2013.
- [11] L. M. Barczak and A. D. L. Batako, "Application of minimum quantity lubrication in grinding," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 4, pp. 406-411, 2012.
- [12] L. M. Barczak, A. D. L. Batako, and M. N. Morgan, "A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 50, pp. 977-985, 2010.
- [13] A. D. L. Batako and V. Tsiakoumis, "An experimental investigation into resonance dry grinding of hardened steel and nickel alloys with element of MQL," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, pp. 27-41, 2015.
- [14] D. Bhaduri et al., "A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 359-364, 2012.

- [15] D. Bhaduri et al., "Ultrasonic assisted creep feed grinding of Inconel 718," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 615-620, 2013.
- [16] B. Bhushan, *Modern Tribology Handbook*, Volume One, Principles of Tribology ed. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2001.
- [17] Bibus Metals. (2016, Dec.) Bibus Metals. [Online].  
[http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data\\_sheets/Inconel\\_718\\_karta\\_katalogowa.pdf](http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data_sheets/Inconel_718_karta_katalogowa.pdf)
- [18] Bibus Metals. (2016, Dec.) www.bibusmetals.com.pl. [Online].  
[http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data\\_sheets/Inconel\\_600\\_karta\\_katalogowa.pdf](http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data_sheets/Inconel_600_karta_katalogowa.pdf)
- [19] Bibus Metals. (2016, Dec.) www.bibusmetals.com.pl. [Online].  
[http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data\\_sheets/Incoloy\\_800h\\_ht\\_karta\\_katalogowa.pdf](http://www.bibusmetals.pl/fileadmin/editors/countries/bmpl/Data_sheets/Incoloy_800h_ht_karta_katalogowa.pdf)
- [20] A. Bielawa, "Przegląd kryteriów i mierników efektywnościowych przedsiębiorstw nastawionych projakościowo," *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania*, vol. 1, no. 34, pp. 24-36, 2013.
- [21] F. P. Bowden and D. Tabor, "The area of contact between stationary and moving surfaces," *Proceedings of the Royal Society*, vol. A169, pp. 391-413, 1939.
- [22] A. Caggiano and R. Teti, "cBN Grinding Performance Improvement in Aircraft Engine Components Manufacture," *Procedia CIRP - 2nd CIRP Global Web Conference*, vol. 9, pp. 109-114, 2013.
- [23] F. C. Campbell, *Element of Metallurgy and Engineering Alloys*.: ASM International, 2008.
- [24] G. V. Chirkov, "Characteristics of the grinding wheel impregnation process," *Russian Engineering Research*, vol. 27, pp. 387-389, 2007.
- [25] D. T. Curtis, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, and C. Sage, "Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 173-176, 2009.
- [26] E. J. Da Silva, E. C. Bianchi, and P. R. Da Aguiar, "A review of grinding fluids – performances and management," *Revista De Ciencia & Tecnologia*, vol. 8, no. 18, pp. 67-77, 2001.
- [27] E. J. Da Silva and J. F. G. Oliveira, "Evaluation technique for determining wheel performance in the grinding of aerospace materials," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, no. 1, pp. 25-34, 2011.
- [28] R. B. Da Silva et al., "Grinding of Inconel 718 alloy with air-oil-water mixture delivered by MQL technique," in *2016 STLE Annual Meeting & Exhibition*, Las Vegas, Nevada, USA, 2016.
- [29] M. Dhananchezian and M. Pradeep Kumar, "Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts," *Cryogenics*, vol. 51, pp. 34-40, 2011.

- [30] W. Ding, J. Xu, Z. Chen, H. Su, and Y. Fu, "Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed cBN Abrasive Wheels," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 23, pp. 501-510, 2010.
- [31] L. A. Dobrzański, *Metalowe materiały inżynierskie*. Gliwice - Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
- [32] M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Superalloys: a technical guide*. United States of America: ASM International, Materials Park, 2002.
- [33] T. P. Gallagher, "Process for impregnating porous bodies with a solid fusible substance," No. 3341355, Sep. 12., 1967.
- [34] A. Gołąbczak, *Metody kształtowania właściwości użytkowych ściernic*. Łódź: Politechnika Łódzka, Monografia, 2004.
- [35] A. Gołąbczak, M. Gołąbczak, R. Świącik, B. Stańczyk, and D. Kaczmarek, "Dwuparametrowa ocena zdolności krawnych ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym," *Mechanik*, no. 8/9, pp. 112-116, 2015.
- [36] Grier Abrasive Co., Inc. (USA). (2015, Jan.) Grier Product Catalog, General Abrasive Information, Treatment, pp. 47. [Online].  
[www.grierabrasive.com/sites/default/files/downloads/Grier\\_MasterCatalog\\_2014.pdf](http://www.grierabrasive.com/sites/default/files/downloads/Grier_MasterCatalog_2014.pdf)
- [37] S. Grzesiak, "Metody ilościowe w badaniu efektywności ekonomicznej przedsiębiorstw," *Rozprawy i Studia*, no. 266, p. 330, 1997.
- [38] S. Grzesiak and A. Wyrozębska, "Wykorzystanie metody DEA (Analizy Obwiedni Danych) do oceny efektywności technicznej oddziałów szpitalnych," *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania*, vol. 2, no. 36, pp. 253-272, 2014.
- [39] C. Guo, Z. Shi, H. Attia, and D. McIntosh, "Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated cBN Wheels," *Annals of the CIRP*, vol. 1, pp. 343-346, 2007.
- [40] M. L. Hartmann, "Abrasive Article," No. 1615271, Jan. 25., 1927.
- [41] D. Herman, "Glass and glass-ceramic binder obtained from waste material for binding alundum abrasive grains into grinding wheels," *Ceramic International*, vol. 24, pp. 515-520, 1998.
- [42] D. Herman and J. Markul, "Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 511-522, 2004.
- [43] D. Herman, J. Plichta, and T. Karpiński, "Effect of glasscrystalline and amorphous binder application to abrasive tools made of microcrystalline alumina grains type SG," *Wear*, vol. 209, pp. 213-218, 1997.
- [44] S. Huddedar, P. Chitalkar, A. Chavan, and R. S. Pawade, "Effect of cooling environment on grinding performance of nickel based superalloy Inconel 718," *Journal of Applied Sciences*, vol. 12, no. 10, pp. 947-954, 2012.
- [45] R. A. Irani, R. J. Bauer, and A. Warkentin, "A review of cutting fluid application in the grinding process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 1696-1705, 2005.

- [46] L. P. Jackson, "Filled abrasive article and filler for the same," No. 23333480, Nov. 02., 1943.
- [47] H. H. Jones, "Composition for impregnating grinding wheels," No. 2240302, Apr. 29., 1941.
- [48] Joto Abrasives Pvt. Ltd. (RFG). (2011, Nov.) Products, Making System, Treatment. [Online]. [www.jotoabrasives.com/Products/Html%20Pages/ProductsMfrsTreatment.htm](http://www.jotoabrasives.com/Products/Html%20Pages/ProductsMfrsTreatment.htm)
- [49] P. Kalita, A. P. Malshe, S. A. Kumar, V. G. Yoganath, and T. Gurumurthy, "Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 14, pp. 160-166, 2012.
- [50] N. Kawagoishi, Q. Chen, E. Kondo, 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, Apr. 1999.
- [51] A. I. Kovalev et al., "Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials," *Vacuum*, vol. 84, pp. 184-187, 2010.
- [52] Z. Kowalski, "Wybrane problemy definiowania i oceny efektywności gospodarowania w rolnictwie," *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, no. 22, p. 22, 1992.
- [53] J. Krzos, "Wskaźniki zdolności skrawnej ściernicy," *Obróbka Metalu - Kwartalnik Naukowo-Techniczny*, no. 2, pp. 48-53, 2013.
- [54] X. Li, "Application of Self-inhaling Internal Cooling Wheel in Vertical Surface Grinding," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 27, no. 1, 2014.
- [55] Benkai Li et al., "Grinding Temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 4, pp. 1084-1095, 2016.
- [56] Q. Liu, X. Chen, and N. Gindy, "Assesment of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 940-951, 2007.
- [57] Q. Liu, X. Chen, and N. Gindy, "Evaluation of superalloy heavy-duty grinding based on multivariate tests," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, pp. 1421-1430, 2007.
- [58] 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.
- [59] Q. Liu, X. Chen, and N. Gindy, "Robust design and optimisation of aerospace alloy grinding by different abrasive wheels," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, pp. 1125-1135, 2008.
- [60] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, United States of America: Industrial Press Inc., 2008.

- [61] T. Mang and W. Dresel, *Lubricants and Lubrication*, Second, Completely Revised and Extended Edition ed., T. Mang and W. Dresel, Eds. Weinheim, Federal Republic of Germany: Wiley-VCH, 2007.
- [62] I. D. Marinescu, M. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, and I. Inasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [63] I.D. Marinescu, W. B. Rowe, B. Dimitrov, and I. Inasaki, *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Norwich: William Andrew, Inc., 2004.
- [64] E. N. Maslov, *Teorija slifovanija materialov*. Moskva: Masinostroenie, 1974.
- [65] R. Mindek, J. Webster, and C. Cui, "Minimizing thermal damage of aerospace components using coolant nozzle and coolant system optimization," in *Proceedings of the ASME Conference on Turbo power*, New York, 1994, pp. 97-104.
- [66] Monarchinstrument. Table of Emissivity. [Online].  
<http://www.monarchinstrument.com/pdfs/TableofEmissivity.pdf>
- [67] K. Nadolny, *Podstawy budowy i eksploatacji modyfikowanych ściernic z ziarnami mikrokryształicznego korundu spiekanego w procesach szlifowania otworów*. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia 277, 2012.
- [68] K. Nadolny, "The method of comparative assessment of the grinding wheel cutting ability in plunge grinding process," *Central European Journal of Engineering*, vol. 2, pp. 399-409, 2012.
- [69] K. Nadolny, W. Kapłonek, and Cz. Łukianowicz, "Laserowe pomiary topografii powierzchni narzędzi ściernych z zastosowaniem systemu pomiarowego CLI 2000," in *Materiały Konferencyjne IX Szkoły-Konferencji "Metrologia Wspomagana Komputerowo"*, Warszawa, 2011, p. 88.
- [70] K. Nadolny, W. Kapłonek, Cz. Łukianowicz, and J. Valicek, "Laserowe pomiary topografii powierzchni narzędzi ściernych z zastosowaniem systemu pomiarowego CLI 2000," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 9a, pp. 24-27, 2011.
- [71] K. Nadolny and J. Plichta, "Sposób badania zdolności skrawnej ściernicy," PL 219952 B1, 2011.
- [72] 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.
- [73] M. Neslušán, "Grinding of Ni-based alloys with grinding wheels of high porosity," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 4, no. 1-2, pp. 29-36, 2009.
- [74] M. Neslušán and A. Czán, "Machining of Titanium and Nickel Alloys," *EDIS Žilina*, 2001.
- [75] Nickel Development Institute. (2015, marzec) <http://www.nickelinstitute.org/>. [Online].  
<http://www.nickelinstitute.org/>
- [76] Cz. Nizankowski, *Właściwości skrawne ściernic z korundu spiekanego*. Kraków: Politechnika Krakowska, Monografia 205, 1996.
- [77] NORTON Abrasives - Saint Gobain (USA). (2015, Jan.) 2015 Norton Industrial Catalog, Dressing Sticks, Blank Stock FastTrack Made-to-Order Microabrasive Superfinishing Sticks, Treatment type, pp. 298. [Online].



[www.nortonindustrial.com/uploadedFiles/SGindnortonabrasives/Documents/Catalog\\_PDFs/Catalog-NortonIndustrial-7362-2015-Bookmarked.pdf](http://www.nortonindustrial.com/uploadedFiles/SGindnortonabrasives/Documents/Catalog_PDFs/Catalog-NortonIndustrial-7362-2015-Bookmarked.pdf)

- [78] K. Oczóś and J. Porzycki, *Szlifowanie. Podstawy i technika*, E. Kłós and H. Kunicki, Eds. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
- [79] D. J. Oliveira et al., "Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 2559-2568, 2012.
- [80] W. Osterle 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, May 1997.
- [81] W. Osterle, 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, 1999.
- [82] E. C. Pasour, "A further note on the measurement of efficiency and economies of farm size," *Journal Agriculture Economic*, no. 32, p. 135, 1981.
- [83] R. B. Pavan, G. B. Kiran, R. R. Sirikant, and A. V. Gopal, "Investigations on grinding of Inconel 718 using newly developed graphene nanoplatelets impregnated grinding wheels," in *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014)*, Assam, 2014, pp. 381-1 - 381-6.
- [84] R. B. Pavan, G. B. Kiran, R. R. Srikant, and A. V. Gopal, "Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-11, 2015.
- [85] J. Plichta, "Charakterystyka materiałów trudno skrawalnych," in *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*, J. Plichta et al., Eds. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012, pp. 18-32.
- [86] J. Plichta, *Podstawy szlifowania ściernicami z mikrokrystalicznym ziarnem regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym*. Koszalin: Politechnika Koszalińska, 1996.
- [87] A. Yu. Popov, D. S. Rechenko, K. V. Averkov, and V. A. Sergeev, "High-Speed Grinding of ZhS6-K High-Temperature Nickel Alloy," *Russian Engineering Research*, vol. 32, no. 5-6, pp. 511–512, 2012.
- [88] S. Prabhu and B. K. Vinayagam, "Nano surface generation of Inconel 600 material by grinding process using single wall carbon nanotubes," *International Journal of Nanotechnology and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 7-16, 2009.
- [89] Praca zbiorowa, *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*, J. Plichta et al., Eds. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012.
- [90] W. B. Rowe, *Principles of Modern Grinding Technology*, First Edition ed. Burlington, Massachusetts, USA: William Andrew, 2009.
- [91] W. B. Rowe, S. Ebbrell, and M. N. Morgan, "Process Requirements for Cost-Effective Precision Grinding," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 255-258, 2004.

- [92] S. Shaji and V Radhakrishnan, "An investigation on solid lubricant moulded grinding wheels," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 965-972, 2003a.
- [93] S. Shaji and V. Radhakrishnan, "An investigation on surface grinding using graphite as lubricant," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 733-740, 2002.
- [94] S. Shaji and V. Radhakrishnan, "Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 141, pp. 51-59, 2003.
- [95] S. Shaji and V. Radhakrishnan, "Application of solid lubricants in grinding: investigations on graphite sandwiched grinding wheels," *Machining Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 137-155, 2003b.
- [96] S. Shaji and V. Radhakrishnan, "Investigations on the application of solid lubricants in grinding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B- Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 10, pp. 1325-1343, 2002a.
- [97] B. Shen, A. P. Malshe, P. Kalita, and A. J. Shih, "Performance of novel MoS<sub>2</sub> nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding," *Transactions of NAMRI/SME*, vol. 36, pp. 357-364, 2008.
- [98] C. Shi, X. Li, and Z. Chen, "Design and experimental study of a micro-groove grinding wheel with spray cooling effect," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 27, no. 2, pp. 407-412, 2014.
- [99] W. Sienicki, M. Wojtewicz, and K. Nadolny, "Sposób modyfikacji ceramicznych narzędzi ściernych przez impregnację," Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 395441, June 27, 2011.
- [100] M. K. Sinha, R. Madarkar, S. Ghosh, and V. Rao, "Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication," *Journal of Cleaner Production*, vol. 141, pp. 1359-1375, 2017.
- [101] M. K. Sinha, D. Setti, S. Ghosh, and P. Venkateswara Rao, "An alternate method for optimisation of minimum quantity lubrication parameters in surface grinding," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 18, no. 5/6, pp. 586-605, 2016b.
- [102] M. K. Sinha, D. Setti, S. Ghosh, and P. Venkateswara Rao, "An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718," vol. 21, pp. 124-133, 2016.
- [103] Society of Manufacturing Engineers, *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, J. D. Silliman, Ed. Dearborn, Michigan, United States of America: Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [104] Special Metals. (2016, Dec.) <http://www.specialmetals.com/>. [Online].  
<http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/incoloy/incoloy-alloys-800h-800ht.pdf>
- [105] Special Metals. (2016, Dec.) [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com). [Online].  
<http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-600.pdf>
- [106] J. A. F. Stoner, R. E. Freeman, and D. R. Gilbert, *Kierowanie*. Warszawa: PWE, 1997.
- [107] Sunarto and Y. Ichida, "Creep feed profile grinding of Ni-based superalloys with ultrafine-polycrystalline cBN abrasive grits," *Precision Engineering*, vol. 25, pp. 274-283, Jan. 2001.

- [108] Super Abrasives (Republic of India). (2015, Jan.) Range of Products, Super Finishing Stones & Wheels, Range & Selection Code, Treatment. [Online]. [www.superabrasivesindia.com/grinding.htm](http://www.superabrasivesindia.com/grinding.htm)
- [109] P. Sutowski, "Proces szlifowania powierzchni płaskich przedmiotów z materiałów trudno skrawalnych," in *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*, J. Plichta et al., Eds. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012, pp. 178-205.
- [110] Systec Segments (USA). (2015, Jan.) FAQ, Table of Contents, Sulfur Treatments. [Online]. [www.systecsegments.com/faq3.htm#15](http://www.systecsegments.com/faq3.htm#15). Sulfur Treatments (5-23-06)
- [111] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, and M. Rabiey, "Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 42, pp. 883-891, 2009.
- [112] T. Tawakoli et al., "An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 924-932, 2009.
- [113] R. Tomkowski, *Analiza cech stereometrycznych powierzchni po obróbce ściernej z zastosowaniem nowych parametrów oceny*. Koszalin: Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, 2013.
- [114] R. Tomkowski et al., "Metody filtracji cyfrowej w ocenie topografii powierzchni," *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, vol. 59, no. 6, pp. 507-510, 2013.
- [115] Ming-Yi Tsai and Shi-Xing Jian, "Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 56, pp. 94-101, 2012.
- [116] P. L. Tso, "An investigation of chip types in grinding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 53, pp. 521-532, 1995b.
- [117] P. L. Tso, "Study on the grinding of Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 55, pp. 421-426, 1995a.
- [118] Yaogang Wang et al., "Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids," *Tribology International*, vol. 99, pp. 198-210, 2016.
- [119] Z. Y. Wang and K. P. Rajurkar, "Cryogenic machining of hard-to-cut materials," *Wear*, vol. 239, pp. 168-175, 2000.
- [120] Z. Y. Wang et al., "Hybrid machining of Inconel 718," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 1391-1396, 2003.
- [121] J. Webster, "Selection of coolant type and application technique in grinding," *Supergrind 1995 - Grinding and Polishing with Superabrasives*, pp. 205-220, Nov. 1995.
- [122] J. A. Webster, C. Cui, R. B. Mindek Jr., and Dr. R. Lindsay, "Grinding fluid application system design," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 333-338, 1995.
- [123] K. Woźniak, *Chemiczne podstawy obróbki ściernej. Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 17*. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 1984.
- [124] K. Woźniak, "Chemiczne zużywanie się ziarna ściernego," *Mechanik*, no. 4, pp. 179-181, 1977.

- [125] R. Wójcik, "Nowe media i sposoby ich doprowadzania do strefy szlifowania," *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, vol. 28, no. 4, pp. 137-145, 2008.
- [126] 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, Jan. 2002.
- [127] X. Xu, Y. Yu, and H. Huang, "Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys," *Wear*, vol. 255, pp. 1421-1426, 2003.
- [128] X. P. Xu, Y. Q. Yu, and H.J. Xu, "Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, pp. 359-363, 2002.
- [129] C. F. Yao et al., "Research on surface integrity of grinding Inconel 718," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 1019-1030, 2013.
- [130] 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, June 1984.
- [131] Q. Zeng, G. Liu, L. Liu, and 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*, p. in press, 2014.
- [132] 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.
- [133] Yanbin Zhang et al., "Experimental study on effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 232, pp. 100-115, 2016.
- [134] Yanbin Zhang, Changhe Li, Dongzhou Jia, Dongkun Zhang, and Xiaowei Zhang, "Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS<sub>2</sub>/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 99, pp. 19-33, 2015.
- [135] Xianpeng Zhang et al., "Performances of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC hybrid nanofluids in minimum-quantity lubrication grinding," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, pp. 3427-3441, 2016.
- [136] C. Zhenzhen, X. Jiuhua, D. Wenfeng, and M. Changyu, "Grinding performance evaluation of porous composite-bonded CBN wheels for Inconel 718," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 27, no. 4, pp. 1022-1029, 2014.

## Załączniki

### Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(1984) NEYe [130]	Szlifowanie powierzchni płaskich CFG	Nimonic® alloy 108	Biały Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	230×25WA60225VMC	$v_s = 27,1$ m/s $v_w = 0,0154$ m/min $a_e = 3,6; 1,5; 1,0$ mm PCS: woda i olej, dysza trzewikowa, $p_{PCS} = 0,83$ bar
(1995) Tso [116,117]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718 (40 HRC)	99A SiC cBN	V	1-140×13×50,8/WA46K8V; 1-140×13×50,8/GC60J8V; 1-140×13×50,8/cBN100P76V;	$v_s = 10,8-22$ m/s $v_w = 2-5$ m/min $a_e = 0,005-0,015$ mm $Q_{PCS} = 9,4$ dm <sup>3</sup> /min
(1997; 1999) Osterle [80,81]	Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym i ciągłym ociąganiem	Inconel® alloy 738LC	89A Biały Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cBN	V	89A609H11AV237P25 D <sub>s</sub> = 342-386 mm; T = 14 mm;	$v_s = 20; 30$ m/s $v_w = 0,12$ m/min $a_e = 0,5; 1,0$ mm $v_{frd} = 2-16$ mm/s ( $v_{frd}$ – prędkość posuwu promieniowego obciążacza)
(1999) Kawagoishi [50]	Szlifowanie zewnętrznych powierzchni walcowych	Inconel® alloy 718	cBN	V	cB170N75VN5GP, rozmiar ziarna: 170#; koncentracja: 75	$v_s = 31$ m/s $v_w = 3$ m/min PCS: emulsja
(2001) Ichida [107]	Szlifowanie powierzchni płaskich, jednoprzęściowe CFG	Nimonic® alloy 80A (34 HRC)	PcBN McBN	M	cBN 80/100N100M wielkość ziarna 80/100US#; koncentracja: 100 D <sub>s</sub> = 125 mm; T = 1 mm	$v_s = 43,33$ m/s $v_w = 0,9-1,8$ mm/min $a_e = 2$ mm $Q_{PCS} = 2.8$ dm <sup>3</sup> /min PCS: 2% emulsja

Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2001) Aspinwall [6]	Elektro-erozyjne (EDG) szlifowanie wgłębne powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718 (~43 HRC) Udimet® alloy720 (~43 HRC)	cBN Diament	G	małogabarytowe ściernice trzpieniowe galwaniczne z ziarnami cBN i D D <sub>s</sub> = 15 mm; T = 25 mm	v <sub>s</sub> = 35-45 m/s a <sub>e</sub> = 0,005-0,015 mm Q <sub>PCS</sub> = 20 dm <sup>3</sup> /min PCS: 5% emulsja p <sub>PCS</sub> = 30 MPa (dwie dysze)
(2003) Xu [127]	Szlifowanie powierzchni płaskich	K417 (45 HRC)	99A SiC cBN (segmentowa)	V (99A) B cBN	WA100KV D <sub>s</sub> = 300 mm, T = 20 mm; B91 D <sub>s</sub> = 250 mm, T = 10 mm,	v <sub>w</sub> = 12 m/min a <sub>p</sub> = 0,25-1,75 mm dla cBN a <sub>p</sub> = 5-30 mm dla Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> PCS: 3% emulsja
(2004) Rowe [91]	Szlifowanie powierzchni walcowych	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SG™ cBN	V	Ściernice ze spoiwem ceramicznym o podwyższonej porowatości (40%): A46 K5V i A80 J6V (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ); A60 J8V (SG); B91 i B151 (cBN);	Dla ściernic z ziarnami Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : v <sub>s</sub> = 33 m/s v <sub>w</sub> = 20 m/min Q <sub>w</sub> ' = 2 mm <sup>3</sup> /mm·s Dla ściernic z ziarnami cBN: v <sub>s</sub> = 45-120 m/s v <sub>w</sub> = 20-26 m/min Q <sub>w</sub> ' = 2 mm <sup>3</sup> /mm·s
(2006) Liu [58]	Szlifowanie powierzchni płaskich	CSMX4 (54 HRC)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	HP NGV XA60F13VRP	v <sub>s</sub> = 40 i 50 m/s v <sub>w</sub> = 0,5-1,0 m/min a <sub>p</sub> = 0,074-1,3 mm
(2006) Liu [57]	Szlifowanie powierzchni płaskich	CSMX4 (54 HRC)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	HP NGV XA60E13VRP T = 9.5 - 18 mm	v <sub>s</sub> = 30-55 mm/s v <sub>w</sub> = 0,5-2 m/min a <sub>e</sub> = 0,5-2,5 mm PCS: 9% emulsja Hocut 3380 p <sub>PCS</sub> = 50 bar (Polialfaolefiny)
(2007) Liu [56,59]	Szlifowanie powierzchni płaskich CFG (współ i przeciwbieżne)	CMSX4 Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cBN Diament	V G G	Ściernice Typ 1 XA60E13VRP; XA60F13VRP B126 i B252 (cBN) D126 i D213 (Diament)	v <sub>s</sub> = 30-55 m/s v <sub>w</sub> = 0.5-2 m/min a <sub>e</sub> = 0,01-2,5 mm PCS: 9% emulsja Hocut 3380 p <sub>PCS</sub> = 42 bar (Polialfaolefiny)



Zał. 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoivo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2007) Aspinwall [7]	Szlifowanie powierzchni kształtowych	Inconel® alloy 718 Udimet® alloy 720	cBN Diament	G	Ściernice trzpieniowe profilowe galwaniczne z ziarnami: B46, B76, B91 (cBN); D46 (Diament);	$v_s =$ do 90 m/s $v_w = 2$ m/min $a_e = 0,02$ mm $Q_{PCS} = 135$ dm <sup>3</sup> /min PCS: olej $p_{PCS} = 0,3$ MPa (Polialfaolefiny)
(2007) Guo [39]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Stop na bazie niklu	cBN	G	Ściernice galwaniczne z ziarnami B120 $D_s = 254$ mm; $T = 12,7$ mm	$v_s = 12-60$ m/s $v_w = 0,72-9$ m/min $a_e = 0,03-0,06$ mm $Q_{PCS} = 100$ dm <sup>3</sup> /min PCS: olej $p_{PCS} = 2,8$ MPa dyszą o przepływie laminarnym i przekroju prostokątnym 40,6 mm <sup>2</sup> ; dodatkowa dysza użyta do oczyszczania ściernicy: $Q_{PCS} = 34$ dm <sup>3</sup> /min $p_{PCS} = 7,0$ MPa)
(2008) Zhang [132]	Szlifowanie powierzchni płaskich	GH2132	SG™	V	Ściernica z SG™ produkowana przez Saint-Gobain®	$v_s = 16, 20, 24$ m/s $v_w = 15$ m/min $a_e = 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$ mm $Q_{PCS}$ – zalewowo PCS: 5% emulsja O/W
(2009) Neslušan [73]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Stop EI 698 VD (podobny do stopu Nimonic® alloy 90)	99A i aglomeraty ziaren ściernych Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w ściernicach Vortex®	V	1-250×20×76/A9960J9V Vortex® 1-250×20×76/60J17V	$v_s = 34$ m/s $v_w = 4$ m/min $a_e = 0,01-0,04$ mm PCS: Emulzín H (2% emulsja)

Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoivo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2009) Curtis [25]	Elektro-chemiczne (ECG) szlifowanie wgłębne powierzchni płaskich i kształtowych	Udimet® alloy 720 (~44 HRC)	cBN Diament	B M G	Małogabarytowe ściernice trzpieniowe (walcowe i profilowe) ze spoiwem żywicznym, metalowym i galwanicznym Ds = 10-15 mm, z ziarnami B151 (cBN); D76 i D91 (Diament)	$v_s = 11-15$ m/s $n_s = 20\ 000$ obr./min $v_w = 0,008-0,010$ m/min $a_e = 0,5$ mm $Q_{PCS} = 22,5$ dm <sup>3</sup> /min PCS: elektrolit podawany dyszą o przepływie laminarnym i wymiarach 20×1 mm $p_{PCS} = 0,196$ MPa
(2009) Prabhu [88]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 600 (75 HRC)	–	–	–	$n_s = 12000$ obr./min PCS: chłodzenie olejem SAE 20W40 z 10% dodatkiem SWCNT
(2010) Ding [30]	Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym	K424	cBN	G	Ściernica segmentowa ze spoiwem galwanicznym i liniowo rozmieszczonymi ziarnami B150 (cBN) na CPS Ds = 265 mm, T = 4,5 mm)	$v_s = 17,5-25,0$ m/s $v_w = 0,1-0,4$ m/min $a_e = 0,08-0,20$ mm $Q_{PCS} = 90$ dm <sup>3</sup> /min PCS: 5% emulsja $p_{PCS} = 0,4$ MPa
(2011) Da Silva [27]	Szlifowanie „zanurzeniowe” zewnętrznych powierzchni walcowych	Inconel® alloy 751	cBN	V	JB126 K150 VSS i 8B126 K150 VT2 Ds = 400 mm	$v_s = 80; 100$ m/s $v_w = 17,9$ m/min $Q_w' = 50; 100; 150; 200$ mm <sup>3</sup> /mm·min $b = 5$ mm $Q_{PCS} = 50$ dm <sup>3</sup> /min PCS: 10% emulsja, 2 dysze o średnicy wylotowej 6 mm prędkość wylotowa z dyszy $v_j = 15$ m/s

Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoivo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2012) Bhaduri [14,15]	Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym, wspomagane ultradźwiękami	Inconel® alloy 718 (44±1 HRC)	25A	V	25A601 I 74 VPMCNN (PO-ROS2) D <sub>s</sub> = 220 mm, T = 25 mm	v <sub>s</sub> = 30-40 m/s v <sub>w</sub> = 0,2-0,3; 0,6 m/min a <sub>e</sub> = 1,0 mm PCS: 7-10% emulsja p <sub>PCS</sub> = 2,8 MPa dyszą o wymiarach 20×20mm dodatkowa dysza o takich samych wymiarach użyta do oczyszczania ściernicy p <sub>PCS</sub> = 7,0 MPa f ≈ 20 kHz
(2012) Huddedar [44]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (nr ziarna: 60, 120 i 220)	–	–	v <sub>w</sub> = 8-12 m/min f <sub>r</sub> = 0,05-0,15 mm PCS: olej kokosowy, SAE+grafit; ciekły azot
(2012) Abdullah [1]	Szlifowanie z posuwem pełzającym, wspomagane ultradźwiękami	Inconel® alloy 718LC	SG™	V	3SG54H13VXPC	v <sub>s</sub> = 26 m/s v <sub>w</sub> = 0,061-0,254 m/min a <sub>e</sub> = 0,025-0,050 mm Q <sub>PCS</sub> = 0 dm <sup>3</sup> /min (szlifowanie na sucho) f = 25 kHz
(2012) Adibi [2,3]	Szlifowanie powierzchni płaskich L = 50 mm	Inconel® alloy 738	cBN	V	1-A120010B126 Vit. N V100	v <sub>s</sub> = 20; 25; 30 m/s v <sub>w</sub> = 2,88; 6; 12 m/min a <sub>e</sub> = 0,005; 0,01; 0,015; 0,020 mm Q <sub>PCS</sub> = 7,4 dm <sup>3</sup> /min PCS: 3% emulsja
(2012) Popov [87,9]	Szlifowanie prostoliniowo-zwrotne powierzchni płaskich	ZhS6-K	Diament	M	AW 16×20×6 92A 40H CM1 K5	v <sub>s</sub> = 160 m/s v <sub>w</sub> = 3-4 m/min a <sub>p</sub> = 0,01-0,03 mm

Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoivo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2013) Caggiano [22]	Szlifowanie z posuwem pełzającym łopatk turbin samolotowych,	Renè 125; Renè 80	cBN	G	$D_s = 178$ mm, $T = 35$ mm Trzy ściernice, o różnej zawartości ziaren z cBN (o wymiarze $181$ $\mu$ m) w objętości ściernicy, oznaczonych symbolami: T0 ( $4,4$ ct/cm <sup>3</sup> – ściernica referencyjna, stosowana w przemyśle); T1 ( $3,74$ ct/cm <sup>3</sup> ); T2 ( $3,08$ ct/cm <sup>3</sup> )	$v_s = 62,44; 83,88$ m/s $v_w = 0,645; 0,020; 0,045; 0,060$ m/min $a_e = 2,1$ mm (9 przejść: dla pierwszego przejścia $a_p = 0,5$ mm, dla kolejnych ośmiu $a_p = 0,2$ mm); 4 mm PCS: olej Rhenus HM7 podawany przez 2 dysze oraz 6% emulsja oleju półsyntetycznego CIMCOOL CIMSTAR 560 $p_{PCS} = 20$ bar
(2013) Yao [129]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cBN (nr ziarna 80)	V B	$D_s = 250$ mm, $T = 25$ mm Ściernica korundowa o numerze ziarna 80, strukturze 6 ze spoiwem ceramicznym; Ściernica z cBN o numerze ziarna 80, koncentracji 100 ze spoiwem żywicznym	$v_s = 15; 20; 25; 30; 35$ m/s $v_w = 8; 12; 16; 22; 43$ m/min $a_p = 0,005-0,025$ mm
(2013) Balan [10]	Szlifowanie współbieżne powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 751	Diamant	B	$D_s = 150$ mm, $T = 13$ mm Ściernica diamentowa o numerze ziarna 126, koncentracji 75 ze spoiwem żywicznym	$v_s = 47,1$ m/s $v_w = 0,9$ m/min $a_p = 0,03$ mm $Q_{PCS} = 0,06 - 0,1$ dm <sup>3</sup> /h $p_{PCS} = 0,2 - 0,4$ MPa PCS: olej Cimtech D14 o lepkości kinematycznej $\nu = 5$ cst i gęstości $\rho = 1,08$ kg/dm <sup>3</sup>

Zał. 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ścierne	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2014) Zeng [131]	Szlifowanie zewnętrznych powierzchni walcowych; szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (nr ziarna 80)	–	–	$v_s = 15; 20; 25; 30$ m/s $v_w = 8; 12; 16; 22$ m/min $a_e = 0,005; 0,01; 0,015;$ 0,02 mm (szlifowanie wałków) $v_s = 25$ m/s $v_w = 10$ m/min $a_e = 0,005; 0,015; 0,025; 0,035;$ 0,04 mm (szlifowanie pow. płaskich) PCS: 5% emulsja
(2014) Zhenzhen [136]	Szlifowanie powierzchni płaskich, długość próbki 5 mm	Inconel® alloy 718	cBN	V B (kompozytowa)	B181V100 B181C100 (kompozytowa) $D_s = 400$ mm, $T = 10$ mm, $H = 175$ mm Ściernica z ziarnami cBN oraz ściernica z ziarnami cBN o otwartej strukturze (przez dodanie pustych kulek z Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$v_s = 50; 60; 70; 80; 90$ m/s $v_w = 0,64-6,9$ m/min $a_p = 0,010; 0,015; 0,020; 0,025;$ 0,030 mm
(2014) Li X. [54]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego	Inconel® alloy 718	cBN	M	$D_s = 80$ mm; $W_s = 2,9$ mm; rozmiar ziarna: 0,2 mm; koncentracja: 31,25% - ściernica segmentowa	$v_s = 50,3$ m/s $v_w = 2,5$ m/min $a_p = 0,006$ mm PCS: emulsja i czysty olej: szlifowanie z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego i tradycyjnego

Załącznik 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoivo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2014) Shi [98]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego	Inconel® alloy 718	cBN	M	Ściernica segmentowa 1: D <sub>s</sub> = 80 mm; odległość między segmentami b = 8,7 mm; wysokość nasypu 4 mm; rozmiar ziarna: 100 mesh; koncentracja: 125%  Ściernica segmentowa 2: D <sub>s</sub> = 80 mm; odległość między segmentami b = 5,5 mm; wysokość nasypu 0,25 mm; rozmiar ziarna: 100 mesh; koncentracja: 125%	v <sub>s</sub> = 50,3 m/s v <sub>w</sub> = 0,8 m/min a <sub>p</sub> = 0,01 mm Q <sub>PCS</sub> = 1-5,25 dm <sup>3</sup> /min PCS: olej Blasgrind HC 10 RZ
(2014, 2015) Pavan [83,84]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B	AnA80K6B D <sub>s</sub> = 200 mm, T = 25 mm, H = 31,75 mm	v <sub>s</sub> = 25 m/s v <sub>w</sub> = 15 m/min a <sub>e</sub> = 0,025 mm Q <sub>PCS</sub> = 1-5,25 dm <sup>3</sup> /min
(2015) Batako [13]	Szlifowanie powierzchni płaskich (HEDG) wspomagane ultradźwiękami z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	33A602HH10VB1	v <sub>s</sub> = 30 m/s v <sub>w</sub> = 12 m/min a <sub>e</sub> = 0,01-0,03 mm Q <sub>PCS</sub> = 0,03 dm <sup>3</sup> /h p <sub>PCS</sub> = 0,45 MPa PCS: olej Carecut ES1 f = 275 Hz (sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym, amplituda 15 μm)



Zał. 1. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania nadstopów niklu – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2015, 2016) Zhang [55,118,134,133 ,135]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA80H12V D <sub>s</sub> = 300 mm, T = 22 mm, H = 76,2 mm	v <sub>s</sub> = 30 m/s v <sub>w</sub> = 0,05 m/min a <sub>p</sub> = 0,01 mm a <sub>e</sub> = 0,6 mm Q <sub>PCS</sub> = 1 dm <sup>3</sup> /min Q <sub>PCS</sub> (MQL) = 0,05 dm <sup>3</sup> /h p <sub>a</sub> = 0,6 MPa PCS: olej syntetyczny lipidowy z dodatkiem mikroproszków
(2016) Sinha [102]	Szlifowanie powierzchni płaski	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC	V	CGC60K5V; WA60K5V D <sub>s</sub> = 350 mm, T = 40 mm, H = 127 mm	v <sub>s</sub> = 10; 20 m/s v <sub>w</sub> = 3; 15 m/min a <sub>e</sub> = 0,005; 0,015 mm Q <sub>PCS</sub> = 0 dm <sup>3</sup> /min (szlifowanie na sucho)
(2016b) Sinha [101]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA60K5V D <sub>s</sub> = 350 mm, T = 40 mm, H = 127 mm	v <sub>s</sub> = 5; 15 m/s v <sub>w</sub> = 6 m/min a <sub>e</sub> = 0,010 mm Q <sub>PCS</sub> (MQL) = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 dm <sup>3</sup> /h PCS: emulsja O/W 1:20
(2017) Sinha [100]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA80K5V D <sub>s</sub> = 345 mm, T = 40 mm, H = 127 mm	v <sub>s</sub> = 18 m/s v <sub>w</sub> = 6 m/min a <sub>p</sub> = 0,01 mm a <sub>e</sub> = 0,1 mm Q <sub>PCS</sub> (MQL+NFs) = 0,15 dm <sup>3</sup> /h Q <sub>PCS</sub> (MQL+NFs) = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 dm <sup>3</sup> /h p <sub>a</sub> = 0,8 MPa PCS: emulsja O/W 1:30 Castrol CoolEdge SL

\* Spoiwo: B – żywiczne; G – galwaniczne; M – metalowe; V – ceramiczne

## Załącznik 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(1995) Tso [116,117]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718 (40 HRC)	99A SiC cBN	V	1-140×13×50,8/WA46K8V; 1-140×13×50,8/GC60J8V; 1-140×13×50,8/cBN100P76V;	$v_s = 10,8-22$ m/s $v_w = 2-5$ m/min $a_e = 0,005-0,015$ mm $Q_{PCS} = 9,4$ dm <sup>3</sup> /min
(1999) Kawagoishi [50]	Szlifowanie zew. powierzchni walcowych	Inconel® alloy 718	cBN	V	cB170N75VN5GP, nr ziarna: 170#; koncentracja: 75	$v_s = 31$ m/s $v_w = 3$ m/min PCS: emulsja
(2001) Aspinwall [6]	Elektro-erozyjne (EDG) szlifowanie wgłębne powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718 (~43 HRC) Udimet® alloy720 (~43 HRC)	cBN Diament	G	małogabarytowe ściernice trzpieniowe galwaniczne z ziarnami cBN i D D <sub>s</sub> = 15 mm; T = 25 mm	$v_s = 35-45$ m/s $a_e = 0,005-0,015$ mm $Q_{PCS} = 20$ dm <sup>3</sup> /min PCS: 5% emulsja $p_{PCS} = 30$ MPa (dwie dysze)
(2004) Rowe [91]	Szlifowanie powierzchni walcowych	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SG™ cBN	V	Ściernice ze spoiwem ceramicznym o podwyższonej porowatości (40%): A46 K5V i A80 J6V (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ); A60 J8V (SG); B91 i B151 (cBN);	Dla ściernic z ziarnami Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : $v_s = 33$ m/s $v_w = 20$ m/min $Q_w' = 2$ mm <sup>3</sup> /mm·s Dla ściernic z ziarnami cBN: $v_s = 45-120$ m/s $v_w = 20-26$ m/min $Q_w' = 2$ mm <sup>3</sup> /mm·s
(2007) Liu [56,59]	Szlifowanie powierzchni płaskich CFG (współ i przeciwbieżne)	CMSX4 Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cBN Diament	V G G	Ściernice Typ 1 XA60E13VRP; XA60F13VRP B126 i B252 (cBN) D126 i D213 (Diament)	$v_s = 30-55$ m/s $v_w = 0,5-2$ m/min $a_e = 0,01-2,5$ mm PCS: 9% emulsja Hocut 3380 $p_{PCS} = 42$ bar (Polialfaolefiny)

Załącznik 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 – ciąg dalszy

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2007) Aspinwall [7]	Szlifowanie powierzchni kształtowych	Inconel® alloy 718 Udimet® alloy 720	cBN Diament	G	Ściernice trzpieniowe profilowe galwaniczne z ziarnami: B46, B76, B91 (cBN); D46 (Diament);	$v_s = \text{do } 90 \text{ m/s}$ $v_w = 2 \text{ m/min}$ $a_e = 0,02 \text{ mm}$ $Q_{PCS} = 135 \text{ dm}^3/\text{min}$ PCS: olej $p_{PCS} = 0,3 \text{ MPa}$ (Polialfaolefiny)
(2012) Bhaduri [14,15]	Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym, wspomagane ultradźwiękami	Inconel® alloy 718 (44±1 HRC)	25A	V	25A601 I 74 VPMCNN (PO-ROS2) $D_s = 220 \text{ mm}$ , $T = 25 \text{ mm}$	$v_s = 30\text{-}40 \text{ m/s}$ $v_w = 0,2\text{-}0,3; 0,6 \text{ m/min}$ $a_e = 1,0 \text{ mm}$ PCS: 7-10% emulsja $p_{PCS} = 2,8 \text{ MPa}$ dyszą o wymiarach 20×20mm dodatkowa dysza o takich samych wymiarach użyta do oczyszczania ściernicy $p_{PCS} = 7,0 \text{ MPa}$ $f \approx 20 \text{ kHz}$
(2012) Huddedar [44]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (nr ziarna: 60, 120 i 220)	–	–	$v_w = 8\text{-}12 \text{ m/min}$ $f_r = 0,05\text{-}0,15 \text{ mm}$ PCS: olej kokosowy, SAE+grafit; ciekły azot
(2012) Abdullah [1]	Szlifowanie z posuwem pełzającym, wspomagane ultradźwiękami	Inconel® alloy 718LC	SG™	V	3SG54H13VXPC	$v_s = 26 \text{ m/s}$ $v_w = 0,061\text{-}0,254 \text{ m/min}$ $a_e = 0,025\text{-}0,050 \text{ mm}$ $Q_{PCS} = 0 \text{ dm}^3/\text{min}$ (szlifowanie na sucho) $f = 25 \text{ kHz}$

Załącznik 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 – ciąg dalszy

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2013) Yao [129]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cBN (nr ziarna 80)	V B	D <sub>s</sub> = 250 mm, T = 25 mm Ściernica korundowa o numerze ziarna 80, strukturze 6 ze spoiwem ceramicznym; Ściernica z cBN o numerze ziarna 80, koncentracji 100 ze spoiwem żywicznym	v <sub>s</sub> = 15; 20; 25; 30; 35 m/s v <sub>w</sub> = 8; 12; 16; 22; 43 m/min a <sub>p</sub> = 0,005-0,025 mm
(2014) Zeng [131]	Szlifowanie zewnętrznych powierzchni walcowych; szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (nr ziarna 80)	–	–	v <sub>s</sub> = 15; 20; 25; 30 m/s v <sub>w</sub> = 8; 12; 16; 22 m/min a <sub>e</sub> = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02 mm (szlifowanie wałków) v <sub>s</sub> = 25 m/s v <sub>w</sub> = 10 m/min a <sub>e</sub> = 0,005; 0,015; 0,025; 0,035; 0,04 mm (szlifowanie pow. płaskich) PCS: 5% emulsja
(2014) Zhenzhen [136]	Szlifowanie powierzchni płaskich, długość próbki 5 mm	Inconel® alloy 718	cBN	V B (kompozytowa)	B181V100 B181C100 (kompozytowa) D <sub>s</sub> = 400 mm, T = 10 mm, H = 175 mm Ściernica z ziarnami cBN oraz ściernica z ziarnami cBN o otwartej strukturze (przez dodanie pustych kulek z Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	v <sub>s</sub> = 50; 60; 70; 80; 90 m/s v <sub>w</sub> = 0,64-6,9 m/min a <sub>p</sub> = 0,010; 0,015; 0,020; 0,025; 0,030 mm

Zał. 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2014) Li X. [54]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego	Inconel® alloy 718	cBN	M	$D_s = 80$ mm; $W_s = 2,9$ mm; rozmiar ziarna: 0,2 mm; koncentracja: 31,25% - ściernica segmentowa	$v_s = 50,3$ m/s $v_w = 2,5$ m/min $a_p = 0,006$ mm PCS: emulsja i czysty olej: szlifowanie z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego i tradycyjnego
(2014) Shi [98]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem chłodzenia odśrodkowego	Inconel® alloy 718	cBN	M	Ściernica segmentowa 1: $D_s = 80$ mm; odległość między segmentami $b = 8,7$ mm; wysokość nasypu 4 mm; rozmiar ziarna: 100 mesh; koncentracja: 125%  Ściernica segmentowa 2: $D_s = 80$ mm; odległość między segmentami $b = 5,5$ mm; wysokość nasypu 0,25 mm; rozmiar ziarna: 100 mesh; koncentracja: 125%	$v_s = 50,3$ m/s $v_w = 0,8$ m/min $a_p = 0,01$ mm $Q_{PCS} = 1-5,25$ dm <sup>3</sup> /min PCS: olej Blasogrind HC 10 RZ
(2014, 2015) Pavan [83,84]	Szlifowanie powierzchni płaskich	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B	AnA80K6B $D_s = 200$ mm, $T = 25$ mm, $H = 31,75$ mm	$v_s = 25$ m/s $v_w = 15$ m/min $a_e = 0,025$ mm $Q_{PCS} = 1-5,25$ dm <sup>3</sup> /min

Załącznik 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 – ciąg dalszy

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ściernie	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2015) Batako [13]	Szlifowanie powierzchni płaskich (HEDG) wspomagane ultradźwiękami z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	33A602HH10VB1	$v_s = 30$ m/s $v_w = 12$ m/min $a_e = 0,01-0,03$ mm $Q_{PCS} = 0,03$ dm <sup>3</sup> /h $p_{PCS} = 0,45$ MPa PCS: olej Carecut ES1 $f = 275$ Hz (sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym, amplituda 15 μm)
(2015, 2016) Zhang [55,118,134,133,135]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA80H12V $D_s = 300$ mm, $T = 22$ mm, $H = 76,2$ mm	$v_s = 30$ m/s $v_w = 0,05$ m/min $a_p = 0,01$ mm $a_e = 0,6$ mm $Q_{PCS} = 1$ dm <sup>3</sup> /min $Q_{PCS}$ (MQL) = 0,05 dm <sup>3</sup> /h $p_a = 0,6$ MPa PCS: olej syntetyczny lipidowy z dodatkiem mikroproszków
(2016) Sinha [102]	Szlifowanie powierzchni płaski	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC	V	CGC60K5V; WA60K5V $D_s = 350$ mm, $T = 40$ mm, $H = 127$ mm	$v_s = 10; 20$ m/s $v_w = 3; 15$ m/min $a_e = 0,005; 0,015$ mm $Q_{PCS} = 0$ dm <sup>3</sup> /min (szlifowanie na sucho)
(2016b) Sinha [101]	Szlifowanie powierzchni płaskich z wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA60K5V $D_s = 350$ mm, $T = 40$ mm, $H = 127$ mm	$v_s = 5; 15$ m/s $v_w = 6$ m/min $a_e = 0,010$ mm $Q_{PCS}$ (MQL) = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 dm <sup>3</sup> /h PCS: emulsja O/W 1:20



Zał. 2. Zestawienie informacji technologicznych zawartych w wybranych źródłach literaturowych opisujących badania procesu szlifowania stopu Inconel® alloy 718 – *ciąg dalszy*

Źródło (rok)	Proces szlifowania	Materiał obrabiany	Ziarna ścierne	Spoiwo*	Ściernia	Warunki szlifowania
(2017) Sinha [100]	Szlifowanie powierzchni płaskich wykorzystaniem MQL	Inconel® alloy 718	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	WA80K5V D <sub>s</sub> = 345 mm, T = 40 mm, H = 127 mm	v <sub>s</sub> = 18 m/s v <sub>w</sub> = 6 m/min a <sub>p</sub> = 0,01 mm a <sub>e</sub> = 0,1 mm Q <sub>PCS</sub> (MQL+NFs) = 0,15 dm <sup>3</sup> /h Q <sub>PCS</sub> (MQL+NFs) = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 dm <sup>3</sup> /h p <sub>a</sub> = 0,8 MPa PCS: emulsja O/W 1:30 Castrol CoolEdge SL

\* Spoiwo: B – żywiczne; G – galwaniczne; M – metalowe; V – ceramiczne

mgr inż. Michał Wojtewicz

**Badania wpływu impregnacji ściernic  
substancjami antyadhezyjnymi  
na efektywność procesu szlifowania stopów niklu**

## Streszczenie

Na szlifowalność superstopów niklu zasadniczy wpływ mają duża ciągliwość, mała przewodność cieplna oraz podatność na utwardzanie w procesie obróbki. Często występuje zjawisko nadmiernego zalepiania czynnej powierzchni ściernicy (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. W swoich publikacjach opisują efekty procesu szlifowania z użyciem ściernic z materiałów superwardych jak ściernice diamentowe oraz ściernice z regularnego azotku boru. Jednak badania te dotyczą szlifowania powierzchni płaskich, szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych oraz szlifowania głębokiego z posuwem pełzającym. Badania dotyczące efektywności szlifowania wewnętrznego materiałów wykonanych z superstopów niklu zostaje całkowicie pominięty. Szlifowanie wewnętrzne czyli szlifowanie otworów i innych średnic wewnętrznych prawdopodobnie jest jedną z najtrudniejszych operacji szlifierskich. Zakres operacji szlifowania wewnętrznego obejmuje szlifowanie z bardzo szybkim zdejmowaniem naddatków, jak i bardziej kontrolowane procesy, gdzie uzyskiwane wymiary i kołowość liczone są w mikronach.

Celem dysertacji jest wykazanie wpływu impregnacji czynnej powierzchni ściernicy substancjami antyadhezyjnymi na efektywność procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopów niklu.

Do realizacji celu przyjęto następujące hipotezy pracy:

- Hipoteza 1. Jeżeli wprowadzi się na powierzchnię czynną ściernicy, lub w jej przestrzenie międzyziarnowe dodatkowe substancje antyadhezyjne w formie impregnatów, można spodziewać się wydłużenia jej okresu trwałości.
- Hipoteza 2. Jeżeli wprowadzi się na powierzchnię czynną ściernicy, lub w jej przestrzenie międzyziarnowe dodatkowe substancje antyadhezyjne jako impregnaty, można spodziewać się, że istnieje dopuszczalny stopień zapelnienia wolnych przestrzeni w ściernicy impregnatem, dla którego okres trwałości jest najdłuższy.

Badania zostały oddzielone na cztery etapy: badania przygotowawcze, badania podstawowe, badania rozpoznawcze oraz badania właściwe. W niniejszej pracy w rozdziale piątym zastosowano 3 autorskie metody impregnacji narzędzi ściernych: metoda impregnacji siarką, polegająca na częściowym jej odwirowaniu z zaimpregnowanej ściernicy; metoda impregnacji narzędzi ściernych węglem amorficznym na drodze termicznego rozkładu związków organicznych oraz metoda impregnacji narzędzi ściernych proszkiem smarnym przez zanurzenie ściernicy w jego zawiesinie.

W rozdziale szóstym dowiedziono, że impregnacja może stanowić jedno z rozwiązań mających na celu obniżenie stopnia zalepienia czynnej powierzchni ściernicy wiórami materiału obrabianego podczas szlifowania stopów niklu.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wyniki badań i analiz wpływu impregnacji substancjami antyadhezyjnymi w postaci stałych środków smarnych na efektywność procesu szlifowania stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. W badaniach rozpoznawczych wyznaczono zależność parametrów na efektywność procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718. W badaniach właściwych zastosowano wielokryterialną metodykę oceny efektywności procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego wewnętrznych powierzchni walcowych wykonanych ze stopu Inconel<sup>®</sup> alloy 718 ściernicami impregnowanymi grafitem oraz dwusiarczkiem molibdenu o różnych ich zawartościach w ściernicy. Wyniki uzyskane podczas szlifowania ściernicami impregnowanymi skonfrontowano z wynikami otrzymanymi dla ściernicy referencyjnej (nieimpregnowanej). Zaprezentowane wartości wskaźników efektywności pozwoliły na ocenę poszczególnych impregnatów (w zależności od ich rodzaju oraz ich zawartości w masie ściernicy), a także wskazanie ich mocnych i słabych stron.

M.Sc. Eng. Michał Wojtewicz

**Research on the influence of grinding wheel impregnation  
with anti-adhesive substances on the efficiency  
of nickel based alloys grinding process**

## Summary

Main factors that have great impact on nickel alloys grinding process are high ductility, low thermal conductivity and age-hardening susceptibility during the grinding process. Due to nickel alloys properties Grinding Wheel Active Surface (GWAS) gumming up with chips or other grinding products is often observed. This disadvantageous phenomenon causes tools cutting ability limitation, shortening of their life span, moreover it can lead to grinding defects on the workpiece surface. Due to those phenomena, authors of scientific papers concerning alloys grinding on the nickel matrix usually resign from using conventional (corundum) grinding tools. In their publications effects of grinding process with the use of superhard grinding wheels such as diamond and boron (III) nitride grinding wheels are described. However, those researches concern surface grinding, external cylindrical grinding (outside diameter grinding) and creep feed grinding. Researches dealing with the efficiency of internal cylindrical grinding (inside diameter grinding) of materials made of nickel superalloys are omitted. Internal cylindrical grinding is probably one of the most difficult grinding method. The scope of internal grinding includes operations where many parts must be processed in a short time and operations that are more controlled where obtained dimensions and circularity are specified in microns.

The aim of the thesis is to prove the influence of the impregnation of grinding wheel active surface with anti-adhesive substances on the efficiency in the reciprocal grinding process of internal cylindrical surfaces made from nickel alloys.

The hypotheses for the realization of the aim have been proposed in the section to follow.

Hypothesis 1st If additional antiadhesive substances are implemented on the grinding wheel active surface or its intergranular free spaces as impregnates, grinding wheel life span can be expected.

Hypothesis 2nd If additional antiadhesive substances are implemented on the grinding wheel active surface or its intergranular spaces as impregnates, it can be expected that there is some stage of filling with impregnate the grinding wheel intergranular free spaces, for which grinding wheel life span is the longest.

Researches were divided into four stages: preparatory study, fundamental research, preliminary research and main research. In 5<sup>th</sup> chapter of the thesis 3 original methods of ceramic grinding wheel impregnation were implemented: sulphur implementation method, in which sulphur should be partly centrifugated from the impregnated grinding wheel, amorphous carbon



impregnation method in the way of thermal decomposition of organic compounds and tools impregnation method with lubricating powder submerged in its suspension.

In the 6<sup>th</sup> chapter it was proved, that impregnation can be used as one of the methods leading to decreasing the stage of GWASs smearing with chips during nickel alloy grinding.

In following chapters research results and analysis on the influence of anti-adhesive substances in the form of solid lubricants on the efficiency of Inconel<sup>®</sup> alloy 718 grinding process were presented. In the preliminary research the influence of chosen parameters on the efficiency in the reciprocal internal cylindrical grinding process of Inconel<sup>®</sup> alloy 718 was determined. In the main research the efficiency evaluation in the reciprocal internal cylindrical grinding of Inconel<sup>®</sup> 718 alloy with impregnated graphite and molybdenum disulfide, with their various content in grinding wheel, a multicriteria methodology was used. Research results obtained during grinding with impregnated grinding wheels were confronted with the results obtained during grinding with non-impregnated (reference) grinding wheel. Presented values of an efficiency coefficients allowed to evaluate the impregnates according of their kind and content in the grinding wheel. The values also allowed to point an advantages and disadvantages of used impregnates.