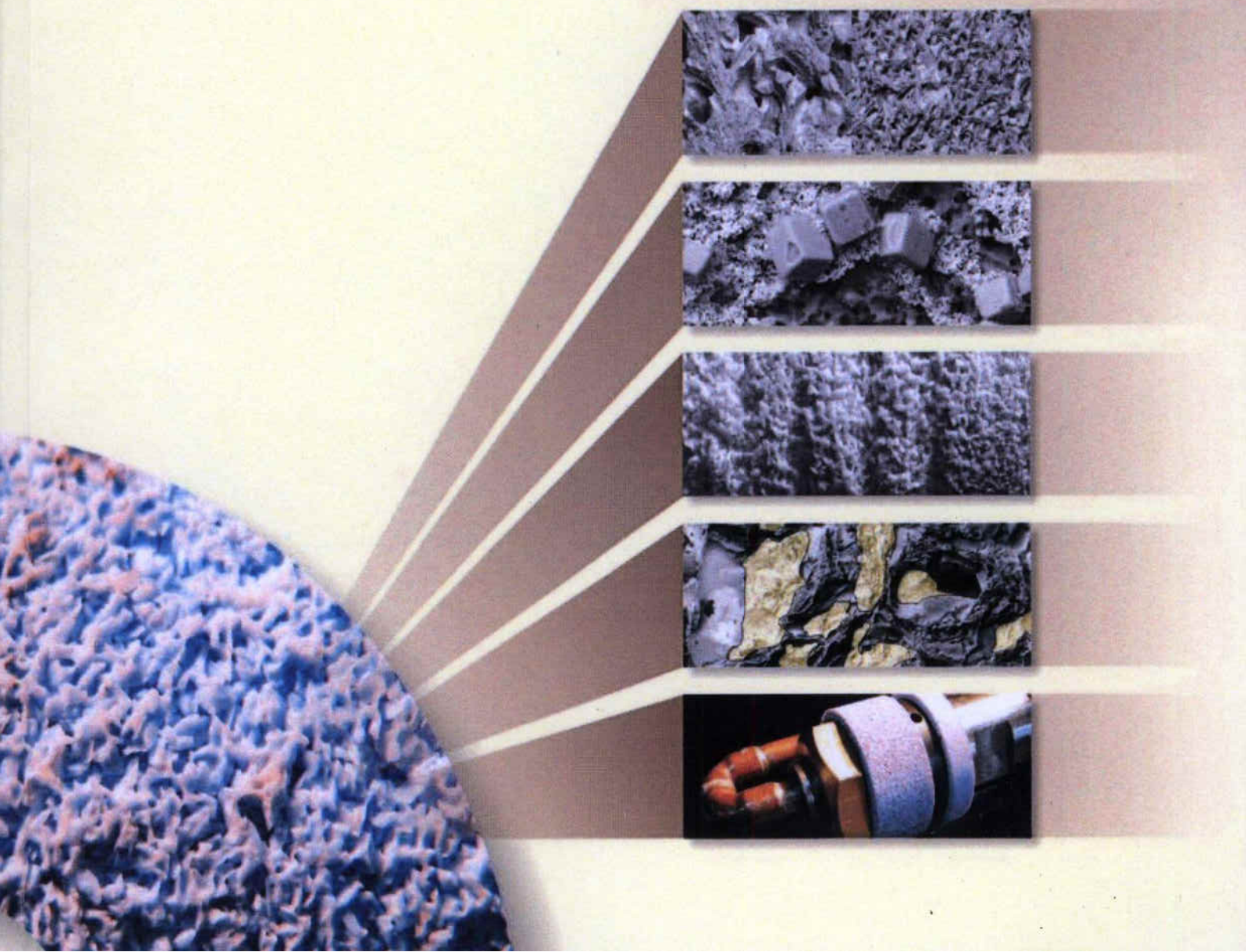


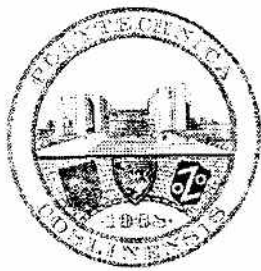
Krzysztof Nadolny

**PODSTAWY BUDOWY I EKSPLOATACJI  
MODYFIKOWANYCH ŚCIERNIC Z ZIARNAMI  
MIKROKRystalicznego KORUNDU SPIEKANEGO  
W PROCESACH SZLIFOWANIA OTWORÓW**



Niniejszą monografię dedykuję Panu Profesorowi  
dr. hab. inż. Jarosławowi Plichcie w podziękowaniu  
za życzliwą pomoc i inspirujące dyskusje

*Autor*



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY



**Krzysztof Nadolny**

**PODSTAWY BUDOWY I EKSPLOATACJI  
MODYFIKOWANYCH ŚCIERNIC Z ZIARNAMI  
MIKROKRystalicznego KORUNDU SPIEKANEGO  
W PROCESACH SZLIFOWANIA OTWORÓW**

KOSZALIN 2012

MONOGRAFIA NR 227  
WYDZIAŁ MECHANICZNY

ISSN 0239-7129

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej  
*Mirosław Maliński*

Recenzja  
*Andrzej Gołąbczak*  
*Mieczysław Marciniak*

Redakcja  
*Agnieszka Czajkowska*

Projekt okładki  
*Krzysztof Nadolny*

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej  
Koszalin 2012

Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej  
75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17

---

Koszalin 2012, wyd. I, ark. wyd. 20,25, nakład 120 egz., format B-5  
Druk: POLIMER Koszalin

# Spis treści

Wykaz ważniejszych symboli i akronimów .....	11
WPROWADZENIE .....	15
1. PROBLEMY WYSTĘPUJĄCE W PROCESACH SZLIFOWANIA OTWORÓW ŚCIERNICAMI Z MIKROKRystalICZNYM KORUNDEM SPIEKANYM I SPOIWEM CERAMICZNYM .....	19
1.1. Charakterystyka ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	19
1.1.1. Korund spiekany .....	20
1.1.2. Mikrokrystaliczny korund spiekany .....	20
1.1.3. Właściwości i zastosowanie ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	21
1.1.4. Warunki pracy i zjawiska zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	25
1.1.5. Mikrokrystaliczny korund spiekany o wydłużonym kształcie .....	29
1.1.6. Nanokrystaliczny korund spiekany .....	30
1.2. Spoiwa stosowane w ściernicach z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	32
1.3. Problemy w szlifowaniu otworów ściernicami z mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym .....	34
1.4. Możliwości poprawy warunków szlifowania otworów poprzez modyfikacje budowy ściernicy .....	36
1.5. Podsumowanie i wnioski .....	48
2. KIERUNKI BADAŃ WŁASNYCH, CEL NAUKOWY I ZNACZENIE PRACY .....	51
2.1. Cel naukowy pracy .....	51
2.2. Kierunki badań własnych .....	52
2.3. Znaczenie pracy .....	55

3. METODY BADAWCZE OPRACOWANE DO OCENY PRZEBIEGU I EFEKTÓW SZLIFOWANIA ŚCIERNICAMI MODYFIKOWANYMI.....	56
3.1. Analityczna metoda oceny obciążenia ziaren aktywnych w różnych odmianach kinematycznych procesu szlifowania otworów .....	57
3.1.1. Wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w$ .....	58
3.1.2. Liczba kinematycznych wierzchołków skrawających $N_{kin}$ .....	61
3.1.3. Syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający $SI_Q$ .....	63
3.2. Metoda badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wgłębnego.....	68
3.2.1. Istota metody badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wgłębnego.....	69
3.2.2. Porównanie możliwości analizowanej metody przy zastosowaniu ściernicy z nakrojem stożkowym i ściernicy ze strefami o różnej średnicy .....	72
3.3. Metoda pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z zastosowaniem termowizji w podczerwieni .....	82
3.3.1. Istota metody pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z zastosowaniem termowizji w podczerwieni.....	83
3.3.2. Przykład zastosowania metody pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym w procesie jednoprzeciowego szlifowania otworów.....	85
3.4. Metoda oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM.....	87
3.4.1. Istota metody oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM .....	87
3.4.2. Stanowisko do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego (EDS).....	88

3.4.3. Weryfikacja możliwości zastosowania technik komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM do oceny stanu czynnej powierzchni ściernic modyfikowanych .....	89
3.5. Metoda oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem skaterometrii laserowej wspomaganej technikami przetwarzania i analizy obrazu .....	98
3.5.1. Charakterystyka optycznych metod pomiarowych wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła .....	98
3.5.2. Zastosowanie skaterometrii laserowej wspomaganej technikami przetwarzania i analizy obrazu do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy .....	101
3.6. Podsumowanie i wnioski .....	106
<b>4. INNOWACYJNE MODYFIKACJE ŚCIERNIC Z ZIARNAMI MIKROKRystalicznego KORUNDU SPIEKANEGO I SPOIWEM CERAMICZNYM ZWIĘKSZAJĄCE EFEKTYWNOŚĆ PROCESÓW SZLIFOWANIA OTWORÓW ..</b>	<b>109</b>
4.1. Strefowe zróżnicowanie budowy ściernicy .....	110
4.1.1. Istota strefowego zróżnicowania budowy ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	111
4.1.2. Stanowisko badawcze .....	114
4.1.3. Przyrząd do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy .....	115
4.1.4. Kształtowanie struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie .....	116
4.1.5. Badania eksploatacyjne procesu szlifowania jednoprzęściowego ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie .....	122
4.2. Modyfikacja spoiwa ceramicznego .....	149
4.2.1. Charakterystyka i właściwości zastosowanych odmian spoiwa ceramicznego .....	152
4.2.2. Procesy zużycia czynnej powierzchni ściernicy .....	158
4.2.3. Wpływ modyfikacji mikrostruktury spoiwa ceramicznego na okres trwałości ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego .....	160

4.3.	Modyfikacja geometrii czynnej powierzchni ściernicy poprzez kształtowanie jej mikronieciągłości .....	178
4.3.1.	Metody kształtowania mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie .....	181
4.3.2.	Przyrząd do precyzyjnego kształtowania makro- i mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy .....	185
4.3.3.	Charakterystyka czynnej powierzchni ściernicy z ukształtowanymi mikronieciągłościami .....	189
4.3.4.	Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza .....	192
4.4.	Ściernice składane z systemem odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego .....	197
4.4.1.	System odśrodkowego doprowadzania płynu chłodząco-smarującego w ściernicach małogabarytowych ...	198
4.4.2.	Symulacja wypływu płynu chłodząco-smarującego .....	200
4.4.3.	Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza .....	204
4.5.	Impregnacja ściernic pierwiastkami niemetalicznymi .....	211
4.5.1.	Impregnowanie ściernic siarką .....	212
4.5.2.	Impregnowanie ściernic alotropowymi odmianami węgla ....	228
4.6.	Podsumowanie i wnioski .....	245
5.	<b>INTEGRACJA MODYFIKACJI ŚCIERNICY</b> .....	253
5.1.	Wybrane modyfikacje budowy ściernicy .....	253
5.2.	Badania doświadczalne .....	253
5.2.1.	Metodyka badań doświadczalnych .....	253
5.2.2.	Ściernice zastosowane w badaniach .....	255
5.2.3.	Wyniki badań i ich analiza .....	256
5.3.	Podsumowanie i wnioski .....	260
6.	<b>OCENA EFEKTYWNOŚCI SZLIFOWANIA OTWORÓW MODYFIKOWANYMI ŚCIERNICAMI Z ZIARNAMI MIKROKRystalicznego KORUNDU SPIEKANEGO</b> .....	261
6.1.	Metody oceny efektywności szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi .....	261
6.2.	Charakterystyka ściernic modyfikowanych i referencyjnych poddanych ocenie efektywności .....	264



---

6.3. Wyniki oceny efektywności szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi.....	267
6.4. Podsumowanie i wnioski .....	272
7. MONITOROWANIE PROCESÓW SZLIFOWANIA OTWORÓW ŚCIERNICAMI MODYFIKOWANYMI Z ZASTOSOWANIEM BEZSTYKOWEGO SYSTEMU EMISJI AKUSTYCZNEJ .....	274
7.1. Bezstykowy system monitorowania procesu szlifowania z użyciem sygnału emisji akustycznej.....	275
7.2. Akwizycja sygnału emisji akustycznej z użyciem czujnika hydroakustycznego .....	277
7.3. Analiza sygnału emisji akustycznej metodą śledzenia zmian zachodzących w obrazie .....	280
7.4. Wyniki monitorowania i ich analiza.....	282
7.5. Podsumowanie i wnioski .....	286
PODSUMOWANIE.....	287
Podziękowania.....	289
Literatura .....	291
Streszczenie .....	317
Abstract .....	318

## Wykaz ważniejszych symboli i akronimów

### Symbole

- $a_a$  – styk osiowy, mm
- $a_e$  – głębokość szlifowania (styk roboczy), mm
- $a_{e\ cut}$  – całkowita głębokość szlifowania (całkowity styk roboczy), mm
- $a_{e\ ef}$  – efektywna głębokość szlifowania (efektywny styk roboczy), mm
- $a_d$  – głębokość obciągania (styk roboczy obciągania), mm
- $a_f$  – styk posuwowy, mm
- $A_{CPS}$  – pole czynnej powierzchni ściernicy, mm<sup>2</sup>
- $A_D$  – średni przekrój poprzeczny warstwy skrawanej, μm<sup>2</sup>
- $A_{Dz}$  – przekrój poprzeczny warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem, μm<sup>2</sup>
- $An$  – pole powierzchni obszaru (obiektu) w analizowanym obrazie, piksel
- $A_R$  – względna powierzchnia mikronieciągłości, %
- $b$  – szerokość nakroju stożkowego ściernicy, mm
- $b_d$  – czynna szerokość ostrza obciągacza, mm
- $b_R$  – szerokość wgłębienia, mm
- $b_w$  – szerokość przedmiotu obrabianego, mm
- $c$  – szerokość starcia wierzchołka obciągacza, mm
- $c_s$  – wybieg ściernicy, mm
- $C_{stl}$  – gęstość ostrzy statycznych na głębokości z, mm<sup>-3</sup>
- $d_d$  – średnica obciągacza, mm
- $d_w$  – średnica przedmiotu obrabianego, mm
- $d_s$  – średnica zewnętrzna ściernicy, mm
- $d_{eq}$  – równoważna średnica ściernicy, mm
- $e$  – wartość mimośrodowa, mm
- $E_s$  – efektywność szlifowania, mm<sup>3</sup>/W·s
- $f$  – częstotliwość oscylacji obciągacza, Hz
- $f_r$  – posuw promieniowy stołu, mm/przejście
- $F_p \cdot F_n$  – składowa normalna siły szlifowania, siła nacisku ściernicy na przedmiot obrabiany, N
- $F_p^*$  – składowa normalna siły szlifowania mierzona przy pierwszym przejściu wyiskrzającym, N
- $F_{pz}$  – składowa normalna siły szlifowania przypadająca na jedno ziarno ściernicze, N
- $G$  – wskaźnik szlifowania, –
- $h_u$  – wartość bicia osiowego, mm
- $h_{eq}$  – równoważna grubość wióra, mm
- $h_r$  – wartość bicia promieniowego, mm
- $H$  – średnica otworu ściernicy, mm

- $i$  – liczba obciążaczy jednoziarnistych na obwodzie, –  
 $i_d$  – liczba przejść obciążających, –  
 $i_p$  – liczba przejść roboczych, –  
 $I_s$  – sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów obrazu skaterometrycznego), j.u.  
 $j$  – liczba oscylacji, 1/obr.  
 $j_p$  – liczba wykonanych przedmiotów, szt./s  
 $k_d$  – wskaźnik pokrycia przy obciążaniu, –  
 $k_r$  – współczynnik korygujący dla prostoliniowo-zwrotnego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, –  
 $k_i$  – współczynnik korygujący dla jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, –  
 $l_n$  – długość odcinka pomiarowego przy pomiarze profilu chropowatości powierzchni, mm  
 $l_r$  – całkowita droga przemieszczenia ściernicy w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, mm  
 $l_s$  – przemieszczenie ściernicy względem przedmiotu obrabianego, mm  
 $l_t$  – całkowita droga przemieszczenia ściernicy w procesie szlifowania jednoprzęściowego, mm  
 $L_R$  – długość nacinanego rowka, mm  
 $L_T$  – długość rowka w okresie  $T_d$  ruchu oscylacyjnego, mm  
 $n_d$  – prędkość obrotowa obciążacza, obr./min  
 $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy, obr./min  
 $n_w$  – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, obr./min  
 $N_u$  – liczba ziaren aktywnych,  $\text{mm}^{-2}$   
 $N_{kin}$  – liczba kinetycznych wierzchołków skrawających,  $\text{mm}^{-2}$   
 $N_{kin\ CPS}$  – liczba kinetycznych wierzchołków skrawających na CPS. –  
 $N_{st}$  – liczba wierzchołków statycznych,  $\text{mm}^{-2}$   
 $P$  – moc szlifowania, W  
 $q$  – stosunek prędkości  $v_s/v_{ws}$ , –  
 $Q_d$  – masa obciążacza diamentowego, kr  
 $Q_{PCS}$  – wydatek płynu chłodząco-smarującego, l/min  
 $Q_w$  – wydajność ubytkowa szlifowania,  $\text{mm}^3/\text{s}$   
 $Q_{w\ kor}$  – skorygowana wydajność ubytkowa szlifowania (uwzględniająca współczynnik korygujący  $k$ ),  $\text{mm}^3/\text{s}$   
 $Q'_w$  – wydajność ubytkowa szlifowania na jednostkę szerokości czynnej powierzchni ściernicy,  $\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$   
 $Q'_{w\ ef}$  – efektywna wydajność ubytkowa szlifowania na jednostkę szerokości czynnej powierzchni ściernicy,  $\text{mm}^2/\text{s}$   
 $r$  – liczba wgłębień na obwodzie ściernicy, –

$rms$	– średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego, $\mu\text{m}$
$R$	– współczynnik korelacji, –
$R^2$	– współczynnik determinacji, –
$Ra$	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, $\mu\text{m}$
$Rz$	– wysokość profilu chropowatości według 10 punktów, $\mu\text{m}$
$S$	– powierzchnia rowka w okresie $T_d$ ruchu oscylacyjnego, $\text{mm}^2$
$Sa$	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, $\mu\text{m}$
$Sbi$	– wskaźnik powierzchni nośnej (wskaźnik nośności), –
$Sdr$	– współczynnik rozwinięcia powierzchni, %
$Sds$	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni, $\text{mm}^{-2}$
$SI_Q$	– syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający, $\mu\text{m}^3/\text{s}$
$Sk$	– wysokość chropowatości rdzenia, $\mu\text{m}$
$Sm$	– średni odstęp profilu chropowatości, $\mu\text{m}$
$S_{mvr}$	– średnia objętość pustek, $\text{mm}^3/\text{mm}^2$
$St$	– całkowita wysokość nierówności powierzchni, $\mu\text{m}$
$t$	– czas szlifowania, s
$t_{ax}$	– podziałka osiowa, mm
$t_{cir}$	– podziałka obwodowa, mm
$t_{exp}$	– czas ekspozycji, s
$T$	– całkowita wysokość ściernicy w kierunku osiowym, mm
$T_1$	– wysokość strefy szlifowania zgrubnego ściernicy, mm
$T_2$	– wysokość strefy szlifowania wykończeniowego ściernicy, mm
$U$	– wskaźnik pokrycia przy szlifowaniu powierzchni płaskich lub walcowych z posuwem osiowym (liczba przeszlifowań)
$Ua$	– napięcie przyspieszające elektronowego mikroskopu skaningowego, kV
$v_d$	– prędkość obwodowa obciążacza, m/s
$v_{fa}$	– prędkość posuwu osiowego stołu, mm/s
$v_{fd}$	– prędkość posuwu osiowego przy obciążaniu, mm/s
$v_{fr}$	– prędkość posuwu promieniowego stołu, mm/s
$v_s$	– prędkość obwodowa ściernicy, m/s
$v_{sd}$	– prędkość obwodowa ściernicy przy obciążaniu, m/s
$v_t$	– prędkość przesuwu głowicy skanującej profilometru, mm/s
$v_w$	– prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego, m/s
$V_s$	– zużycie objętościowe ściernicy, $\text{mm}^3$
$V_{sp}$	– procentowy udział objętościowy spoiwa w masie ściernicy, %
$V_w$	– ubytek materiału, $\text{mm}^3$
$z$	– głębokość przestrzeni roboczej, $\mu\text{m}$
$z_m$	– liczba zwojów wgłębień na szerokości ściernicy, –
$z_r$	– rzędna chropowatości powierzchni, $\mu\text{m}$

- $\alpha$  – współczynnik wykładniczy bazujący na rozkładzie ostrzy skrawających na czynnej powierzchni ściernicy ( $\alpha > 0$ ), –  
 $\alpha_d$  – kąt nakroju stożkowego narzędzia kształtującego, °  
 $\alpha_k$  – kąt nachylenia osi ściernicy do osi przedmiotu obrabianego, °  
 $\beta$  – współczynnik wykładniczy bazujący na rozkładzie ostrzy skrawających na czynnej powierzchni ściernicy ( $\beta > 0$ ), –  
 $\chi$  – kąt nakroju stożkowego, °  
 $\Delta$  – maksymalna odchyłka okrągłości ( $P+V$ ),  $\mu\text{m}$   
 $\Delta a$  – średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości, °  
 $\Delta_k$  – odchyłka kształtu,  $\mu\text{m}$   
 $\Delta P$  – przyrost mocy szlifowania, W  
 $\Delta P_g$  – wartość graniczna przyrostu mocy szlifowania, W  
 $\varepsilon$  – emisyjność obiektu, –  
 $\varepsilon_d$  – kąt wierzchołkowy obciążacza, °  
 $\varphi$  – kąt pracy obciążacza, °  
 $\gamma$  – kąt ścięcia czoła narzędzia kształtującego, °  
 $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła, W/m·K  
 $\lambda_l$  – długość fali światła, nm  
 $\Theta$  – temperatura szlifowania, °C  
 $\omega$  – kąt obrotu osi obciążacza, °

### Akronimy

- CBN – regularny azotek boru (*ang. Cubic Boron Nitride*)  
 CNC – *Computer Numeric Control* – komputerowe sterowanie numeryczne  
 CPCG – *Continuous Path Controlled Grinding* – szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy  
 CPS – czynna powierzchnia ściernicy  
 EA – emisja akustyczna  
 EDS – dyspersja energii promieniowania rentgenowskiego (*ang. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*)  
 PCS – płyn chłodząco-smarujący  
 SEH – hydrofon emisji akustycznej (*niem. Schall-Emissions-Hydrophon*)  
 SEM – elektronowy mikroskop skaningowy (*ang. Scanning Electron Microscope*)  
 SG<sup>TM</sup> – nazwa handlowa ziaren ściernych mikrokryształicznego korundu spiekanego produkowanych przez Saint-Gobain Abrasives, wytwarzanych w technologii zarodkowania w żelu (*ang. Seeded Gel*)  
 SGP – struktura geometryczna powierzchni  
 TEM – transmisyjny mikroskop elektronowy (*ang. Transmission Electron Microscope*)

# Wprowadzenie

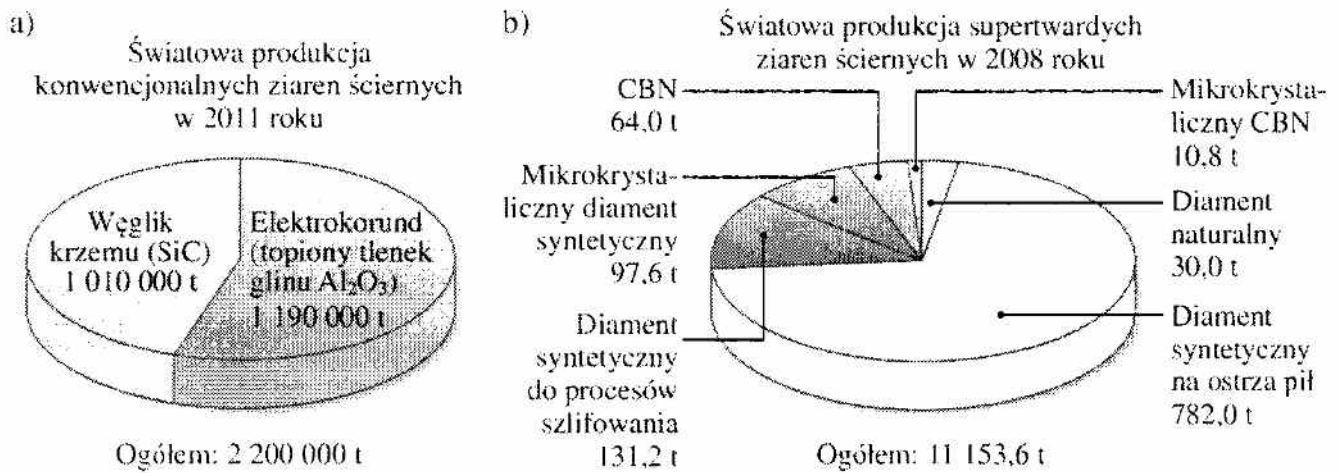
Nowoczesne procesy szlifowania zapewniają wysoką jakość powierzchni obrobionych przy coraz wyższych wydajnościach ubytkowych obróbki. Osiąga się to między innymi poprzez zastosowanie nowych materiałów ściernych, opracowywanie nowych odmian kinematycznych i modyfikacji parametrów procesu szlifowania lub poprzez wprowadzanie modyfikacji w budowie ściernic (rys. 1). Często aspekty te są ze sobą ściśle związane, i np. skuteczna realizacja szlifowania zgrubnego i wykończeniowego w jednym przejściu roboczym ściernicy wiąże się z odpowiednią modyfikacją jej budowy.



Rys. 1. Najważniejsze trendy rozwojowe szlifowania ściernicowego

Fig. 1. Main trends of development in grinding processes using grinding wheels

Jak wskazują statystyki dotyczące światowej produkcji ziaren ściernych [126, 388], w dalszym ciągu największą grupę ścierniwi stanowią ziarna z materiałów konwencjonalnych, takich jak elektrokorund ( $Al_2O_3$ ) i węgiel krzemu (SiC), których roczna produkcja sięga 2 200 000 ton (rys. 2a). Roczna produkcja tzw. supertwardych ziaren ściernych, do których należy diament naturalny i syntetyczny oraz i mono- i mikrokryształiczny regularny azotek boru (ang. *Cubic Boron Nitride* – CBN), wynosi w przybliżeniu 11 150 ton (rys. 2b).



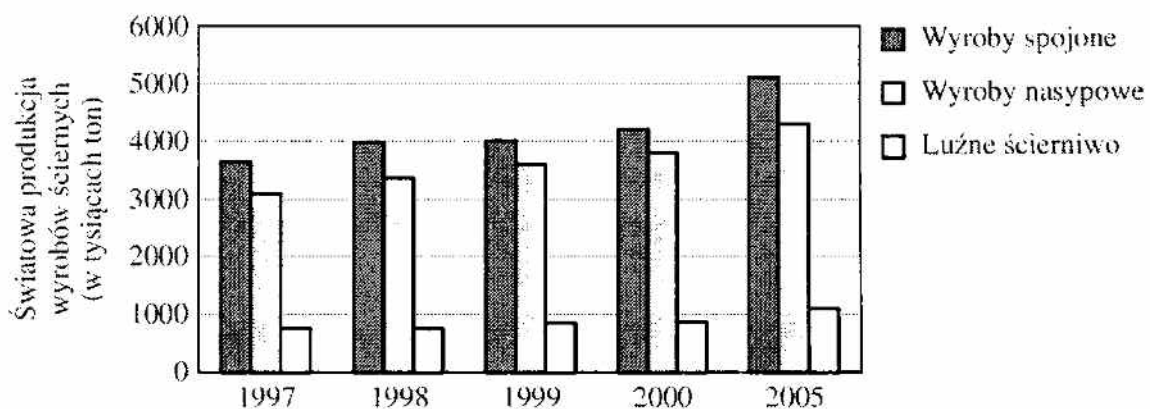
Rys. 2. Światowa produkcja ziaren ściernych: a) produkcja konwencjonalnych ziaren ściernych w 2011 roku [388]; b) struktura produkcji supertwardych ziaren ściernych w 2008 roku [126]

Fig. 2. World production of abrasive grains: a) production capacity of conventional abrasives in 2011 [388]; b) structure of production capacity of superabrasives in 2008 [126]

Porównując te wielkości, można zauważyć, że mimo ciągłego upowszechniania procesów obróbki ścierniej z użyciem narzędzi z supertwardych ziaren ściernych, stanowią one zaledwie około 0,05% światowej produkcji ścierniw.

Okolo 60% wszystkich wytwarzanych typów korundu znajduje zastosowanie jako ścierniwa [7]. Pozostała część produkcji topionego tlenku glinu stosowana jest głównie do produkcji wysokiej klasy wyrobów ogniotrwałych dla hutnictwa stali, odlewni i przemysłu szklarskiego [57].

Spośród wyrobów ściernych wytwarzanych z ziaren ściernych największą grupę stanowią narzędzia spojone (takie jak ściernice i segmenty ściernicze), nieco mniej produkowanych jest narzędzi nasypowych (papiery i płótna ściernicze oraz wykonane z nich tarcze, dyski i tarcze płatkowe), a najmniej liczną grupę stanowią ziarna ściernicze przeznaczone do obróbki luźnym ścierniwem (rys. 3).



Rys. 3. Struktura produkcji wyrobów ściernych w latach 1997–2005 [13]

Fig. 3. Market structure of the abrasive products in the years 1997–2005 [13]

Z przedstawionych analiz rynku wynika, że nadal dominującą grupę narzędzi ściernych stanowią narzędzia spojone wytwarzane z konwencjonalnych ziaren ściernych, w tym w większości z syntetycznego korundu, występującego w postaci różnych odmian elektrokorundu (korundu topionego) lub korundów spiekanych.

W związku z powyższym należy oczekiwać, że coraz większe zastosowanie w procesach szlifowania ściernicowego będą miały nowoczesne odmiany konwencjonalnych ziaren ściernych, w tym głównie ścierniw z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Do najważniejszych w tym kontekście należy zaliczyć ziarna mikrokrystalicznego korundu spiekane występujące pod nazwami handlowymi: SG<sup>TM</sup>, SGA<sup>TM</sup>, SGB<sup>TM</sup>, SGG<sup>TM</sup>, SGR<sup>TM</sup>, SGX<sup>TM</sup>, TG<sup>TM</sup>, TG2<sup>TM</sup>, TGP<sup>TM</sup>, TGX<sup>TM</sup>, XG<sup>TM</sup> (Saint Gobain Abrasives – Noton), Cubitron<sup>TM</sup>, Cubitron 321<sup>TM</sup>, Cubitron 324<sup>TM</sup>, Cubitron 421<sup>TM</sup> i Cubitron II<sup>TM</sup> (Minnesota Mining & Manufacturing – 3M) oraz Sapphire Blue<sup>TM</sup> (Hermes Schleifmittel) [1, 8, 106, 116, 153, 154, 203, 204, 211, 281, 301, 334, 337, 383, 422]. Oznacza to, że podjęcie badań w celu poszukiwania sposobów podniesienia efektywności szlifowania ściernicami z ziaren mikrokrystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ma głębokie uzasadnienie ekonomiczne i gospodarcze, ponieważ wpisuje się w światowe trendy rozwoju rynku ziaren i narzędzi ściernych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wieloletnich badań autora, dotyczących modyfikacji budowy ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i spoiwem ceramicznym. Celem tych badań było określenie wpływu różnych modyfikacji na warunki, przebieg i wyniki procesów szlifowania otworów. Poszukiwano możliwości zwiększenia stopnia wykorzystania potencjału skrawnego ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane oraz wiążącej się z tym efektywności szlifowania, z uwzględnieniem procesów zużycia składników czynnej powierzchni ściernicy (ziaren ściernicy i spoiwa). W pracy przedstawiono kompleksowe wyniki prac badawczych dotyczących pięciu zaproponowanych modyfikacji budowy ściernicy:

- strefowo zróżnicowanej budowy;
- modyfikacji mikrostruktury spoiwa ceramicznego;
- modyfikacji geometrii czynnej powierzchni ściernicy (CPS) poprzez kształtowanie jej mikronieciągłości;
- budowy składanej z systemem odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego (PCS);
- impregnacji ściernic pierwiastkami niemetalicznymi.

Opisano również rezultaty badań przeprowadzonych ściernicą, w której zintegrowano kilka modyfikacji. Uzyskane wyniki badań posłużyły do oceny efektywności procesów szlifowania otworów, prowadzonych z użyciem ściernic modyfikowanych. W końcowej części pracy przedstawiono przykład możliwości



monitorowania procesów szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi, z zastosowaniem systemu wyposażonego w bezstykowy czujnik emisji akustycznej.

Dodatkowym wynikiem przeprowadzonych analiz oraz badań doświadczalnych było opracowanie szeregu autorskich metod badawczych. Umożliwiły one autorowi przeprowadzenie kompleksowej i wielokryterialnej oceny przebiegu i efektów procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, realizowanych z zastosowaniem ściernic modyfikowanych.

Niniejsza praca daje podstawy do budowy ściernic modyfikowanych w zakresie pięciu rozpatrywanych rozwiązań konstrukcyjnych. Przedstawione wyniki badań wpływu parametrów szlifowania na wyniki obróbki pozwalają na wdrożenie takich ściernic i ich efektywną eksploatację w warunkach przemysłowych. Natomiast analiza efektywności pozwala na właściwy dobór modyfikacji do konkretnego zadania obróbkowego oraz kalkulację jego opłacalności.

# 1. Problemy występujące w procesach szlifowania otworów ściernicami z mikrokrystalicznym korundem spiekany i spoiwem ceramicznym

W niniejszym rozdziale przedstawiono charakterystykę ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane (podrozdział 1.1), począwszy od pierwszych ziaren korundu spiekane o wielkości kryształów rzędu 1-5  $\mu\text{m}$ , poprzez znane odmiany ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane, a na ziarnach o strukturze nanokrystalicznej skończywszy.

Zamieszczono również opis spoiw stosowanych w ściernicach z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane (podrozdział 1.2) oraz zidentyfikowano problemy związane ze stosowaniem ściernic z tymi ziarnami w procesach szlifowania otworów (podrozdział 1.3).

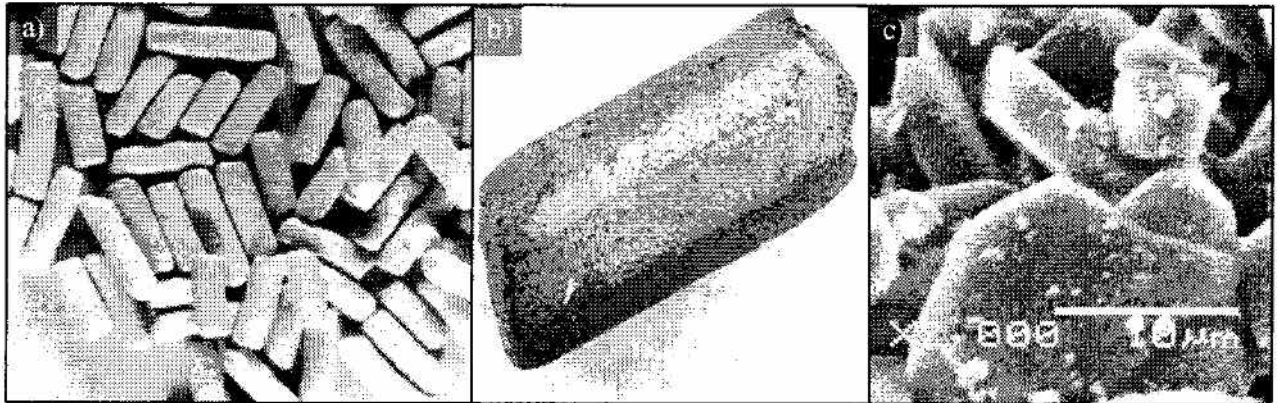
W końcowej części rozdziału (podrozdział 1.4) opisano możliwości poprawy warunków pracy ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane poprzez wprowadzenie modyfikacji budowy ściernicy. Przedstawiono znane modyfikacje ściernicy stosowane zarówno w procesach szlifowania otworów, jak i w innych odmianach kinematycznych szlifowania. Przedstawione problemy ujęcie zagadnień literaturowych z zakresu objętego tematem niniejszej pracy stanowiło podstawę do wytyczenia kierunków badań własnych autora.

## 1.1. Charakterystyka ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane

Mikrokrystaliczny korund spiekany jest jedną z odmian elektrokorundu (topionego tlenku glinu) – materiału ściernego zbudowanego z krystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (korundu) i niewielkiej ilości domieszek. Elektrokorund otrzymywany jest w procesie topienia boksytu lub tlenku glinu w piecach oporowo-lukowych [116, 154, 203, 204, 300, 334]. Ze względu na zawartość tlenków  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  czy  $\text{Na}_2\text{O}$  wyróżnia się elektrokorund zwykły, półszlachetny i szlachetny. Dodatkowo wytwarza się specjalne odmiany elektrokorundu, takie jak elektrokorund chromowy, tytanowy, cyrkonowy, monokorund oraz korund spiekany i sferyczny zwany również korundem pęcherzykowym (ang. *bubble corundum*) [116, 154, 203, 204, 300, 334].

### 1.1.1. Korund spiekany

Technologia wytwarzania korundu spiekane go opracowana została w 1963 roku przez firmę Norton [386]. Polega ona na zagęszczaniu zawiesiny drobnoziarnistego boksytu, granulacji do żądanej wielkości ziarna i spiekaniu w temperaturze 1600°C. Technologia ta daje możliwość formowania cylindrycznych, pryzmatycznych lub rurkowych pręcików spieczonych z krystalitów o wymiarach od 1 do 5  $\mu\text{m}$ . Na rysunku 1.1 przedstawiono widok cyrkonowego korundu spiekane go.



Rys. 1.1. Ścierniwo z cyrkonowego korundu spiekane go: a) widok ogólny – pow. 4 $\times$ ; b) ziarno ściernie w powiększeniu 40 $\times$ ; c) mikrostruktura ziarna ściernego – pow. 2000 $\times$  [284]

Fig. 1.1. Zirconium sintered corundum abrasives: a) overall view – mag. 4 $\times$ ; b) abrasive grain magnitude 40 $\times$ ; c) microstructure of the abrasive grain – mag. 2000 $\times$  [284]

Ziarna ściernie korundu spiekane go oznaczone zostały jako 76A, a ściernice z nich wytwarzane stosowane są głównie w procesach szlifowania zgrubnego i wysoko wydajnego w przemyśle hutniczym z prędkościami do 80 m/s [282, 300].

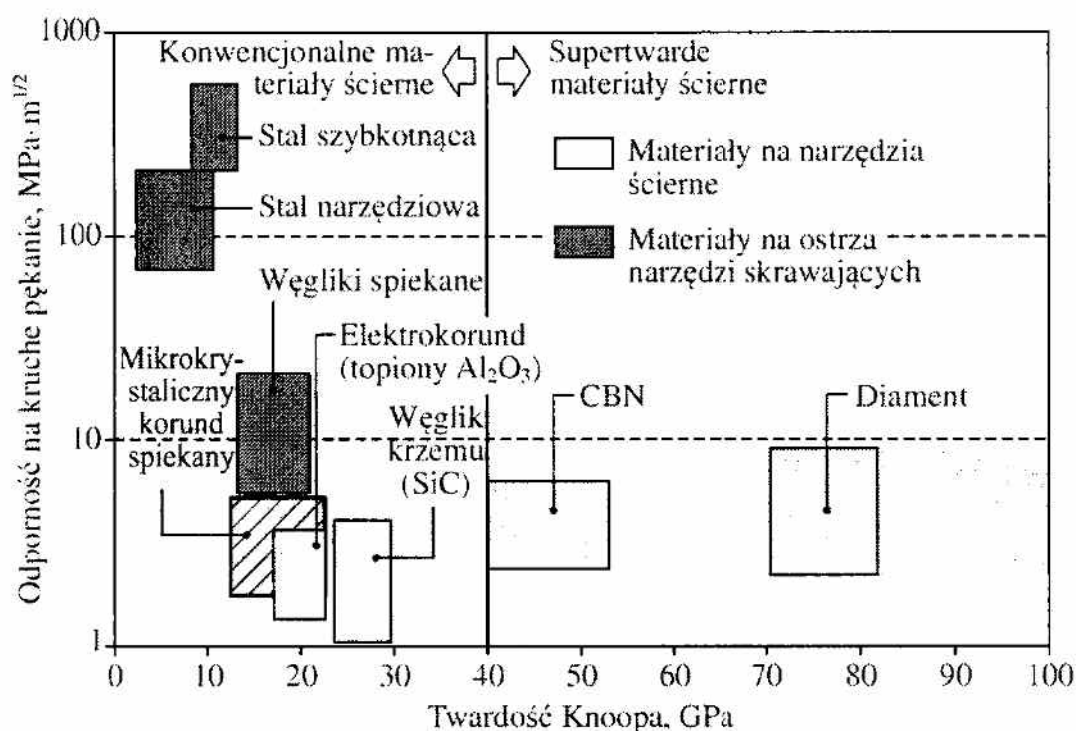
### 1.1.2. Mikrokrystaliczny korund spiekany

W latach osiemdziesiątych XX wieku trwały intensywne prace nad nową generacją korundu spiekane go, charakteryzującego się strukturą mikrokrystaliczną lub nawet submikrokrystaliczną. W 1981 roku firma 3M (Minnesota Mining & Manufacturing) opracowała ścierniwo z mikrokrystalicznego korundu spiekane go pod nazwą handlową Cubitron™, które zastosowano w ściernicach tarczowych. Był to chemicznie wytrącany i spiekany materiał, który charakteryzował się wielofazową strukturą kompozytową [11, 12, 188, 283, 359, 387]. Znaczenie tego typu materiału dla szlifowania ściernicowego zauważono jednak dopiero kilka lat później, po tym jak w 1986 roku firma

Norton opatentowała materiał ścierny nazwany SG<sup>TM</sup>. Był to mikrokrystaliczny korund spiekany wytwarzany technologią zol-żel (ang. *Sol-Gel*), spiekania submikroproszku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, znaną z procesów produkcji ceramiki specjalnej [42]. Kształt ziaren i ich proporcje mogły być kontrolowane przez wytłaczanie nawilżonej masy ceramicznej. Ziarna ściernie mikrokrystalicznego korundu spiekanego wytwarzane są również przez firmę Hermes Schleifmittel pod nazwą handlową Sapphire Blue<sup>TM</sup> [1, 8, 106, 116, 153, 154, 203, 204, 211, 281, 301, 334, 337, 383, 422].

### 1.1.3. Właściwości i zastosowanie ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego

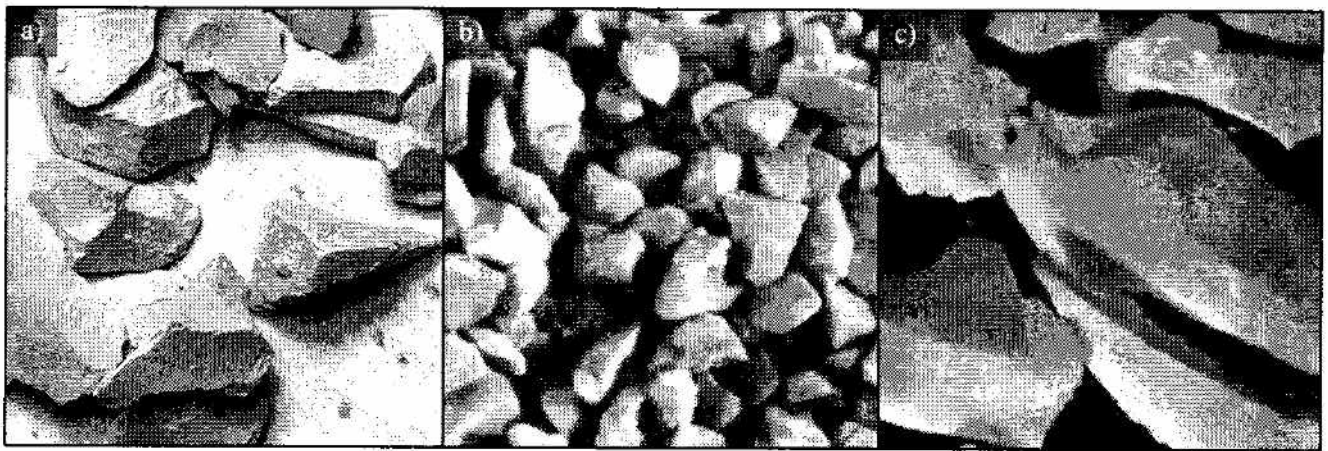
Na tle innych materiałów narzędziowych i ściernych mikrokrystaliczny korund spiekany charakteryzuje się porównywalną twardością i większą ciągliwością od ziaren topionego tlenku glinu, która przekłada się na większą odporność na kruche pękanie. Na rysunku 1.2 przedstawiono porównanie odporności na kruche pękanie i twardości materiałów ściernych oraz skrawających.



Rys. 1.2. Porównanie odporności na kruche pękanie (krytyczny współczynnik intensywności naprężeń) i twardości materiałów ściernych i skrawających [90]

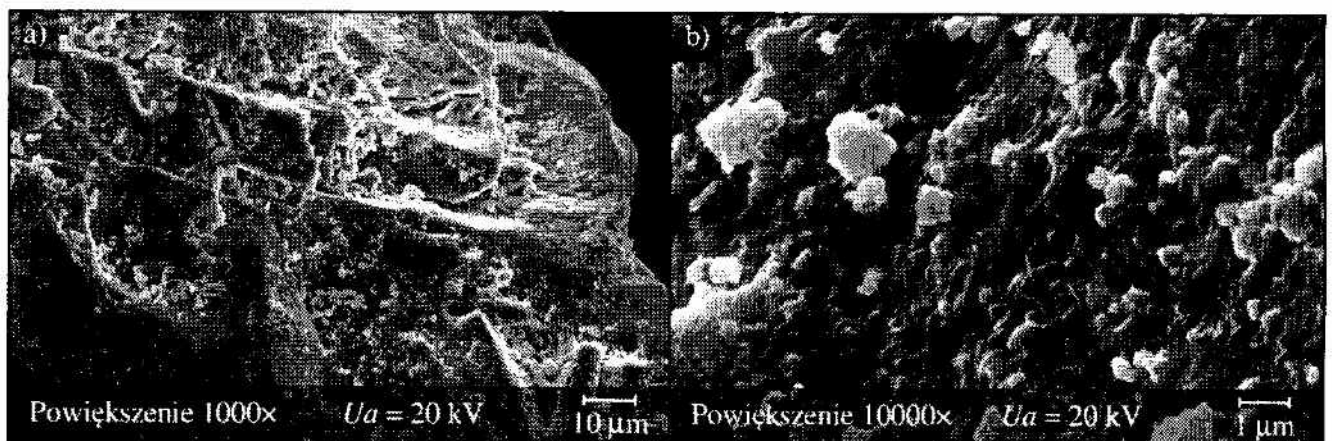
Fig. 1.2. Hardness and fracture toughness of abrasives and materials for cutting tools [90]

Kolejne rysunki przedstawiają widoki makroskopowe ziaren SG<sup>TM</sup>, Cubitron 321<sup>TM</sup> i Sapphire Blue<sup>TM</sup> (rys. 1.3) oraz obrazy SEM mikrostruktury ziarna SG<sup>TM</sup> produkowanego przez firmę Norton (rys. 1.4).



Rys. 1.3. Widok ziaren ściernych mikrokrystalicznego korundu spiekane: a) ziarna SG<sup>TM</sup> [269]; b) ziarna Cubitron 321<sup>TM</sup> [1]; c) ziarna Sapphire Blue<sup>TM</sup> [337]

Fig. 1.3. View of the microcrystalline sintered corundum grains: a) SG<sup>TM</sup> grains [269]; b) Cubitron 321<sup>TM</sup> [1]; c) Sapphire Blue<sup>TM</sup> grains [337]



Rys. 1.4. Widok mikroskopowy mikrostruktury ziaren SG<sup>TM</sup>: a) pow. 1000×; b) pow. 10000×

Fig. 1.4. Microscopic view of the SG<sup>TM</sup> grains microstructure: a) mag. 1000×; b) mag. 10000×

W porównaniu z elektrokorundem szlachetnym, ziarna spiekane tlenku glinu są o 10% twardsze (tab. 1.1). Ich kształt jest podobny do typowego, lecz charakteryzuje się większą jednorodnością kształtu i wymiarów. Ziarna składają się z dużej liczby drobnych krystalitów, połączonych cienką warstwą krystaliczną (rys. 1.4b) [90, 173, 293, 295].

Ponieważ ziarna konwencjonalnego elektrokorundu charakteryzują się polikrystaliczną strukturą z uprzywilejowanymi płaszczyznami krystalograficznymi, pod wpływem obciążeń obróbkowych pękają równoległe do tych

płaszczyzn (zgodnie z ustawieniem krystalograficznym). Proces taki powoduje każdorazową utratę znacznej części masy ziarna, czemu mogą sprzyjać dodatkowo defekty w ziarnie powodujące makroodłupywanie. Proces obciągania również prowadzi do stępienia czynnej powierzchni ściernicy poprzez spłaszczenie naroży ziaren. Dzieje się tak, ponieważ ziarna elektrokorundu najczęściej są pojedynczymi krystalitami [173, 295].

Tab. 1.1. Skład chemiczny i właściwości elektrokorundu szlachetnego, mikrokrystalicznego korundu spiekanego i regularnego azotku boru (CBN) [154, 295, 313, 334]

Tab. 1.1. Composition and properties of fused alumina, sol-gel sintered alumina and cubic boron nitride (CBN) abrasives [154, 295, 313, 334]

	Elektrokorund szlachetny 99A	Mikrokrystaliczny korund spiekany	CBN
Pełna nazwa	topiony tlenek glinu $Al_2O_3$	mikrokrystaliczny tlenek glinu $Al_2O_3$ spiekany metodą zol-żel	regularny azotek boru
Skład chemiczny	$Al_2O_3$ : 99.7% $SiO_2$ : 0.01% $Fe_2O_3$ : 0.02% $Na_2O$ : 0.16% $CaO+MgO$ : 0.02%	$Al_2O_3$ : 95-99% $MgO/Fe_2O_3$ : 0-5%	~43.6% B ~56.4% N
Wielkość kryształu	~10 $\mu m$	< 1 $\mu m$	od ~10 $\mu m$ (monokrystaliczny) do < 1 $\mu m$ (mikrokrystaliczny)
Kształt	spiczasty, ostry	spiczasty, bardzo ostry	blokowy (heksagonalny) lub nieregularny, bardzo ostry
Gęstość właściwa	3,96 g/cm <sup>3</sup>	3.87 g/cm <sup>3</sup>	3.48 g/cm <sup>3</sup>
Twardość Knoop HK	20,3 GPa	21,5 GPa	42-54 GPa
Ciągliwość	2.0 MPa·m <sup>1/2</sup>	3.7 MPa·m <sup>1/2</sup>	–
Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń $K_{Ic}$	2.7 MPa·m <sup>1/2</sup>	3.5-4.3 MPa·m <sup>1/2</sup>	3.7 MPa·m <sup>1/2</sup>
Współczynnik tarcia (stal hartowana)	0,34	0,19	0,19
Współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda$	27-35 W/m·K	27-35 W/m·K	240-1300 W/m·K

Ziarno korundu spiekanego wykazuje natomiast strukturę submikrokrystaliczną z cząstkami o wielkości 0,1-5  $\mu\text{m}$  [137] (najczęściej jednak  $< 1 \mu\text{m}$  [295]). Dla porównania: wielkości krystalitów korundu topionego leżą w obszarze wielkości ziaren nominalnych lub nieznacznie poniżej. Struktura taka przesądza o większej wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$  ziarna. Odpowiedni dobór parametrów szlifowania i obciążania ściernicy umożliwia wystąpienie zjawiska samoostrzenia ziaren ściernych, wywołanego wyłamywaniem z niego mikrocząstek, powodując tworzenie nowych ostrych naroży i krawędzi skrawających. W efekcie umożliwia to zmniejszenie zużycia ściernicy poprzez powstawanie większej liczby wierzchołków aktywnych na jej czynnej powierzchni [173, 206, 295, 301].

Odnosząc do elektrokorundu szlachetnego, narzędzia ścierne z mikrokrystalicznego korundu spiekanego posiadają większą trwałość i dłużej zachowują kształt, dzięki czemu czas pracy między kolejnymi obciążaniami można wydłużyć o 80%. W badaniach laboratoryjnych wykazano sumarycznie od 5 do 36 razy [121, 173], a w niektórych przypadkach nawet 70 razy większą [212] żywotność takich ściernic w porównaniu z elektrokorundem szlachetnym. Wydajność obróbki uzyskiwana ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jest znacznie większa (nawet 10-krotnie [212]).

W odniesieniu do CBN, mikrokrystaliczny  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jest do 30 razy tańszy i nie stawia aż tak wygórowanych wymagań szlifierkom. Kondycjonowanie (profilowanie, ostrzenie i czyszczenie) narzędzi ściernych z mikrokrystalicznego korundu spiekanego jest podobne jak w ściernicach konwencjonalnych. Podobne wymagania stawiane są również układom chłodzenia i smarowania. W celu pełnego wykorzystania możliwości narzędzi ściernych z mikrokrystalicznego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  większą uwagę należy poświęcić procesowi obciążania. Najkorzystniejsze rezultaty osiągnąć można z zastosowaniem obrotowych narzędzi obciążających. Nie wyklucza się także stacjonarnych narzędzi obciążających, przy czym preferowane jest stosowanie ziaren mikrokrystalicznego diamentu (MKD) [80, 277, 295].

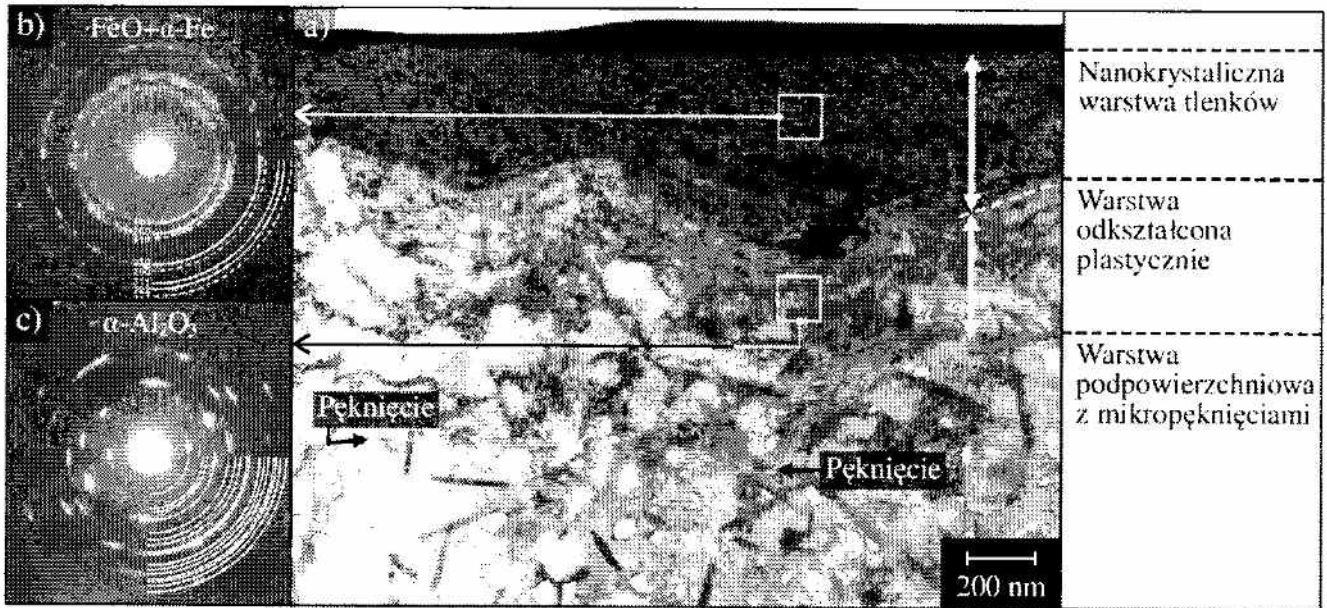
Narzędzia ścierne ze spiekanego tlenku glinu znajdują zastosowanie w procesach szlifowania stali narzędziowych, łożyskowych oraz stopów o wysokiej wytrzymałości (np. Inconel®) [173]. Ściernice te stosuje się do procesów szlifowania, w których wymagana jest precyzja obróbki z jednoczesnym dążeniem do optymalizacji produktywności i kosztów obróbki [287]. Do tej grupy procesów zalicza się między innymi szlifowanie powierzchniowe, walcowe czy nacinanie rowków wiórowych na narzędziach skrawających [104, 293]. Zastosowania tego materiału rozciągają się w zasadzie na wszelkie operacje szlifowania (na sucho, jak i z użyciem płynów chłodząco-smarujących) materiałów żelaznych i nieżelaznych o twardości 30-67 HRC [154, 173, 292].

#### 1.1.4. Warunki pracy i zjawiska zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego

Wydajność szlifowania narzędziami ściernymi z różnych materiałów ściernych jest w głównej mierze zależna od warunków, w jakich pracują ziarna oraz od dominujących procesów zużycia, w tym kompleksowego systemu zjawisk łączącego efekty wykruszania, deformacji plastycznych i reakcji chemicznych [157, 208]. Istniejące w ścierniwie mikropęknięcia rozwijają się w systemy pęknięć, gdy naprężenia osiągną wartości krytyczne, co w konsekwencji prowadzi do wykruszania mikrofragmentów ziaren [63]. Ziarna mikrokrystalicznego tlenku glinu mogą również zużywać się na skutek deformacji plastycznych, wynikających z poślizgu i bliźniakowania pojedynczych krystalitów [170, 362]. Dowiedziono również, że przy ograniczonej liczbie systemów poślizgu intensywność zużycia ziaren zależy w znacznym stopniu od orientacji kryształów [59]. Proces deformacji plastycznych polikrystalicznego korundu jest ściśle związany z wielkością kryształów i poziomem wywołanych naprężeń [36, 105]. Wraz ze zmniejszaniem się wielkości kryształów i ich obciążenia, proces deformacji ziaren zmienia się z dominującego poślizgu na dyfuzyjne pełzanie i poślizgi wzdłuż granic kryształów. Do niedawna nie były jednak dostatecznie znane procesy zużywania się ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego. Znane opisy prezentowały w większości przewagę mikrowykruszania kryształów ziaren i ich samoostrzenia poprzez odsłanianie dużej liczby nowych ostrych naroży. W większości prac pomijano jednak zależności pomiędzy wykruszaniem, odkształceniami plastycznymi, reakcjami chemicznymi i dyfuzją zachodzącymi na aktywnych wierzchołkach ziaren.

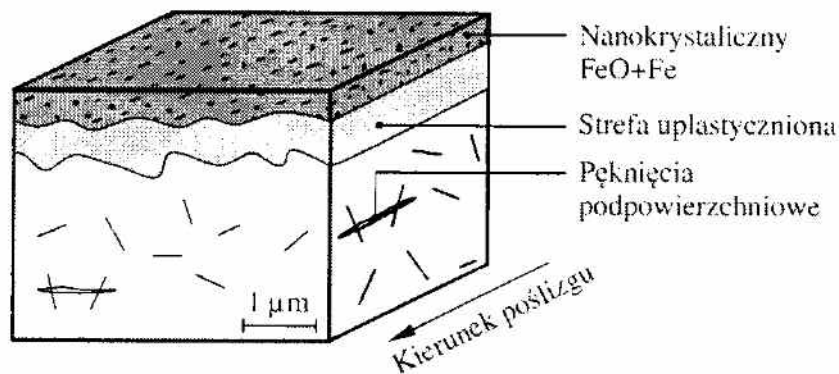
Dopiero prace [157, 208] w sposób szczegółowy i komplementarny przedstawiły procesy szlifowania i zużywania się ziaren  $Al_2O_3$  o strukturze mikrokrystalicznej. Wynika z nich, że doskonale właściwości skrawne tych ziaren są ściśle związane z właściwościami tribologicznymi wygładzonych powierzchni wierzchołków skrawających w strefie kontaktu z materiałem obrabianym. Pod wpływem obciążenia i temperatury wierzchołki ziaren ściernych mikrokrystalicznego korundu spiekanego ulegają deformacji plastycznej, tworząc płaskie powierzchnie kontaktu z materiałem obrabianym. Kontakt wierzchołka ziarna ściernego z materiałem obrabianym wywołuje rozpraszanie dużej energii i lokalne zwiększenie temperatury, która powoduje stopienie cienkiej warstwy powierzchniowej. Stop składa się z fazy o najniższej temperaturze topnienia, co w przypadku szlifowania stali 100Cr6 skutkuje utworzeniem tlenku żelaza FeO, jako fazy ciekłej o dużej lepkości (rys. 1.5 i 1.6). Znacząco obniża on zarówno zużycie, jak i współczynnik tarcia w strefie styku.





Rys. 1.5. Widok mikroskopowy TEM powierzchni przekroju ziarna ściernego mikrokrystalicznego korundu spiekanego (a) wraz ze wzorami dyfrakcyjnymi warstwy tlenków (b) i warstwy odkształconej plastycznie (c) [157, 208]

Fig. 1.5. TEM cross-section of microcrystalline sol-gel alumina surface (a) with diffraction patterns obtained from the oxide layer (b) and plastically deformed layer (c) [157, 208]

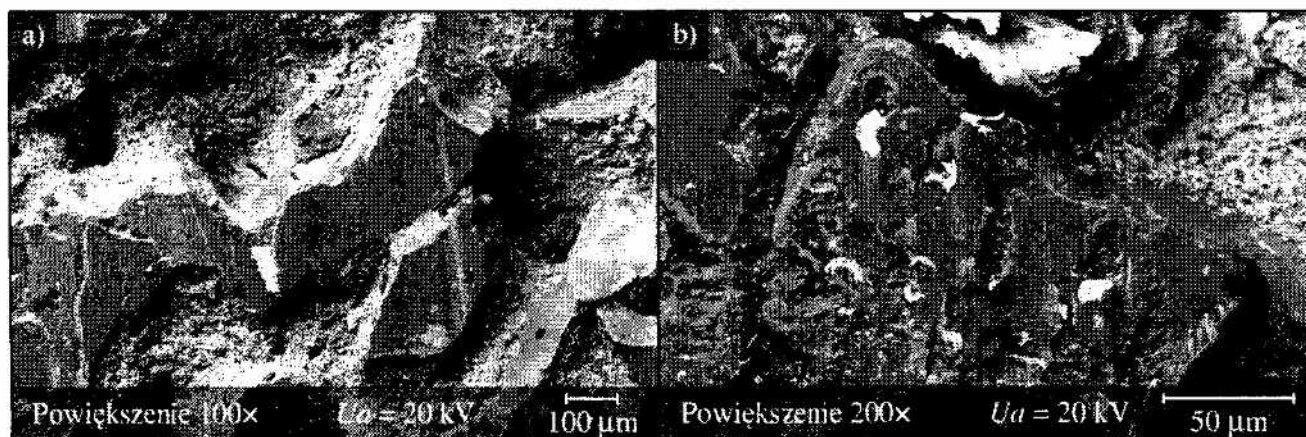


Rys. 1.6. Schematyczne przedstawienie struktury wygładzonej powierzchni ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego [157]

Fig. 1.6. Schematic illustration of structure of the smoothed surface of microcrystalline sol-gel alumina [157]

Katastroficzne wykruszanie większych fragmentów ziaren hamowane jest na granicach mikrokrystalicznych, przez co pęknięcia pozostają blisko powierzchni i nie propagują w głąb ziarna, jak to ma miejsce w przypadku ziaren polikrystalicznego Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Doskonałe właściwości skrawne ziaren mikrokrystalicznych mogą być dodatkowo wyjaśnione przez stabilne warunki poślizgu na płaskich powierzchniach ziaren utworzonych za krawędziami skrawającymi. W rezultacie, mikrokrystaliczny korund spiekany pozwala na zwiększenie wydajności szlifowania przy zmniejszonym zużyciu ziaren ściernych [157, 208].

Wyniki badań własnych autora niniejszej pracy potwierdzają taki model zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane (rys. 1.7).



Rys. 1.7. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane po procesie szlifowania węgłnego z oscylacjami otworów ze stali 100Cr6: a) wygładzone wierzchołki ziaren; b) złuszczenie odkształconej plastycznie warstwy wierzchniej ziarna

Fig. 1.7. SEM views of the grinding wheel active surface with microcrystalline sol-gel alumina grains after internal cylindrical plunge grinding with oscillations of 100Cr6 steel: a) smoothed grain vertexes; b) exfoliation of plastically deformed top layer of the grain

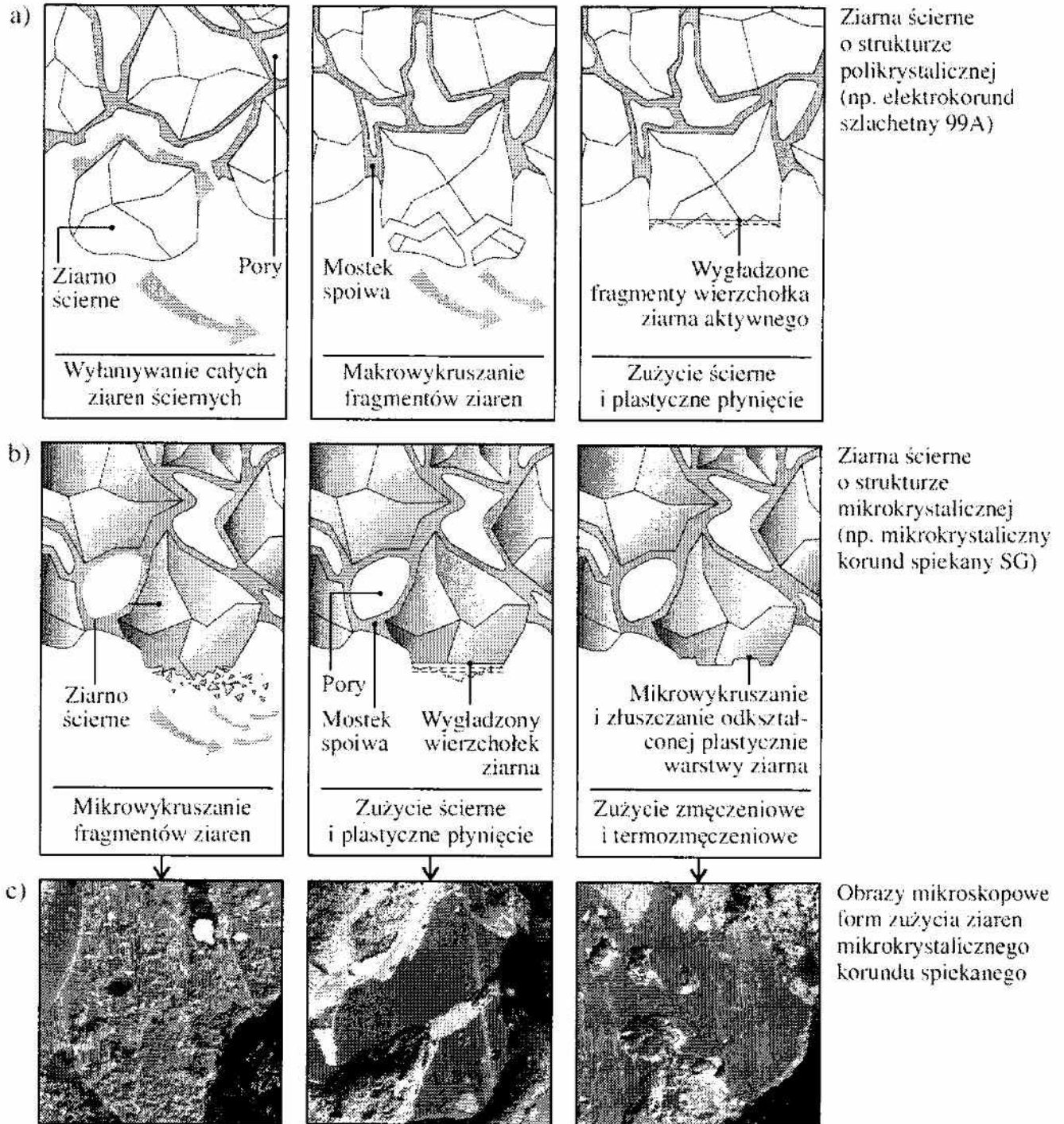
Przeprowadzone analizy wyników badań różnych odmian procesu szlifowania otworów wykazały, że dominującym zjawiskiem zużycia wierzchołków aktywnych mikrokrystalicznych ziaren ściernych jest tworzenie płaskich powierzchni na skutek ich plastycznego płynięcia (rys. 1.7a) [228]. Zjawisko to występowało powszechnie na czynnej powierzchni ściernicy i nie wpływało negatywnie na uzyskiwaną wydajność ubytkową szlifowania oraz jakość powierzchni obrobionej.

Zaobserwowano również, że okresowo na wygładzonych powierzchniach aktywnych wierzchołków skrawających dochodzi do zjawiska złuszczenia warstwy tlenków oraz odkształconej plastycznie warstwy ziarna. Proces ten wywołany jest zużyciem zmęczeniowym i termozmęczeniowym, w wyniku czego odsłaniane zostają ostre krawędzie kryształów znajdujących się poniżej odkształconej plastycznie warstwy wierzchniej (rys. 1.7b).

Podsumowując, można schematycznie porównać procesy zużywania się ziaren polikrystalicznego i mikrokrystalicznego tlenku glinu w sposób przedstawiony na rysunku 1.8.

W przypadku elektrokorundu o strukturze polikrystalicznej (np. elektrokorundu szlachetnego 99A), w zależności od obciążenia ziaren, może dojść do wyłamywania całych ziaren ściernych lub ich znacznych fragmentów, na skutek

łatwej propagacji pęknięć wzdłuż granic krystalograficznych kryształów o znacznych rozmiarach. Dochodzi również do wygładzania niewielkich fragmentów ziaren wywołanego plastycznym płynięciem w wysokich temperaturach (rys. 1.8a).



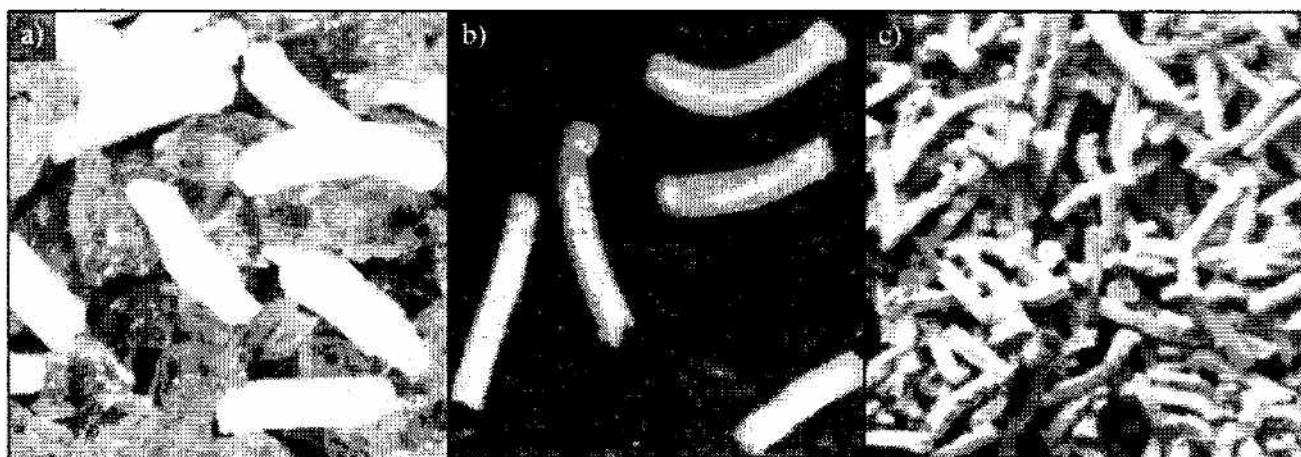
Rys. 1.8. Formy zużycia czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami polikrystalicznego (a) i mikrokrystalicznego (b, c) tlenku glinu (na podstawie rysunków Rappold Winterthur Group i materiałów własnych)

Fig. 1.8. Grain breakdown models in grinding wheels with polycrystalline (a) and microcrystalline (b, c) alumina abrasives (after drawings of Rappold Winterthur Group and author's own material)

W przypadku ziaren mikrokrystalicznych wykruszenia dotyczą najczęściej jedynie mikrokryształów, występuje również wygładzanie dużej powierzchni wierzchołków ziaren oraz okresowe złuszczenie warstwy powierzchniowej i odsłanianie ostrych krawędzi leżących niżej kryształów (rys. 1.8b). Potwierdzeniem tego typu procesów zużywania się ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego są obrazy mikroskopowe SEM, zarejestrowane na czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami SG<sup>TM</sup> po procesie szlifowania otworów w stali 100Cr6, zamieszczone na rysunku 1.8c.

### 1.1.5. Mikrokrystaliczny korund spiekany o wydłużonym kształcie

Kolejnym krokiem w rozwoju technologii szlifowania narzędziami ściernymi z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego było opracowanie odmian ziaren wytłaczanych i spiekanych charakteryzujących się wydłużonym kształtem. Za przykład mogą posłużyć zaprezentowane w 1993 roku [301] przez firmę Norton ścierniwo TG<sup>TM</sup>, charakteryzujące się proporcją długości do maksymalnego wymiaru poprzecznego rzędu 4:1 (rys. 1.9a) lub ziarna o proporcji 8:1 (rys. 1-9b) oznaczone symbolem TG2<sup>TM</sup> [285, 287, 323, 324].



Rys. 1-9. Widok ziaren ściernych mikrokrystalicznego korundu spiekanego o wydłużonym kształcie: a) ziarna TG<sup>TM</sup> o proporcjach wymiarów 4:1 zmieszane z ziarnami CrA; b) ziarna TG2<sup>TM</sup> o proporcji 8:1; c) struktura ściernicy Altos<sup>TM</sup> firmy Norton z ziarnami TG2<sup>TM</sup> [323, 324]

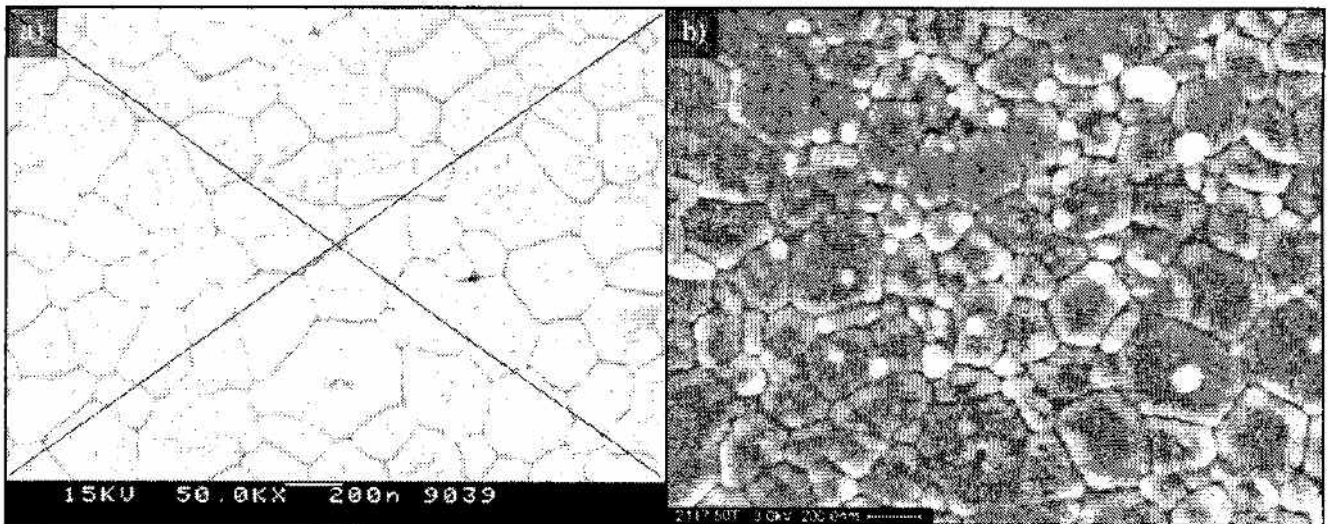
Fig. 1-9. View of the microcrystalline sintered corundum grains with elongate shape: a) TG<sup>TM</sup> grains with dimension proportion 4:1 mixed with CrA grains; b) TG2<sup>TM</sup> grains with shape proportion 8:1; c) Norton's Altos<sup>TM</sup> wheel structure with TG2<sup>TM</sup> grains [323, 324]

Ten sam koncern zaprezentował w 1995 roku [301] ścierniwo hybrydowe, stanowiące mieszaninę elektrokorundu chromowego (CrA) i spiekanego ziarna typu TG<sup>TM</sup>, pod handlową nazwą TGP<sup>TM</sup> [287]. Celem tworzenia materiałów ściernych tego typu było nadanie im szczególnych właściwości odpowia-

jących wymaganiom obróbki ścierniej z większą dokładnością i podwyższoną wydajnością usuwania materiału, przy polepszonej jakości powierzchni obrobionej [301]. Aby dodatkowo podwyższyć efektywność szlifowania ziarnami o wydłużonym kształcie, dąży się do ich regularnego rozmieszczenia i optymalnej, z uwagi na przyjęte kryteria, orientacji ziaren w objętości ściernicy [286]. Ziarna o wydłużonym kształcie pozwalają na tworzenie narzędzi o bardzo otwartej strukturze (rys. 1.9c), która ułatwia docieranie płynu chodząco-smarującego (PCS) do strefy szlifowania. W szczególnych zastosowaniach, np. przy szlifowaniu stopów trudno skrawalnych, takich jak Inconel<sup>®</sup> lub Rene<sup>®</sup>, twardość, kształt i zdolność do zapewnienia chłodzenia pozwalają na uzyskanie zdolności skrawnej przewyższającej o rząd wielkości ziarna CBN [116].

### 1.1.6. Nanokrystaliczny korund spiekany

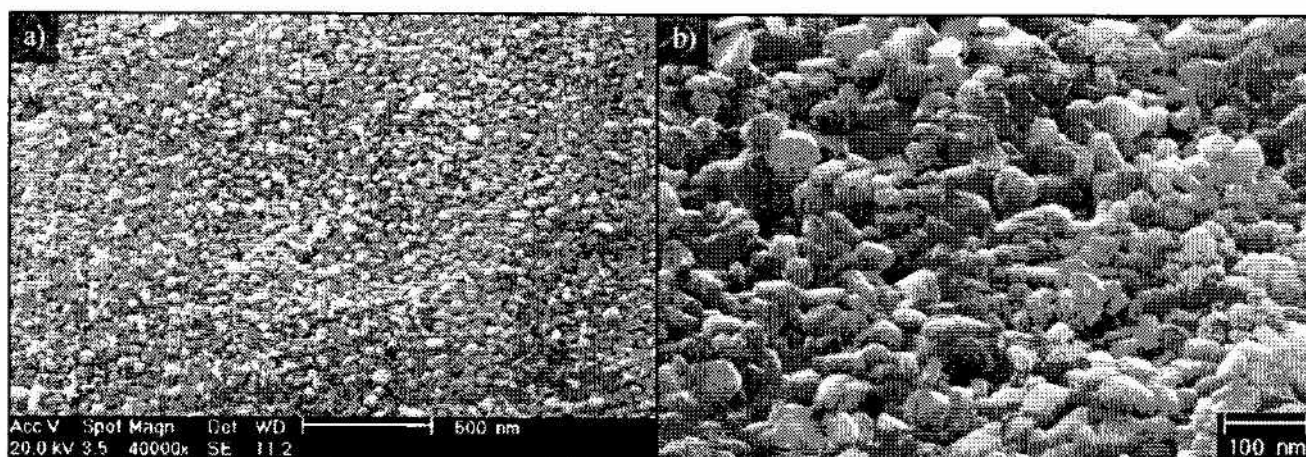
Rozwój ziaren mikrokryształicznego korundu spiekane go otrzymywanego technologią zol-żel zmierza w kierunku otrzymywania struktury o coraz mniejszej wielkości kryształów. W 2008 roku firma Norton wprowadziła do sprzedaży ściernice serii Quantum<sup>™</sup>, w których zastosowała ziarna mikrokryształicznego korundu spiekane go nowej generacji, oznaczone NQ<sup>™</sup> [163]. Ścierniwo to odznacza się zmniejszeniem wymiarów kryształitów, w porównaniu z ziarnami SG<sup>™</sup> (rys. 1.10). Nie są to jednak jeszcze wymiary kryształów, które można by określać w skali nano.



Rys. 1.10. Porównanie mikrostruktury ziaren korundu spiekane go typu SG<sup>™</sup> (a) oraz typu NQ<sup>™</sup> (b) stosowane go w ściernicach Quantum<sup>™</sup> firmy Norton [163]

Fig. 1.10. Comparison of microstructure of the sintered corundum grains type SG<sup>™</sup> (a) and type NQ<sup>™</sup> (b) which are used in the Quantum<sup>™</sup> grinding wheels by Norton [163]

Dopiero w 2008 roku pojawiły się pierwsze doniesienia dotyczące ziaren ściernych z nanokrystalicznego korundu spiekane o średniej wielkości kryształów poniżej 100 nm [180, 182, 184] (60 nm [183]), który wytwarzany jest metodą zol-żel z zastosowaniem techniki spiekania dwustopniowego w temperaturze 1150-1300°C [180, 182, 184]. Znaczące zahamowanie rozrostu ziaren osiągane jest poprzez sterowanie temperaturą spiekania i stosowanie związków wspomagających spiekanie, takich jak MgO–CaO–SiO<sub>2</sub>, w trakcie końcowego etapu procesu dwustopniowego spiekania. W efekcie tak prowadzonego procesu otrzymywany jest materiał o wysokiej gęstości (powyżej 99% gęstości teoretycznej), który charakteryzuje się wielkością kryształów około dziesięć razy mniejszą, niż to ma miejsce w przypadku konwencjonalnych procesów spiekania [184]. Mikrostruktura nanokrystalicznych ziaren korundu spiekanych tą metodą jest bardzo jednorodna i pozbawiona nadmiernie rozrośniętych kryształów, co przedstawione zostało na rysunku 1.11.



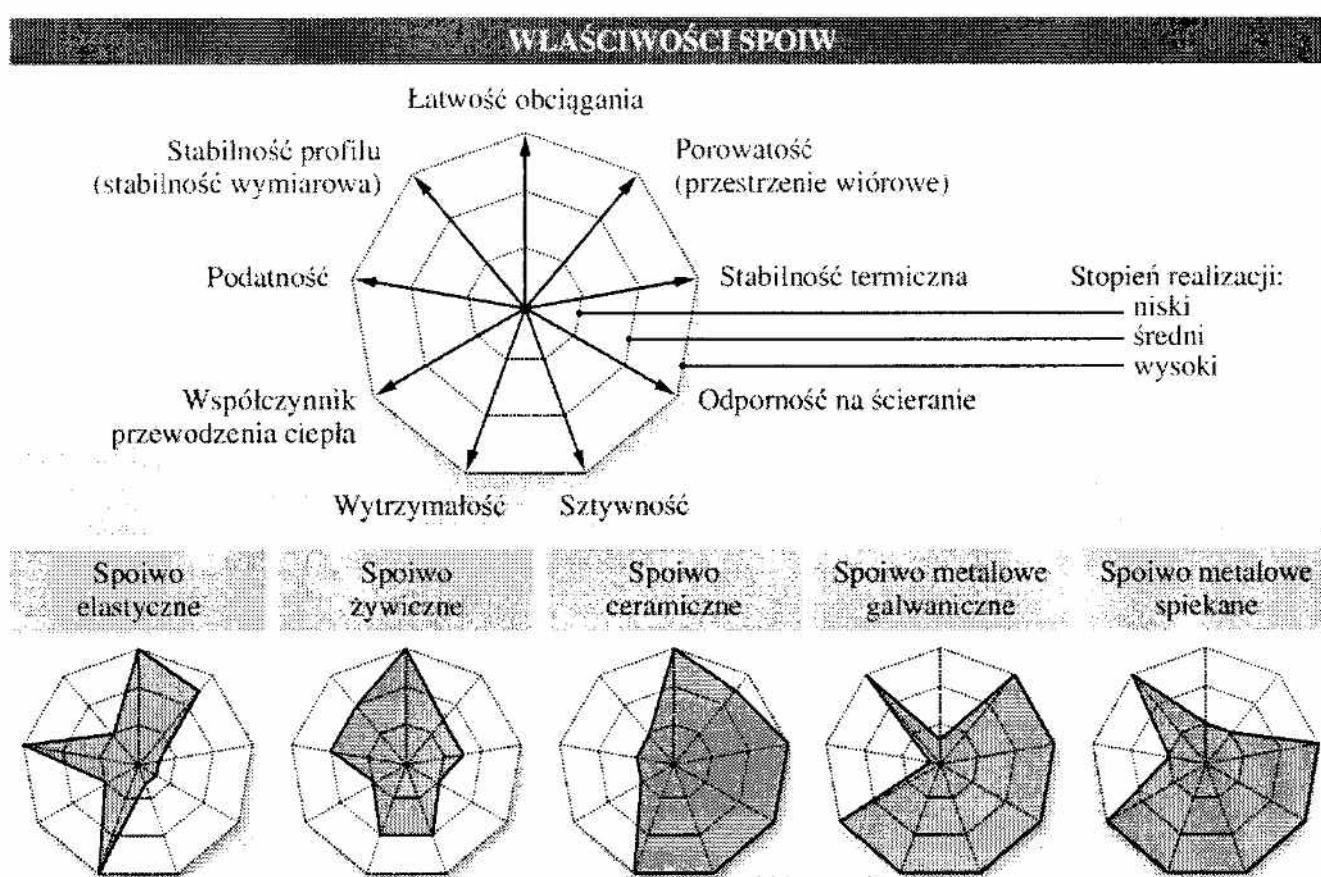
Rys. 1.11. Widoki mikroskopowe mikrostruktury nanokrystalicznego korundu spiekane: a) powiększenie: 40000× [182]; b) powiększenie: 125000× [184]

Fig. 1.11. Microscopic view of the nanocrystalline sintered corundum microstructure: magnification: 40000× [182]; b) magnification: 125000× [184]

Technologia otrzymywania ziaren tego typu jest nadal intensywnie rozwijana w kierunku uzyskiwania jak największej gęstości kryształów, zmniejszania ich rozmiaru oraz obniżania temperatury spiekania [185].

## 1.2. Spoiwa stosowane w ściernicach z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane

Podstawowym zadaniem spoiwa jest związanie ziaren ściernych w narzędziu ściernym. Cechy spoiwa mają zasadniczy wpływ na właściwości narzędzia i decydują o właściwym utrzymaniu ziaren ściernych, zapewnieniu dostatecznej porowatości w celu dostarczenia PCS i odprowadzenia produktów szlifowania ze strefy obróbki, zachowaniu dokładności kształtowej ściernicy oraz warunkują sposób jej obciążania. Na rysunku 1.12 przedstawiono porównanie najważniejszych właściwości spoiw najczęściej stosowanych w narzędziach ściernych spojonych.



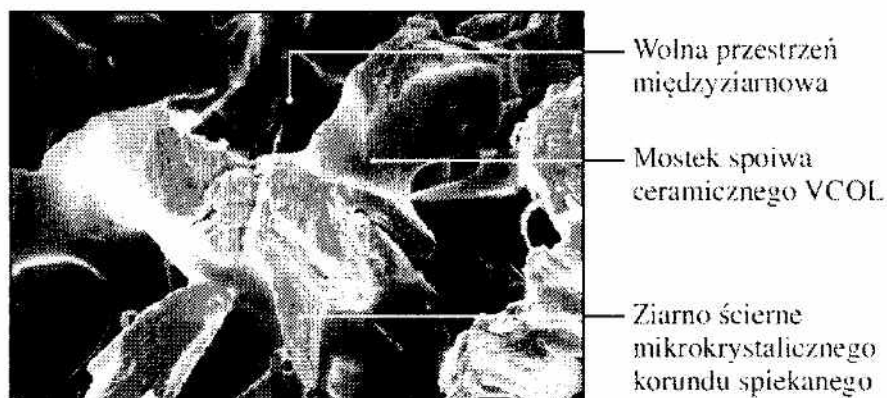
Rys. 1.12. Porównanie właściwości podstawowych typów spoiw stosowanych w narzędziach ściernych spojonych (opracowanie własne na podstawie [63, 116, 154, 203, 204, 299, 300, 334])

Fig. 1.12. Comparison of properties of the basic bond types applied in bonded abrasive tools (based on [63, 116, 154, 203, 204, 299, 300, 334])

Producenci ziaren ściernych mikrokrystalicznego korundu spiekane polecają stosowanie ich w połączeniu ze spoiwem ceramicznym lub żywicznym [1, 163, 296, 323, 324, 337]. W przypadku stosowania tego typu ziaren w procesach szlifowania otworów, poza wytrzymałością i zdolnością wiązania

ziaren, bardzo ważną rolę odgrywa możliwość tworzenia narzędzi o wysokiej stabilności termicznej i relatywnie dużych przestrzeniach międzyziarnowych. Takie cechy zapewnia jedynie spoiwo ceramiczne. Spoiwa te stosowane są obecnie w ponad 50% narzędzi ściernych wytwarzanych ze ścierniw konwencjonalnych [203]. Są to najczęściej szkła wytwarzane w procesach wysokotemperaturowego spiekania sproszkowanej fryty szklanej z dodatkiem topników.

Rozwój technologii spoiw ceramicznych stosowanych w ściernicach z mikrokryształicznego korundu spiekanego zmierza w kierunku stosowania tworzyw szklanokryształicznych w celu zapewnienia mikrowykruszania mostków spoiwa z intensywnością zbliżoną do intensywności zużywania się ziaren [93-95, 97, 98, 137]. Prowadzone są również prace zmierzające do zapewnienia jak najbardziej otwartej struktury ściernicy poprzez modyfikację spoiwa ceramicznego. Przykładem ściernic wielkoporowych, przeznaczonych do szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, są ściernice serii Columbia™ firmy Tyrolit, w których ziarna ściernie mikrokryształicznego korundu spiekanego spojone zostały specjalnym spoiwem VCOL (rys. 1.13) [415, 378].



Rys. 1.13. Fragment czynnej powierzchni wielkoporowej ściernicy Columbia™ z widocznymi ziarnami ściernymi i mostkami spoiwa [378]

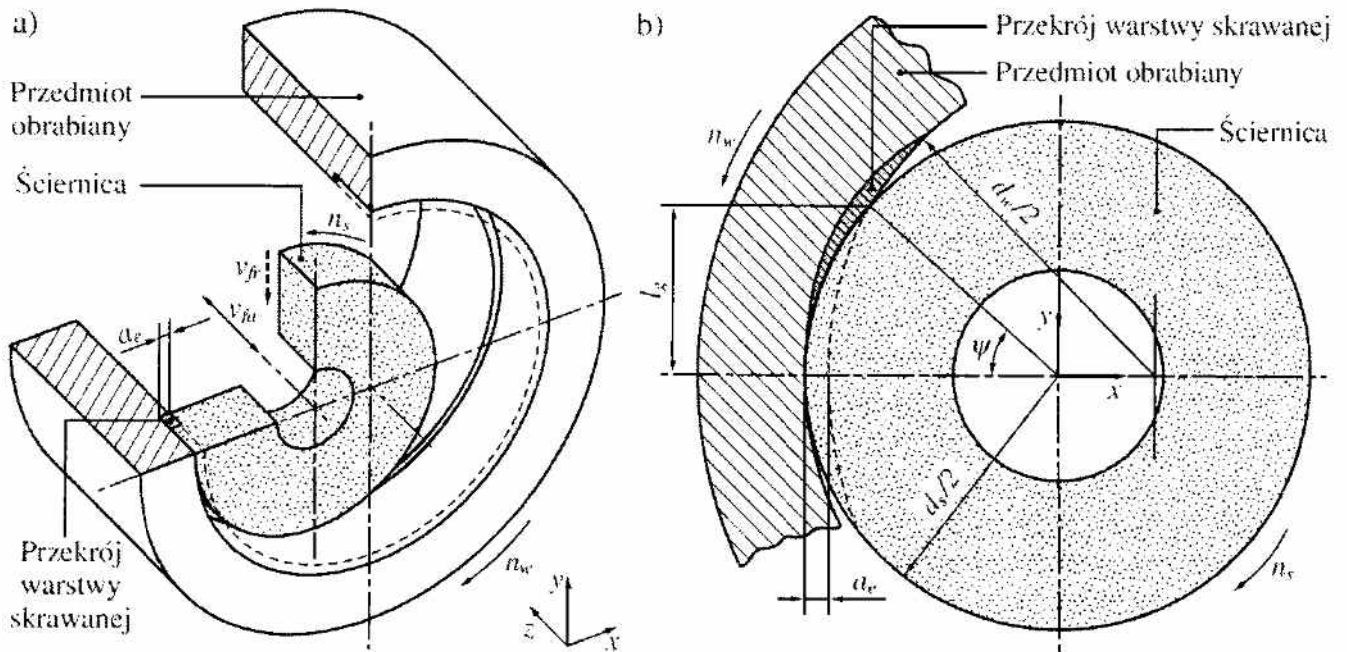
Fig. 1.13. Fragment of the multiporous grinding wheel Columbia™ active surface with visible abrasive grains and bond bridges [378]

W ofercie producentów ściernic z ziarnami mikrokryształicznego  $Al_2O_3$  znaleźć można również przykłady narzędzi ultrawielkoporowych. Należą do nich ściernice serii Altos™ wytwarzane przez firmę Norton na bazie ziaren TG™, w których całkowita porowatość wynosi od 65% do 70%, przy zawartości ścierniwa na poziomie 30% (rys. 1.9c). Mimo zaledwie kilkuprocentowego udziału spoiwa ceramicznego, ściernice te zachowują wysoką wytrzymałość, ponieważ spoiwo migruje i zostaje spieczone w punktach styku ziaren. Wysoka przepuszczalność takiej struktury pozwala na doprowadzenie dużej ilości PCS do strefy szlifowania.



### 1.3. Problemy w szlifowaniu otworów ściernicami z mikrokrystalicznego korundu spiekane go i spoiwem ceramicznym

W procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych występuje szereg problemów wynikających z jego kinematyki (rys. 1.14a). Największe utrudnienie stanowi bardzo długa strefa styku ściernicy z materiałem obrabianym, spowodowana często niewielką różnicą pomiędzy średnicą ściernicy i szlifowanego otworu (rys. 1.14b).



Rys. 1.14. Schemat kinematyki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych: a) schemat ogólny; b) geometryczna długość styku  $l_g$  ściernicy z powierzchnią obrabianą

Fig. 1.14. Kinematic scheme of the reciprocating internal cylindrical grinding process: a) overall scheme of the process; b) geometrical contact length of the grinding wheel with workpiece surface  $l_g$

Energia mechaniczna wprowadzana do procesu szlifowania, w wyniku ruchu względnego narzędzia i materiału obrabianego, jest w znacznej części zamieniana w ciepło [203]. Prowadzi to do znacznego wzrostu temperatury w strefie kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym, wywołanego tarciem i procesami deformacji, prowadzącymi do formowania wiórów i usuwania materiału. Długa droga kontaktu składników czynnej powierzchni ściernicy ze szlifowaną powierzchnią sprawia, że w procesie szlifowania otworów odprowadzenie ciepła ze strefy szlifowania stanowi jeden z najważniejszych czynników decydujących o skuteczności prowadzonej obróbki. Nadmierny wzrost temperatury w procesie szlifowania prowadzić może bowiem do powstawania

defektów powierzchni obrabianej, takich jak mikropęknięcia, przypalenia szlifierskie czy niekorzystne naprężenia warstwy wierzchniej. Ponadto rosnąca temperatura w strefie szlifowania wywołuje nadmierne zużycie składników ściernicy (ziaren ściernych i spoiwa). Oddziaływanie wysokiej temperatury prowadzi do uplastycznienia wierzchołków aktywnych ziaren ściernych. Może również powodować termiczne zużycie mostków spoiwa i przedwczesne wykruszanie ziaren ściernych z czynnej powierzchni ściernicy [116, 154, 204]. W skrajnych przypadkach, szybko zmieniający się gradient temperatury w narzędziu ściernym może wywołać nadmierne naprężenia cieplne, skutkujące drastycznym obniżeniem wytrzymałości całego narzędzia i jego rozerwaniem.

Długa droga styku sprzyja również powstawaniu zalepień CPS wiórami materiału obrabianego, szczególnie przy podwyższonej i wysokiej wydajności ubytkowej obróbki. Wynika to z utrudnionego transportu produktów szlifowania poza strefę szlifowania w przestrzeniach międzyziarnowych. Zalepienia, poza oczywistym zmniejszeniem zdolności skrawnej ściernicy, zwiększają udział tarcia i wpływają na wzrost temperatury w strefie kontaktu z powierzchnią obrabianą.

Dodatkowym problemem jest utrudnione doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego (PCS) do strefy szlifowania. Najczęściej stosowana metoda zalewowa nie zapewnia równomiernego podawania PCS, którego skuteczność zmniejsza się wraz z przesuwaniem się ściernicy w głąb otworu. Ze względu na niewielkie gabaryty ściernicy, w tego typu procesach nie ma możliwości stosowania bardziej zaawansowanych technik podawania PCS, np. ciśnieniowego lub za pomocą dyszy trzewikowej, tak jak ma to miejsce w procesach szlifowania powierzchni płaskich lub walcowych powierzchni zewnętrznych.

Wymienione wyżej czynniki powodują, że niezwykle istotnym zagadnieniem, z punktu widzenia technologii szlifowania otworów, jest projektowanie narzędzi ściernych w taki sposób, aby zapewnić:

- uzyskanie struktury wielkoporowej przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej wytrzymałości ściernicy;
- równomierne zużycie składników CPS (ziaren ściernych i spoiwa) zachodzące w mikroobjętościach;
- skuteczne doprowadzenie PCS do strefy szlifowania we wszystkich fazach procesu, w celu uzyskania dostatecznego smarowania i chłodzenia;
- efektywny transport wiórów i innych produktów szlifowania (pokruszonych ziaren i spoiwa) poza strefę obróbki w przestrzeniach międzyziarnowych;
- obniżanie adhezji wiórów do CPS, w celu ograniczenia lub wyeliminowania zjawiska zalepiania.

Przedstawione problemy, wynikające z kinematyki szlifowania otworów w połączeniu ze specyficznym procesem zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane (opisanym w podrozdziale 1.1.4), sprawiają, że nie zawsze możliwe jest pełne wykorzystanie potencjału skrawnego tych ziaren. W praktyce, producenci ściernic często przygotowują rozwiązania technologiczne dedykowane specjalnie procesowi szlifowania otworów (ściernice Columbia™ firmy Tyrolit) lub grupie procesów charakteryzujących się równie trudnymi warunkami (ściernice Altos™ firmy Norton). Nie są to jednak rozwiązania uniwersalne i opierają się przede wszystkim na modyfikacji struktury ściernicy.

#### **1.4. Możliwości poprawy warunków szlifowania otworów poprzez modyfikacje budowy ściernicy**

Na warunki w strefie szlifowania wpływ ma szereg czynników, począwszy od rodzaju, właściwości i stanu przedmiotu obrabianego, poprzez środowisko obróbki (rodzaj, wydatek i sposób doprowadzenia PCS), właściwości szlifierki (sztywność, drgania), parametry obróbki, sposób przygotowania CPS i jej stan przed obróbką, a na budowie ściernicy skończywszy. Wydaje się, że jednym z najskuteczniejszych, najbardziej uzasadnionych ekonomicznie sposobów poprawy efektywności szlifowania jest modyfikowanie budowy ściernicy. Modyfikacje takie najczęściej nie wymagają ingerowania w budowę szlifierki lub jej osprzętu, co sprawia, że są uniwersalne i mogą znaleźć szerokie zastosowanie.

W literaturze kierunkowej spotkać można szereg modyfikacji konstrukcji ściernic, które mają na celu zwiększenie szeroko rozumianej efektywności procesów szlifowania. Większość znanych modyfikacji dotyczy ściernic o dużych gabarytach, stosowanych w procesach szlifowania powierzchni płaskich, walcowych powierzchni zewnętrznych, szlifowania głębokiego lub kształtowego. Istnieje również niewielka grupa modyfikacji, które znalazły zastosowanie w ściernicach do szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Wydaje się jednak, że znacznie więcej ze znanych modyfikacji mogłoby na drodze badań zostać skutecznie zaimplementowanych również w ściernicach małogabarytowych przeznaczonych do szlifowania otworów.

W tabeli 1.2 przedstawiono charakterystykę znanych modyfikacji konstrukcji ściernic stosowanych w procesach szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

Tabela 1.2. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego stosowanych w procesach szlifowania otworów

Table 1.2. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are used in internal cylindrical grinding processes

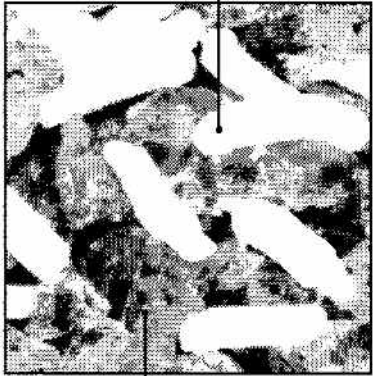
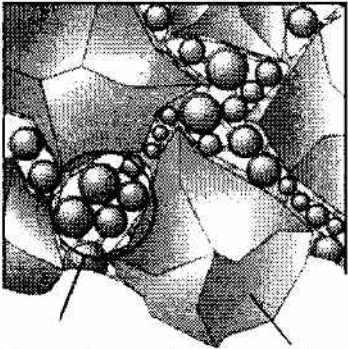
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
1.	<b>Ściernice z ziarnami mieszanymi</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki (SiC, korund topiony, korund żol-żel, CBN).</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> większość procesów.</p> <p><u>Opis:</u> ściernice z mieszaniną ziaren różnych typów stosowane są w celu wspomagania zalet drogich ziaren CBN lub korundu żol-żel poprzez wprowadzanie tańszych ziaren konwencjonalnych (99A, SiC, itp.).</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- obniżenie kosztów narzędzia;</li> <li>- obniżenie energii szlifowania;</li> <li>- zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianej.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- konieczność stosowania specjalnych spoiw zapewniających wiązanie różnych typów ziaren.</li> </ul>	<p>Mikrokryształiczny korund spiekany typu TGP™</p>  <p>Elektrokorund chromowy CrA</p>	[138, 203, 215, 296, 323, 324, 352, 358]
2.	<b>Ściernice z ziarnami korundu sferycznego</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie materiałów trudno skrawalnych, procesy szlifowania z długim stykiem ściernicy z materiałem obrabianym.</p> <p><u>Opis:</u> wprowadzenie mikroziaren korundu sferycznego do spoiwa umożliwia utworzenie sztucznej porowatości w obrębie mostków wiążących ziarna ściernic. W momencie destrukcji podczas obróbki tworzą one otwarte przestrzenie umożliwiające gromadzenie wiórów materiału obrabianego i produktów zużycia ściernicy.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zwiększenie porowatości CPS;</li> <li>- ograniczenie zalepiania CPS;</li> <li>- zredukowanie udziału spoiwa i jednocześnie zwiększenie obciążalności ściernicy.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nieznaczne zwiększenie kosztów ściernicy.</li> </ul>	 <p>Mieszanka spoiwa i mikrokryształicznego korundu sferycznego</p> <p>Ziarno ściernic</p>	[186, 296, 353, 354, 355, 356, 357, 409]

Tabela 1.2. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego stosowanych w procesach szlifowania otworów – *ciąg dalszy*

Table 1.2. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are used in internal cylindrical grinding processes – *continued*


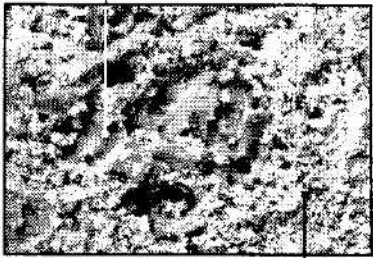
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
3.	<b>Ściernice wielkoporowe</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie materiałów trudno skrawalnych, procesy szlifowania z długim stykiem ściernicy z materiałem obrabianym.</p> <p><u>Opis:</u> modyfikacja spoiwa polegająca na jego wzmocnieniu i zredukowaniu udziału w ściernicy lub na dodaniu środków porotwórczych.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie porowatości ściernicy;</li> <li>– ograniczenie zalepiania CPS;</li> <li>– obniżenie temperatury szlifowania.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– nieznaczne zwiększenie kosztów ściernicy;</li> <li>– pogorszenie chropowatości powierzchni obrobionej.</li> </ul>	<p>Ziarno ściernic      Mostek spoiwa</p>  <p>Wolna przestrzeń międzyziarnowa</p>	[37, 44, 76, 146, 169, 291, 307, 360, 361, 378, 415]
4.	<b>Ściernice ze spoiwem szklanokryształicznym</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki, szczególnie przydatne w zastosowaniu z ziarnami mikrokryształicznymi.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> większość procesów.</p> <p><u>Opis:</u> wprowadzenie fazy krystalicznej w spoiwie ceramicznym poprzez odpowiednie dodatki do szkieł i właściwą obróbkę termiczną.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– mikrowykruszanie mostków spoiwa z intensywnością zbliżoną do intensywności zużywania się ziaren ściernych.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– nieznaczne zwiększenie kosztów ściernicy.</li> </ul>	<p>Amorficzna pozostałość szklista</p>  <p>Faza krystaliczna</p>	[9, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 102, 137, 171, 244, 304, 305, 306, 396, 397, 421]

Tabela 1.2. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego stosowanych w procesach szlifowania otworów – *ciąg dalszy*Table 1.2. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

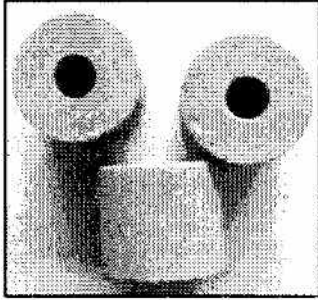
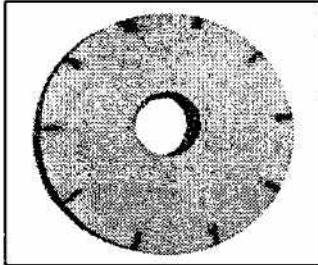
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
5.	<b>Ściernice z nakrojem stożkowym</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> CBN.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> jednoprzęściowe szlifowanie walcowych powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych.</p> <p><u>Opis:</u> nakrój stożkowy o niewielkim kącie kształtowany na czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu obciągania.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– rozłożenie całkowitego naddatku obróbkowego na większej powierzchni ściernicy;</li> <li>– możliwość prowadzenia szlifowania zgrubnego i wykończeniowego jednocześnie w jednym przejściu ściernicy;</li> <li>– zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania;</li> <li>– zachowanie żądanej jakości powierzchni obrabianej;</li> <li>– wydłużenie okresu trwałości.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– konieczność wykonania dodatkowego precyzyjnego zabiegu obciągania.</li> </ul>		[275, 297, 298, 406, 407]
6.	<b>Ściernice impregnowane</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie materiałów trudno skrawalnych, szlifowanie z długim stykiem ściernicy z materiałem obrabianym.</p> <p><u>Opis:</u> wprowadzanie do objętości ściernicy impregnatu (siarki, wosku, żywicy, grafitu) w procesach impregnowania.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zmniejszenie adhezji wiórów materiału obrabianego do CPS;</li> <li>– dodatkowy efekt smarowania;</li> <li>– wzmacnianie ściernic w celu zmniejszenia zużycia krawędziowego.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie kosztów ściernicy spowodowane impregnacją.</li> </ul>	<p>Ściernice impregnowane siarką</p>  <p>Ściernica impregnowana grafitem</p> 	[15, 39, 66, 78, 84, 115, 119, 122, 203, 290, 366, 372, 412]

Tabela 1.2. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego stosowanych w procesach szlifowania otworów – *ciąg dalszy*

Table 1.2. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
7.	<b>Ściernice z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie walcowych powierzchni wewnętrznych (przy zapewnieniu możliwości dostarczenia PCS przez wrzeciono szlifierskie), szlifowanie walcowych powierzchni zewnętrznych, powierzchni płaskich i kształtowych.</p> <p><u>Opis:</u> Znanych jest wiele różnych sposobów podawania PCS od wewnątrz ściernicy bezpośrednio do strefy szlifowania:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– przez pory ściernicy;</li> <li>– przez kanały w korpusie ściernicy i dalej przez pory ściernicy;</li> <li>– przez kanały w korpusie ściernicy w przestrzenie pomiędzy segmentami ściernymi i inne.</li> </ul> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– dużo skuteczniejsze docieranie PCS do strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym (wyeliminowanie defektów cieplnych powierzchni obrobionej);</li> <li>– zdecydowana poprawa chłodzenia i smarowania strefy szlifowania w porównaniu z metodą zalewową;</li> <li>– możliwość zmniejszenia wydatku PCS (aspekt ekonomiczny i ekologiczny).</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– konieczność stosowania specjalnych systemów podawania PCS;</li> <li>– w wielu przypadkach potrzeba stosowania nietypowej konstrukcji korpusu ściernicy;</li> <li>– przy braku możliwości podania PCS przez wrzeciono, bardzo utrudniona implementacja w procesach szlifowania otworów ze względu na małe gabaryty ściernic.</li> </ul>		[31, 77, 139, 141, 152, 155, 205, 209, 278, 279, 280, 294, 300, 332, 335, 368, 375, 401]

W tabeli 1.3 zamieszczono skrótowy opis najważniejszych cech tych znanych modyfikacji budowy ściernicy, które dotyczą ściernic do szlifowania obwodowego i nie są stosowane w szlifowaniu otworów.

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes

Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
1.	<b>Ściernice z ziarnami agregatowymi</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> większość procesów szlifowania.</p> <p><u>Opis:</u> ściernice o dużej otwartości struktury, spójne ze wstępnie uformowanych agregatów ziaren ściernych.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie zużycia ściernicy;</li> <li>- zmniejszenie drgań;</li> <li>- zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zwiększenie kosztów ściernicy wynikających z bardziej złożonej technologii wytwarzania.</li> </ul>		[25, 26, 120, 125, 404]
2.	<b>Ściernice warstwowe</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> elektrokorund.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie kompletne (jednoprzejściowe) walcowych powierzchni zewnętrznych, powierzchni płaskich i kształtowych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernice zbudowane z warstw różniących się wielkością ziaren ściernych. Możliwe jest również zróżnicowanie struktury i twardości poszczególnych stref. Rozmiar ziaren maleje w kierunku posuwu wzdłużnego ściernicy.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie sił szlifowania;</li> <li>- zwiększenie wydajności;</li> <li>- wydłużenie okresu trwałości ściernicy;</li> <li>- zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianej.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zwiększenie kosztów ściernicy spowodowane budową warstwową.</li> </ul>		[46, 48, 144, 275, 287]



Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

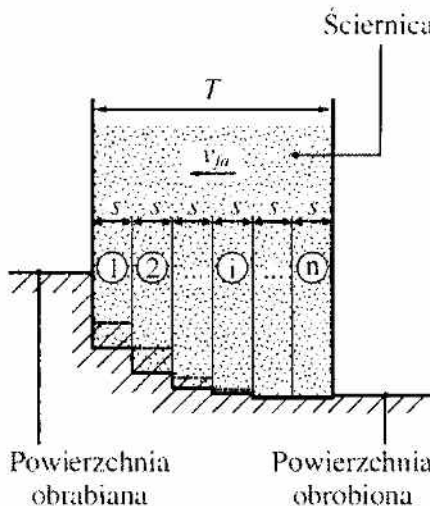
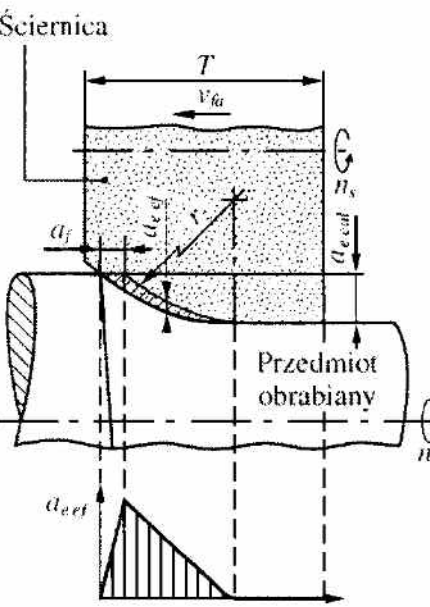
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
3.	<b>Ściernice ze strefami o różnej średnicy</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> elektrokorund.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie kompletne (jednoprzejsiowe) z dużymi nadatkami walcowych powierzchni zewnętrznych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernice ze strefami o różnej średnicy, dobranymi w taki sposób, aby równomiernie rozłożyć nadatek obróbkowy.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie sił szlifowania;</li> <li>- wydłużenie okresu trwałości ściernicy;</li> <li>- zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania;</li> <li>- zwiększenie jakości powierzchni obrabianej.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- konieczność odpowiedniego ukształtowania makrogeometrii ściernicy w zależności od całkowitego nadatku obróbkowego.</li> </ul>		[19, 91, 217, 287, 339, 405]
4.	<b>Ściernice z promieniową strefą szlifowania zgrubnego</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> elektrokorund.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> jednoprzejsiowe szlifowanie walcowych powierzchni zewnętrznych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica z promieniowym zarysem strefy szlifowania zgrubnego ukształtowanym w zabiegu obciągania.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rozłożenie warstwy skrawanej na większej powierzchni ściernicy;</li> <li>- wydłużenie okresu trwałości;</li> <li>- zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania;</li> <li>- zmniejszenie chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- konieczność wykonania dodatkowego precyzyjnego zabiegu obciągania.</li> </ul>		[275]

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

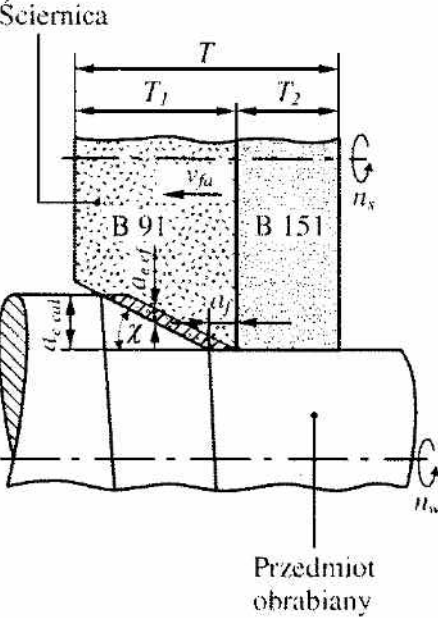
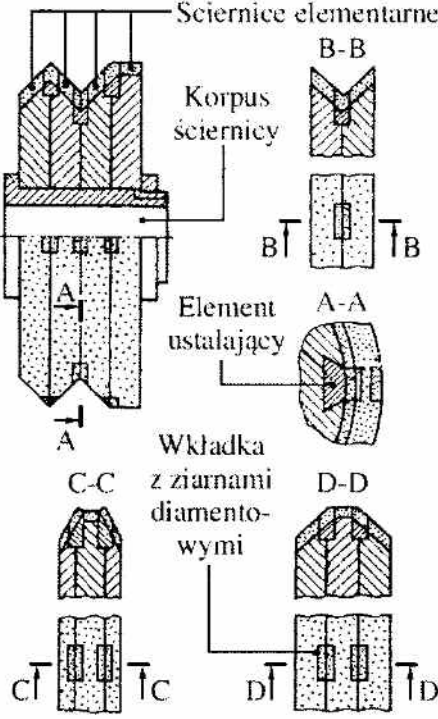
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
5.	<b>Ściernice o strefowo zróżnicowanej budowie</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> CBN.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> jednoprzęściowe szlifowanie walcowych powierzchni zewnętrznych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica z nakrojem stożkowym oraz dwoma strefami różniącymi się wielkością ziaren.</p> <p>Budowa pierwszej strefy (w kierunku posuwu osiowego) zoptymalizowana jest pod kątem szlifowania zgrubnego, a drugiej – szlifowania wykończeniowego.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania, przy jednoczesnym zachowaniu jakości powierzchni po szlifowaniu;</li> <li>– wydłużenie okresu trwałości.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– konieczność wykonania dodatkowego precyzyjnego zabiegu obciągania;</li> <li>– zwiększenie kosztów ściernicy spowodowane budową warstwową.</li> </ul>		[88, 154, 159]
6.	<b>Ściernice składane</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie powierzchni kształtowych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica składana osiowo z kilku elementów (ściernic elementarnych). Na płaszczyznach podziału wprowadzono wkładki wykonane z supertwardych ziaren ściernych (np. diamentu).</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– możliwość zmiany kształtu zarysu osiowego CPS;</li> <li>– zwiększenie dokładności obróbki poprzez zastosowanie wkładek z ziaren supertwardych;</li> <li>– wydłużenie okresu trwałości ściernicy.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie kosztów ściernicy spowodowane budową składaną.</li> </ul>		[34, 81]

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
7.	<p><b>Ściernice z makronieciągłościami czynnej powierzchni</b></p>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.  <u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie walcowych powierzchni zewnętrznych, powierzchni płaskich oraz kształtowych; szlifowanie materiałów trudno skrawalnych.  <u>Opis:</u> ściernica z lokalnymi wybraniami, przesunięciami powierzchniowymi i uskokami kształtowanymi w operacjach skrawania, wygniatania, wykruszania lub w procesie formowania na etapie wytwarzania.  <u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zwiększenie efektu chłodzącego w strefie szlifowania;</li> <li>- ograniczenie uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej;</li> <li>- ograniczenie zjawiska zalepiania CPS;</li> <li>- wydłużenie okresu trwałości ściernicy.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zakończenia nieciągłości w trakcie pracy mogą wpływać na powstawanie drgań;</li> <li>- zmniejszona powierzchnia czynna ściernicy i mniejsza liczba ziaren aktywnych, co powoduje ich większe obciążenie;</li> <li>- zwiększenie kosztów ściernicy wynikające z dodatkowej operacji kształtowania nieciągłości;</li> <li>- możliwe zwiększenie chropowatości powierzchni obrabianej.</li> </ul>	<p>Schemat ideowy</p>	<p>[140, 149, 175, 179, 194, 195, 196, 278, 280, 350,]</p>

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

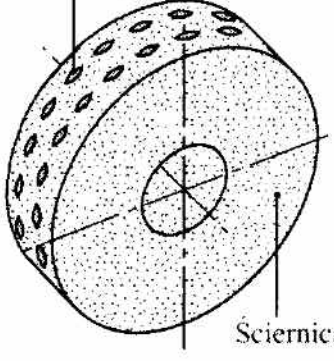
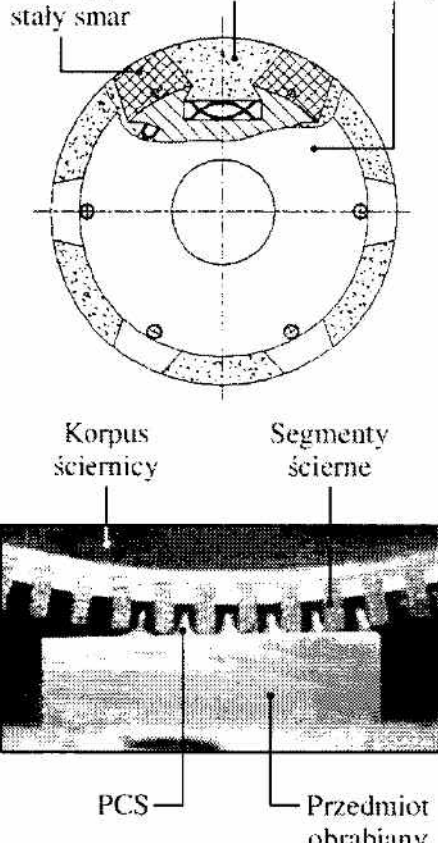
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
8.	<b>Ściernice z mikronieciągłościami czynnej powierzchni</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie walcowych powierzchni zewnętrznych i powierzchni płaskich.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica z lokalnymi nieciągłościami w strukturze powierzchniowej ukształtowanymi w zabiegu obciągania.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– obniżenie energii cieplno-mechanicznej w strefie szlifowania;</li> <li>– lepsze odprowadzenie ciepła i produktów szlifowania;</li> <li>– bardziej wydajne doprowadzenie PCS do strefy szlifowania.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– konieczność wykonania dodatkowego precyzyjnego zabiegu obciągania.</li> </ul>	<p>Mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy</p> 	[315, 319, 320]
9.	<b>Ściernice segmentowe</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie walcowych powierzchni wewnętrznych (wielkogabarytowych) i zewnętrznych, powierzchni płaskich oraz kształtowych.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica zbudowana z segmentów ściernych rozmieszczonych w różnych konfiguracjach na jej obwodzie.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– możliwość uzyskania nieciągłości CPS;</li> <li>– możliwość doprowadzenia PCS do strefy szlifowania pomiędzy segmentami ściernymi;</li> <li>– możliwość wprowadzania segmentów ze smarem stałym;</li> <li>– zwiększenie dokładności obróbki;</li> <li>– zwiększenie wydajności ubytkowej szlifowania;</li> <li>– wydłużenie okresu trwałości ściernicy.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie kosztów ściernicy spowodowane budową segmentową.</li> </ul>	<p>Elementy zawierające stały smar    Segmenty ściernic    Korpus ściernicy</p>  <p>Korpus ściernicy    Segmenty ściernic</p> <p>PCS    Przedmiot obrabiany</p>	[22, 23, 151, 164, 174, 278, 279, 280, 322, 413]

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

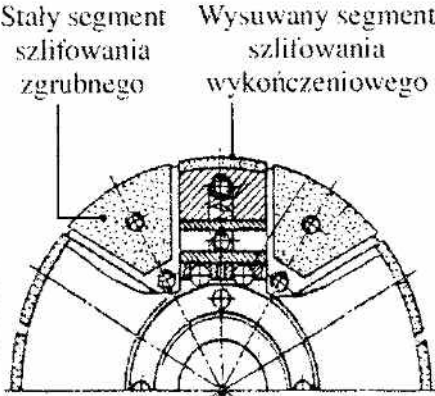
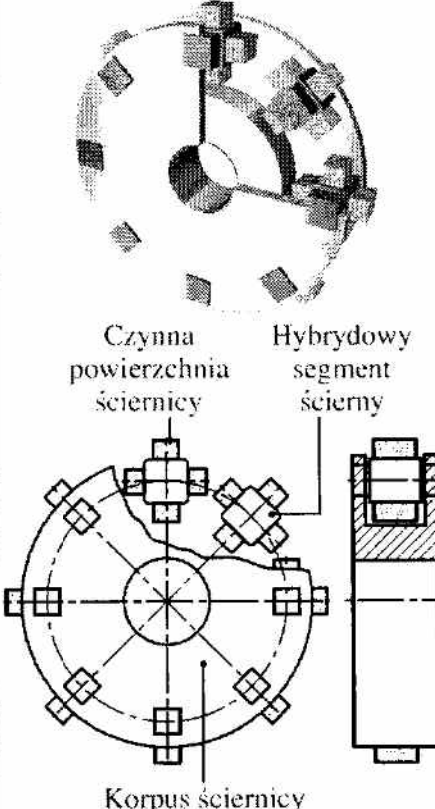
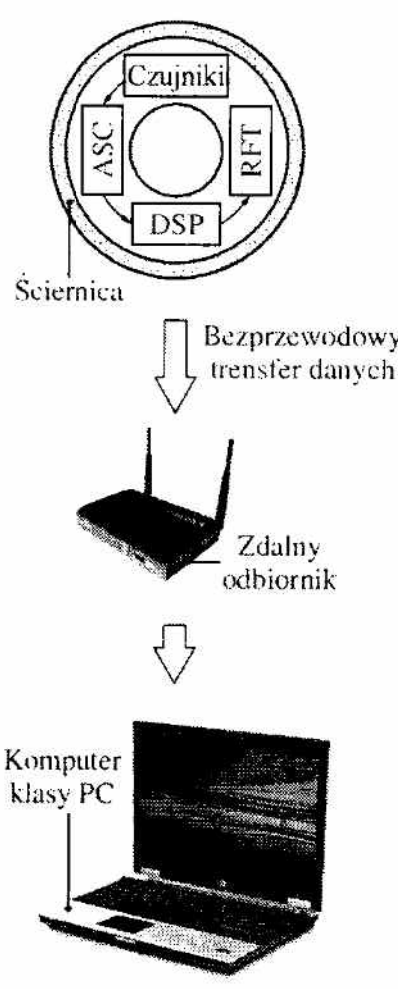
Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
10.	<b>Ściernice z wysuwanymi segmentami szlifowania wykończeniowego</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> elektrokorund.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych i płaskich.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica segmentowa z zamocowanymi na stałe segmentami szlifowania zgrubnego i wysuwanymi w kierunku promieniowym segmentami szlifowania wykończeniowego.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– szlifowanie zgrubne i wykończeniowe w jednym zamocowaniu;</li> <li>– możliwość zróżnicowania charakterystyki segmentów ściernych do szlifowania zgrubnego i wykończeniowego.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– duży stopień skomplikowania i koszty ściernicy;</li> <li>– trudne do zastosowania w przypadku ściernic małogabarytowych.</li> </ul>		[147]
11.	<b>Ściernice segmentowe hybrydowe</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> różne gatunki.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych (wielkogabarytowych) oraz powierzchni płaskich.</p> <p><u>Opis:</u> hybrydowa ściernica segmentowa zbudowana z zamocowanych w korpusie obracanych segmentów z elementarnymi segmentami ściernymi.</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– szlifowanie zgrubne i wykończeniowe w jednym zamocowaniu;</li> <li>– możliwość szlifowania materiałów o różnych właściwościach (np. stal, tworzywa sztuczne, ceramika);</li> <li>– możliwość jedno- lub wielozabiegowej obróbki kształtowej.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– duży stopień skomplikowania i koszty ściernicy.</li> </ul>		[316]

Tabela 1.3. Charakterystyka znanych modyfikacji ściernic do szlifowania obwodowego, które nie są stosowane w procesach szlifowania otworów – *cd.*

Table 1.3. Characteristics of known modifications of the grinding wheels for peripheral grinding processes, which are not used in internal cylindrical grinding processes – *continued*

Lp.	Nazwa modyfikacji	Charakterystyka modyfikacji	Schemat ideowy	Źródła
12.	<b>Ściernice „inteligentne”</b>	<p><u>Ziarna ściernic:</u> diament, CBN.</p> <p><u>Proces szlifowania:</u> szlifowanie wgłębne, szlifowanie z posuwem pełzającym (ang. <i>creep-feed</i>), szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych i płaskich.</p> <p><u>Opis:</u> ściernica „inteligentna”, charakteryzująca się zintegrowanymi czujnikami sił, emisji akustycznej lub temperatury.</p> <p><u>Oznaczenia na rysunku:</u>            ASC – wzmacniacz sygnału analogowego (ang. <i>analog signal conditioner</i>);            DSP – przetwornik sygnału cyfrowego (ang. <i>digital signal processor</i>);            RTF – nadajnik częstotliwości radiowej (ang. <i>radio frequency transmitter</i>).</p> <p><u>Zalety:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– monitorowanie procesu szlifowania w czasie rzeczywistym z użyciem systemu czujników zintegrowanych w ściernicy;</li> <li>– duża przydatność w badaniach procesu szlifowania.</li> </ul> <p><u>Wady:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– duży stopień skomplikowania i koszty systemu;</li> <li>– trudne do zastosowania w przypadku ściernic małogabarytowych.</li> </ul>	<p>Schemat ideowy przedstawia strukturę i sposób działania ściernicy „inteligentnej”. W górnej części znajduje się okrągła ściernica z czterema zintegrowanymi czujnikami: ASC (wzmacniacz sygnału analogowego), DSP (przetwornik sygnału cyfrowego), RTF (nadajnik częstotliwości radiowej) oraz Czujniki. Poniżej ściernicy znajduje się strzałka z napisem „Bezprzewodowy transfer danych”, która wskazuje na zdalny odbiornik (router bezprzewodowy). Poniżej odbiornika znajduje się strzałka, która wskazuje na komputer klasy PC (laptop).</p> 	[2, 24, 29, 30, 142, 207, 210, 308, 381, 389, 390, 391, 394]

W tabelach 1.2 i 1.3 zebrano ogółem 19 najważniejszych i najczęściej spotykanych w literaturze przykładów modyfikacji budowy ściernicy. Należy podkreślić, że nie jest to lista skończona. Niektóre z przedstawionych rozwiązań opracowano dziesiątki lat temu (np. impregnacja ściernic oraz makronieciągłości CPS), inne stanowią najnowsze trendy prac badawczych nad spojonymi narzędziami ściernymi (np. modyfikacje mikrostruktury spoiw ceramicznych).

Z przedstawionego w tabeli 1.3 zbioru znanych modyfikacji znaczna część potencjalnie może wpłynąć na poprawę warunków realizacji procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Są to w szczególności modyfikacje polegające na strefowym zróżnicowaniu budowy:

- ściernice warstwowe;
- ściernice ze strefami o różnej średnicy;
- ściernice składane

oraz na modyfikacji kształtu CPS:

- ściernice z promieniową strefą szlifowania zgrubnego;
- ściernice z mikronieciągłościami CPS.

Pozostałe modyfikacje, w tym głównie różne odmiany ściernic segmentowych, mimo niewątpliwych zalet, są trudne do wprowadzenia w ściernicach małogabarytowych używanych w szlifowaniu otworów lub ich stosowanie wydaje się nieuzasadnione ekonomicznie.

## 1.5. Podsumowanie i wnioski

Jak wykazała charakterystyka ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego (podrozdział 1.1), ziarna te odznaczają się korzystniejszymi właściwościami w porównaniu z ziarnami elektrokorundowymi, i mimo wyższej ceny wynikającej z bardziej energochłonnego i skomplikowanego procesu wytwarzania, są coraz szerzej stosowane. Jednak prognozy dotyczące upowszechnienia tego typu ziaren, sformułowane jeszcze kilka lat temu, nie sprawdziły się. W głównej mierze wynika to ze specyficznego procesu zużywania się ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego. Dominującym zjawiskiem zachodzącym w strefie styku wierzchołków aktywnych ziaren z materiałem obrabianym nie jest, jak dotąd sądzono, wykruszanie mikrokryształów i ciągle samoostrzenie, ale deformacja plastyczna i wygładzanie wierzchołków. Specyficzne właściwości tribologiczne cienkiej warstwy tlenków tworzących się na wygładzonej powierzchni ziarna sprawiają, że znacząco obniżają one zarówno zużycie, jak i współczynnik tarcia w strefie styku. Jak wykazały prace autora, okresowo dochodzi do złuszczenia uplastycznionej warstwy wierzchniej i odsłaniania ostrych naroży mikrokryształów. Taki proces zużycia sprawia, że nie w każdych warunkach można w pełni wykorzystać potencjał skrawny ziaren mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$ . Należy przypuszczać, że właśnie trudności z uzyskaniem zakładanego wzrostu efektywności szlifowania sprawiają, że ściernice z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego nie są powszechnie stosowane.

Z przytoczonego stanu wiedzy w tym zakresie wynika, że temat niniejszej pracy znajduje również głębokie uzasadnienie naukowe i poznawcze, dając podstawy teoretyczne i doświadczone do podnoszenia efektywności

procesów szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$ , na drodze modyfikacji ich budowy.

Ściernice z ziarnami mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$  wytwarzane są najczęściej z użyciem spoiwa ceramicznego (podrozdział 1.2). Poza dużą wytrzymałością, zdolnością wiązania ziaren oraz łatwością kształtowania CPS, cechuje się ono również możliwością tworzenia narzędzi o wysokiej stabilności termicznej i relatywnie dużych przestrzeniach międzyziarnowych. Prace badawcze w zakresie spoiw ceramicznych ukierunkowane są na otrzymywanie tworzyw szklanokrystalicznych. Poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego szkła i precyzyjną obróbkę termiczną możliwe jest otrzymanie zaprogramowanych cech spoiwa w celu tworzenia ściernic o coraz większej porowatości struktury oraz dopasowanie intensywności zużycia mostków spoiwa do zużycia ziaren mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$ .

Trudności z pełnym wykorzystaniem potencjału skrawnego ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego dotyczą również procesów szlifowania otworów, które, jak opisano w podrozdziale 1.3, odznaczają się szczególnie trudnymi warunkami realizacji. Proces zużywania ziaren polegający na tworzeniu relatywnie dużych płaskich powierzchni kontaktu z materiałem obrabianym sprawia, że kluczową rolę dla uniknięcia defektów cieplnych przedmiotu obrobionego odgrywa skuteczne doprowadzenia PCS do strefy szlifowania. Niezwykle istotne jest również efektywne usuwanie z niej produktów szlifowania, w szczególności wiórów materiału obrabianego, które przy długiej strefie styku powodują ryzyko powstawania zalepień CPS. Dotyczy to w największym stopniu procesów szlifowania otworów prowadzonych z podwyższoną i wysoką wydajnością ubytkową.

W podrozdziale 1.4 scharakteryzowano 19 modyfikacji budowy ściernicy, spośród których jedynie 7 znajduje zastosowanie w procesach szlifowania otworów. W związku z powyższym uzasadnione jest przeprowadzenie badań teoretycznych i doświadczalnych, mających na celu opracowanie podstaw stosowania ściernic modyfikowanych w procesach szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Z przeglądu znanych rozwiązań wynika, że najbardziej korzystny wpływ na warunki opisywanego procesu mają modyfikacje konstrukcyjne polegające na strefowym zróżnicowaniu budowy ściernicy, stosowanie systemu odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego oraz modyfikacja kształtu CPS. Ze względu na ich zalety, wydaje się również zasadne rozwijanie prac nad modyfikacjami strukturalnymi, w szczególności spoiwami o strukturze amorficzno-krystalicznej oraz ściernicami impregnowanymi substancjami smarnymi i obniżającymi adhezję wiórów. Jedną z możliwości zwiększenia efektywności jest również uzyskanie efektu synergii poprzez integrację kilku modyfikacji w jednej ściernicy.



Najważniejsze wnioski wynikające z analizy problemów występujących w procesach szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i ze spoiwem ceramicznym są następujące:

- w celu zwiększenia efektywności szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$  należy uwzględnić najnowszą wiedzę dotyczącą dominujących zjawisk zużycia tych ziaren;
- spoiwo ceramiczne daje szerokie możliwości modyfikacji struktury ściernic i przez to wpływania na warunki szlifowania otworów i efektywność tego procesu;
- najistotniejsze problemy w szlifowaniu otworów dotyczą skutecznego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania oraz efektywnego usuwania z niej produktów szlifowania i wynikają z kinematyki tego procesu cechującego się długą drogą styku ściernicy z materiałem obrabianym;
- najbardziej skutecznym i najbardziej uzasadnionym ekonomicznie sposobem poprawy efektywności szlifowania otworów jest modyfikacja budowy ściernicy w celu zniwelowania zdefiniowanych wyżej problemów dotyczących tego procesu;
- z porównania cech znanych w literaturze modyfikacji budowy ściernicy wynika, że najbardziej korzystny wpływ na warunki opisywanego procesu mają modyfikacje konstrukcyjne polegające na strefowym zróżnicowaniu budowy ściernicy, modyfikacje mikrostruktury spoiwa ceramicznego, modyfikacje kształtu CPS, stosowanie systemu odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego oraz impregnowanie ściernicy substancjami smarnymi i obniżającymi adhezję wiórów;
- należy przypuszczać, że integracja kilku modyfikacji w jednej ściernicy pozwoli na uzyskanie efektu synergicznego wzmocnienia efektu ich pozytywnego oddziaływania na proces szlifowania.

## **2. Kierunki badań własnych, cel naukowy i znaczenie pracy**

Wnioski z analizy stanu wiedzy i techniki w zakresie szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym stanowiły podstawę do sformułowania celu naukowego niniejszej pracy, określenia kierunków badań własnych oraz znaczenia pracy.

### **2.1. Cel naukowy pracy**

Jak wskazano w rozdziale 1, jednym z najważniejszych problemów, związanych ze stosowaniem ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego, jest specyficzny przebieg procesu ich zużywania się w trakcie szlifowania. Powstające w wyniku kontaktu z materiałem obrabianym duże płaskie powierzchnie starcia zwiększają udział tarcia w procesie szlifowania i mogą przyczynić się do nadmiernego obciążenia cieplno-mechanicznego strefy kontaktu, a także wzrostu sił i mocy szlifowania. Jak pokazały wyniki badań własnych autora, taki przebieg zużycia ziaren dominuje w procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, charakteryzującym się długą strefą styku ściernicy z materiałem obrabianym. W konsekwencji, potencjał skrawny ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego nie jest w pełni wykorzystany, dochodzi do zalepień CPS wywołanych przywieraniem do niej wiórów materiału obrabianego, przedwczesnej utraty zdolności skrawnej ściernicy oraz defektów cieplnych powierzchni obrobionej.

Celem naukowym niniejszej pracy jest opracowanie podstaw budowy i eksploatacji ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym, których budowa została zmodyfikowana w celu poprawy warunków i wyników szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Modyfikacje te dotyczą integracji strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego w jednym narzędziu, mikrostruktury spoiw ceramicznych, wprowadzenia mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernicy, odśrodkowego chłodzenia strefy szlifowania przez otwory w ściernicy oraz impregnacji ściernicy pierwiastkami niemetalicznymi. Oczekiwany rezultatem takich modyfikacji jest zwiększenie efektywności szlifowania otworów w procesach szlifowania jednoprzęściowego, prostoliniowo-zwrotnego oraz wgłębnego. Uzyskane w tym zakresie wyniki badań eksperymentalnych zostaną porównane z efektami szlifowania prowadzonego w analogicznych warunkach ściernicami referencyjnymi (pozbawionymi modyfikacji), z uwzględnieniem zjawisk zużycia charakterystycznych dla zastosowanych ziaren ściernych.

## 2.2. Kierunki badań własnych

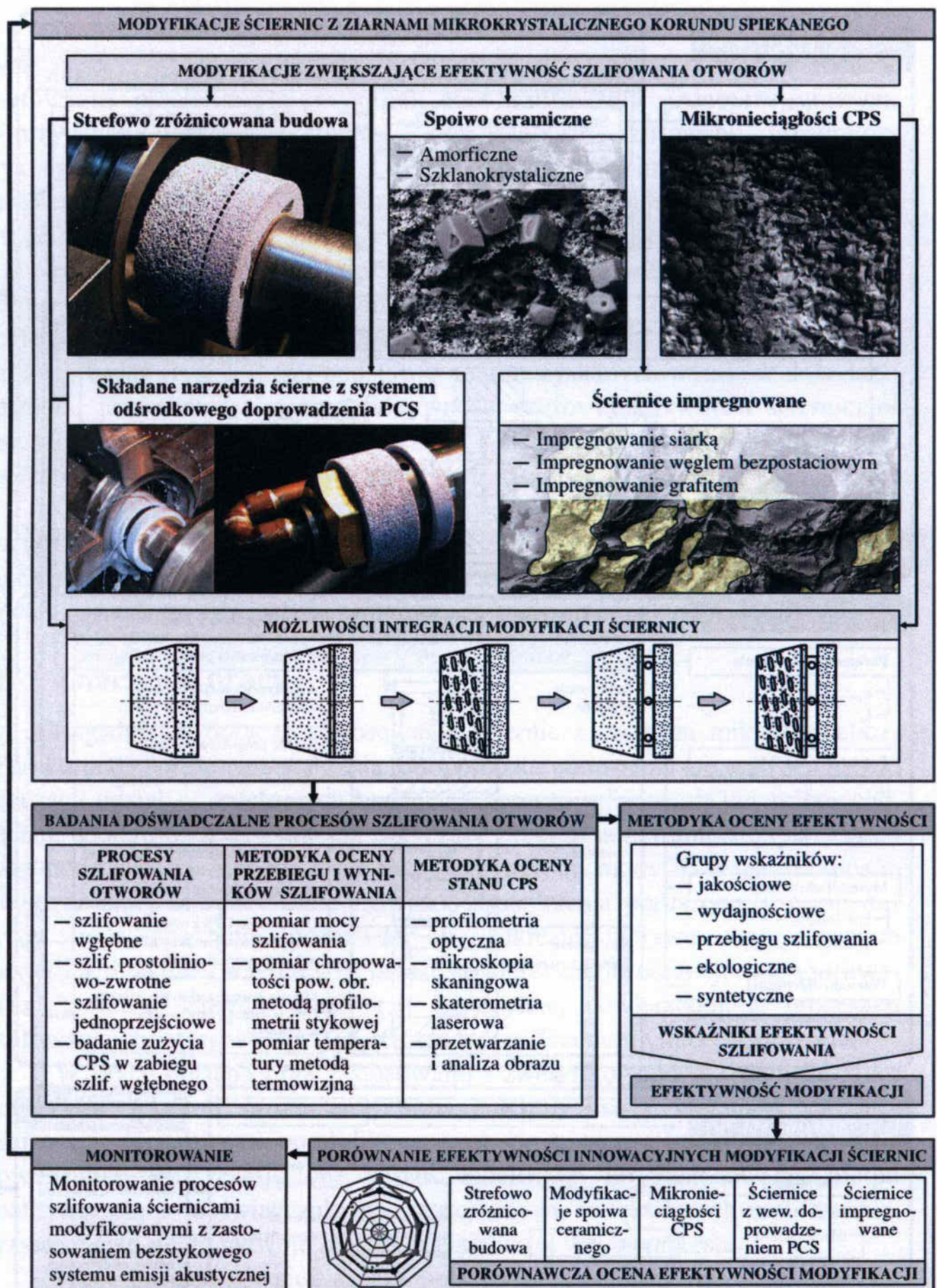
Zakres badań nad możliwością zwiększenia efektywności procesów szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$  i spoiwem ceramicznym, poprzez wprowadzanie modyfikacji ich budowy, przedstawiono schematycznie na rysunku 2.1.

Do badań nad możliwościami zwiększenia efektywności szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego wytypowano pięć modyfikacji, które uznano za najkorzystniejsze na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki przedstawionej w rozdziale 1:

- na podstawie wiedzy dotyczącej ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie z ziarnami CBN, stosowanych w procesach jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych, opracowano ściernice małogabarytowe z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem szklanokrystalicznym;
- opracowano ściernice, w których zmodyfikowano strukturę spoiwa ceramicznego, otrzymując tworzywa szklanokrystaliczne w trzech wariantach różniących się rodzajem i zawartością poszczególnych faz krystalicznych w pozostałości szklistej;
- na podstawie wiedzy, dotyczącej mikronieciągłości CPS stosowanych w procesie szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych, opracowano małogabarytowe ściernice do jednoprzęściowego szlifowania otworów z ukształtowanymi mikronieciągłościami w stożkowej strefie szlifowania zgrubnego;
- opracowano innowacyjny system odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania w małogabarytowej ściernicy składanej;
- do badań wytypowano również ściernice impregnowane pierwiastkami niemetalicznymi (siarką oraz alotropowymi odmianami węgla), które wprowadzono do objętości ściernicy nowo opracowanymi metodami w celu ograniczenia zjawiska zalepiania CPS.

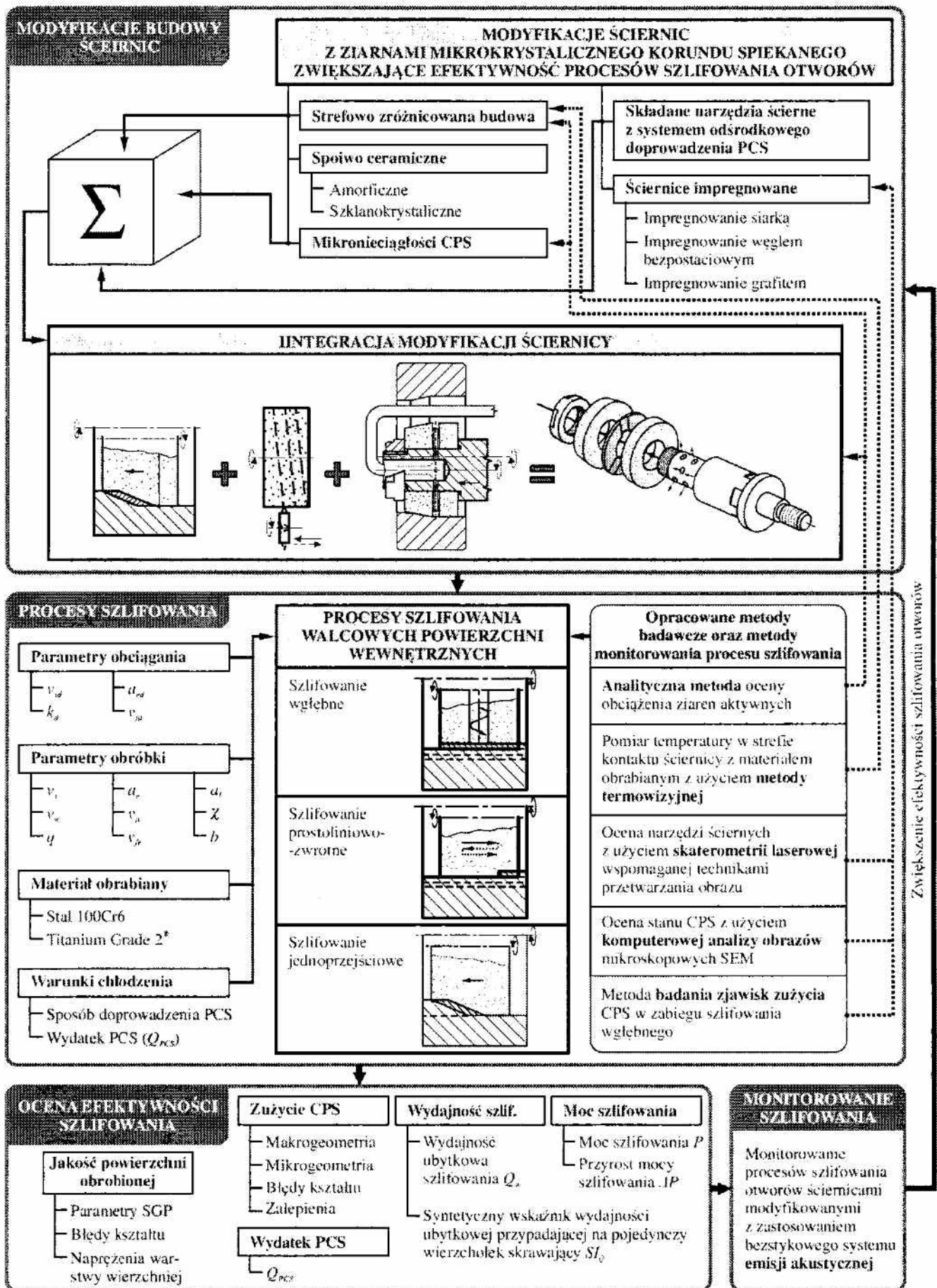
Zaprezentowano również przykład integracji modyfikacji, w którym w jednym narzędziu ściernym zastosowano strefowo zróżnicowaną budowę składaną, mikronieciągłości CPS oraz system odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania.

Na rysunku 2.2 przedstawiono szczegółowy zakres analiz teoretycznych i badań doświadczalnych opisanych w niniejszej monografii.



Rys. 2.1. Schemat ideowy programu badań

Fig. 2.1. Diagram of research program



Rys. 2.2. Szczegółowy zakres analiz teoretycznych i badań doświadczalnych

Fig. 2.2. Detailed scope of the theoretical analysis and experimental investigations

Badania doświadczalne prowadzono w trzech odmianach kinematycznych procesu szlifowania otworów: szlifowaniu wgłębnym z oscylacjami, szlifowaniu prostoliniowo-zwrotnym oraz szlifowaniu jednoprzęściowym. W przypadku większości badań doświadczalnych szlifowano przedmioty wykonane ze stali 100Cr6. Jedynie w badaniach wpływu impregnacji na stopień zalepienia CPS szlifowano bardzo wymagający obróbkowo stop Titanium Grade 2<sup>®</sup>, zaliczany do grupy materiałów trudno skrawalnych. W celu kompleksowej analizy wyników przeprowadzonych doświadczeń wykorzystano szereg metod badawczych, pomiarowych i metod diagnostyki procesu szlifowania, w tym pięć nowatorskich, opracowanych na potrzeby prowadzonych badań (rys. 2.2). Na podstawie analiz uzyskanych wyników dokonano następnie porównawczej oceny efektywności szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi, odnosząc wyznaczone wskaźniki do wartości odpowiadających ściernicom referencyjnym – bez modyfikacji.

Ostatnim etapem wytyczonego zakresu badań własnych było zaproponowanie metody monitorowania procesu szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi. Wykorzystano w tym zakresie bezstykowy system monitorowania przebiegu szlifowania za pomocą sygnału emisji akustycznej.

### 2.3. Znaczenie pracy

Zagadnienia dotyczące stosowania ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane go stanowią, od momentu pojawienia się tego ścierniwa, znaczący udział w światowych badaniach procesu szlifowania ściernicowego. Jednak dopiero ostatnie odkrycia dotyczące procesu zużywania się tych ziaren dały podstawę do rozwoju ściernic, które byłyby modyfikowane w sposób uwzględniający te specyficzne zjawiska. Zagadnienia poruszone w niniejszej pracy mają znaczenie poznawcze w zakresie wpływu wytypowanych modyfikacji budowy ściernicy na jakość powierzchni obrobionej, moc szlifowania i trwałość ściernicy oraz stan jej czynnej powierzchni w procesach szlifowania otworów w stali 100Cr6 oraz stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup>.

W pracy opisano oraz zastosowano i zweryfikowano przydatność kilku nowatorskich metod, opracowanych na potrzeby oceny warunków procesu szlifowania ściernicami modyfikowanymi oraz oceny stanu ich czynnej powierzchni. Rozszerzają one zakres możliwych do zastosowania metod analitycznych i doświadczalnych stosowanych w procesach szlifowania, przyczyniając się do rozwoju metodyki badawczej w tym zakresie.

Praca posiada również aspekt praktyczny, ponieważ daje podstawy do oceny przydatności i kalkulacji opłacalności wdrożenia badanych modyfikacji w praktyce przemysłowej. Dotyczy to zarówno wytwórców narzędzi ściernych, jak i ich użytkowników.

### **3. Metody badawcze opracowane do oceny przebiegu i efektów szlifowania ściernicami modyfikowanymi**

W ramach prac badawczych nad modyfikacjami budowy ściernic z mikrokrystalicznego korundu spiekanego stosowano kilka odmian kinematycznych procesu szlifowania otworów: szlifowanie wgłębne, szlifowanie wgłębne z oscylacjami, szlifowanie prostoliniowo-zwrotne oraz szlifowanie jednoprzejściowe. Każda z wymienionych odmian procesu szlifowania odznacza się specyficzną metodyką badawczą, której szczegółowe opisy zamieszczono w rozdziałach 4 i 5 przy prezentowaniu poszczególnych modyfikacji budowy ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego. Dodatkowo, każdorazowo przy prezentacji rezultatów badań przytoczone zostały wraz z nimi konkretne wartości parametrów obróbkowych, przy których wyniki zostały uzyskane.

W celu wielokryterialnej oceny przebiegu i efektów procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, realizowanych z zastosowaniem ściernic modyfikowanych, konieczne było wykorzystanie wielu metod badawczych oraz pomiarowych. Ze względu na specyfikę niektórych modyfikacji, konieczne było również opracowanie w tym zakresie kilku autorskich metod. Dotyczy to zarówno metodyki badań doświadczalnych, jak i metod oceny przebiegu i efektów procesu szlifowania, w tym w szczególności stanu czynnej powierzchni ściernicy.

W niniejszym rozdziale opisano następujące autorskie metody oceny procesu szlifowania otworów:

- metodę analityczną, pozwalającą na ocenę obciążenia ziaren aktywnych w różnych odmianach kinematycznych szlifowania otworów (podroz. 3.1);
- metodę badania zjawisk zużycia składników czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wgłębego (podrozdział 3.2), opracowaną na potrzeby badań wpływu impregnowania ściernic,
- metodę poszerzającą wiedzę o warunkach szlifowania, polegającą na pomiarze temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z użyciem termowizji w podczerwieni (podrozdział 3.3).

Ważną grupę opracowanych metod stanowią sposoby oceny wpływu modyfikacji na stan czynnej powierzchni ściernicy, w tym na intensywność jej zalepiania materiałem obrabianym. Są to:

- metoda wykorzystująca do oceny i diagnostyki narzędzi ściernych komputerową analizę obrazów zarejestrowanych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego (podrozdział 3.4),
- metoda wykorzystująca do oceny CPS skaterometrię laserową (podrozdział 3.5).

### 3.1. Analityczna metoda oceny obciążenia ziaren aktywnych w różnych odmianach kinematycznych procesu szlifowania otworów

W literaturze dotyczącej procesów szlifowania znaleźć można szereg wskaźników, które opisują warunki pracy ściernicy podczas obróbki. Do najczęściej wymienianych należy zaliczyć: równoważną grubość wióra  $h_{eq}$ , wydajność ubytkową  $Q_w$  i właściwą wydajność ubytkową szlifowania  $Q'_w$  oraz średni przekrój poprzeczny warstwy skrawanej  $A_D$  [111, 154, 158, 203, 204, 334, 383, 404, 407]. W tabeli 3.1 zestawiono zależności definiujące powyższe parametry dla rozpatrywanych odmian kinematycznych procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

Tab. 3.1. Parametry definiujące warunki usuwania materiału w procesie szlifowania otworów [111, 154, 158, 203, 204, 334, 383, 404, 407]

Tab. 3.1. Parameters defined conditions of material removal process during internal cylindrical grinding [111, 154, 158, 203, 204, 334, 383, 404, 407]

	Szlifowanie jednoprzęściowe	Szlifowanie prostoliniowo- -zwrotne	Szlifowanie wglębne	Szlifowanie wglębne z oscylacjami
Równoważna grubość wióra $h_{eq}$ , $\mu\text{m}$	$h_{eq} = \frac{a_f}{ q } \text{tg} \chi$ (3.1)	$h_{eq} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_{fn}}{v_s \cdot T}$ (3.2)		$h_{eq} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_{fr}}{v_s}$ (3.3)
Wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w$ , $\text{mm}^3/\text{s}$	gdzie: $Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_f \cdot n_w$ (3.4) $a_f \cdot n_w = v_{fa}$ (3.5)		gdzie: $Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_a \cdot a_e \cdot n_w$ (3.6) $a_e \cdot n_w = v_{fr}$ (3.7)	
Właściwa wydajność ubytkowa szlifowania $Q'_w$ , $\text{mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$	$Q'_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot \text{tg} \chi$ (3.8)	$Q'_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot a_e}{T}$ (3.9)		$Q'_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_a \cdot a_e}{T}$ (3.10)
Średni przekrój poprzeczny warstwy skrawanej $A_D$ , $\mu\text{m}^2$	$A_D = \frac{v_w}{v_s} \frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{a_a}{d_{eq}}}$ (3.11)	gdzie:		$d_{eq} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w - d_s}$ (3.12)
Gdzie:		$N_a$ – liczba ziaren aktywnych, $\text{mm}^{-2}$ $v_{fa}$ – prędkość posuwu osiowego, $\text{mm}/\text{s}$ $v_{fr}$ – prędkość posuwu promieniowego, $\text{mm}/\text{s}$ $v_s$ – prędkość obwodowa ściernicy, $\text{m}/\text{s}$ $v_w$ – prędkość obwodowa przedmiotu obr., $\text{m}/\text{s}$ $T$ – wysokość ściernicy, $\text{mm}$ $q$ – stosunek prędkości $v/v_w$ – $\chi$ – kąt nakroju stożkowego, $^\circ$		



Jednak żaden z wymienionych w tabeli 3.1 wskaźników w swojej definicji nie uwzględnia wystarczającej liczby parametrów szlifowania, która pozwalałaby na porównywanie warunków pracy ziaren ściernych dla różnych ściernic oraz różnych parametrów szlifowania otworów z uwzględnieniem specyfiki różnych odmian kinematycznych tego procesu. W celu porównania warunków usuwania materiału dla ściernic różniących się, np. wielkością ziaren ściernych, konieczne jest uwzględnienie parametru opisującego liczbę ziaren aktywnych na czynnej powierzchni ściernicy. Zapewnia to jedynie parametr  $A_D$  definiujący średni przekrój poprzeczny warstwy skrawanej. W podanej formie (3.11) nie pozwala on jednak w pełni odtworzyć tych samych warunków pracy ziaren ściernych w różnych kinematykach szlifowania, ponieważ jego wartość nie zależy od prędkości posuwu ( $v_{fa}$  lub  $v_{fr}$ ).

Wobec powyższego podjęto próbę zdefiniowania nowego wskaźnika opisującego obciążenie ziaren aktywnych w procesie szlifowania otworów w sposób umożliwiający porównanie między sobą różnych odmian kinematycznych tego procesu, a także uwzględniający strukturę geometryczną powierzchni (SGP) ściernicy. Porównanie to powinno być jednoznaczne i łatwe do zastosowania nie tylko w badaniach laboratoryjnych, ale również w praktyce przemysłowej, w przypadkach, gdy konieczna jest np. wiedza dotycząca wpływu parametrów na warunki pracy ziaren ściernych i związaną z nimi intensywność zużycia ściernicy. Poprzez zastosowanie odpowiedniego wskaźnika możliwe byłoby dla jednej charakterystyki ściernicy odtworzenie porównywalnego obciążenia ziaren w innym procesie szlifowania, poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki. Pozwalałoby on również na porównywanie ściernic o różnej strukturze geometrycznej CPS. W założeniu porównanie takie pozwalałoby na odtworzenie żądanych warunków pracy, zużycia i samoostrzenia czynnej powierzchni ściernicy, osiągniętych wcześniej dla ściernicy o odmiennej strukturze geometrycznej, poprzez odpowiedni dobór najważniejszych parametrów obróbki.

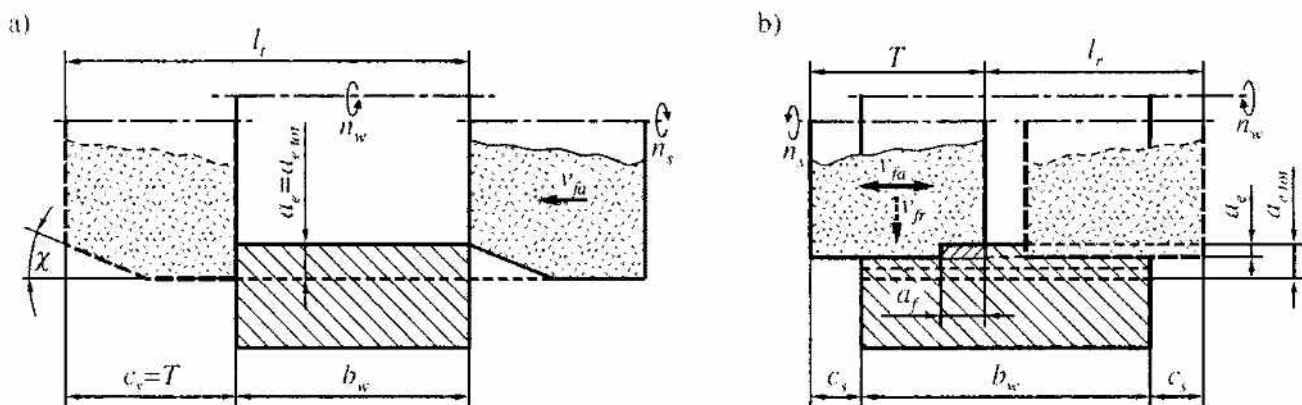
W celu zdefiniowania nowego wskaźnika posłużono się znormalizowaną wydajnością ubytkową szlifowania  $Q_w$  wyrażoną w  $\text{mm}^3/\text{s}$ , określającą ubytek materiału obrabianego  $V_w$  w jednostce czasu [111]. Na podstawie tej wielkości, uwzględniając liczbę ziaren aktywnych biorących udział w usuwaniu materiału, opracowano wskaźnik syntetyczny wydajności ubytkowej przypadającej na ziarno aktywne, oznaczony jako  $SI_Q$  i wyrażony w  $\mu\text{m}^3/\text{s}$ .

### 3.1.1. Wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w$

Do wyznaczenia obciążenia ziaren aktywnych na CPS w czterech różnych odmianach kinematycznych procesu szlifowania otworów, konieczne było precyzyjne określenie wydajności ubytkowej szlifowania, z uwzględnie-

niem odmiennej kinematyki rozpatrywanych procesów: szlifowania jednoprzęściowego [158, 252, 271, 346, 407], szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, szlifowania wglębnego oraz szlifowania wglębnego z oscylacjami. W literaturze podane są zależności definiujące chwilową wydajność ubytkową szlifowania w różnych odmianach kinematycznych szlifowania otworów [111, 154, 158, 203, 204, 334, 383, 404, 407].

Z technologicznego punktu widzenia, istnieje jednak różnica pomiędzy wydajnością wyznaczoną z podawanych w literaturze wzorów, a rzeczywistą wydajnością ubytkową, określaną jako objętość usuniętego materiału  $V_w$  po zakończeniu operacji szlifowania w czasie  $t$ . Ta rozbieżność wynika najczęściej z wydłużenia rzeczywistego czasu obróbki spowodowanego wybiegiem ściernicy  $c_s$ . W procesach szlifowania otworów przelotowych wybieg (o wartości najczęściej 30% wysokości ściernicy  $T$  z każdej strony otworu) stosuje się w celu uniknięcia błędów kształtu powierzchni obrobionej wynikających ze zużycia krawędziowego CPS. W przypadku otworów o niewielkiej długości udział czasu pracy obszarów CPS niebędących w kontakcie z powierzchnią przedmiotu obrabianego może być znaczący. Zagadnienie to dotyczy procesu szlifowania jednoprzęściowego oraz prostoliniowo-zwrotnego i zostało schematycznie przedstawione na rysunku 3.1. W procesie szlifowania wglębnego i wglębnego z oscylacjami wydajność ubytkowa szlifowania nie zależy od drogi ściernicy w kierunku osiowym, a jedynie w kierunku promieniowym ( $v_{fr}$ ), dlatego nie ma potrzeby wprowadzania współczynnika korygującego dla tych odmian kinematycznych.



Rys. 3.1. Wpływ wybiegu ściernicy  $c_s$  na długość przemieszczenia ściernicy w kierunku osiowym: a) szlifowanie jednoprzęściowe  $l_r$ ; b) szlifowanie prostoliniowo-zwrotne  $l_r$

Fig. 3.1. Effect of the grinding wheel coasting  $c_s$  on the length of grinding wheel displacement in axial direction: a) traverse grinding  $l_r$ ; b) reciprocating grinding  $l_r$

W przypadku szlifowania jednoprzęściowego (rys. 3.1a), we wzorze na ogólną wydajność ubytkową należy uwzględnić czas, w jakim ściernica z zadaną prędkością posuwu osiowego  $v_{fa}$  wysunie się z przedmiotu obrabianego o wartość wysokości ściernicy  $c_s = T$ , po którym zakończony zostaje kontakt CPS z powierzchnią obrabianą. Długość przemieszczenia  $l_t$  ściernicy w takim procesie wynosi:

$$l_t = b_w + c_s = b_w + T, \text{ mm}; \quad (3.13)$$

gdzie:

$b_w$  – szerokość przedmiotu obrabianego;

$c_s$  – wybieg ściernicy, mm.

Oznacza to, że wartość wydajności ubytkowej szlifowania jednoprzęściowego należy wyznaczać, uwzględniając poniższy współczynnik korygujący  $k_t$ :

$$k_t = \frac{b_w}{(b_w + c_s)} = \frac{b_w}{(b_w + T)}, \text{ -}. \quad (3.14)$$

Dla procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego (rys. 3-1b), całkowita droga  $l_r$  ściernicy wzdłuż szlifowanej powierzchni powinna uwzględniać podwójną wartość przyjętego wybiegu  $c_s$ , odpowiadającą wybiegom po obu stronach szlifowanego otworu:

$$l_r = b_w - T + 2c_s, \text{ mm}. \quad (3.15)$$

Kolejnym czynnikiem, powodującym różnice w wartościach chwilowej i rzeczywistej wydajności ubytkowej w procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, jest liczba przejść  $i_p$  w kierunku osiowym, pomiędzy kolejnym dodaniem wartości posuwu promieniowego  $f_r$ . Przypadek taki ma miejsce wtedy, gdy całkowity naddatek obróbkowy  $a_{e\text{ cat}}$  dzielony jest na wiele przejść roboczych z prędkością  $v_{fa}$ , a wartości elementarnych naddatków  $a_e$  zadawane są w kierunku promieniowym  $f_r$  w sposób przerywany. Poniżej przedstawiono zależność określającą współczynnik korygujący  $k_r$  dla procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, uwzględniający wybieg ściernicy  $c_s$  oraz liczbę przejść  $i_p$ :

$$k_r = \frac{1}{i_p} \cdot \frac{b_w}{(b_w - T + 2c_s)}, \text{ -}. \quad (3.16)$$

W tabeli 3.2 przedstawiono schematy kinematyczne rozpatrywanych procesów szlifowania otworów, znane z literatury zależności definiujące

wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$  (3.4), (3.6), wzory opracowanych współczynników korygujących  $k_t$  (3.14) i  $k_r$  (3.16), a także uwzględniające je zależności definiujące skorygowaną wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\text{ kor}}$  (3.17-3.19).

Tab. 3.2. Zależności definiujące wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$

Tab. 3.2. Calculation formulae for the material removal rate  $Q_w$

	Szlifowanie jednoprzęściowe	Szlifowanie prostoliniowo-zwrotne	Szlifowanie węgłbne	Szlifowanie węgłbne z oscylacjami
Schemat kinematyki procesu szlifowania				
Wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w$ , mm <sup>3</sup> /s	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_f \cdot n_w$		$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_a \cdot a_e \cdot n_w$	
Współczynnik korygujący	$k_t = \frac{b_w}{(b_w + c_s)}$ gdzie: $c_s = T$	$k_r = \frac{1}{i_p} \cdot \frac{b_w}{(b_w - T + 2c_s)}$ gdzie: $c_s = \frac{T}{3}$	-	
Skorygowana wydajność ubytkowa szlifowania ( $Q_{w\text{ kor}} = Q_w \cdot k$ ) $Q_{w\text{ kor}}$ , mm <sup>3</sup> /s	$Q_{w\text{ kor}} = \pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot a_e \cdot \frac{b_w}{(b_w + T)}$ (3.17)	$Q_{w\text{ kor}} = \pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot a_e \cdot \frac{1}{i_p} \cdot \frac{b_w}{(b_w - \frac{T}{3})}$ (3.18)	$Q_{w\text{ kor}} = Q_w$ (3.19)	

Wyznaczone zależności, definiujące skorygowaną wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\text{ kor}}$ , stanowią podstawę do dalszych analiz zmierzających do określenia współczynnika opisującego obciążenie ziaren aktywnych na CPS. Z zależności (3.17-3.19) możliwe jest wyznaczenie skorygowanej wydajności ubytkowej w danej operacji szlifowania.

### 3.1.2. Liczba kinematycznych wierzchołków skrawających $N_{kin}$

Okres trwałości ściernicy w głównej mierze zależy od warunków pracy ziaren ściernych. W celu określenia obciążenia przypadającego na pojedyncze ziarno aktywne (biorące udział w obróbce), konieczne było ustalenie liczby aktywnych (kinematycznych) wierzchołków skrawających  $N_{kin}$  na 1 mm<sup>2</sup> CPS, według zależności (3.20) [158]:

$$N_{kin} = A \cdot C_{st1}^{\beta} \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^{\alpha} \cdot \left( \frac{a_e}{d_{eq}} \right)^{\frac{\alpha}{2}}, \text{ mm}^{-2}; \quad (3.20)$$

gdzie:

$A$  – współczynnik proporcjonalności, –;

$C_{st1}$  – gęstość ostrzy statycznych na głębokości  $z$  ( $z$  – głębokość przestrzeni roboczej),  $\text{mm}^{-3}$ ;

$\alpha, \beta$  – współczynniki wykładnicze uwzględniające rozkład ostrzy skrawających na CPS ( $\alpha, \beta > 0$ ), –.

Występująca we wzorze (3.20) równoważna średnica ściernicy  $d_{eq}$  opisana jest zależnością (3.12). Współczynnik proporcjonalności  $A$  wyznaczony został na podstawie wzoru (3.21):

$$A = \frac{1}{1+\alpha} \cdot 1,6^{3\alpha}, \text{ –}. \quad (3.21)$$

Natomiast gęstość ostrzy statycznych  $C_{st1}$  obliczono zgodnie ze wzorem (3.22):

$$C_{st1} = \frac{N_{st}}{z^q}, \text{ mm}^{-3}; \quad (3.22)$$

gdzie:

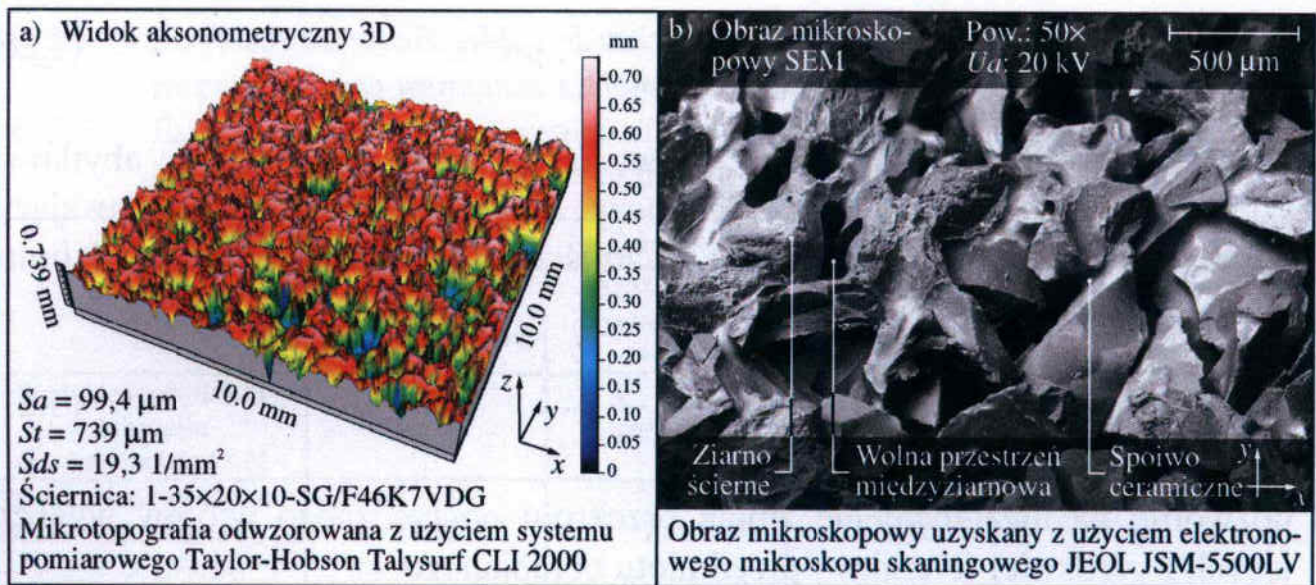
$N_{st}$  – liczba wierzchołków statycznych, –;

$z$  – głębokość przestrzeni roboczej, mm.

Wykładnik potęgowy  $\alpha$  występujący we wzorze na współczynnik proporcjonalności  $A$  (3.21) obliczono na podstawie zależności (3.23), przyjmując wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych i podawane w literaturze wartości wykładników potęgowych  $p \approx 2$  i  $q \approx 1$ :

$$\alpha = \frac{q}{p+1}, \text{ –}. \quad (3.23)$$

Do wyznaczenia liczby kinetycznych wierzchołków skrawających  $N_{kin}$  konieczne jest jeszcze określenie występującej we wzorze (3.22) liczby wierzchołków statycznych  $N_{st}$ . W opisywanym przypadku wartość  $N_{st}$  wyznaczono na podstawie pomiaru mikrotopografii CPS. Założono, że liczbie statycznych wierzchołków skrawających odpowiada wartość parametru  $Sds$ , określającego gęstość wyniesień na jednostkę powierzchni. Na rysunku 3.2a przedstawiono przykładowe wartości parametrów struktury geometrycznej CPS ( $Sa$ ,  $St$  i  $Sds$ ) po odfiltrowaniu cylindrycznego kształtu narzędzia i wypoziomowaniu mikrotopografii zarejestrowanej z użyciem systemu pomiarowego Taylor-Hobson Talysurf CLI 2000, opisanego szerzej w podrozdziale 3.2.2.



Rys. 3.2. Przykładowa czynna powierzchnia ściernicy: a) parametry SGP i aksonometryczny widok 3D wypoziomowanej mikrotopografii; b) widok mikroskopowy SEM

Fig. 3.2. Exemplary grinding wheel active surface: a) roughness parameters and axonometric 3D view of levelled microtopography; b) SEM microphotography

Dodatkowo na rysunku 3.2b przedstawiono widok mikroskopowy SEM czynnej powierzchni analizowanej ściernicy, która zbudowana była z ziaren mikrokryształicznego korundu spiekanego i szklanokryształicznego spoiwa ceramicznego (1-35×20×10-SG/F46K7VDG).

Wyznaczoną w ten sposób wartość  $N_{kin}$  przemnożono przez pole czynnej powierzchni ściernicy  $A_{CPS}$ , otrzymując liczbę wierzchołków skrawających na CPS, oznaczoną jako  $N_{kin\ CPS}$ , zgodnie ze wzorem (3.24):

$$N_{kin\ CPS} = N_{kin} \cdot A_{CPS}, -; \quad (3.24)$$

gdzie:

$$A_{CPS} = \pi \cdot d_s \cdot T, \text{ mm}^2. \quad (3.25)$$

### 3.1.3. Syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający $SI_Q$

Syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający  $SI_Q$  zdefiniowano jako skorygowaną wydajność ubytkową szlifowania  $Q_{w\ kor}$  podzieloną przez liczbę aktywnych wierzchołków skrawających znajdujących się na CPS  $N_{kin\ CPS}$  oraz przez stosunek prędkości  $q$ , zgodnie z zależnością (3.26):

$$SI_Q = \frac{Q_{w\ kor}}{N_{kin} \cdot CPS \cdot q}, \mu\text{m}^3/\text{s}. \quad (3.26)$$

W rezultacie uzyskano zależność opisującą wydajność ubytkową szlifowania przypadającą na pojedynczy aktywny wierzchołek skrawający, wyrażoną w  $\text{mm}^3/\text{s}$ . Odniesienie tej wartości do ilorazu prędkości  $q$ , definowanego jako:

$$q = \frac{v_s}{v_w}, -, \quad (3.27)$$

pozwoлиło na uwzględnienie zmian przekroju poprzecznego wiórów wynikających z prędkości ściernicy i przedmiotu obrabianego.

Po uwzględnieniu zależności (3.24), (3.25) i (3.27) ostateczny wzór na wskaźnik  $IS_Q$  przyjmuje następującą postać:

$$SI_Q = \frac{Q_{w\ kor} \cdot v_w}{N_{kin} \cdot \pi \cdot d_s \cdot T \cdot v_s}, \mu\text{m}^3/\text{s}. \quad (3.28)$$

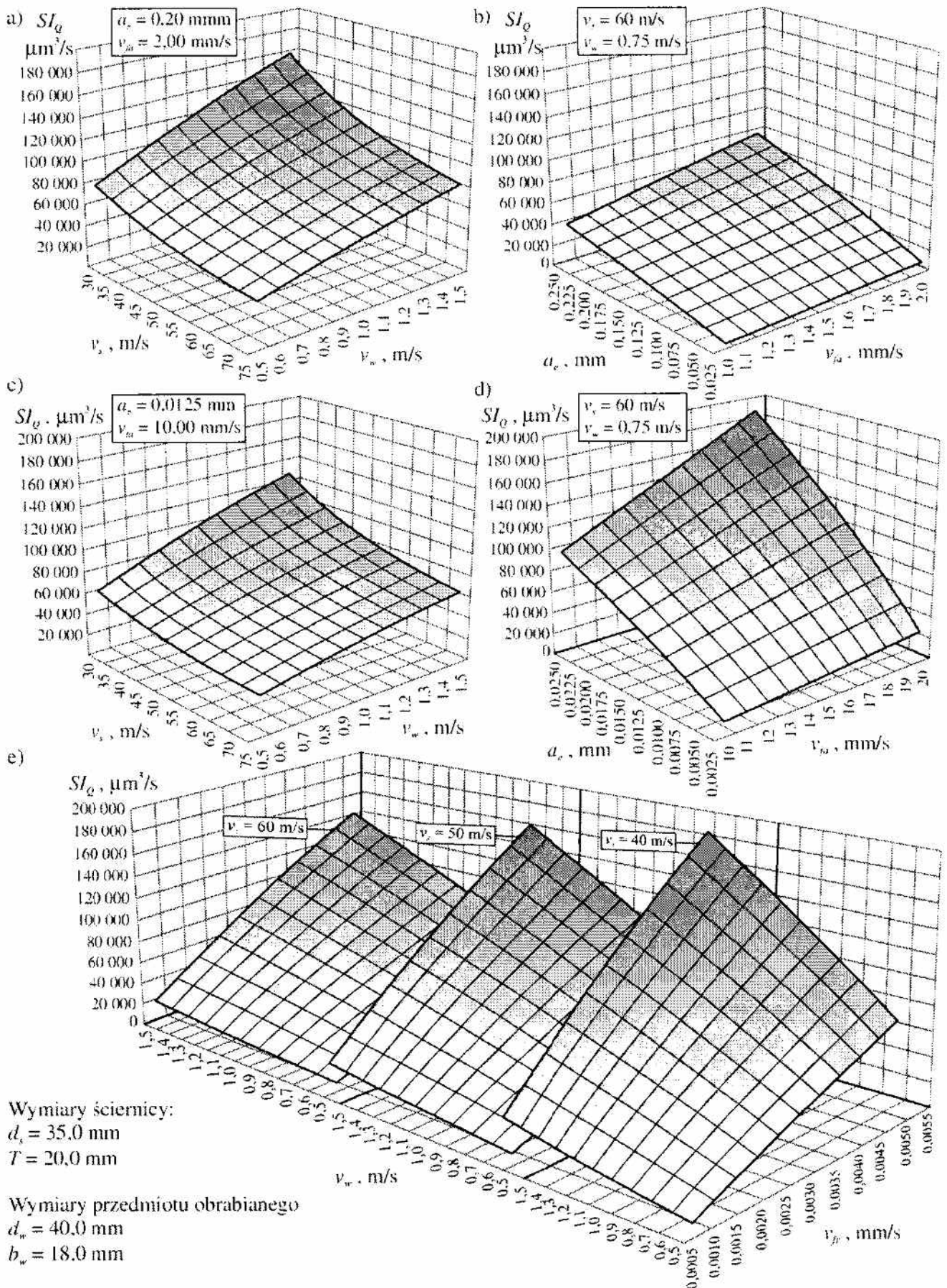
Wskaźnik  $SI_Q$  w podanej formie w przypadku szlifowania jednoprzęściowego i prostoliniowo-zwrotnego jest wrażliwy na zmiany następujących parametrów szlifowania:  $a_e$ ,  $v_s$ ,  $v_w$ ,  $v_{fs}$ ,  $N_{kin}$ ,  $d_s$ ,  $d_w$ ,  $T$ . Natomiast w kinematyce szlifowania wgłębnego oraz wgłębnego z oscylacjami, wartości wskaźnika  $SI_Q$  zależą od:  $a_e$ ,  $v_s$ ,  $v_w$ ,  $v_{fr}$ ,  $N_{kin}$ ,  $d_s$ ,  $d_w$ , oraz  $T$ . Cecha ta czyni go niezwykle przydatnym przy doborze parametrów obróbki, w przypadku zmiany kinematyki procesu szlifowania otworów, przy konieczności zachowania obciążenia ziaren aktywnych na tym samym poziomie. Pokazuje również, jak zmienia się obciążenie aktywnych wierzchołków skrawających w funkcji wyżej wymienionych parametrów obróbkowych, co pozwala wstępnie optymalizować ich dobór.

Przykładowe wyniki obliczeń wartości wskaźnika syntetycznego  $SI_Q$  dla rozpatrywanych odmian kinematycznych szlifowania otworów przedstawiono w tabeli 3.3. W tabeli tej zawarto wartości wielkości pośrednich niezbędnych do wyznaczenia wartości  $SI_Q$ , a także wartości przyjętych parametrów szlifowania i wykładników potęgowych. Dodatkowo, na rysunku 3.3 przedstawiono wykresy zmienności wartości wskaźnika  $SI_Q$  obliczone dla procesu szlifowania jednoprzęściowego (rys. 3.3a-b), prostoliniowo-zwrotnego (rys. 3.3c-d) i wgłębnego (rys. 3.3e), zgodnie ze wzorem (3.28) dla przykładowych zakresów zmienności parametrów ( $a_e$ ,  $v_{fs}$ ,  $v_{fr}$ ,  $v_s$  i  $v_w$ ). Pozostałe parametry szlifowania oraz współczynniki potęgowe przyjęto analogicznie jak w tabeli 3.3.

Tab. 3.3. Przykładowe wyniki obliczeń wskaźnika  $SI_Q$  wraz z wszystkimi danymi dla rozpatrywanych wariantów kinematycznych procesu szlifowania otworówTab. 3.3. Exemplary calculation results of the  $SI_Q$  index with all input data for considered kinematic variants of the internal cylindrical grinding process

Parametr	Przykładowe wyniki obliczeń			
	Szlifowanie jednoprzeciowe	Szlifowanie prostoliniowo-zwrotne	Szlifowanie wstępne	Szlifowanie wstępne z oscylacjami
Wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w$ , mm <sup>3</sup> /s (3.4), (3.6)	50,27	9,42	7,54	7,54
Skorygowana wydajność ubytkowa szlifowania $Q_w^{kor}$ mm <sup>3</sup> /s (3.17-3.19)	23,81	7,48	7,54	7,54
Współczynnik proporcjonalności $A$ , - (3.21)	1,20	1,20	1,20	1,20
Liczba statycznych ostrzy skrawających $N_s$ , mm <sup>-2</sup> (z mikrotopografii CPS)	19,3	19,3	19,3	19,3
Gęstość ostrzy statycznych na głębokości $z = 1$ mm $C_{st}$ , mm <sup>-3</sup> (3.22)	26,12	26,12	26,12	26,12
Liczba ostrzy kinematycznych $N_{kin}$ , mm <sup>-2</sup> (3.20)	2,17	1,22	0,82	0,82
Liczba ostrzy kinematycznych na CPS $N_{kin CPS}$ , - (3.24)	4 782,16	2 683,90	1 794,56	1 794,56
Syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej pojedynczego wierzchołka skrawającego $SI_Q$ , μm <sup>3</sup> /s (3.28)	62 236,44	34 857,83	52 518,73	52 518,73
Parametry szlifowania i wykładniki potęgowe	$v_s = 60$ m/s $d_s = 35,0$ mm $T = 20,0$ mm $v_w = 0,75$ m/s $n_w = 5,97$ s <sup>-1</sup> $d_w = 40,0$ mm $b_w = 18,0$ mm $A_{CPS} = 2199,11$ mm <sup>2</sup> $a_a = -$ $a_f = v_{fa}/n_w = 0,34$ mm $a_e = a_{e cut} = 0,20$ mm $a_{e cut} = 0,20$ mm $v_{fa} = 2,0$ mm/s $v_{fr} = -$ $i_p = -$ $\alpha = 1/3$ $\beta = 1$ $p \approx 2$ $q \approx 1$ $z = 0,739$ mm	$v_s = 60$ m/s $d_s = 35,0$ mm $T = 20,0$ mm $v_w = 0,75$ m/s $n_w = 5,97$ s <sup>-1</sup> $d_w = 40,0$ mm $b_w = 18,0$ mm $A_{CPS} = 2199,11$ mm <sup>2</sup> $a_a = -$ $a_f = v_{fa}/n_w = 2,01$ mm $a_e = 0,0125/i_p$ , mm $a_{e cut} = 0,20$ mm $v_{fa} = 12$ mm/s $v_{fr} = -$ $i_p = 2$ $\alpha = 1/3$ $\beta = 1$ $p \approx 2$ $q \approx 1$ $z = 0,739$ mm	$v_s = 60$ m/s $d_s = 35,0$ mm $T = 20,0$ mm $v_w = 0,75$ m/s $n_w = 5,97$ s <sup>-1</sup> $d_w = 40,0$ mm $b_w = 18,0$ mm $A_{CPS} = 2199,11$ mm <sup>2</sup> $a_a = b_w = 18,0$ mm $a_f = -$ $a_e = v_{fr}/n_w = 0,00056$ mm $a_{e cut} = 0,20$ mm $v_{fa} = -$ $v_{fr} = 0,0033$ mm/s $i_p = -$ $\alpha = 1/3$ $\beta = 1$ $p \approx 2$ $q \approx 1$ $z = 0,739$ mm	$v_s = 60$ m/s $d_s = 35,0$ mm $T = 20,0$ mm $v_w = 0,75$ m/s $n_w = 5,97$ s <sup>-1</sup> $d_w = 40,0$ mm $b_w = 18,0$ mm $A_{CPS} = 2199,11$ mm <sup>2</sup> $a_a = b_w = 18,0$ mm $a_f = v_{fa}/n_w = 2,01$ mm $a_e = v_{fr}/n_w = 0,00056$ mm $a_{e cut} = 0,20$ mm $v_{fa} = 12$ mm/s $v_{fr} = 0,0033$ mm/s $i_p = -$ $\alpha = 1/3$ $\beta = 1$ $p \approx 2$ $q \approx 1$ $z = 0,739$ mm

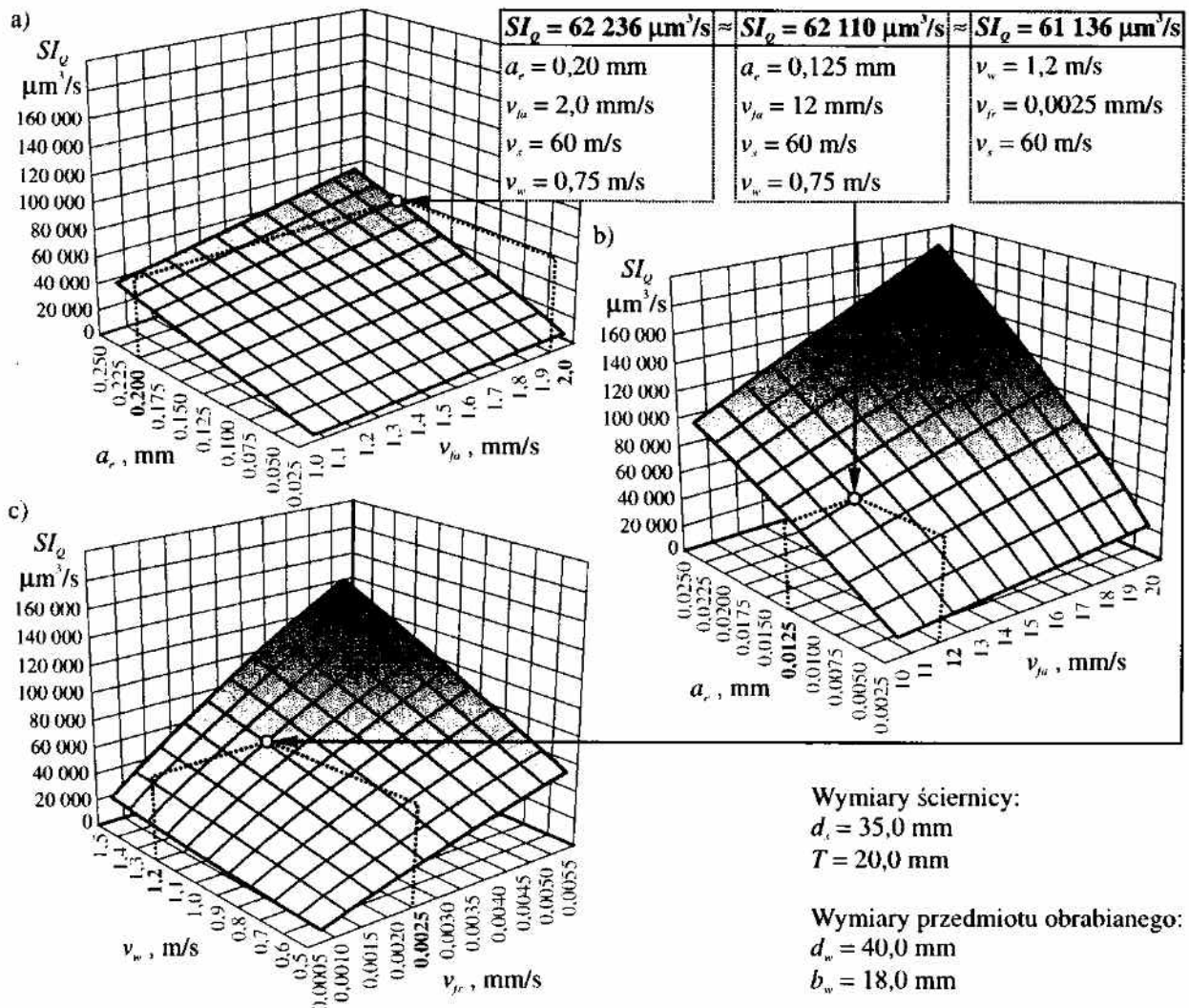




Rys. 3.3. Wykresy przykładowych wartości wskaźnika  $SI_Q$  dla szlifowania: a, b) jedoprzejsiowego; c, d) prostoliniowo-zwrotnego; e) wglębego  
 Fig. 3.3. Diagrams of the  $SI_Q$  index exemplary values for: a, b) traverse grinding; c, d) reciprocating grinding; e) plunge grinding

Jak widać z przedstawionych na rysunku 3.3 wykresów, dla stałych  $N_{kin}$ ,  $d_s$ ,  $d_w$ ,  $b_w$  i  $T$ , wartości syntetycznego wskaźnika wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający  $SI_Q$  zmieniają się wprost proporcjonalnie do  $a_e$ ,  $v_{fa}$ ,  $v_{fr}$  i  $v_w$  oraz odwrotnie proporcjonalnie do  $v_s$ , co wynika z konstrukcji równania (3.28).

Opracowany wskaźnik  $SI_Q$  pozwala na określenie obciążenia ziaren aktywnych w strefie szlifowania, uwzględniając osiem wymienionych w punkcie 3.1.3 parametrów szlifowania. Na rysunku 3.4 przedstawiono przykład zastosowania wskaźnika  $SI_Q$  do określenia parametrów szlifowania, przy których w różnych odmianach kinematycznych tego procesu obciążenie ziaren kształtuje się na porównywalnym poziomie. Na wykresach zaznaczono miejsca odpowiadające przykładowej wartości współczynnika  $SI_Q \approx 62\ 000\ \mu\text{m}^3/\text{s}$ .



Rys. 3.4. Zastosowanie wskaźnika  $SI_Q$  do określenia parametrów szlifowania, przy których ziarna obciążone są na porównywalnym poziomie: a) szlifowanie jedno-prześciowe; b) szlifowanie prostoliniowo-zwrotne; c) szlifowanie wgłębne  
 Fig. 3.4. Determining of grinding parameters for which abrasive grain load are at a comparable level, using the  $SI_Q$  index: a) traverse grinding; b) reciprocating grinding; c) plunge grinding

Zaprezentowany na rysunku 3.4 przykład ilustruje możliwości doboru parametrów szlifowania z użyciem wskaźnika  $SI_Q$ , dla różnej kinematyki procesu w taki sposób, aby zachować porównywalne obciążenie ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy. Kształt opracowanych wykresów daje podstawę do modyfikowania stosowanych parametrów obróbkowych, biorąc pod uwagę obciążenie ziaren aktywnych. Zastosowanie wskaźnika  $SI_Q$  pozwala również na predykcję warunków pracy ściernic różniących się między sobą liczbą ziaren aktywnych na CPS, wyznaczoną w sposób zaprezentowany w podrozdziale 3.1.2 lub dowolną inną metodą.

### **3.2. Metoda badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wgłębnego**

Modyfikowanie budowy ściernic ma najczęściej na celu wydłużenie ich okresu trwałości, poprzez wpływanie na warunki w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Poprawa warunków szlifowania przekłada się na zwiększenie wydajności obróbki lub podniesienie stopnia wykorzystania potencjału skrawnego ziaren ściernych, co ma swoje odzwierciedlenie w efektywności procesu.

Do szybkiej i wielostronnej oceny wpływu modyfikacji budowy ściernicy na procesy zużycia opracowano i zgłoszono do opatentowania metodę bazującą na krótkim teście przeprowadzanym w zabiegu szlifowania wgłębnego z użyciem ściernicy o specjalnie ukształtowanej makrogeometrii [132, 135, 231, 262, 263].

Dotychczas do oceny zjawisk zachodzących w strefie szlifowania stosowano głównie metody dotyczące jedynie ziaren ściernych. Polegają one na analizie wyników prób skrawania pojedynczym ziarnem ściernym [28, 82, 327, 398]. Ziarno takie jest specjalnie orientowane i zamocowane w metalowej oprawie (najczęściej poprzez lutowanie), którym następnie wykonuje się rysy na powierzchni materiału obrabianego. Sposoby takie bazują przede wszystkim na ocenie objętości usuniętego materiału i ubytku masy ziarna ściernego, rejestracji sił skrawania oraz na analizach wizualnych śladów skrawania, form zużycia ziarna, kształtu wiórów czy też procesu powstawania wypyłek. Jednak sposoby oceny skrawalności ziaren ściernych polegające na skrawaniu pojedynczym ziarnem ściernym mają ograniczone zastosowanie ze względu na to, że nie uwzględniają m.in.:

- specyficznej kinematyki różnych odmian procesu szlifowania;
- dynamiki szlifowania w danej kinematyce;
- wzajemnego oddziaływania sąsiadujących ze sobą ziaren ściernych w ściernicy;

- oddziaływania spoiwa na proces szlifowania oraz siły wiązania ziarna ściernego przez spoiwo;
- wpływu objętości porów na zdolność docierania płynu chłodząco-smarującego do strefy szlifowania oraz na zdolność gromadzenia i wydalania ze strefy obróbki wiórów i produktów szlifowania;
- losowości orientacji ziaren ściernych w ściernicy,
- wpływu zalepień powstających na czynnej powierzchni ściernicy w trakcie obróbki.

W literaturze spotyka się również opisy metod oceny zdolności skrawnej nie tylko ziaren ściernych, ale całej ściernicy. W większości przypadków polegają one jednak na wykonywaniu długotrwałych badań eksperymentalnych [53, 109, 208, 418]. W przypadku metod pozwalających na szybką ocenę ściernicy ograniczona jest ona zazwyczaj do jednego lub kilku wskaźników syntetycznych [70-75], na podstawie których dokonywane jest wnioskowanie.

W związku z powyższym opracowano nową metodę [263], w celu umożliwienia wielokryterialnej oceny warunków pracy ziaren ściernych oraz mostków spoiwa, a także umożliwienia oceny procesów zużycia składników CPS zachodzących w trakcie szlifowania, przy jednoczesnym maksymalnym ograniczeniu zakresu prób warsztatowych. Metoda taka miałaby zastosowanie głównie w badaniach porównawczych w celu optymalizacji budowy ściernicy oraz parametrów szlifowania.

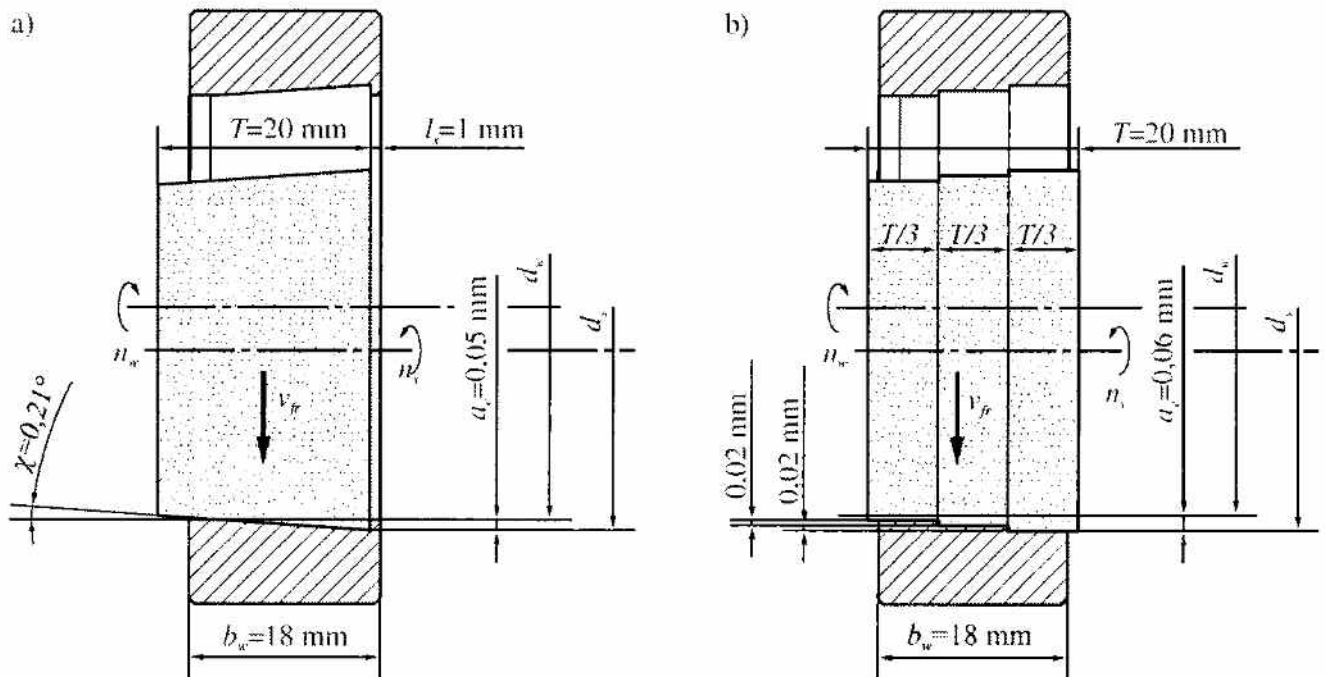
### 3.2.1. Istota metody badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wglębnego

Opisywana metoda opracowana została z myślą o procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, ale może być z powodzeniem stosowana również w szlifowaniu wałków czy powierzchni płaskich. Jej istota polega na przeprowadzeniu krótkiego testu szlifowania, trwającego np. 3 sekundy, specjalnie ukształtowaną ściernicą, w kinematyce szlifowania wglębnego [231, 262, 263].

Istotną cechą metody jest pominięcie etapu szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania. Ściernica wykonuje ruch roboczy z zadaną prędkością posuwu wglębnego  $v_{fp}$ , 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 wyływek, bruzdowania itp.

Zastosowana w opracowanej metodzie modyfikacja makrogeometrii ściernicy polega na uformowaniu na jej czynnej powierzchni stożka lub kilku, np. trzech, stref o różnej średnicy w zabiegu obciągania. Na rysunku 3.5 przedstawiono schemat kinematyki szlifowania wglębnego ściernicą stożkową

(rys. 3.5a) i ściernicą ze strefami o różnych średnicach (rys. 3-5b) oraz geometrię dwóch opracowanych modyfikacji makrogeometrii CPS.



Rys. 3.5. Schemat kinematyki metody oceny warunków pracy składników CPS z użyciem ściernicy o specjalnie ukształtowanej makrogeometrii: a) ściernica z nakrojem stożkowym; b) ściernica ze strefami o różnej średnicy

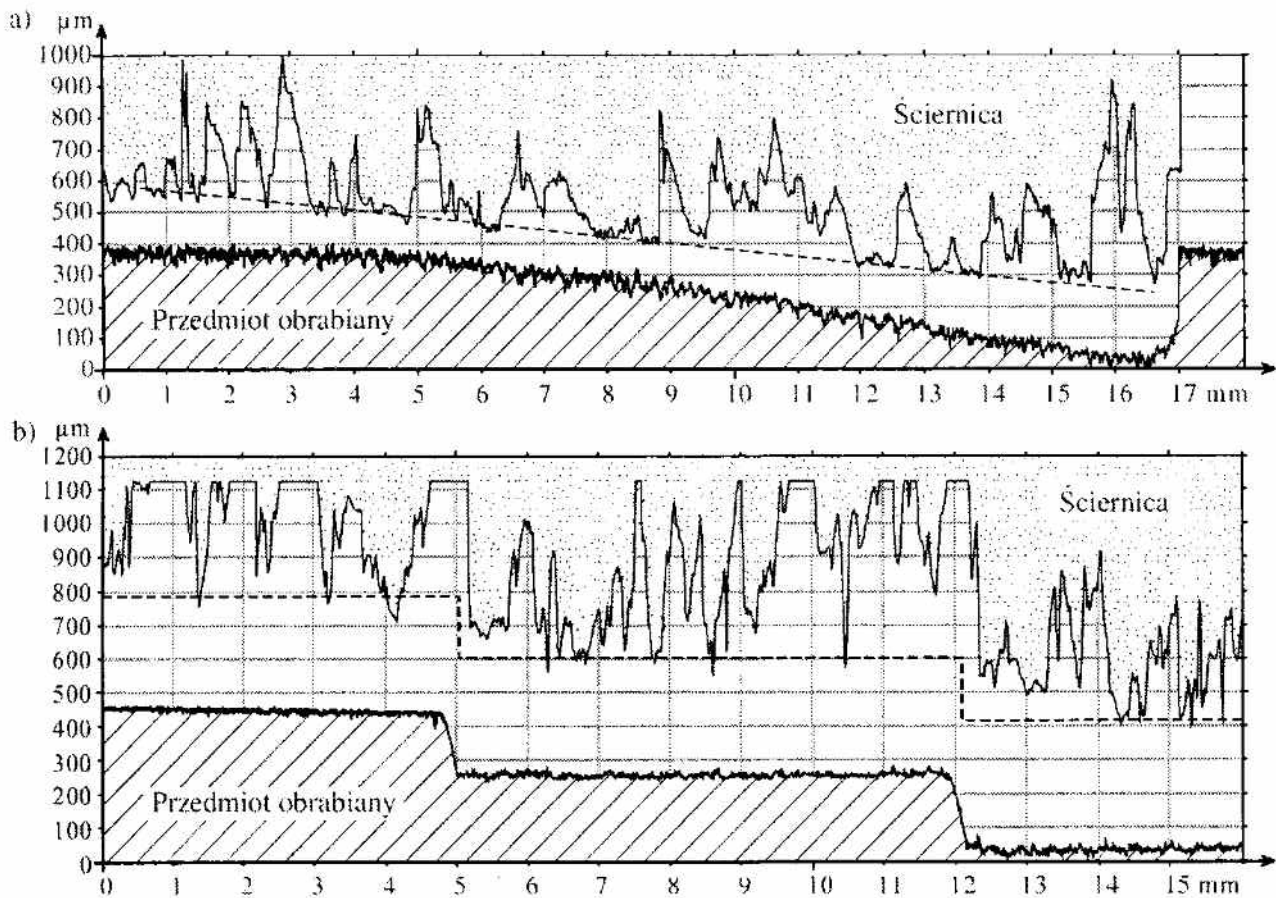
Fig. 3.5. Kinematics of the method of assessment of the grinding wheel active surface components, using grinding wheel with special macrogeometry: a) conical grinding wheel; b) grinding wheel with zones of various diameters

W przypadku kształtowania stożka na CPS, jego kąt  $\chi$  powinien być dobrany z uwzględnieniem takich parametrów geometrycznych, jak: wysokość ściernicy  $T$ , szerokość materiału obrabianego  $b_w$  oraz głębokość szlifowania  $a_e$ . Wskazane jest przesunięcie o pewną odległość  $l_s$  krawędzi ściernicy o większej średnicy względem szlifowanego materiału (rys. 3.5a). Zapewnia to późniejszą obserwację efektów szlifowania ziarnami umiejscowionymi na największym promieniu działania CPS.

Wykonując próby z użyciem ściernicy ze strefami o różnych średnicach, należy ją tak przygotować, aby uzyskać równomierny podział wysokości  $T$  na poszczególne strefy robocze (rys. 3.5b). Opracowana metodyka zakłada również, że całkowity naddatek obróbkowy  $a_e$  dzielony jest równomiernie na kolejne stopnie ściernicy.

Rezultatem tak przeprowadzonego szlifowania w głębokiego jest odwzorowanie makrogeometrii ściernicy na przedmiocie obrobionym, którego przykład pokazano na rysunku 3.6. Nałożono na nim profile osiowe ściernic zmierzone

metodą profilometrii optycznej z profilami chropowatości powierzchni po szlifowaniu, zarejestrowanymi z użyciem profilometru stykowego.



Rys. 3.6. Zestawienie zmierzonych profili osiowych ściernicy i przedmiotu po szlifowaniu wgłębny: a) ściernicą z nakrojem stożkowym; b) ściernicą ze strefami o różnej średnicy

Fig. 3.6. Measured axial profiles of the grinding wheel and the workpiece after plunge grinding: a) using conical grinding wheel; b) using grinding wheel with zones of various diameters

Specjalne ukształtowanie makrogeometrii ściernicy powoduje, że poszczególne strefy jej czynnej powierzchni pracują z różnym czasem i usuwają różną objętość materiału. 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. W przypadku ściernicy stożkowej zmiany te następują bezstopniowo, w sposób ciągły, wynikający ze zmiany średnicy ściernicy (rys. 3.6a). Natomiast przy zastosowaniu ściernicy schodkowej, warunki i rezultaty obróbki są zbliżone w poszczególnych strefach ściernicy (rys. 3.6b).

Porównawcza ocena zdolności skrawnej składników CPS przeprowadzona może być na podstawie parametrów szlifowania zarejestrowanych w trakcie

procesu, takich jak: siły i moce szlifowania, zmiany wartości sygnału emisji akustycznej, drgań, temperatury. Dalszą ocenę zdolności skrawnej ściernicy przeprowadza się po dokonaniu pomiarów i analiz dotyczących czynnej powierzchni ściernicy po szlifowaniu, a więc w wyniku pomiaru zużycia objętościowego i krawędziowego ściernicy, parametrów struktury geometrycznej powierzchni, czy też w wyniku rejestracji obrazów mikroskopowych i oceny wizualnej stopnia i form zużycia ziaren ściernych. Ocenę zdolności skrawnej odnosi się również do wyników szlifowania obserwowanych na przedmiocie obrobionym poprzez pomiar ubytku materiału obrabianego, parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP), błędów kształtu, mikrotwardości, naprężeń w warstwie wierzchniej, wykrywanie defektów szlifierskich, takich jak np. przypalenia i mikropęknięcia, czy też rejestrację obrazów mikroskopowych i ocenę wizualną śladów skrawania.

Opracowana metoda pozwala zatem na bardzo szeroką analizę wyników testu, która zazwyczaj powinna być jednak ograniczona do parametrów najbardziej istotnych z punktu widzenia celu prowadzonych badań.

### **3.2.2. Porównanie możliwości analizowanej metody przy zastosowaniu ściernicy z nakrojem stożkowym i ściernicy ze strefami o różnej średnicy**

W celu porównania możliwości prezentowanej metody przy zastosowaniu dwóch makrogeometrii CPS przeprowadzono badania doświadczalne z użyciem narzędzia wykonanego z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane go i ceramicznego spoiwa szklanokrystalicznego [94, 97, 98] o oznaczeniu technicznym: 1-35×20×10-SG/F46G10VTO. Makrogeometrię CPS kształtowano w zabiegu obciążania, stosując diamentowy obciążacz jednoziarnisty o masie  $Q_d = 1,25$  kr. W celu ukształtowania czynnej powierzchni ściernicy stożkowej, w przypadku której kąt stożka  $\chi = 0,21^\circ$ , konieczne było zastosowanie specjalnego przyrządu do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego [223] opisanego w podrozdziale 4.1.2. Szlifowano wgłębnie powierzchnie wewnętrzne pierścieni łożyskowych wykonanych ze stali 100Cr6 o twardości  $62 \pm 2$  HRC.

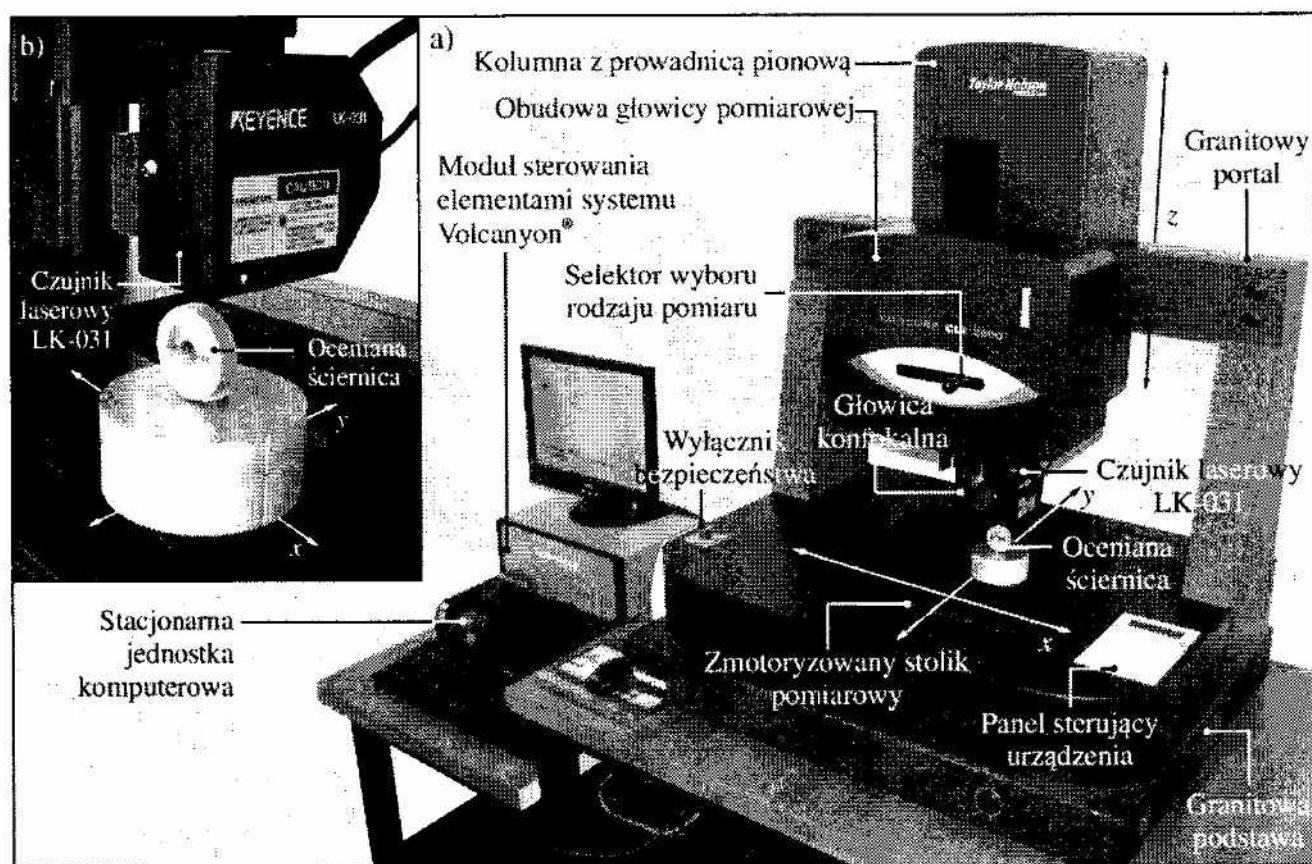
W opisanym przykładzie zastosowania metody badania zjawisk zużycia czynnej powierzchni ściernicy w zabiegu szlifowania wgłębego, przy analizie wyników prób wykorzystano obrazy mikroskopowe SEM oraz mikrotopografie CPS po obróbce oraz mikrotopografie powierzchni przedmiotu obrobionego. Do rejestracji obrazów mikroskopowych zastosowano elektronowy mikroskop skaningowy JSM5500LV firmy JEOL Ltd., którego szczegółowy opis zamieszczono w podrozdziale 3.4.2. Do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy zastosowano system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor Hobson Ltd., realizujący pomiary metodą

topografii laserowej. Mikrotopografie powierzchni przedmiotu obrobionego rejestrowane były z użyciem profilometru stykowego Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH.

Ponizej przedstawiono opis zastosowanych stanowisk do pomiarów struktury geometrycznej ściernic oraz przedmiotów obrobionych, a następnie zamieszczono wyniki badań uzyskanych z użyciem ściernicy stożkowej oraz ściernicy ze strefami o różnej średnicy.

### Stanowisko do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernicy metodą topografii laserowej

Do pomiaru mikrotopografii powierzchni narzędzi ściernych zastosowano stanowisko pomiarowe wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd., przedstawione na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Stanowisko do bezstykowego pomiaru mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd.: a) widok ogólny; b) obszar pomiarowy [240, 241]

Fig. 3.7. Measuring position for non-contact measurement of the grinding wheel active surface microtopographies with multi-head measuring system Talysurf CLI 2000 by Taylor-Hobson Ltd.: a) overall view; b), c) measuring area [240, 241]

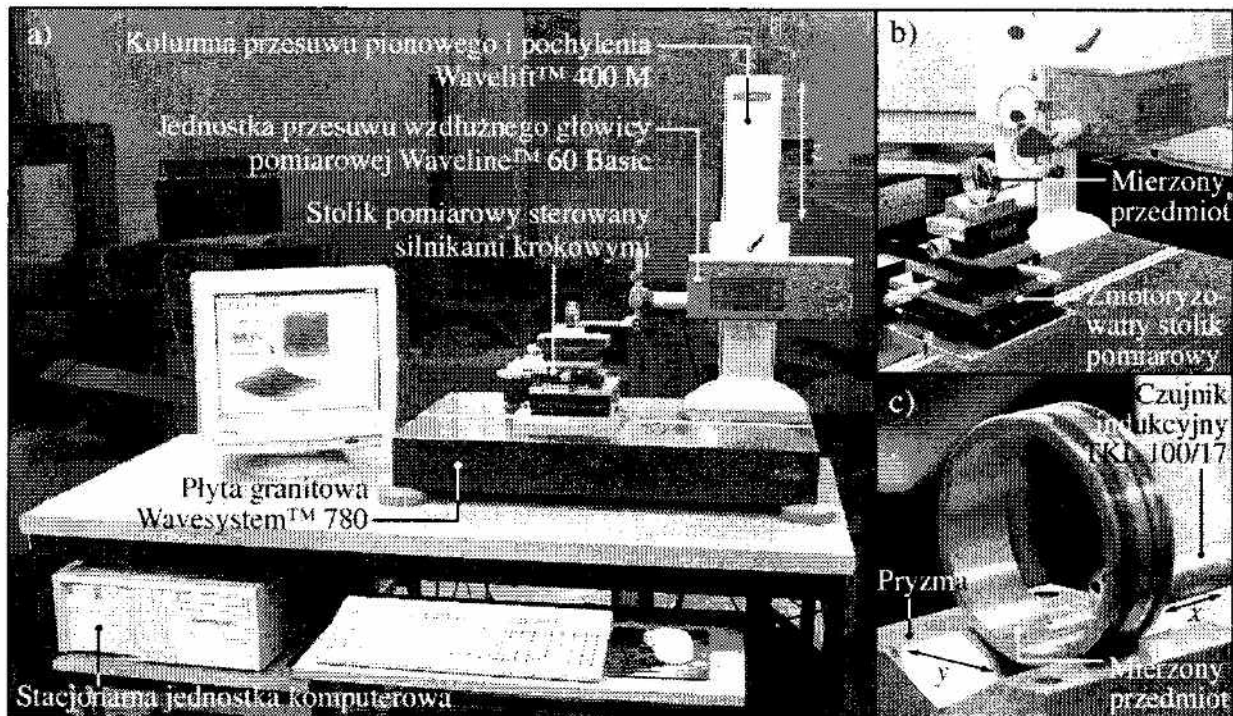


W celu poprawnej rejestracji mikrotopografii czynnej powierzchni ściernic o otwartej strukturze zastosowano metodę triangulacji laserowej. Pomiar triangulacyjny realizowane były przez bezstykowy czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence (rys. 3.7b, c). Współpracował on z kontrolerem LK-2001 tej samej firmy i pozwalał na uzyskanie rozdzielczości pomiarów rzędu  $1\ \mu\text{m}$ .

Pomiarów dokonano za pomocą dostarczonego przez producenta oprogramowania Talyscan CLI 2000 w wersji 2.6.1. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych danych pomiarowych posłużono się oprogramowaniem TalyMap Silver w wersji 4.1.2 wykorzystującym Mountains Technology™ firmy Digital Surf. Ten sam producent dostarcza także moduł sterowania poszczególnymi elementami systemu pod nazwą Volcanyon®.

### Stanowisko do pomiarów stykowych struktury geometrycznej powierzchni obrobionych

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. 3.8).



Rys. 3.8. Stanowisko do pomiaru profili chropowatości oraz mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) widok ogólny stanowiska; b), c) obszar pomiarowy

Fig. 3.8. Measuring position for roughness stylus profile and microtopographies measurements of workpiece surface with profilometer Hommel-Tester T8000 by Hommelwerke GmbH: a) overall view; b), c) measuring area

Pomiarów struktury geometrycznej 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  $r = 2,5 \mu\text{m}$ .

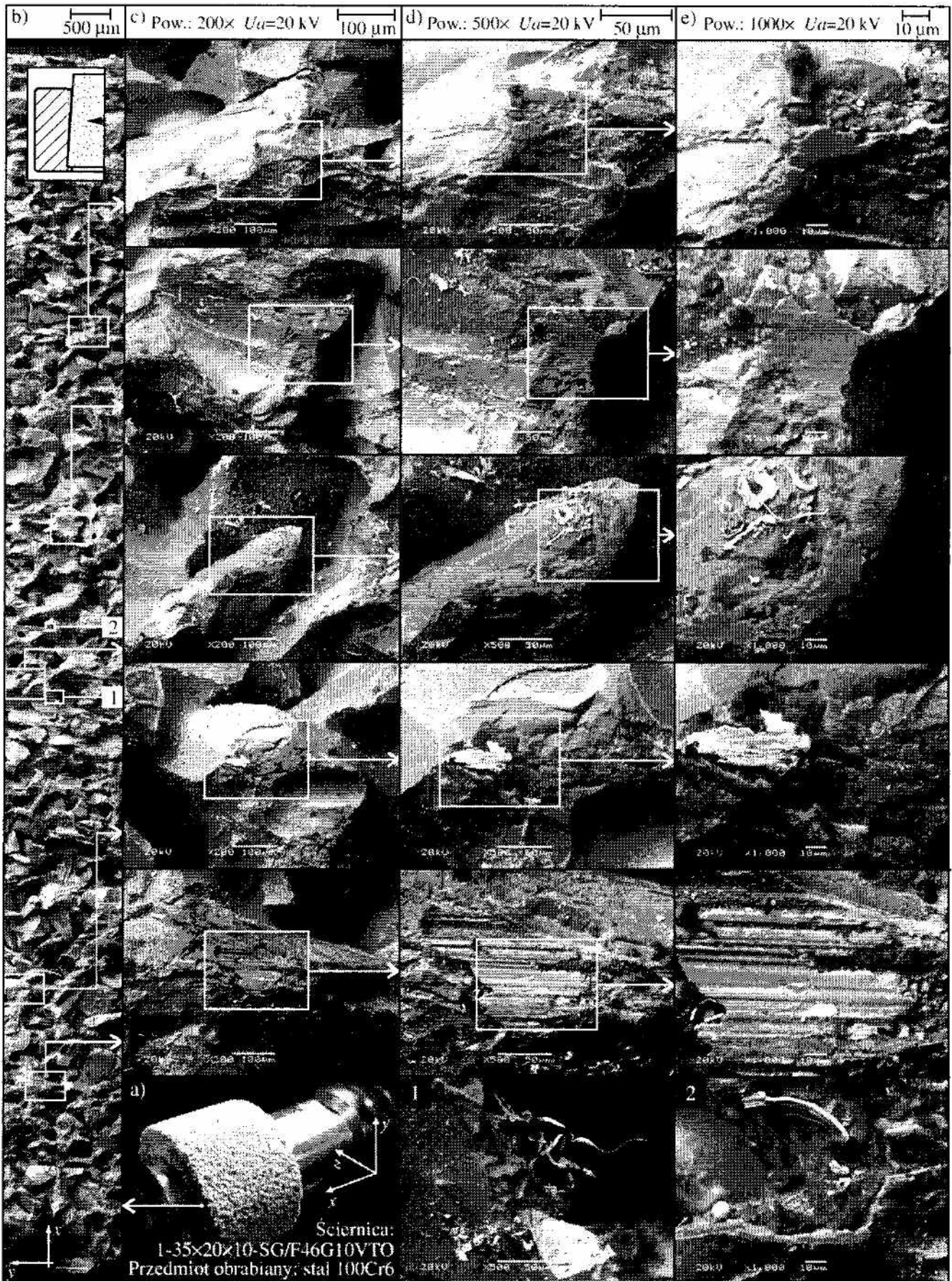
Podczas badań korzystano z oprogramowania Turbo Roughness for Windows w wersji 3.1 oraz HommelMap Basic w wersji 3.1.0, służącego do sterowania elementami urządzenia (głowica pomiarowa) oraz dokonywania pomiarów. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych mikrotopografii powierzchni zastosowany został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

### **Wyniki badań uzyskanych z zastosowaniem ściernicy stożkowej**

Pierwszy etap oceny wyników przeprowadzonego szlifowania w głębnego ściernicą stożkową polegał na analizie stanu jej czynnej powierzchni. W tym celu zarejestrowano obrazy mikroskopowe SEM oraz wykonano pomiary mikrotopografii CPS po obróbce.

Na rysunku 3.9 zamieszczono m.in. obraz mikroskopowy przedstawiający w powiększeniu  $50\times$  około 2,5 mm obwodu CPS na całej jej szerokości, złożony z kilkunastu pojedynczych obrazów (rys. 3.9b). Następnie w powiększeniu  $200\times$ ,  $500\times$  i  $1000\times$  obserwowano zauważone charakterystyczne elementy znajdujące się na CPS w kolejnych jej fragmentach, w taki sposób, aby możliwa była analiza zmian wynikających ze zwiększającej się głębokości i czasu szlifowania (rys. 3.9c-e).

Z analizy zarejestrowanych obrazów mikroskopowych CPS wyraźnie wynika, że wraz z rosnącym czasem szlifowania zwiększa się zużycie ziaren ściernych, przy czym dominuje zużycie ściernych składników CPS. W obszarze CPS usuwającym niewielki naddatek obróbkowy wywołane jest ono wzajemnym oddziaływaniem pomiędzy składnikami ściernicy i obrabianą powierzchnią. Wraz ze wzrostem głębokości i czasu szlifowania zauważyć można zwiększającą się powierzchnię starcia wierzchołków ziaren (rys. 3.9e). W obszarze CPS, który pracował najdłużej (w przybliżeniu 3 sekundy), występują mikrozalepienia na wierzchołkach ziaren aktywnych, a także zaobserwowano odwzorowanie kształtu powierzchni obrabianej na wierzchołku aktywnym jednego z ziaren ściernych. Wskazuje to na uplastycznienie wierzchołków ziaren mikrokryształicznego korundu spiekane [208], powstałe na skutek zużycia ściernego wywołanego wysoką temperaturą w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym [116, 204]. Taki wzrost temperatury spowodowany był tym, że opisywana próba wykonana została bez udziału płynu chłodząco-smarującego.



Rys. 3.9. Obrazy mikroskopowe CPS z nakrojem stożkowym po szlifowaniu: a) widok ogólny; b) pow. 50x; c) pow. 200x; d) pow. 500x; e) pow. 1000x  
 Fig. 3.9. SEM images of the active surface of the conical grinding wheel after work: a) overall view; b) mag. 50x; c) mag. 200x; d) mag. 500x; e) mag. 1000x

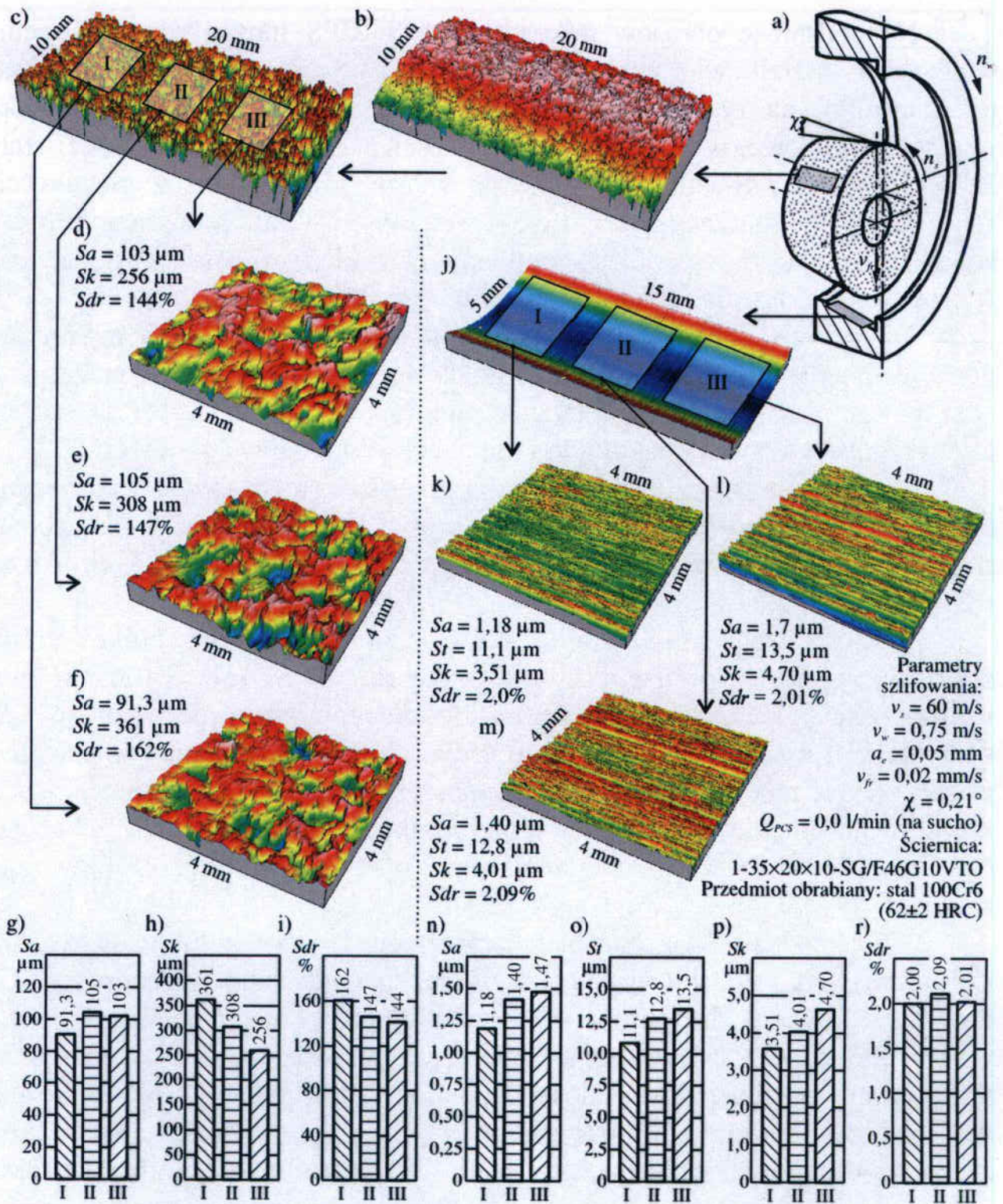
Na podstawie obrazów mikroskopowych CPS można również ocenić wielkość i kształt wiórów powstających w procesie szlifowania. Obraz przedstawiony na rysunku 3.9 (szczegół 1) wskazuje, że dominują wióry wstępowe i łukowe, wynikające z właściwości plastycznych szlifowanej stali. Zauważyć można również, że wielkość wiórów rośnie wraz z głębokością szlifowania. O znaczącym wzroście temperatury w mikroobszarach strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym świadczy również występowanie wiórów kulowych widocznych na rysunku 3.9 (szczegół 2).

Na rysunku 3.10 przedstawiono aksonometryczne widoki mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy stożkowej oraz powierzchni przedmiotu obrobionego wraz z wybranymi parametrami ( $Sa$ ,  $St$ ,  $Sk$ ,  $Sdr$ ) struktury geometrycznej powierzchni, wyznaczonymi dla trzech przykładowych obszarów.

Wyznaczone wartości średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości  $Sa$  czynnej powierzchni ściernicy (rys. 3.10g) pozostają na zbliżonym poziomie dla wszystkich trzech zmierzonych obszarów ściernicy, a ich rozrzut nie przekracza 15%.

Na postępujące wraz z czasem szlifowania tępienie wierzchołków ziaren ściernych wskazuje wysokość chropowatości rdzenia  $Sk$  (rys. 3.10h), którego wartości maleją w kolejnych obszarach ściernicy. Wartość parametru  $Sk$  dla strefy II i III zmalała odpowiednio o 15% i 30% w porównaniu z wartością wyznaczoną z mikrotopografii CPS w obszarze I. Taki sam kierunek zmian zaobserwowano w wartościach współczynnika rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  (rys. 3.10i), którego wartości zmniejszyły się ogółem o 12,5%, porównując strefę I do III.

Przyjęta metodyka badań, charakteryzująca się pominięciem etapu szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania, spowodowała, że parametry SGP dotyczące powierzchni obrobionej (rys. 3.10n-r) przyjęły relatywnie duże wartości. W efekcie, na podstawie zmierzonej mikrotopografii powierzchni po szlifowaniu możliwe jest wnioskowanie o przebiegu procesu skrawania w warunkach szlifowania zgrubnego. Porównanie wartości parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego z różnymi głębokościami wskazuje, że wraz ze wzrostem wartości naddatku obróbkowego rośnie chropowatość powierzchni po obróbce. Dla parametrów  $Sa$ ,  $St$  i  $Sk$  wzrost ten wynosi odpowiednio 25%, 22% i 34%, porównując wartości wyznaczone w obszarze I i III. Spowodowane jest to zwiększającym się, wraz ze średnicą ściernicy, przekrojem poprzecznym warstwy skrawanej przypadającym na pojedyncze ziarno ściernic. Wyznaczone wartości parametru  $Sdr$  pozostawały na zbliżonym poziomie, a różnice między nimi nie przekraczały 5%. Świadczy to o podobnym stopniu rozwinięcia powierzchni obrobionej we wszystkich trzech zmierzonych obszarach.



Rys. 3.10. Mikrotopografie i wybrane parametry SGP czynnej powierzchni ściernicy stożkowej oraz przedmiotu obrobionego: a) schemat procesu; b-i) mikrotopografie i parametry SGP trzech obszarów CPS; j-r) mikrotopografie i parametry SGP trzech obszarów powierzchni przedmiotu obrobionego

Fig. 3.10. Scheme of the grinding process (a) with microtopographies and selected roughness parameters for the three areas of the active surface of the conical grinding wheel (b-i) and the workpiece surface (j-r)

Z przeprowadzonych analiz stanu CPS oraz powierzchni przedmiotu po szlifowaniu wynika, że dla przyjętych parametrów obróbki zdolność skrawna ściernicy maleje wraz z głębokością szlifowania. Mimo bardzo krótkiego czasu szlifowania, wnoszącego 3 sekundy, ziarna ściernic położone na największym promieniu działania ściernicy uległy widocznemu zużyciu. Oznacza to, że prowadzenie szlifowania w takich warunkach spowoduje szybką utratę zdolności skrawnej ściernicy, w związku z czym należy poszukiwać możliwości poprawy warunków pracy narzędzia, np. poprzez zastosowanie chłodzenia.

### **Wyniki badań uzyskanych z zastosowaniem ściernicy ze strefami o różnej średnicy**

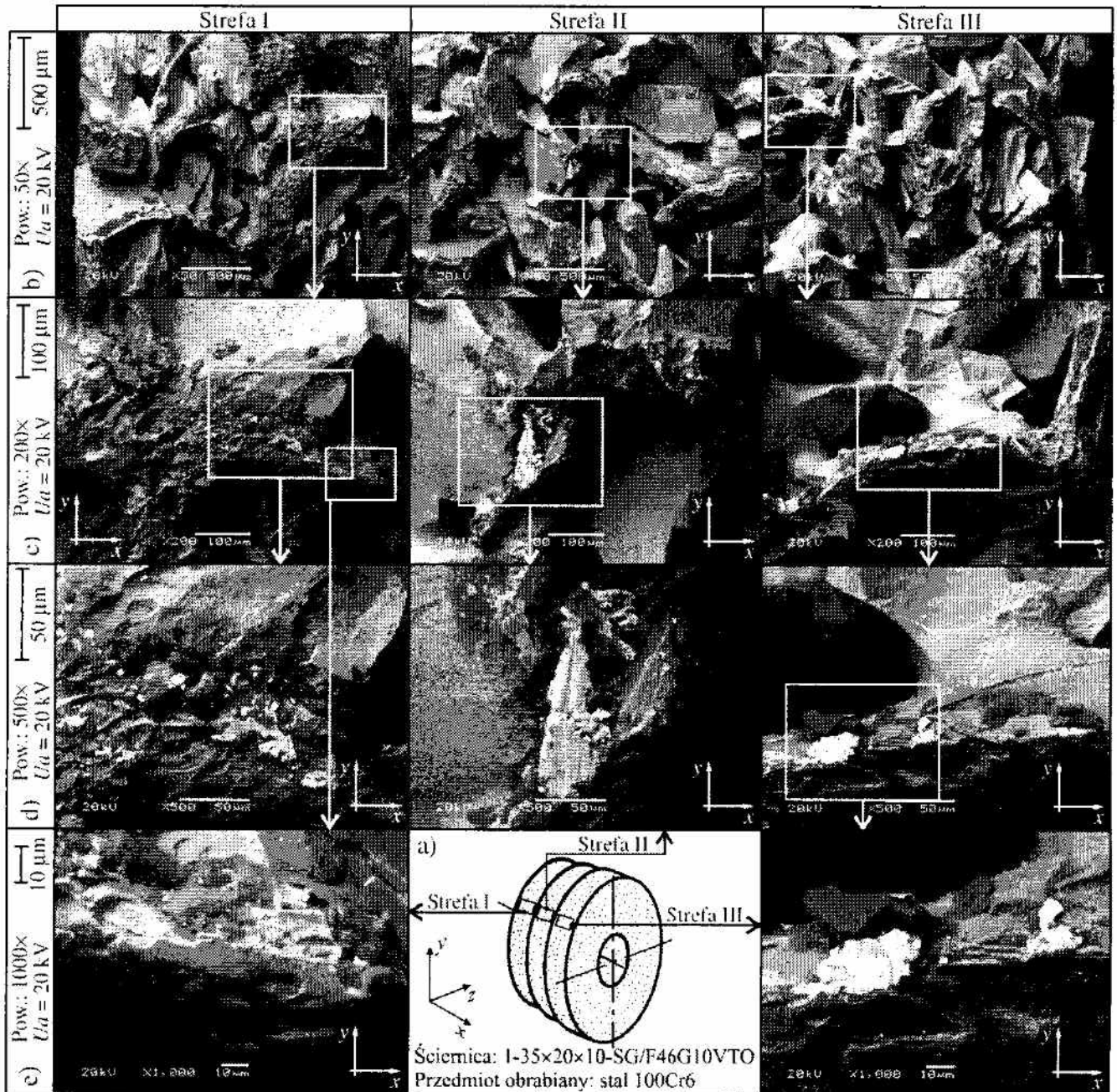
Próbę wcinania ściernicą ze strefami o różnej średnicy przeprowadzono z zastosowaniem płynu chłodząco-smarującego w postaci roztworu wodnego z 5% dodatkiem oleju Castrol Syntilo RHS, doprowadzonym w strefę obróbki metodą zalewową z wydatkiem  $Q_{PCS} = 3,0$  l/min.

Na rysunku 3.11 przedstawiono obrazy mikroskopowe SEM zarejestrowane w trzech strefach czynnej powierzchni badanej ściernicy.

Z analizy uzyskanych obrazów (rys. 3.11) wynika, że w wyniku chłodzenia znacząco zmniejszyły się powierzchnie starcia aktywnych ziaren ściernych, w porównaniu z obrazami CPS ściernicy stożkowej po szlifowaniu na sucho (rys. 3.11). Świadczy to o obniżeniu temperatury w strefie kontaktu na skutek zastosowanego płynu chłodząco-smarującego. Nie zapobiegło to jednak powstawaniu mikrozalepień na wierzchołkach ziaren, szczególnie w II i III strefie CPS (rys. 3.11). Na CPS nie zarejestrowano obrazów wiórów wstęgowych, jedynie drobne mikrowióry umiejscowione wokół wierzchołków ziaren aktywnych biorących udział w procesie usuwania materiału.

Na rysunku 3.12 zestawiono aksonometryczne widoki mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy ze strefami o różnej średnicy oraz powierzchni przedmiotu obrobionego zmierzone w trzech strefach. Obliczone wartości wybranych parametrów SGP analizowanych powierzchni przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 3.12k-r.

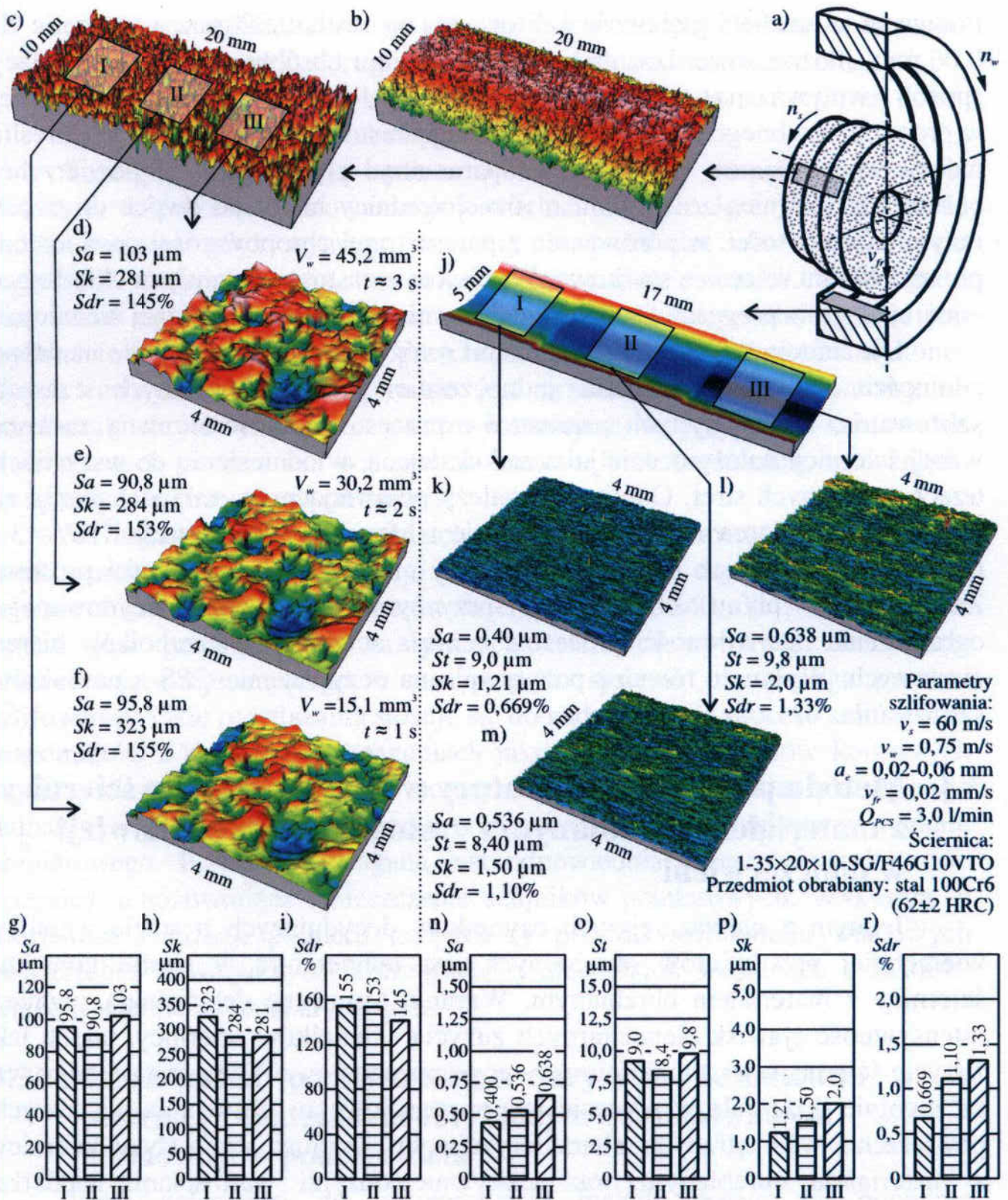
Porównując parametry SGP kolejnych stref CPS (rys. 3.12k-m), można zauważyć, że ich wartości pozostają na porównywalnym poziomie dla wszystkich trzech stref. Największe różnice w wartościach odnotowano dla parametru  $St$  (15%), natomiast rozrzut wartości parametru  $Sa$  i  $Sdr$  wynosił odpowiednio 13% i 7%. Trend malejący wartości parametru  $St$  i  $Sdr$  świadczyć może o nieznacznym stopniu wierzchołków ziaren aktywnych postępującym wraz z rosnącym czasem szlifowania w kolejnych strefach narzędzia.



Rys. 3.11. Obrazy mikroskopowe CPS ze strefami o różnej średnicy (strefa I-III) po szlifowaniu wglębnym stali 100Cr6: a) schemat budowy; b) pow. 50x; c) pow. 200x; d) pow. 500x; e) pow. 1000x

Fig. 3.11. SEM images of the active surface of the grinding wheel with zones of various diameters (zones I-III) after internal cylindrical plunge grinding of 100Cr6 steel: a) construction scheme of the tool; b) mag. 50x; c) mag. 200x; d) mag. 500x; e) mag. 1000x

Porównanie parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego, wyznaczone dla kolejnych trzech stref obróbki (rys. 3.12n-r), wskazuje na wyraźny wzrost chropowatości powierzchni w kolejnych strefach. Parametry  $Sa$ ,  $Sk$  i  $Sdr$  przyjmowały od 50% do 63% większe wartości dla strefy III, w porównaniu ze strefą I.



Rys. 3.12. Mikrotopografie i wybrane parametry SGP czynnej powierzchni ściernicy ze strefami o różnej średnicy oraz przedmiotu obrobionego: a) schemat procesu; b-i) mikrotopografie i parametry SGP trzech obszarów CPS; j-r) mikrotopografie i parametry SGP trzech obszarów pow. przedmiotu obrobionego

Fig. 3.12. Scheme of the grinding process (a) with microtopographies and selected roughness parameters for the three areas of the active surface of the grinding wheel with zones of various diameters (b-i) and the workpiece surface (j-r)



Ponieważ w strefie I głębokość szlifowania wynosiła 0,02 mm, a w strefie III 0,06 mm, można stwierdzić, że wartość naddatku obróbkowego w decydujący sposób wpływa na strukturę geometryczną powierzchni ukształtowanej w procesie zgrubnego szlifowania wgłębnego zastosowaną ściernicą. Podkreślić należy również, że wyznaczone parametry chropowatości powierzchni obrobionej ściernicą ze strefami o różnej średnicy miały od dwóch do trzech razy niższe wartości, w porównaniu z parametrami chropowatości powierzchni po szlifowaniu ściernicą stożkową. Wynika to z zastosowania płynu chłodząco-smarującego w przypadku szlifowania ściernicą ze strefami o różnej średnicy.

Ukształtowanie na CPS trzech stref o różnej średnicy pozwoliło na ocenę zdolności skrawnej narzędzia jednocześnie po trzech różnych czasach szlifowania. Dla przyjętych parametrów procesu zdolność skrawną zastosowanej ściernicy należy ocenić jako zadowalającą, w odniesieniu do wszystkich trzech ocenianych stref. Odnotować należy pojawiające się mikrozalepienia na wierzchołkach ziaren aktywnych po czasie szlifowania  $t \approx 2$  s (strefa II) i  $t \approx 3$  s (strefa III), jednak ich niewielkie rozmiary nie zagrażają stabilności procesu. Zastosowanie płynu chłodzącego przyczyniło się do zdecydowanego ograniczenia intensywności procesów zużycia ściernego wierzchołków ziaren aktywnych. Wpłynęło również pozytywnie na oczyszczanie CPS z produktów szlifowania.

### **3.3. Metoda pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z zastosowaniem termowizji w podczerwieni**

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o stanie warstwy wierzchniej przedmiotów obrobionych jest temperatura w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Warunki termiczne determinują również intensywność zjawisk elementarnych zużycia składników ściernicy, takich jak zużycie ściernicze, wytrzymałościowe i termozmęczeniowe. Temperatura odgrywa szczególnie dużą rolę w procesie jednoprzejściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, charakteryzującym się długą strefą styku ściernicy z materiałem obrabianym oraz relatywnie dużymi wartościami naddatku obróbkowego dochodzącymi do  $a_e = 0,20$  mm. W celu zarejestrowania temperatury w tej odmianie kinematycznej szlifowania opracowano metodę wykorzystującą jako narzędzie pomiarowe kamerę termowizyjną.

Pomiar temperatury w procesie szlifowania jest najczęściej dokonywany za pomocą termopar. Wyróżnia się spośród nich trzy odmiany [145, 213]:

- termopary sztuczne, w których termoelementy wykonane są z materiałów o odpowiednio dobranych charakterystykach;

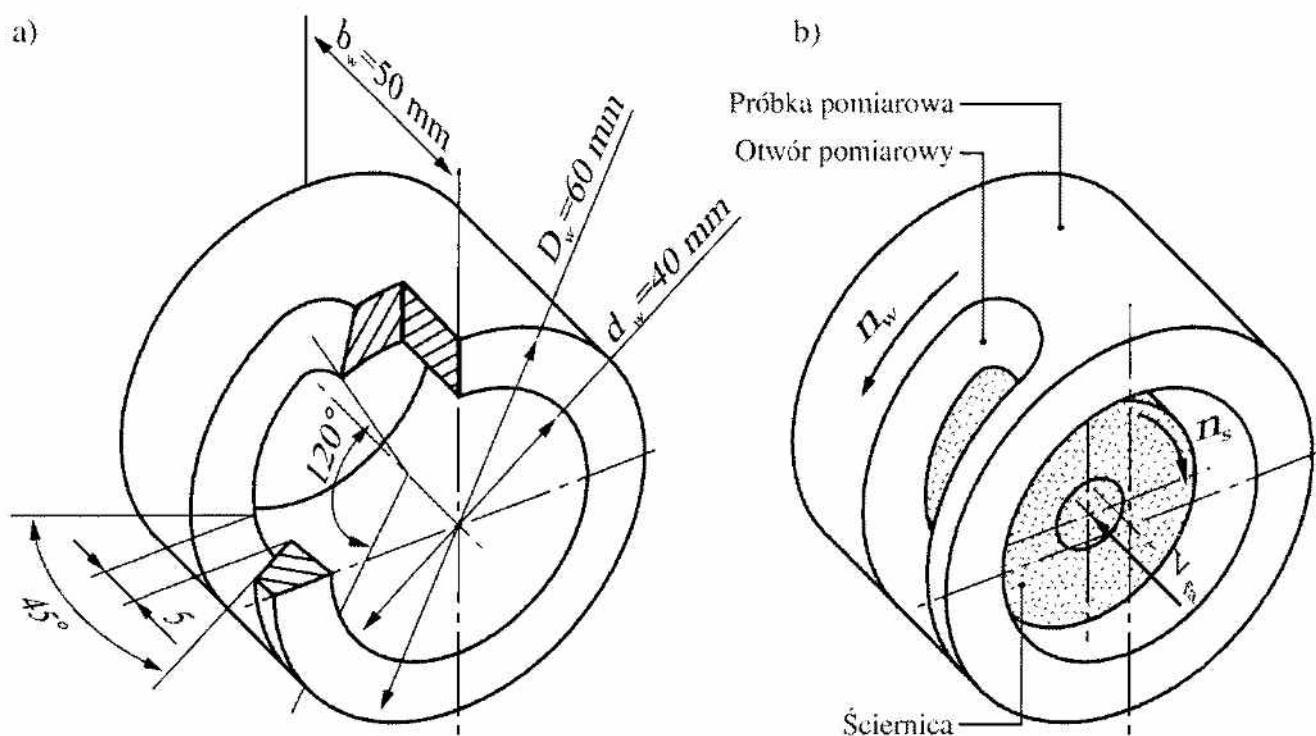
- termopary półnaturalne, w których jeden z termoelementów stanowi materiał obrabiany, a drugi odpowiednio dobrana termoelektroda;
- termopary naturalne, w których jedną termoelektrodą jest materiał ścierny, a drugą materiał obrabiany.

Termopary zapewniają bardzo szybki i dokładny pomiar temperatury, zwłaszcza w procesie szlifowania powierzchni płaskich. Jest on jednak dość skomplikowany, gdyż wymaga ingerencji w przedmiot obrabiany w celu wykonania specjalnych gniazd do umieszczenia termoelementów. Wyklucza to stosowanie tej metody w warunkach przemysłowych. Szczególnie trudne jest wykonanie toru pomiarowego w przypadku szlifowania przedmiotów wykonujących ruch obrotowy, gdyż trudno jest przekazać sygnał pomiarowy na przekaźnik obrotowy. Jest to jeszcze trudniejsze w przypadku szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych o niewielkich średnicach, ze względu na ograniczoną przestrzeń pomiarową.

W najnowszych rozwiązaniach do pomiaru temperatury stosuje się cienkowarstwowe termoelementy, umieszczone na czynnej powierzchni ściernic między czołami segmentów ściernych [210, 340, 381, 417]. Z nich sygnał jest przekazywany za pomocą telemetrii cyfrowej do układu przetwarzająco-rejestrującego, a następnie do systemu monitoringu procesu szlifowania. Takie rozwiązania stosuje się do nadzorowania procesu szlifowania przedmiotów o wysokich wymaganiach jakościowych, np. wałów korbowych czy krzywkowych dla przemysłu motoryzacyjnego [381]. Pomiar taki wymaga jednak skomplikowanych systemów telemetrycznych do przekazania sygnału pomiarowego. Ponadto wymagana jest odpowiednia przestrzeń w korpusie ściernicy, umożliwiająca umieszczenie czujników pomiarowych. Wyklucza to możliwość realizacji pomiaru temperatury podczas szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, szczególnie o niewielkich średnicach z zastosowaniem ściernic małogabarytowych.

### **3.3.1. Istota metody pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z zastosowaniem termowizji w podczerwieni**

Istota zgłoszonej do opatentowania metody polega na pomiarze temperatury podczas szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych za pomocą kamery termowizyjnej przez specjalnie wykonany i ukształtowany podłużny otwór pomiarowy wykonany na części obwodu próbki pomiarowej [317]. Na rysunku 3.13 przedstawiono wymiary charakterystyczne próbki pomiarowej oraz schemat kinematyki procesu szlifowania jednoprzęściowego realizowanego z jej zastosowaniem w celu dokonania pomiarów temperatury.



Rys. 3.13. Próbka pomiarowa do termowizyjnego pomiaru temperatury w procesie jednoprzęciowego szlifowania otworów: a) wymiary próbki; b) kinematyka procesu szlifowania realizowanego z zastosowaniem próbki [317]

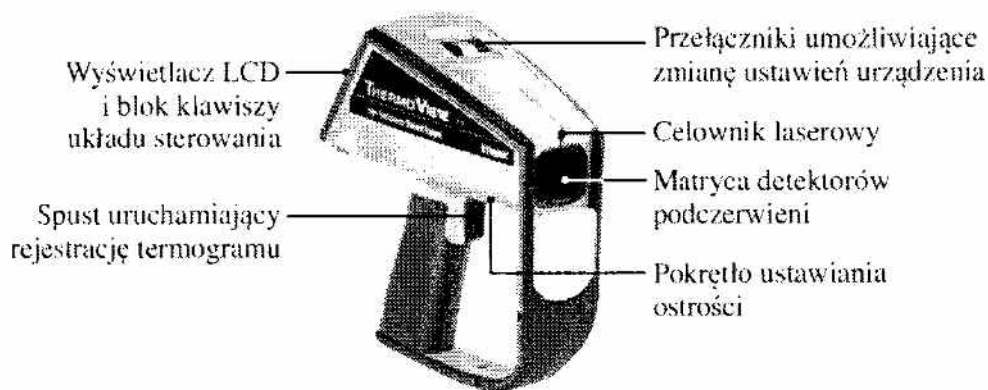
Fig. 3.13. Specimen for thermovision temperature measurement in the single-pass internal cylindrical grinding: a) dimensions of the specimen, b) kinematics of the grinding process realized using the specimen [317]

W próbce pomiarowej wykonany został otwór o szerokości 5 mm na  $1/3$  długości obwodu. Ściany boczne otworu pomiarowego rozchylone były pod kątem  $\alpha = 45^\circ$  w celu umożliwienia rejestrowania temperatury w bezpośredniej bliskości strefy szlifowania. Geometria próbki pomiarowej wynikała z zastosowanej prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego oraz prędkości transmisji danych użytej kamery.

Sposób pomiaru temperatury według opisywanej metody polega na rejestrowaniu termowizyjnego obrazu otoczenia otworu pomiarowego przez szybką kamerę termowizyjną i utrwalaniu go w postaci termogramów. Na ich podstawie można określić wartość temperatury w dowolnym punkcie zarejestrowanego obrazu oraz dokonać analizy rozkładu temperatur w poszczególnych przekrojach otworu pomiarowego. Pomiar jest dokonywany bezstykowo w dowolnym momencie procesu szlifowania.

### 3.3.2. Przykład zastosowania metody pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów

Opisywaną metodę sprawdzono przy pomiarze temperatury w strefie obróbki podczas realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Pomiarzy wykonano przy użyciu kamery termowizyjnej typu ThermoView Ti30 firmy Raytek Corp., której elementy funkcjonalne opisano na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Elementy funkcjonalne kamery termowizyjnej ThermoView Ti30 firmy Raytek Corp. [331]

Fig. 3.14. Functional elements of the thermovision camera ThermoView Ti30 by Raytek Corp. [331]

Zastosowane urządzenie należało do grupy kamer o długofalowym zakresie widmowym (7-14  $\mu\text{m}$ ). Zakres pomiarowy kamery wynosił od 0 do 250°C z dokładnością  $\pm 2\%$ , a wielkość matrycy detektorów podczerwieni wynosiła 160  $\times$  120 pikseli.

Dokładność pomiaru temperatury wykonanego kamerą termowizyjną określono jako sumę błędów wynikającego z warunków pomiaru (odległości od źródła oraz jego rozmiarów) oraz dokładności urządzenia. Obliczony w ten sposób całkowity błąd pomiaru wynosił  $\pm 3\%$ . Zarejestrowane termogramy analizowano za pomocą programu InsideIR w wersji 2.0.2 firmy Fluke Corp.

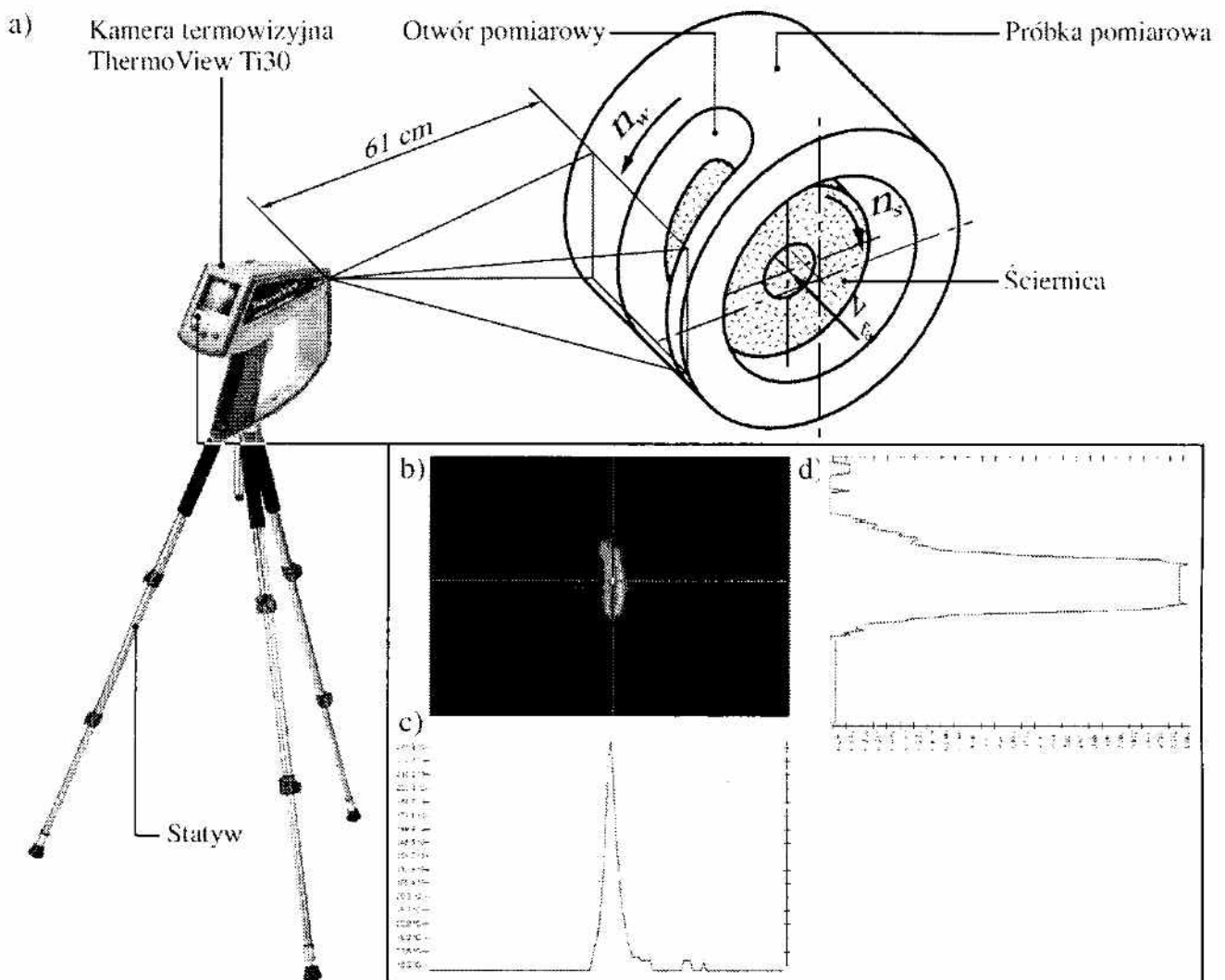
Emisyjność szlifowanej tulei, wykonanej ze stali 40H (53 $\pm$ 2 HRC), dobrano z tablic emisyjności. Wynosiła ona:  $\varepsilon = 0,4-0,6$ . Podczas analizy zarejestrowanych termogramów dla pomiarów temperatury przedmiotu szlifowanego przyjęto wartość średnią z podanego zakresu  $\varepsilon = 0,5$ . Emisyjność ściernicy przyjęto z tych samych tablic ( $\varepsilon = 0,95$ ), stosując wartość podaną dla ceramiki.

Dodatkowo została maksymalnie zredukowana prędkość obrotowa próbki pomiarowej do wartości  $n_w = 18$  obr./min, aby możliwe było zarejestrowanie

pojedynczego termogramu dokładnie w chwili, w której wycięcie w tulei znajduje się naprzeciwko detektora podczerwieni, odsłaniając strefę obróbki.

Ponieważ pomiarów nie można było przeprowadzić z udziałem płynu chodząco-smarującego, szlifowanie prowadzono na sucho. Wymusiło to znaczne zmniejszenie grubości warstwy materiału usuwanej w jednym przejściu ściernicy do wartości  $a_e = 0,025$  mm. Do takiej wartości styku roboczego dobrano kąt nakroju stożkowego badanych ściernic, który przy szerokości nakroju  $b = 10$  mm był równy  $\chi = 0,14^\circ$ .

Na rysunku 3.15 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego oraz przykładowy termogram zarejestrowany w trakcie procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów [317].



Rys. 3.15. Schemat stanowiska pomiarowego (a) wyposażonego w kamerę termowizyjną ThermoView Ti30 firmy Raytek Corp. z przykładowym termogramem (b) oraz wykresami rozkładu temperatury w przekroju osiowym (c) i obwodowym (d) [317]

Fig. 3.15. Scheme of measuring position (a) with thermovision camera ThermoView Ti30 by Raytek Corp. and exemplary thermogram (b) with diagrams of axial (c) and peripheral temperature distribution [317]

Tak zestawione stanowisko pomiarowe zastosowane zostało do porównawczej oceny temperatury w procesie szlifowania jednoprzęściowego realizowanego ściernicami z nakrojem stożkowym [249] (podrozdział 4.1.5).

### **3.4. Metoda oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM**

Do oceny stanu CPS stosuje się wiele metod pomiarowych [178]. Klasycznym podejściem jest zastosowanie stykowych metod profilometrycznych [408]. Pozwalają one, na podstawie zarejestrowanego profilu lub mikrotopografii, uzyskać dużą liczbę parametrów charakteryzujących stan CPS. Może to stanowić przydatne kryterium oceny, zwłaszcza w rutynowych pomiarach laboratoryjnych. W wielu zastosowaniach badawczych wykorzystanie jednej metody pomiarowej może okazać się jednak niewystarczające. W szczególnie interesujących przypadkach korzystne jest zastosowanie kilku metod, zwłaszcza jeżeli ocena ma mieć charakter kompleksowy. Metody stykowe mogą być wtedy wsparte wybranymi metodami optycznymi (mikroskopia interferencyjna [83], mikroskopia konfokalna [214]) lub obrazowymi (elektronowa mikroskopia skaningowa – SEM [60]). Ostatnia z wymienionych metod jest, w tym kontekście, najczęściej stosowana ze względu na szereg zalet, takich jak: wysoka zdolność rozdzielcza, duża głębia ostrości, uzyskiwanie wysokiej jakości obrazów, możliwość płynnej zmiany powiększenia oraz szybkiego skanowania dużych powierzchni, możliwość uzyskiwania obrazu dyfrakcyjnego – identyfikacja struktury krystalicznej, prowadzenie analizy pierwiastkowej materiałów przy pomocy mikroanalizatora rentgenowskiego dyspersji energii (EDS) sprzężonego z mikroskopem.

#### **3.4.1. Istota metody oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM**

Przy ocenie stanu CPS obrazy uzyskane techniką mikroskopii skaningowej służą najczęściej do analiz wizualnych, odnoszących się do cech jakościowych, tylko niekiedy uzupełnionych w niewielkim fragmencie danymi ilościowymi, np. dotyczącymi długości wiórów itp. W celu uzyskania z zarejestrowanych obrazów mikroskopowych SEM znacznie większej liczby informacji o charakterze ilościowym, służących szczegółowej ocenie stanu CPS po procesach obróbki ściernicy, zaproponowano wykorzystanie technik przetwarzania i analizy obrazu [133, 136]. W niniejszym rozdziale zaprezentowany został opis użytego stanowiska do rejestracji obrazów metodą

skaningowej mikroskopii elektronowej oraz przedstawione zostały wybrane analizy ilościowe, obejmujące m.in. wyznaczanie parametrów geometrycznych obiektów znajdujących się w ocenianych obrazach. Do komputerowej analizy obrazów użyto specjalistycznego środowiska badawczego Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics.

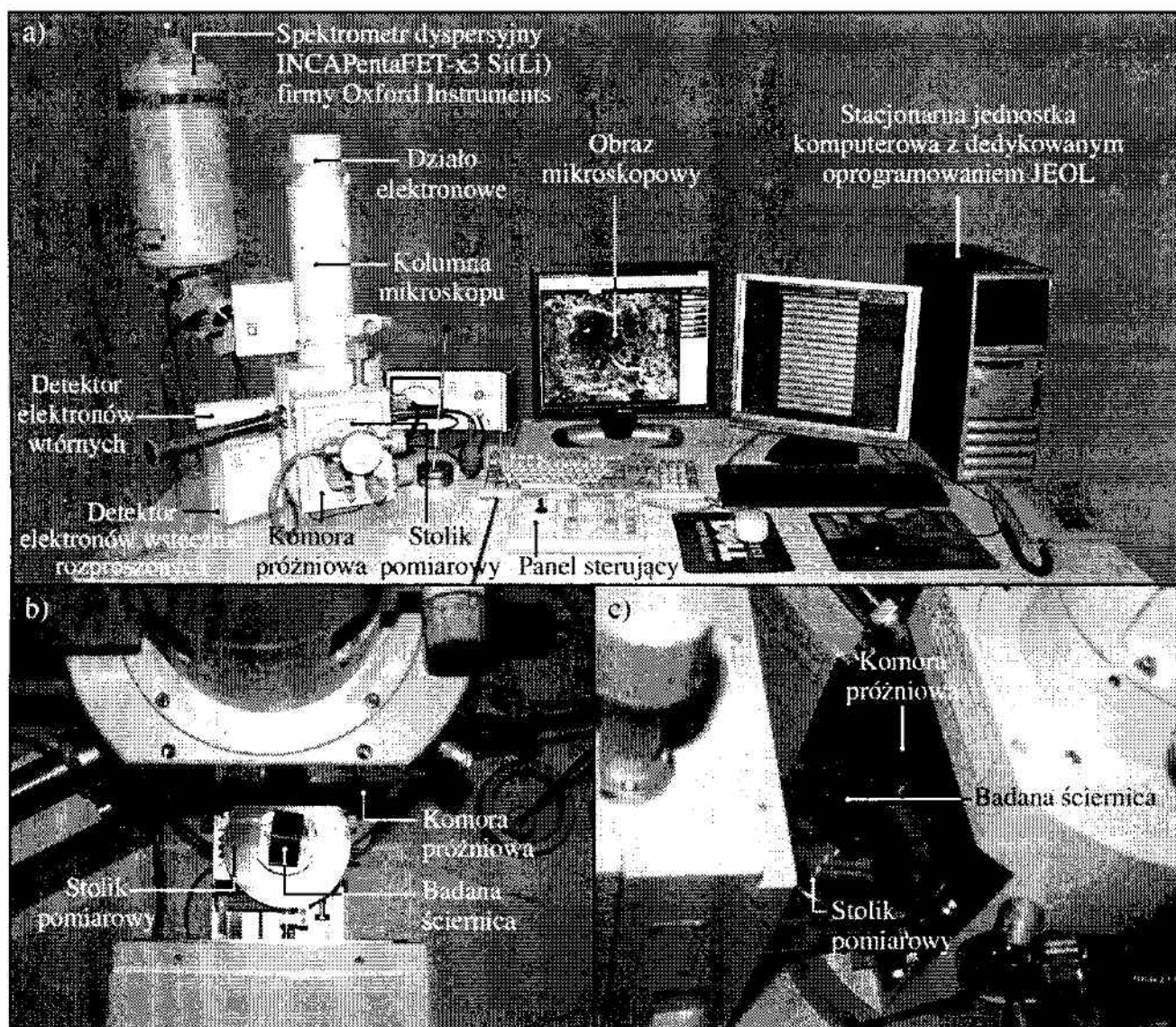
### **3.4.2. Stanowisko do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego (EDS)**

Do rejestracji obrazów mikroskopowych użyto elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. Urządzenie to charakteryzowało się następującymi parametrami: zakres powiększeń od 18× do 300000×, 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 × 960 pikseli, głębia kolorów 8-bitowa, tryb szaroodcieniowy, format zapisu \*.bmp.

Przed dokonaniem akwizycji ściernica była każdorazowo oczyszczana powierzchniowo sprężonym powietrzem, a następnie umieszczana na stoliku pomiarowym znajdującym się w komorze próżniowej mikroskopu.

W kolumnie mikroskopu JSM-5500LV zainstalowany był moduł energo-dyspersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) o nazwie INCAPentaFET-x3 firmy Oxford instruments (UK). Moduł wyposażony był w detektor typu Si(Li) o średnicy 30 mm<sup>2</sup> i spektralnej zdolności rozdzielczej < 129eV (dla linii Mn K $\alpha$ ). Umożliwiał on jakościową i ilościową analizę pierwiastków o liczbie atomowej  $Z > 4$ . Średnica wiązki energo-dyspersyjnego spektrometru rentgenowskiego w trakcie prowadzonych analiz wynosiła w przybliżeniu 60 nm.

Na rysunku 3.16 przedstawiono widok ogólny wykorzystanego w badaniach doświadczalnych elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd.



Rys. 3.16. Elektronowy mikroskop skaningowy JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. wyposażony w moduł energo-dyspersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments: a) widok ogólny mikroskopu; b-c) widok próbki przeznaczonej do badań ustawionej na stoliku pomiarowym

Fig. 3.16. Scanning electron microscope JSM-5500LV by JEOL Ltd. with an Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) module INCAPentaFET-x3 from Oxford Instruments: a) overall view of the microscope; b-c) specimen placed on a measuring table

### 3.4.3. Weryfikacja możliwości zastosowania technik komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM do oceny stanu czynnej powierzchni ściernic modyfikowanych

Weryfikacji możliwości pozyskania dodatkowych informacji o stanie CPS na podstawie zarejestrowanych obrazów mikroskopowych SEM, odpowiednio przetworzonych i przeanalizowanych komputerowo, dokonano na przykładzie szeregu obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni ściernic



ze spoiwem ceramicznym z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane. Do analiz wytypowano obrazy zarejestrowane na powierzchni czterech ściernic, których szczegółową charakterystykę zamieszczono w tabeli 3.4.

Tab. 3.4. Charakterystyka ściernic użytych do oceny technikami komputerowej analizy obrazu

Tab. 3.4. General characteristics of the grinding wheels used for assessment with image analysis techniques

Nr próbki	Charakterystyka techniczna ściernicy	Obiekt poddany ocenie	Cechy charakterystyczne CPS
1.	1-35×10×10-SG/F46 K7VDG	CPS po szlifowaniu wgłębnym z oscylocjami otworów (materiał obrabiany: stal 100Cr6)	Starte wierzchołki aktywnych ziaren ściernych
2.	1-35×20×10-SG/F46 G10VTO	CPS po szlifowaniu wgłębnym otworów (materiał obrabiany: stop INCONEL® alloy 600)	Mikrozalepienia wierzchołków aktywnych ziaren ściernych
3.	1-35×20×10-SG/F46 K7VDG70% / 99A/F80 I7VDG30% (ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie – badano czynną powierzchnię strefy szlifowania zgrubnego wykonaną z ziaren SG™ o numerze 46)	CPS po szlifowaniu jednoprzęściowym otworów (materiał obrabiany: stal 100Cr6)	Makrozalepienia wierzchołków ziaren ściernych i przestrzeni międzyziarnowych
4.	1-35×20×10-SG/F46 G10VTO (po procesie impregnowania CPS siarką)	CPS po szlifowaniu wgłębnym otworów (materiał obrabiany: stop Titanium Grade 2®)	Przestrzenie międzyziarnowe wypełnione siarką

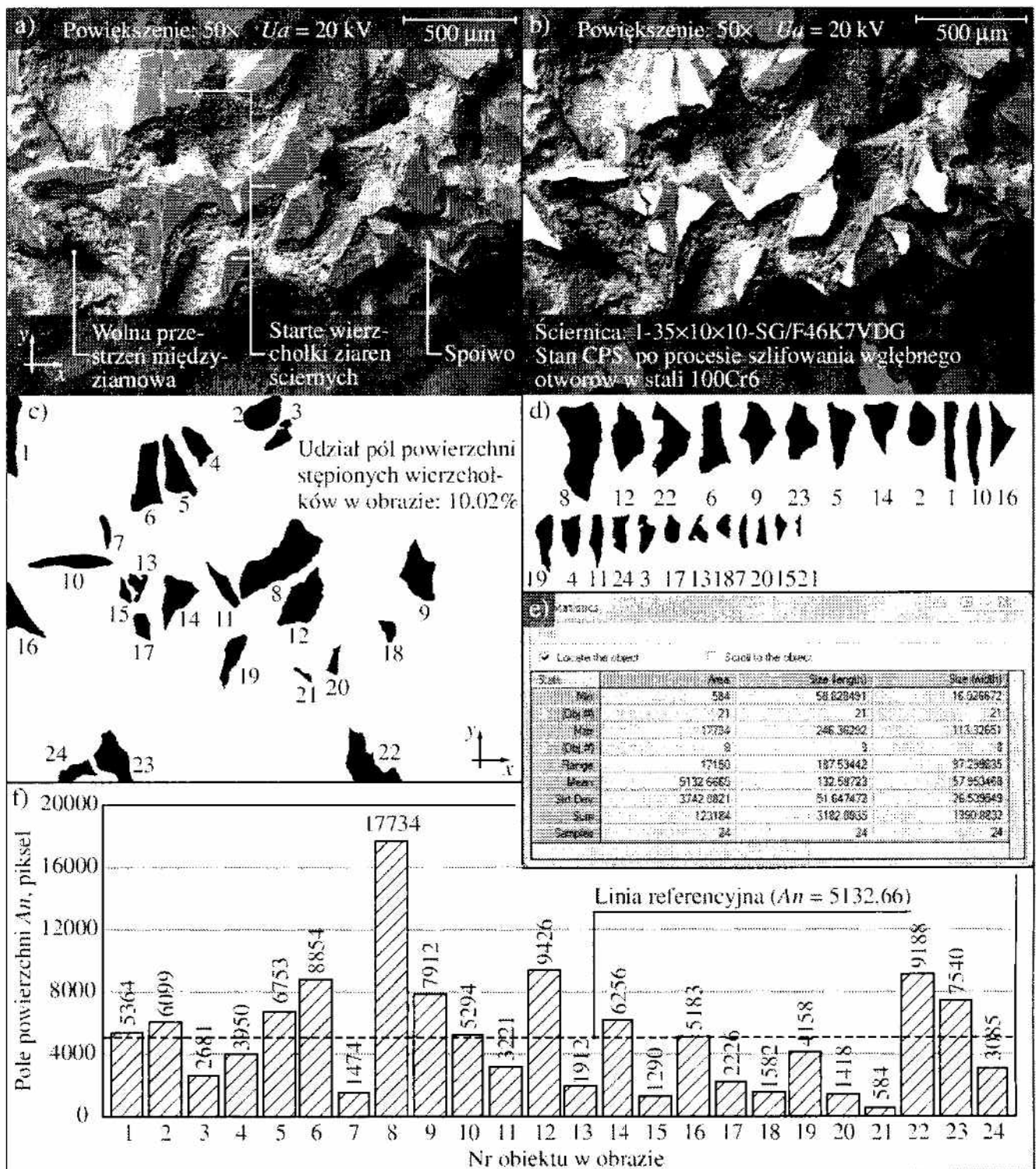
Wszystkie ściernice, których obrazy mikroskopowe SEM czynnych powierzchni wytypowano do analiz, należą do grupy ściernic z innowacyjnymi modyfikacjami:

- próbka nr 1 i 2 – ściernice o zmodyfikowanym udziale i budowie strukturalnej spoiwa szklanokrystalicznego opisane szczegółowo w podrozdziale 4.2;
- próbka nr 3 – ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie stosowana w procesie szlifowania jednoprzęściowego opisana szczegółowo w podrozdziale 4.1;
- próbka nr 4 – ściernica impregnowana siarką opisana szczegółowo w podrozdziale 4.5.

Wybór takiego zbioru analizowanych obrazów miał na celu wykazanie zalet komputerowej analizy obrazów przy ocenie stanu czynnej powierzchni ściernic modyfikowanych.

Na rysunku 3.17 przedstawiono rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 1. Ściernicę tę użyto w procesie szlifowania wgłębnego otworów z oscylacjami w stali 100Cr6. Dla CPS zarejestrowano obraz mikroskopowy przedstawiający starte wierzchołki aktywnych ziaren ściernych.

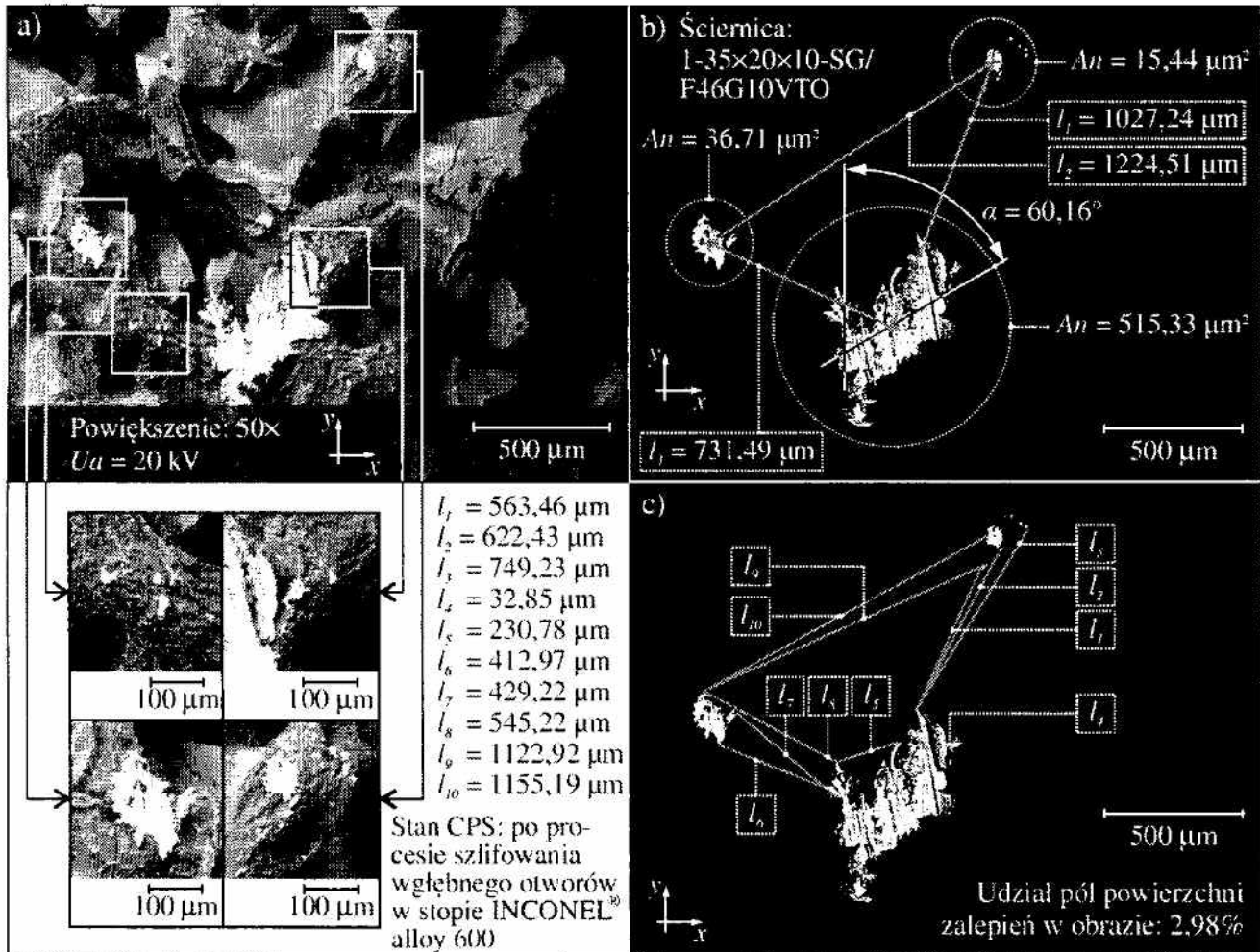
Na obrazie zarejestrowano fragment CPS o wymiarach  $5,12 \times 3,84$  mm, dla którego wydzielono poprzez binaryzację te fragmenty, które stanowiły starte wierzchołki aktywnych ziaren ściernych. Powstałą w ten sposób maskę nałożono na obraz wejściowy (rys. 3.17b) w celu sprawdzenia, czy binaryzacja została przeprowadzona w sposób poprawny. Następnie za pomocą funkcji *Count/Size* oprogramowanie dokonało automatycznego zliczenia wszystkich ciemnych obszarów (obiektów) w analizowanym obrazie (rys. 3.17c). Operacja ta pozwoliła na wyznaczenie podstawowych parametrów geometrycznych charakteryzujących starte wierzchołki aktywnych ziaren ściernych (tj. pola powierzchni  $A_n$ , długości  $l$  i szerokości  $w$ ). Uzyskane wartości zostały przedstawione w sposób statystyczny. W tym celu skorzystano z funkcji *Statistics* (rys. 3.17e). Dodatkowo dokonano również uszeregowania wszystkich wyznaczonych obszarów w zależności od wielkości ich pola powierzchni. Operacja realizowana była automatycznie przez funkcję *Sorted Object Image* (rys. 3.17d). Uzyskane wartości jednego z parametrów geometrycznych (pola powierzchni  $A_n$ ) zestawiono dla wszystkich wyznaczonych obszarów (obiektów). Na wykresie kolumnowym (rys. 3.17f) zaznaczono także linię referencyjną, stanowiącą wartość średnią pól powierzchni dla wszystkich obszarów. Analiza wykresu pozwoliła stwierdzić, że obszar (obiekt) nr 21 posiadał najmniejsze  $A_n$  wynoszące 504 pikseli ( $2336 \mu\text{m}^2$ ), a obszar (obiekt) nr 8 największą wartość  $A_n = 17734$  pikseli ( $70936 \mu\text{m}^2$ ). Obszar startych wierzchołków aktywnych ziaren ściernych stanowił 10,02% całkowitego obszaru analizowanego fragmentu CPS.



Rys. 3.17. Rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 1: a) obraz wejściowy; b) obraz z nałożoną maską wydzielonych obszarów odpowiadających startym wierzchołkom aktywnych ziaren ściernych; c) obraz maski; d) obszary uszeregowane wg wielkości pola powierzchni  $A_n$ ; e) okno funkcji *Statistics*; f) wykres wartości pow.  $A_n$  dla poszczególnych obszarów

Fig. 3.17. The results of image analysis carried out for sample No. 1: a) input image; b) image with mask of selected objects corresponding to the dulled vertexes of active abrasive grains; c) image of the mask; d) areas classified according to the size of the area  $A_n$ ; e) window of the *Statistics* function; f) column diagram showing the values of the area  $A_n$  for particular objects

Na rysunku 3.18 przedstawiono rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 2, którą obrobiono w kinematyce szlifowania w głębego walcową powierzchnię wewnętrzną w stopie INCONEL<sup>®</sup> alloy 600. Na obrazie mikroskopowym CPS można wyraźnie zaobserwować trzy różnej wielkości mikrozaplecia wierzchołków ziaren ściernych.



Rys. 3.18. Rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 2: a) obraz wejściowy z zaznaczonymi obszarami mikrozapleć występującymi na CPS; b) obraz po procesie binaryzacji z wyznaczonymi wartościami pól powierzchni mikrozapleć oraz odległościami od ich środków ciężkości; c) przykładowe wyznaczanie odległości od wybranych mikrozapleć

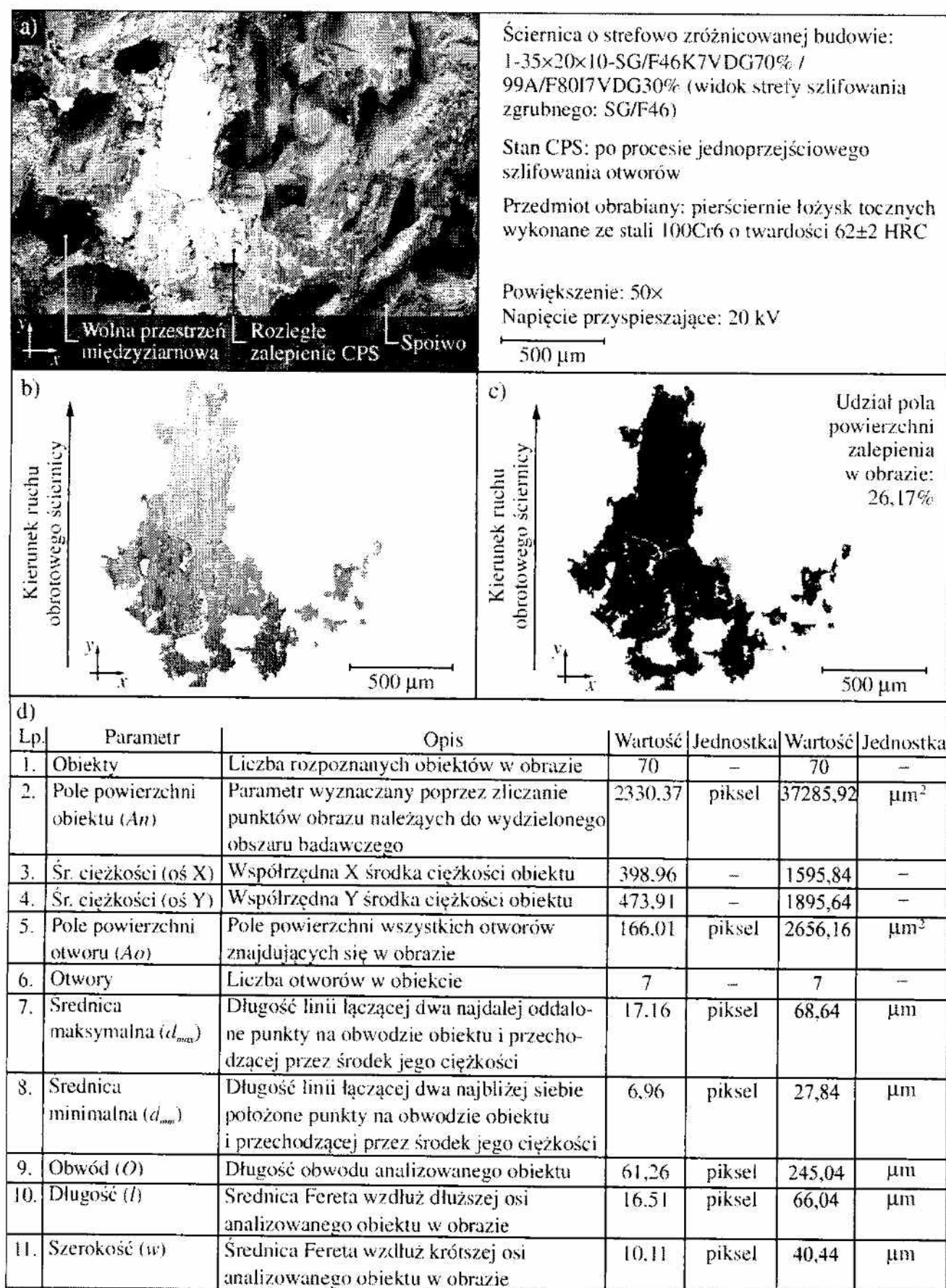
Fig. 3.18. The results of image analysis carried out for sample No. 2: a) input image with selected microsmearing areas of the grinding wheel active surface; b) image after the binarization process with determined values of the all microsmearing areas and distances from its center mass, c) determination of the distance from the selected microsmearing

W tym przypadku analiza polegała w głównej mierze na wyznaczeniu odległości między obiektami (mikrozapleć) znajdującymi się w obrazie. Z obrazu wejściowego (rys. 3.18a) o wymiarach  $5,12 \times 3,84 \text{ mm}$  wydzielono

fragmenty, które powiększono w celu uwidocznienia szczegółów mikrozalepień na różnych obszarach analizowanej powierzchni. Po procesie binaryzacji uzyskano obraz z zaznaczonymi trzema obszarami, na których wystąpiły mikrozalepienia (rys. 3.18b). Dla tych obszarów wyznaczono wartości pól powierzchni, korzystając z funkcji *Count/Size*. Wartości uzyskane w pikselach przeliczono na mikrometry i naniesiono na obraz. Następnie, korzystając z tej samej funkcji, wyznaczono współrzędne środków ciężkości poszczególnych obszarów mikrozalepień oraz odległości między nimi (funkcja *Measurement* i *Measure Distance*). Dodatkowo podano kąt pochylenia obszaru największego mikrozalepienia w stosunku do osi ściernicy. Na rysunku 3.18c dokonano przykładowych pomiarów odległości pomiędzy wybranymi punktami obszarów mikrozalepień. Procentowy udział pól powierzchni mikrozalepień w całym ocenianym obrazie stanowił 2,98%.

Na rysunku 3.19 przedstawiono rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 3. Badaniom poddano czynną powierzchnię strefy szlifowania zgrubnego wykonaną z ziaren SG<sup>TM</sup> o rozmiarze 46. Ściernica była zastosowana w procesie szlifowania jednoprzęściowego otworów w pierścieniach łożysk tocznych wykonanych ze stali 100Cr6. W centralnej części obrazu mikroskopowego SEM zarejestrowanego dla tej ściernicy widoczny jest obszar rozległego makrozalepienia wierzchołków ziaren ściernych i przestrzeni międzyziarnowych.

Z obrazu o wymiarach 5,12 × 3,84 mm zarejestrowanego dla próbki nr 3 wydzielono, korzystając z funkcji *Irregular AOI*, centralny fragment obszaru makrozalepienia oraz niewielkie powierzchniowo obszary znajdujące się po jego prawej dolnej stronie (rys. 3.19b). Wydzielenie pozwoliło na całościowe przedstawienie obszaru makrozalepienia. Dodatkowo umożliwiło określenie kierunku ruchu obrotowego narzędzia ściernego na podstawie obserwacji śladów na jego powierzchni. Wyżej wymieniony obraz, po procesie binaryzacji (rys. 3.19c), posłużył do wyznaczenia szeregu parametrów geometrycznych. Opis parametrów oraz uzyskane w trybie automatycznym (funkcja *Count/Size*) wartości przedstawione zostały w formie tabeli (rys. 3.19d). Analiza w tym przypadku polegała głównie na określeniu dużej liczby parametrów geometrycznych, charakteryzujących obszar makrozalepienia CPS. Oprogramowanie Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 pozwala na wyznaczanie wartości ponad 30 parametrów geometrycznych. Podczas prowadzenia analizy posłużono się jedynie wybranymi parametrami przedstawionymi w tabeli (rys. 3.19d). Końcowym etapem analizy obrazu próbki nr 3 było określenie procentowego udziału pola powierzchni makrozalepienia w całym ocenianym obrazie. Udział ten stanowił 26,17%.



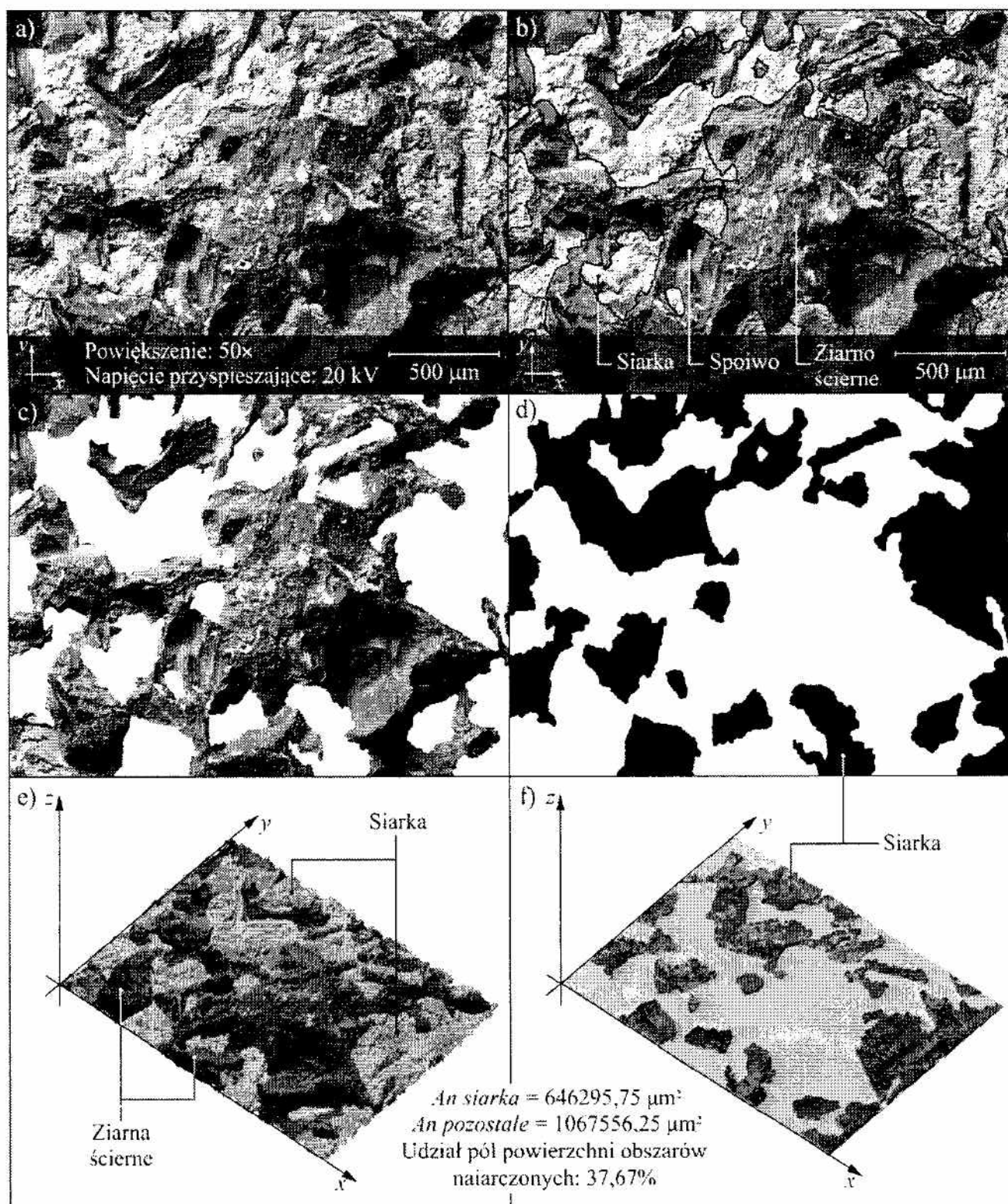
Rys. 3.19. Rezultaty analizy obrazu próbki nr 3: a) obraz wejściowy; b) obszar makrozalepienia; c) obszar makrozalepienia po binaryzacji; d) parametry geometryczne

Fig. 3.19. The results of image analysis for sample No. 3: a) input image; b) smearing area; c) smearing area after the binarization, d) geometrical parameters

Na rysunku 3.20 przedstawiono rezultaty analizy obrazu przewodzonej dla próbki nr 4. Ściernicę poddano procesowi impregnowania siarką i użyto w procesie szlifowania wglębnego otworów w stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup>. Obraz mikroskopowy SEM zarejestrowany dla takiej powierzchni przedstawia rozległe przestrzenie międzyziarnowe wolne od siarki oraz wypełnione siarką.

Z obrazu o wymiarach  $5,12 \times 3,84$  mm zarejestrowanego dla próbki nr 4 wydzielono, korzystając z funkcji *Irregular AOI*, te fragmenty powierzchni, które zawierały siarkę (rys. 3.20b). Zauważyć można, że obszary CPS z siarką były nierównomierne rozmieszczone na analizowanym obrazie, co dodatkowo utrudniało ich wizualną obserwację. Barwa siarki na obrazach pochodzących z mikroskopu skaningowego była bardzo zbliżona do barwy tła – tzn. ziaren ściernych i spoiwa. Należało więc bardzo precyzyjnie identyfikować i wyselekcjonować obszary z siarką na analizowanym obrazie. Po zaznaczeniu obszary z siarką usunięto, pozostawiając samo tło (rys. 3.20c). Pozwoliło to na pełniejszą obserwację ukształtowania CPS oraz stanowiło podstawę do przeprowadzenia procesu binaryzacji. Obraz po binaryzacji (rys. 3.20d) posłużył do przeprowadzenia analizy – tj. wyznaczenia sumarycznego pola powierzchni obszaru z siarką i obszaru pozbawionego siarki. Dodatkowo, podobnie jak dla poprzednich analiz, wyznaczono również procentowy udział pól powierzchni obszarów nasiarczonych. W tym przypadku wynosił on 37,67%.

Przedstawiona analiza została poszerzona o przestrzenną wizualizację CPS, realizowaną za pomocą funkcji *Surface Plot*. Działanie tej funkcji polega na generowaniu quazi-przestrzennego odwzorowania płaskiego dwuwymiarowego obrazu wejściowego. Przestrzenna wizualizacja CPS zarejestrowanej dla próbki nr 4 została przedstawiona w dwóch wariantach. W pierwszym (rys. 3.20e) wygenerowano wizualizację z rysunku 3.20b przedstawiającą pełną powierzchnię ściernicy – tzn. zawierającą zarówno obszary z siarką, jak i tło – ziarna ściernic i spoiwo. W drugim wariantcie (rys. 3.20f) wygenerowano wizualizację z obrazu, w którym wydzielono tło (ziarna ściernic i spoiwo), pozostawiając szereg obszarów z siarką. Przedstawione wizualizacje mogą być istotnym uzupełnieniem analiz prowadzonych na obrazach dwuwymiarowych. Pozwalają uwydatnić pewne cechy powierzchni, które są znacznie lepiej widoczne w ujęciu przestrzennym. Daje to podstawy do prawidłowej interpretacji informacji zawartych w analizowanych obrazach.



Rys. 3.20. Rezultaty analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki nr 4: a) obraz wejściowy; b) obraz wejściowy z zaznaczonymi obszarami z siarką; c) obraz obszaru zawierającego ziarna ścierne i spoiwo; d) obraz po binaryzacji; e) wizualizacja przestrzenna; f) wizualizacja obszarów zawierających siarkę

Fig. 3.20. The results of image analysis for sample No. 4: a) input image; b) input image with marked areas with sulfur; c) the image with visible areas of abrasive grains and bond; d) image after binarization; e) 3D visualization; f) 3D visualization of the visible areas containing sulfur



### **3.5. Metoda oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem skaterometrii laserowej wspomaganiej technikami przetwarzania i analizy obrazu**

W procesie szlifowania otworów niezwykle ważne jest monitorowanie i ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy, zmieniającego się pod wpływem zjawisk zużycia. Zagadnienie to staje się szczególnie istotne w przypadku obróbki materiałów trudno skrawalnych, takich jak stopy tytanu, aluminium, magnezu, niklu, kobaltu oraz stale wysokostopowe, charakteryzujących się dużą ciągliwością, wytrzymałością i trwałością oraz małą przewodnością cieplną. Jednym z istotnych problemów w szlifowaniu tego typu materiałów jest intensywne zalepianie czynnej powierzchni ściernicy ciągliwymi wiórami. Wyznaczenie momentu, w którym konieczna jest regeneracja narzędzia poprzez obciążanie, może bowiem zdecydować zarówno o jakości powierzchni szlifowanego otworu, jak i o trwałości ściernicy.

Ocena stanu CPS, a w szczególności stopnia jej zalepiania materiałem obrabianym, może być dokonywana przy wykorzystaniu różnych metod pomiarowych, przy czym najczęściej stosowane są metody optyczne. Z wielu grup metod optycznych mogących mieć zastosowanie w tego typu ocenie największe nadzieje wiąże się z metodami wykorzystującymi zjawisko rozpraszania światła, czyli metodami skaterometrycznymi. Ze względu na szereg zalet, takich jak m.in. duża czułość, krótki czas pomiaru, możliwość dokonywania oceny podczas ruchu badanej powierzchni, metody skaterometryczne mogą stanowić dobrą alternatywę dla innych metod (pneumatycznych, ultradźwiękowych). Dodatkowo, możliwość ich integracji z technikami przetwarzania i analizy obrazu pozwala na uzyskanie efektywnego narzędzia pomiarowego przeznaczonego do diagnostyki narzędzi ściernych.

#### **3.5.1. Charakterystyka optycznych metod pomiarowych wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła**

Terminem skaterometria [330] określa się grupę optycznych metod pomiarowych wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła, przeznaczonych do oceny struktury geometrycznej powierzchni oraz detekcji różnorodnych wad powierzchni. Opis teoretyczny rozpraszania światła związany jest z teorią dyfrakcji Kirchhoffa [10, 14, 38] oraz wektorową teorią zaburzeń Rayleigha-Ricea [41, 333, 364]. Teorie te umożliwiły opracowanie pierwszych w miarę spójnych modeli matematycznych rozpraszania światła odbitego od powierzchni chropowatych. Kolejne teorie, m.in. skalarna teoria dyfrakcji Beckmanna-Kirchhoffa [85, 303, 329], teoria Harveya-Shacka [86, 392, 393] i inne [86, 365,

392], umożliwiły rozszerzenie modeli matematycznych i ich adaptację do zastosowań praktycznych.

Do grupy metod rozpraszania światła można zaliczyć m.in. metody: integracyjne TIS (*Total Integrated Scattering*) [364, 376], różniczkowe ARS (*Angle-Resolved Scattering*) [16, 21, 118, 193, 379] i wykorzystujące optyczne przekształcenie Fouriera OFT (*Optical Fourier Transform*) [309, 380]. W metodach rozpraszania światła często korzysta się z promieniowania laserowego, obejmującego zakres widma widzialnego (od 400 nm do 700 nm) [52] oraz zakres bliskiej i średniej podczerwieni (od 0,75  $\mu\text{m}$  do 15  $\mu\text{m}$ ) [20] – mówi się wtedy o skaterometrii laserowej [103, 192].

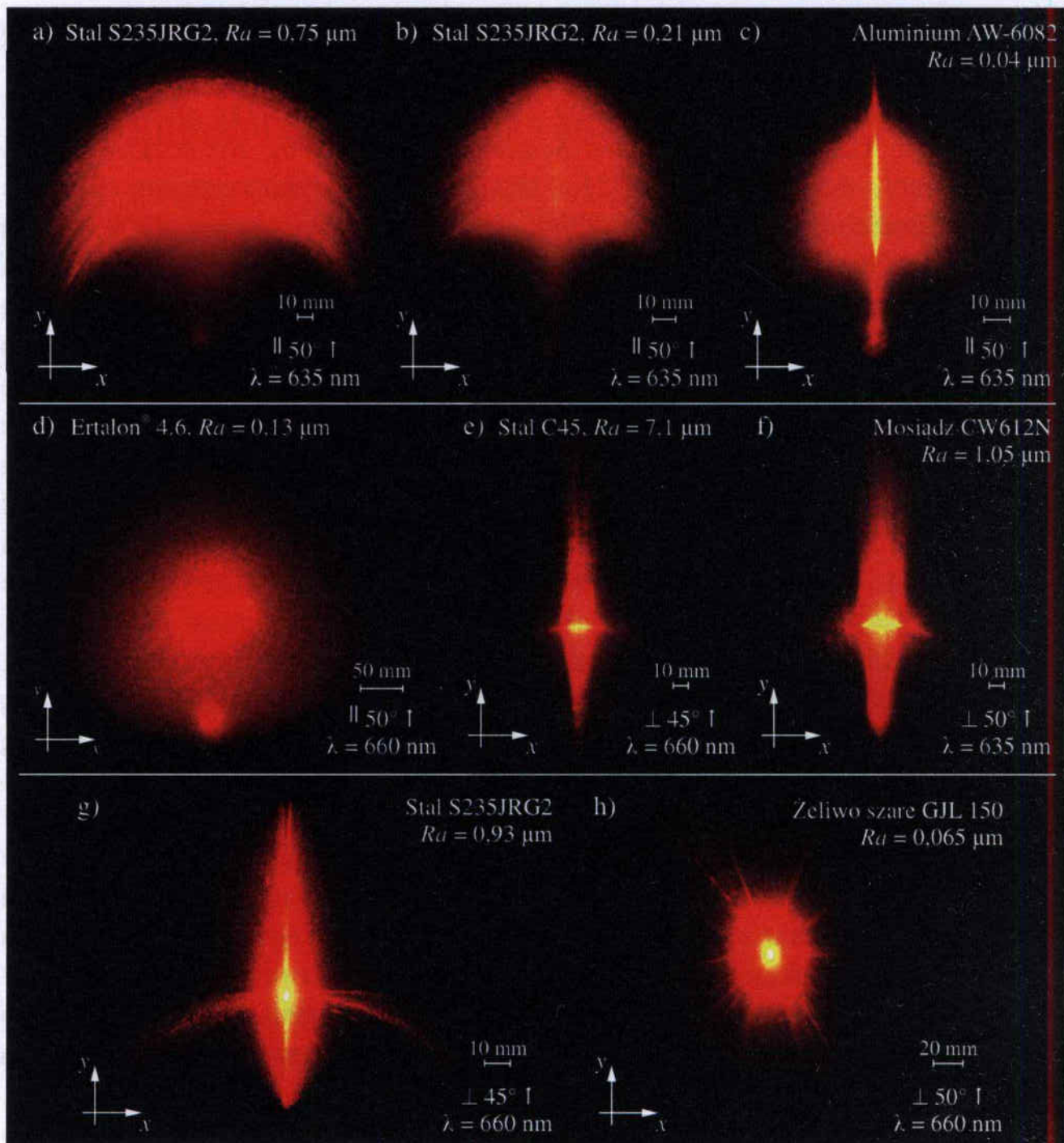
Pomiary skaterometryczne w większości przypadków dotyczą oceny parametrów powierzchni obrobionych, kształtowanych typowymi technikami obróbkowymi, wykonanych z metalu lub stopów metali. Znacznie rzadziej w literaturze można znaleźć zastosowanie tych metod do oceny powierzchni wykonanych z innych materiałów, np. z tworzyw sztucznych [129] lub z ceramiki [274].

Na rysunku 3.21 przedstawiono porównanie obrazów optycznych światła rozproszonego uzyskanych dla różnych materiałów (stal, żeliwo, mosiądz, aluminium, Ertalon<sup>®</sup>), technik obróbkowych (szlifowanie, mikrowygładzanie, polerowanie, wiercenie) i różnej geometrii oświetlenia (równoległe lub prostopadle do osi próbki) wiązką światła laserowego [127-129].

Trudność w ocenie skaterometrycznej czynnej powierzchni ściernicy wynika ze specyfiki budowy ściernic składających się ze stochastycznie rozmieszczonych ziaren ściernych o niezdefiniowanej geometrii, spojonych spoiwem. Taka struktura, o dużej niejednorodności, bez wyraźnego ukierunkowania, powoduje nasilenie zjawiska rozpraszania światła. Przejawia się ono wizualnie w powstawaniu na płaszczyźnie obserwacji obrazu światła rozproszonego o nieregularnej formie.

W przypadku, gdy na czynnej powierzchni ściernicy występują zalepienia wiórami materiału obrabianego, możliwości oceny się polepszają. Dla dużych zalepień przestrzeni międzyziarnowych powierzchnia ściernicy będzie charakteryzowała się podobnymi właściwościami odbiciowymi jak typowa powierzchnia wykonana z metalu. Wizualnie będzie się to przejawiało powstawaniem na płaszczyźnie obserwacji obrazu światła rozproszonego o dość regularnej formie (rys. 3.21a-h).

Opracowując metodę oceny stanu CPS z użyciem skaterometrii laserowej założono, że poprzez obserwację i analizę obrazów światła rozproszonego uzyskanych dla fragmentów niezalepionych (rozpraszających falę świetlną) i zalepionych (odbijających oraz częściowo rozpraszających falę świetlną), będzie możliwe oszacowanie stopnia zalepienia czynnej powierzchni ściernicy.

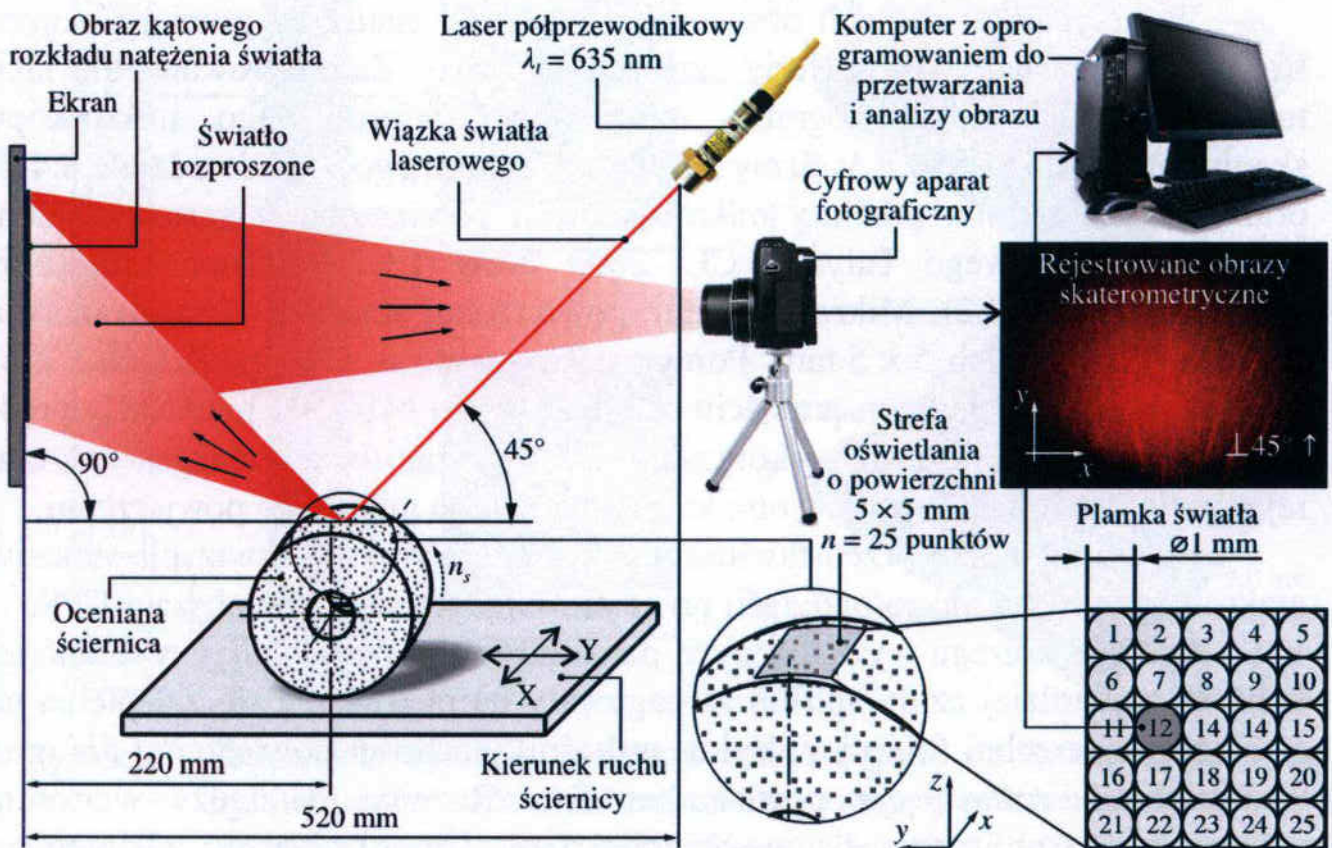


Rys. 3.21. Porównanie obrazów światła rozproszonego uzyskanych dla powierzchni: a), f), g) szlifowanej; b), d) mikrowygładzanej; c), h) polerowanej; e) wierconej; Uwagi: || lub  $\perp$  – oceniana powierzchnia była oświetlana wiązką światła laserowego, gdy płaszczyzna padania była równoległa (||) lub prostopadła ( $\perp$ ) do osi próbki;  $^\circ$  – kąt padania wiązki światła laserowego;  $\uparrow$  – pomiar przeprowadzony był w warunkach statycznych [127-129]

Fig. 3.21. The comparison of optical images of scattered light obtained for surface after: a), f), g) grinding; b), d) microfinishing; c), h) polishing; e) drilling; Note: || or  $\perp$  – tested surface was illuminated by laser light beam when plane of incidence was parallel (||) or perpendicular ( $\perp$ ) to axis of sample;  $^\circ$  – angle of incidence of the laser light beam;  $\uparrow$  – measurement was carried out in static condition [127-129]

### 3.5.2. Zastosowanie skaterometrii laserowej wspomaganiej technikami przetwarzania i analizy obrazu do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy

Ocenę przydatności skaterometrii laserowej [130-132, 134, 135, 237] wspomaganiej technikami przetwarzania i analizy obrazu do oceny stanu CPS dokonano na podstawie analizy ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie o oznaczeniu 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70%/SG/F80I7VDG30% (opisanej szerzej w podrozdziale 4.1). Ściernicę tę użyto do realizacji procesu szlifowania jednoprzęściowego otworów w stali 100Cr6. Zeszlifowano nią materiał obrabiany o objętości wynoszącej 475 mm<sup>3</sup>, w czasie 19 s, co odpowiadało wydajności ubytkowej szlifowania równej 24 mm<sup>3</sup>/s. Szlifowanie otworów z tak dużą wydajnością ubytkową doprowadziło do powstania zalepień na czynnej powierzchni badanej ściernicy. Wybrane obszary pozbawione zalepień oraz z zalepieniami zostały odpowiednio oznaczone. Łącznie do badań wytypowano 14 obszarów, każdy o wymiarach 5 × 5 mm. W każdym z obszarów zarejestrowano 25 obrazów skaterometrycznych na stanowisku zestawionym w sposób przedstawiony na rysunku 3.22.



Rys. 3.22. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji obrazów kąтового rozkładu natężenia rozproszonego światła odbitego od CPS

Fig. 3.22. Scheme of measuring position for registration of scattered images of assessed grinding wheel active surface

W jego skład wchodził laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs Inc., emitujący w sposób ciągły wiązkę światła z zakresu widzialnego o długości fali  $\lambda_l = 635$  nm. Wiązka skierowana pod kątem padania równym  $45^\circ$ , oświetlała badaną powierzchnię ściernicy, tworząc na niej plamkę o średnicy 1 mm. W wyniku rozproszenia światła na ocenianej powierzchni, w płaszczyźnie obserwacji tworzony był obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Światło rozproszone obserwowane było na matowym ekranie, z naniesioną podziałką do szacowania wymiarów rejestrowanego obrazu.

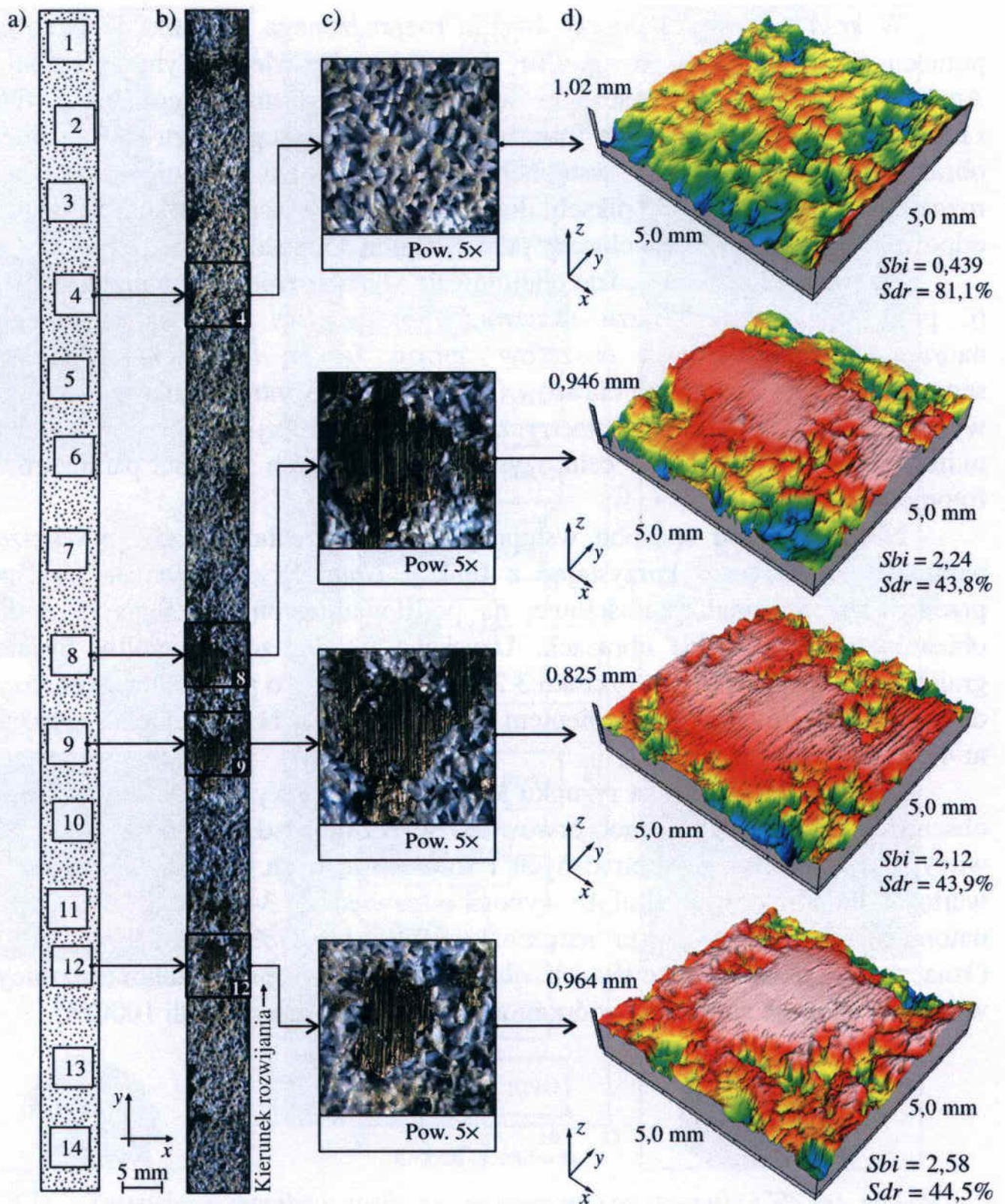
Akwizycja obrazów skaterometrycznych dokonywana była statycznie dla 14 obszarów pomiarowych o wymiarach  $5 \times 5$  mm, podzielonych dodatkowo na 25 punktów pomiarowych. Wymiar punktu pomiarowego równy był średnicy plamki światła laserowego i wynosił 1 mm.

Rejestracja obrazów światła rozproszonego dokonywana była za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus Corp. zamocowanego na statywie. Aparat wyposażony był w matrycowy detektor typu CCD o efektywnej liczbie 5,10 miliona pikseli. Obrazy rejestrowano z następującymi parametrami: czas ekspozycji  $t_{exp} = 1$  s, rozdzielczość obrazu  $2592 \times 1944$  pikseli, czułość ISO 400.

W przypadku czterech obszarów poszerzono analizy o pomiary mające stanowić odniesienie dla metody skaterometrycznej. Zarejestrowano dla nich makrofotografie, mikrofotografie z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego JSM 5500LV firmy JEOL Ltd. (opisanego w podrozdziale 3.4.2) oraz przeprowadzono pomiary mikrotopografii powierzchni z zastosowaniem systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. (opis w podrozdziale 3.2.2). Mikrotopografie powierzchni ściernic rejestrowano dla obszaru o wymiarach  $5 \times 5$  mm. Pomiar odbywał się w 101 przejściach z krokiem co  $50 \mu\text{m}$ . W jednym przejściu rejestrowanych było 500 punktów z prędkością  $v_t = 5$  mm/s. Pomiar wykonywany był w trybie dwuprzebiegowym, tzn. rejestracja danych odbywała w obu kierunkach ruchu mierzonej powierzchni.

Na rysunku 3.23 przedstawiono zestawienie wyników akwizycji obrazów makroskopowych i mikrotopografii przedstawiających wybrane obszary CPS.

Spośród szeregu wyznaczonych parametrów SGP do analizy wybrano te, które w najbardziej czuły sposób zareagowały na pojawienie się zalepienia na czynnej powierzchni ściernicy. Był to wskaźnik nośności powierzchni  $S_{bi}$  oraz współczynnik rozwinięcia powierzchni  $S_{dr}$ . Różnica pomiędzy wartością parametru  $S_{bi}$  obliczoną dla powierzchni bez ( $S_{bi} = 0,439$ ) i z zalepieniem ( $S_{bi} = 2,12-2,58$ ) wynosiła od 480% do 580% (rys. 3.23). Natomiast wartość współczynnika  $S_{dr}$  zmniejszyła się niemal o połowę, z 81,1% dla powierzchni bez zalepienia, do około 44% w przypadku obszarów CPS zalepionych materiałem obrabianym.



Rys. 3.23 Zestawienie wyników rejestracji makrofotografii i mikrotopografii wybranych obszarów CPS: a) schemat przedstawiający położenie analizowanych obszarów; b) makrofotografia CPS po rozwinięciu; c) powiększone obrazy wybranych obszarów CPS; d) mikrotopografie wraz z parametrami SGP

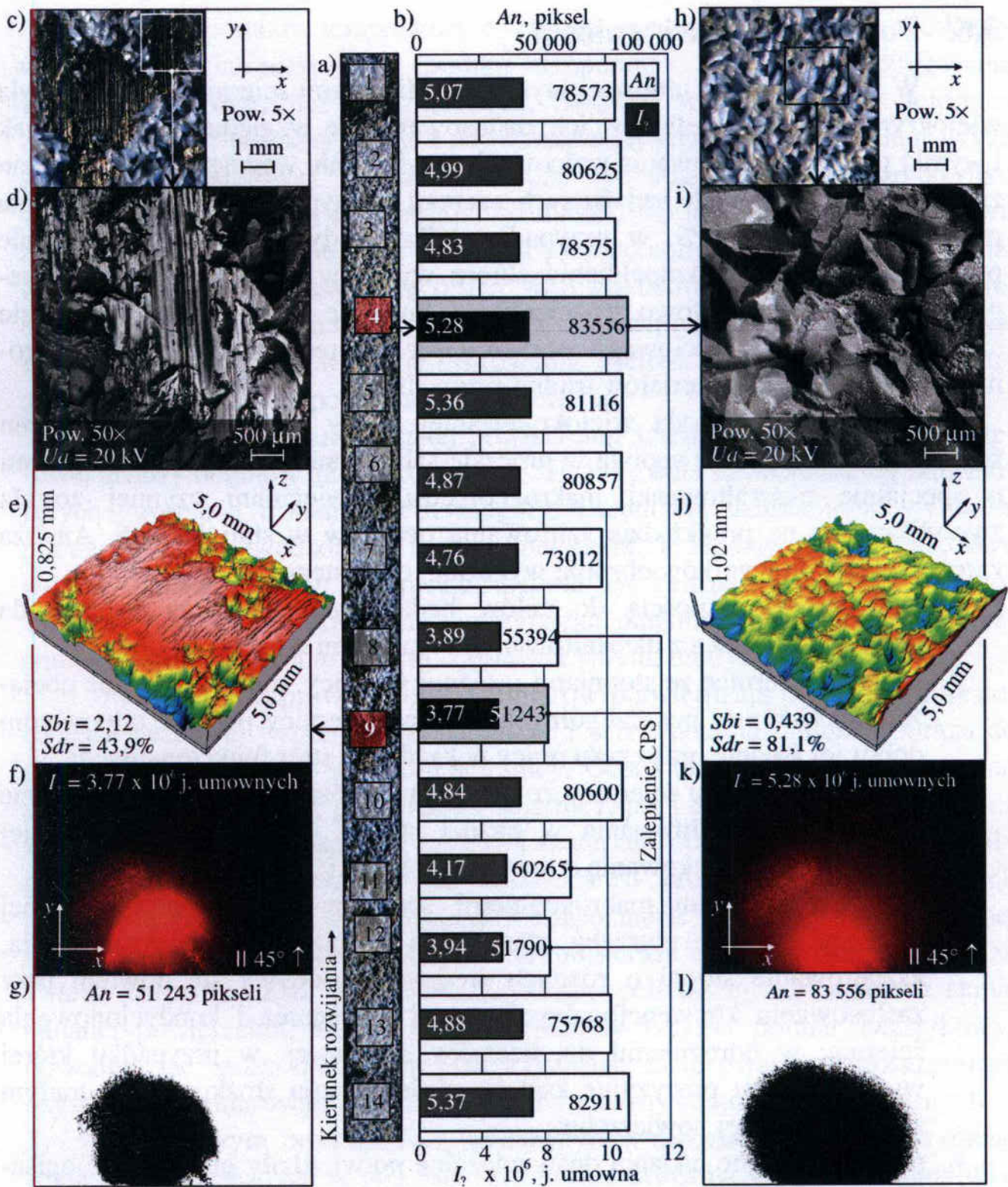
Fig. 3.23. Macrophotography and microtopographies of selected areas of the grinding wheel active surface: a) schematic diagram of analysed areas; b) macrophotography of surface in developed view; c) enlarged images of selected areas; d) microtopographies with parameters of geometrical structure of surface

W kolejnym kroku obrazy światła rozproszonego poddano analizie za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics Inc. Analiza obejmowała wyznaczenie wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych ocenianych obrazów. Przed przystąpieniem do analizy obrazy poddane zostały wstępnemu przetworzeniu. Zmniejszono ich rozdzielczość do  $640 \times 480$  pikseli, dokonano korekcji jasności i kontrastu oraz odpowiednio wykadrowano obszary przeznaczone do analizy.

Przyjęto, że analiza będzie obejmowała wyznaczenie dwóch parametrów, tj. pola powierzchni obrazu skaterometrycznego  $A_n$  oraz sumarycznego natężenia światła jasnych obszarów obrazu  $I_{\Sigma}$ . W tym celu dokonano segmentacji poszczególnych obrazów (dla uzyskania konturów niezbędnych do wyznaczenia parametrów geometrycznych) lub korekcji tonalnej (poprawy m.in. jasności i kontrastu, w celu uzyskania poprawnych wartości parametrów fotometrycznych).

Niezależnie od sposobu wstępnego przetworzenia obrazów powyższe parametry uzyskiwano korzystając z funkcji *Count/Size*. Pozwalała ona na przeprowadzenie analizy ilościowej na podstawie automatycznego zliczania obiektów w ocenianych obrazach. Uzyskane wyniki zestawiono w formie graficznej i pokazano na rysunku 3.24, uzupełnione o przykładowe analizy dotyczące powierzchni z zalepieniem (obszar nr 9) i bez zalepienia (obszar nr 4).

Z przedstawionego na rysunku 3.24 zestawienia wynika, że dla czterech obszarów (8, 9, 11, 12) zaobserwowano wyraźny spadek wartości analizowanych parametrów geometrycznych i fotometrycznych. Spadek procentowy wartości dla pola powierzchni  $A_n$  wynosił odpowiednio: 34%, 39%, 28%, 38%, natomiast dla sumarycznego natężenia światła  $I_{\Sigma}$ : 27%, 30%, 22%, 27%. Oznacza to, że w analizowanych obszarach czynnej powierzchni ściernicy wystąpiły znaczne zalepienia wiórami materiału obrabianego (stali 100Cr6).



Rys. 3.24. Zestawienie wyników analiz zawierające makrofotografię CPS (a), wykres wartości  $An$  i  $I_{\Sigma}$  (b) oraz makrofotografie (c, h), obrazy mikroskopowe (d, i), mikrotopografie (e, j), obrazy skaterometryczne po zarejestrowaniu (f, k) i po segmentacji (g, l), dla obszaru nr 9 (c-g) i nr 4 (h-l)

Fig. 3.24. The results of analysis that contains macrophotography of the grinding wheel active surface (a), graph of  $An$  and  $I_{\Sigma}$  parameter (b) as well as macrophotography (c, h), macroscopic images (d, i), microtopographies (e, j), scatterometric images after registration (f, k) and after segmentation (g, l), for area no. 9 (c-g) and no. 4 (h-l)



### 3.6. Podsumowanie i wnioski

W badaniach nad innowacyjnymi modyfikacjami ściernic konieczna była wielokryterialna ocena efektów ich zastosowania, ze względu na warunki, jak i wyniki procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Pomimo zastosowania w pracach badawczych szeregu znanych metod monitorowania procesu oraz stanu CPS, w przypadku kilku modyfikacji budowy ściernic pojawiła się potrzeba uzupełnienia zbioru wyników. Dotyczyło to w szczególności ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, stosowanych w procesie szlifowania jednoprzęsciowego oraz ściernic impregnowanych, przeznaczonych do szlifowania materiałów trudno skrawalnych.

Opracowana metoda wielokryterialnej oceny warunków pracy ziaren ściernych oraz mostków spoiwa w procesie szlifowania wglębnego ściernicami o specjalnie ukształtowanej makrogeometrii powierzchni czynnej została zweryfikowana na przykładzie szlifowania otworów w stali 100Cr6. Analiza zarejestrowanych wyników obróbki wykazała, co następuje:

- większą przydatnością do celów badawczych odznacza się metoda wcinania ściernicą z ukształtowanymi stopniami o różnej średnicy;
- stosując ściernicę ze stopniami o różnej średnicy, można sterować obciążeniem ziaren w poszczególnych strefach ściernicy poprzez odpowiedni dobór jej średnic oraz czasu pracy w każdej ze stref funkcjonalnych;
- przy zastosowaniu ściernicy ze stopniami o różnej średnicy uzyskuje się stałe warunki szlifowania w każdej strefie, co pozwala na bardziej wiarygodne wnioskowanie o przebiegu obróbki;
- przy kształtowaniu makrogeometrii ściernicy ze stopniami o różnej średnicy nie ma potrzeby stosowania specjalnego oprzyrządowania, kształtowanie stopni o różnych średnicach odbywa się bowiem przy zastosowaniu konwencjonalnych metod obciążania i kondycjonowania ściernic; w odróżnieniu do ściernicy stożkowej, w przypadku której wymagane jest precyzyjne kształtowanie nakroju stożkowego o małym kącie na czynnej powierzchni;
- przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły przydatność opisanej metody do oceny procesów zużycia składników CPS zachodzących w trakcie szlifowania oraz zjawisk je wywołujących;
- jedną z największych zalet metody jest fakt, że w rezultacie krótkiego testu szlifowania możliwa jest wielostronna ocena warunków usuwania materiału, wynikających ze zmian obciążenia składników ściernicy;
- przedstawiona metoda umożliwia również badania porównawcze ściernic o różnych charakterystykach, przy zróżnicowanych parametrach szlifowania czy też dla różnych materiałów obrabianych.

Metoda pomiaru temperatury z zastosowaniem termowizji w podczerwieni umożliwia bezstykowy pomiar temperatury w procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, zarówno w strefie styku ściernicy z przedmiotem obrabianym, jak i na określonych głębokościach pomiarowych ścian tulei pomiarowej. Pomiar ten może być dokonywany bardzo szybko w dowolnym momencie szlifowania, co dodatkowo umożliwia ocenę wpływu zużycia narzędzia ściernego na powstającą temperaturę w procesie szlifowania. Możliwe jest także badanie tą drogą wpływu budowy narzędzia ściernego, charakterystyki jego składników i różnego rodzaju modyfikacji konstrukcyjnych, na rozkład ciepła w strefie szlifowania. Metoda ta może mieć szczególne znaczenie w badaniach porównawczych ściernic.

Metoda oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy z użyciem komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM pozwala uzyskać szereg interesujących informacji o stanie CPS, mogących stanowić uzupełnienie wyników pomiarów przeprowadzonych innymi metodami. Przedstawione przykładowe wyniki analiz wykazały, że opisana metoda jest bardzo użyteczna i z powodzeniem może być zastosowana w przypadku diagnostyki czynnych powierzchni ściernic, szczególnie ściernic z innowacyjnymi modyfikacjami budowy.

Rezultaty przeprowadzonych pomiarów potwierdzają przydatność skaterometrii laserowej wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy. Ocena ta może dotyczyć zarówno struktury geometrycznej powierzchni ściernicy, jak i elementów powstałych na CPS, takich jak np. zalepienia wiórami materiału obrabianego. Jak wykazały przeprowadzone analizy, metoda skaterometrii laserowej pozwala na ich precyzyjną detekcję. Zlokalizowanie i rozpoznanie zalepień, a w następnej kolejności ich odpowiednia analiza na podstawie zarejestrowanego obrazu światła rozproszonego, umożliwia uzyskanie pełniejszej informacji o stanie badanej powierzchni. Cechy opisanej metody (szybki pomiar bezstykowy) powodują, że może ona w przyszłości zostać zastosowana w urządzeniach i systemach pomiarowych przeznaczonych do oceny stanu narzędzi ściernych.

Dodatkowym zagadnieniem poruszonym w rozdziale 3 była ocena obciążenia ziaren aktywnych w procesie szlifowania otworów w sposób umożliwiający porównanie między sobą różnych odmian kinematycznych tego procesu, z uwzględnieniem różnic w strukturze geometrycznej CPS. Najważniejsze wnioski, wynikające z zaprezentowanych analiz parametrów kinematycznych procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, są następujące:

- analiza materiałów źródłowych dotyczących parametrów kinematycznych rozważanego procesu wykazała potrzebę zdefiniowania nowego wskaźnika, który w sposób syntetyczny uwzględniałby wszystkie kluczowe parametry szlifowania, a także strukturę geometryczną CPS;

- w definicji (3.28) nowego wskaźnika, oznaczonego jako  $SI_Q$  (syntetyczny wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na ziarno aktywne), odniesiono wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$  do liczby ziaren aktywnych na CPS i odwrotności stosunku prędkości  $q$ ;
- wskaźnik  $SI_Q$  pozwala na porównanie między sobą różnych odmian kinematycznych procesu szlifowania otworów;
- opracowana zależność definiująca  $SI_Q$  uwzględnia zmiany następujących parametrów szlifowania:  $a_e, v_s, v_w, v_{fa}, N_{kin}, d_s, d_w, T$  (w przypadku szlifowania jednoprzęściowego i prostoliniowo-zwrotnego) oraz  $a_e, v_s, v_w, v_{fr}, N_{kin}, d_s, d_w, T$  (w kinematyce szlifowania wgłębnego oraz wgłębnego z oscylacjami);
- wskaźnik  $SI_Q$  daje możliwość doboru parametrów obróbki w przypadku zmiany kinematyki procesu szlifowania otworów, przy konieczności zachowania obciążenia ziaren aktywnych na tym samym poziomie;
- wartości wskaźnika  $SI_Q$  mogą służyć do określenia zmian obciążenia aktywnych wierzchołków skrawających w funkcji wybranych parametrów obróbkowych, co pozwala wstępnie optymalizować ich dobór;
- wskaźnik  $SI_Q$  może zostać użyty w przypadkach, gdy konieczna jest wiedza dotycząca wpływu parametrów obróbkowych na warunki pracy ziaren ściernych i związaną z nimi intensywność zużycia ściernicy;
- z użyciem wskaźnika  $SI_Q$  możliwe jest porównywanie ściernic o różnej strukturze geometrycznej CPS, co w efekcie pozwala na odtworzenie żądanych warunków pracy, zużycia i samoostrzenia CPS, osiągniętych wcześniej dla ściernicy o odmiennej SGP, poprzez odpowiedni dobór najważniejszych parametrów obróbki;
- wskaźnik  $SI_Q$  pozwala również na predykcję warunków pracy ściernic różniących się między sobą liczbą ziaren aktywnych na czynnej powierzchni ściernicy.
- wprowadzenie współczynników korygujących  $k_r$  (3.14) i  $k_r$  (3.16) do zależności opisujących wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$  sprawia, że wskaźnik  $SI_Q$  może być stosowany w badaniach laboratoryjnych oraz w praktyce przemysłowej.

Wymienione zalety opracowanego wskaźnika  $SI_Q$  sprawiają, że może on być użyty do wielokryterialnej oceny efektywności procesów szlifowania otworów w wielu odmianach kinematycznych, realizowanych z użyciem zarówno ściernic konwencjonalnych, jak i modyfikowanych. Z tego względu został on zastosowany, jako jeden z kilku wskaźników, przy ocenie efektywności procesów szlifowania otworów prowadzonych ściernicami z modyfikacjami opisanymi w niniejszej pracy. Wyniki oceny efektywności zamieszczone zostały w rozdziale 6.

## **4. Innowacyjne modyfikacje ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym zwiększające efektywność procesów szlifowania otworów**

Dążąc do podniesienia efektywności procesów szlifowania otworów, rozumianej jako relacja uzyskanych efektów obróbki do nakładów, główną uwagę skupiono na możliwości ingerencji w konstrukcję ściernic z mikrokrystalicznego korundu spiekanego. Starano się przy tym uwzględnić warunki przemysłowe, decydujące o możliwości ewentualnych wdrożeń opracowanych innowacji. Założono, że opracowywane modyfikacje nie powinny ingerować w konstrukcję szlifierki oraz powinny wykazywać wyraźny korzystny wpływ na efektywność szlifowania przy standardowych parametrach obróbki.

W niniejszym rozdziale opisane zostały szczegółowo wyniki badań prowadzonych ściernicami modyfikowanymi w szerokim aspekcie ich cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Opracowane modyfikacje dotyczą:

- makrogeometrii i budowy wewnętrznej – ściernice o strefowo zróżnicowanej budowie z ukształtowanym nakrojem stożkowym (podrozdział 4.1);
- budowy strukturalnej – ściernice ze zmodyfikowaną mikrostrukturą spoiwa ceramicznego (podrozdział 4.2);
- mikrogeometrii ściernicy – ściernice z mikronieciągłościami czynnej powierzchni ściernicy (podrozdział 4.3);
- doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego bezpośrednio do strefy szlifowania – ściernice składane z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS (podrozdział 4.4);
- aspektów chemicznych szlifowania – ściernice impregnowane siarką oraz alotropowymi odmianami węgla, w celu zmniejszenia adhezji produktów szlifowania do czynnej powierzchni ściernicy (podrozdział 4.5).

W przypadku ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie należy podkreślić, że ich zalety można wykorzystać jedynie w procesie szlifowania jednoprzęściowego. Mimo swoich zalet proces ten nie rozpowszechnił się jak dotąd na szerszą skalę w praktyce przemysłowej. Pozostałe z opisywanych modyfikacji stanowią rozwiązania relatywnie łatwe do wdrożenia w większości stosowanych odmian kinematycznych procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

W tej części pracy przedstawiono podstawy teoretyczne i doświadczalne opracowanych innowacyjnych modyfikacji ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego, podając ich najważniejsze zalety oraz kluczowe ograniczenia.

## 4.1. Strefowe różnicowanie budowy ściernicy

Ściernice o strefowo różnicowanej budowie opracowane zostały na potrzeby procesów szlifowania jednoprzęściowego, w których cały naddatek obróbkowy usuwany jest w jednym przejściu ściernicy. Do najczęściej spotykanych procesów jednoprzęściowych [221, 222] zaliczyć należy szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (*Continuous Path-Controlled Grinding* – CPCG) zewnętrznych powierzchni walcowych, w którym stosowane są ściernice z supertwardych ziaren ściernych [65, 89, 190, 191, 216, 258, 295, 298, 302, 338, 404, 416]. Rozwijane są jednak również metody szlifowania jednoprzęściowego z użyciem ściernic wykonanych z ziaren  $Al_2O_3$  [124, 275, 287, 314].

W odniesieniu do procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w literaturze kierunkowej spotkać można opisy procesów nazywanych szlifowaniem złuszcającym (*Peelgrinding*) lub głębokim szlifowaniem wzdłużnym otworów (*Internal Deep Traverse Grinding*) [297, 298, 406, 407], a także przykład szlifowania otworów w jednym przejściu metodą *Quickpoint* [123]. Istota tej metody polega na zmniejszeniu powierzchni styku między ściernicą a przedmiotem szlifowanym do tzw. punktu, od którego wzięła się nazwa metody, poprzez odchylenie osi ściernicy względem osi szlifowanego przedmiotu o kąt  $\alpha_k = 0,5^\circ$  [51, 61, 79, 156, 292, 295, 328, 383].

W procesach typu *Peelgrinding* i *Traverse Grinding* stosowane są ściernice z CBN o całkowitej wysokości  $T < 6$  mm, charakteryzujące się stożkową strefą szlifowania zgrubnego. Ściernice takie umożliwiają usunięcie w jednym przejściu całego naddatku obróbkowego rzędu  $a_{e\text{ cal}} = 0,15$  mm. Jednocześnie uzyskuje się zmniejszenie sił szlifowania, a co za tym idzie, tendencji do kształtowania otworu stożkowego. Dodatkowo zwiększa się elastyczność, w porównaniu z konwencjonalnym szlifowaniem otworów, przy zachowaniu wysokiej niezawodności procesu i wysokiej jakości powierzchni przedmiotu obrobionego [297, 298, 406, 407].

Decydujące znaczenie dla przebiegu procesu szlifowania zgrubnego ma kąt nakroju stożkowego  $\chi$ , który uzależniony jest od szeregu parametrów, takich jak wybieg ściernicy, wielkość usuwanego naddatku, wysokość ściernicy, a także od wymagań dotyczących jakości powierzchni. Te ostatnie determinują szerokość strefy szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania. Na skutek zużycia ściernicy strefa szlifowania zgrubnego przesuwa się w obszar szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania, co powoduje jego skracanie.

Zastosowanie podwyższonej prędkości szlifowania  $v_s = 60-80$  m/s oraz odpowiednio ukształtowanej makrogeometrii CPS podzielonej na strefę stożkową o kącie  $\chi = 5^\circ$  i długą na 2-4 mm walcową strefę szlifowania

wykończeniowego pozwala na uzyskiwanie wydajności ubytkowej rzędu  $Q_w = 24-37,7 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Odpowiednio długa strefa wyiskrzania zapewnia osiągnięcie chropowatości powierzchni obrobionej na poziomie  $R_z < 1 \mu\text{m}$  [407].

Opisywana geometria ściernicy pozwala na podwyższenie wydajności ubytkowej poprzez zwiększenie prędkości posuwu osiowego  $v_{ja}$ . Mimo że prowadzi to do zwiększenia obciążenia strefy szlifowania zgrubnego, możliwe jest osiągnięcie dobrej jakości powierzchni dzięki wielokrotnemu przeszlifowaniu przedmiotu przez walcową strefę szlifowania wykończeniowego. W rezultacie, przy wydajności obróbki porównywalnej z toczeniem na twardo, osiągana jest wyraźnie lepsza jakość powierzchni [297, 298, 406, 407].

W wyniku prac nad zwiększeniem efektywności jednoprzęściowego szlifowania z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (CPCG) opracowano ściernicę zbudowaną z dwóch stref różniących się wielkością ziaren CBN [159]. Ściernica taka charakteryzuje się całkowitą wysokością w kierunku osiowym  $T = 5 \text{ mm}$  i podzielona została na stożkową strefę szlifowania zgrubnego zbudowaną z ziaren B 91, stanowiącą około 50%  $T$  ( $\chi = 15^\circ$ ), część cylindryczną z tym samym ziarnem (ok. 10%  $T$ ) oraz strefę szlifowania wykończeniowego z ziarnem B 151 (ok. 40%  $T$ ) [159].

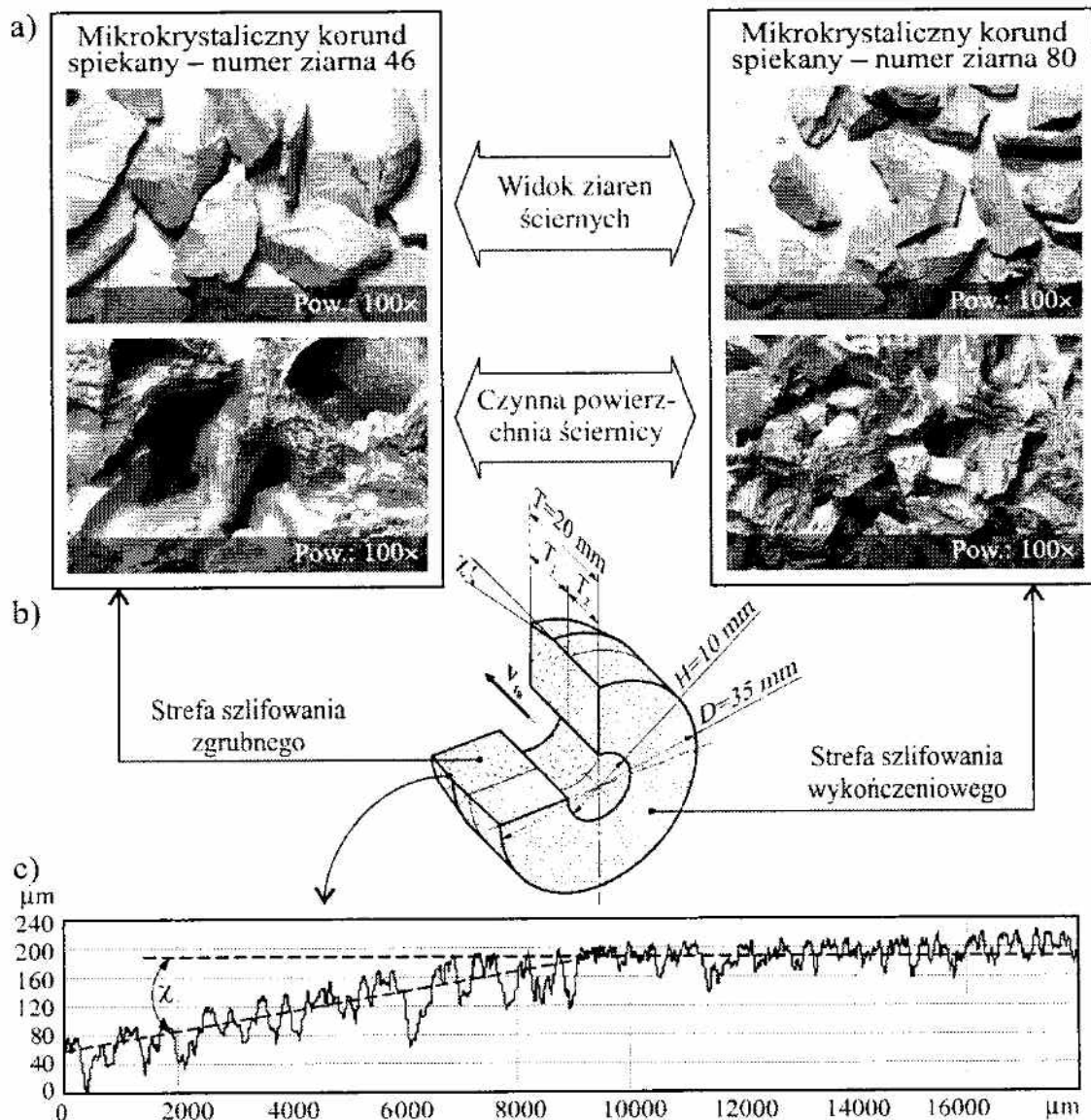
Ponieważ dotychczas w procesach szlifowania jednoprzęściowego stosowane były głównie drogie ściernice z regularnego azotku boru (CBN), wymagające specjalizowanych szlifierek o dużej sztywności oraz dużych prędkości szlifowania ( $v_s > 60 \text{ m/s}$ ), powstała potrzeba opracowania nowych konstrukcji ściernic ze znacznie tańszych ziaren, które można by stosować również w konwencjonalnych szlifierekach do otworów.

#### **4.1.1. Istota strefowego zróżnicowania budowy ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego**

Autor niniejszej pracy był współtwórcą opatentowanej w 2009 roku konstrukcji oraz sposobu wytwarzania ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, charakteryzujących się odmienną budową stożkowej strefy szlifowania zgrubnego i walcowej strefy szlifowania wykończeniowego, wykonaną z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego i szklanokrystalicznego spoiwa ceramicznego z układu  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [99-101, 235, 236].

Ściernice takie charakteryzują się tym, że strefa szlifowania zgrubnego zbudowana jest z ziaren o relatywnie dużych wymiarach, zaś walcowa strefa szlifowania wykończeniowego posiada ziarna o mniejszych wymiarach. Zadaniem strefy szlifowania zgrubnego jest usuwanie nadmiaru, natomiast zadaniem strefy szlifowania wykończeniowego jest wyiskrzanie i wygładzanie powierzchni. Dlatego w strefie szlifowania zgrubnego wprowadza się bardziej otwartą strukturę, aby umożliwić gromadzenie powstających wiórów materiału

obrabanego i produktów zużycia ściernicy. Struktura ściernicy w strefie szlifowania wykończeniowego jest natomiast bardziej zwarta. Z powodu znacznie mniejszej zdolności skrawnej ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane, w porównaniu z ziarnami CBN, wysokość ściernic zwiększono do  $T = 20$  mm. Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat konstrukcyjny, widoki mikroskopowe stref funkcjonalnych oraz osiowy profil mikrogeometrii CPS o strefowo zróżnicowanej budowie, przeznaczonej do jednoprzęściowego szlifowania otworów. W tabeli 4.1 opisano wykonane prototypy takich narzędzi.



Rys. 4.1. Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie do jednoprzęściowego szlifowania otworów: a) widoki mikroskopowe SEM ziaren ściernych i CPS; b) schemat konstrukcyjny; c) profil mikrogeometrii CPS z zaznaczonym kątem nakroju stożkowego  $\chi$  [255]

Fig. 4.1. Zone diversified structure grinding wheel for single-pass internal cylindrical grinding: a) SEM images of single abrasive grains and grinding wheel active surface; b) construction scheme; c) microgeometrical axial profile of the grinding wheel active surface with an exposed conical chamfer angle  $\chi$  [255]

Tab. 4.1. Prototypy ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie [219]

Tab. 4.1. Prototypes of the zone-diversified structure grinding wheels [219]

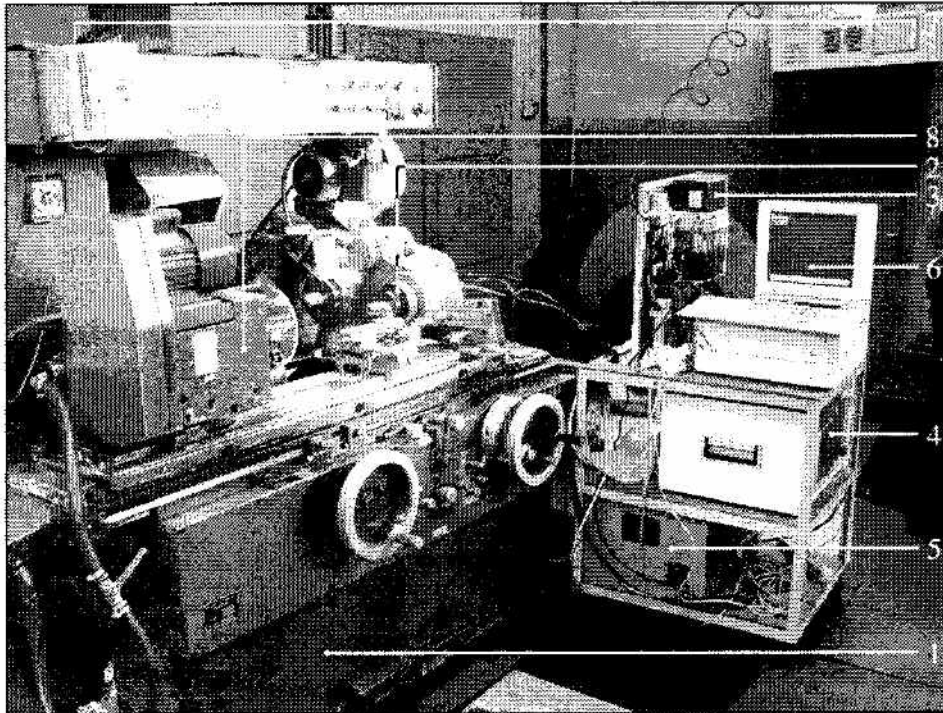
Nazwa	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie	Nazwa	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie
Ściernice z ziaren elektrokorundu szlachetnego 99A i mikrokrystalicznego korundu spiekane							
99A/SG*			1-35x20x10-99A/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%	99A 100%*			1-35x20x10-99A/F46K7VDG 100%
SG/99A*			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 70% / 99A/F80 I 7 V DG 30%	SG 100%*			1-35x20x10-SG/F46K7VDG 100%
SG/SG*			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%	*Nazwa ściernicy to jej oznaczenie skrócone przyjęte dla uproszczenia prezentacji i opisu wyników badań. W przypadku pierwszej grupy narzędzi nazwa zawiera rodzaj ziarna w strefie szlifowania zgrubnego/wykończeniowego. Ściernica w całości wykonana z ziaren jednej wielkości oznaczona została nazwą ziarna i liczbą 100%. Dla ściernicy SG F60 100% dodano informację o rozmiarze ścierniwa dla odróżnienia od ściernicy SG 100% zbudowanej z ziaren o rozmiarze 46			
Ściernice z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane							
46/80-30%**			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%	46/60-30%**			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F60 I 7 V DG 30%
46/80-20%**			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F80 I 7 V DG 20%	46/60-20%**			1-35x20x10-SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F60 I 7 V DG 20%
46-100%**			1-35x20x10-SG/F46 K 7VDG 100%	**Dla drugiej grupy ściernic nazwa zawiera wielkość ziarna w strefie szlifowania zgrubnego/wykończeniowego oraz liczbę oznaczającą procentowy udział drugiej strefy. Ściernica w całości wykonana z ziaren jednej wielkości oznaczona została wielkością ziarna i liczbą 100%.			



Parametry opisujące budowę ściernic dobrano na podstawie wyników badań symulacyjnych w taki sposób, aby możliwe było określenie wpływu rodzaju ziarna ściernego w każdej ze stref ściernicy oraz określenie wpływu numeru ziarna (46, 60 i 80 [64,112,114]) i udziału procentowego wysokości stref  $T_1/T_2$  na rezultaty badanego procesu [232-234, 266]. Zarówno twardość, jak i struktura poszczególnych stref funkcjonalnych ściernicy pozostawały stałe dla wszystkich ściernic użytych podczas badań. Dla strefy szlifowania zgrubnego zastosowano stopień twardości K, a dla strefy szlifowania wykończeniowego I. W obu strefach przyjęto strukturę 7.

#### 4.1.2. Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne jednoprzęsciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych zostały zrealizowane na stanowisku badawczym wyposażonym w szlifierkę RUP 28P, przedstawionym na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. 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

Fig. 4.2. Experimental setup: 1 – universal grinding machine RUP 28P, 2 – grinding wheel electrospindle Fisher EV-70/70-2WB, 3 – dosage system of air-oil mixture IG 54-2, 4 – frequency converter Sieb&Meyer 21.60, 5 – cooling unit IK-V07, 6 – computer with control program, 7 – frequency converter SJ100 controlling the workpiece spindle, 8 – workpiece spindle

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

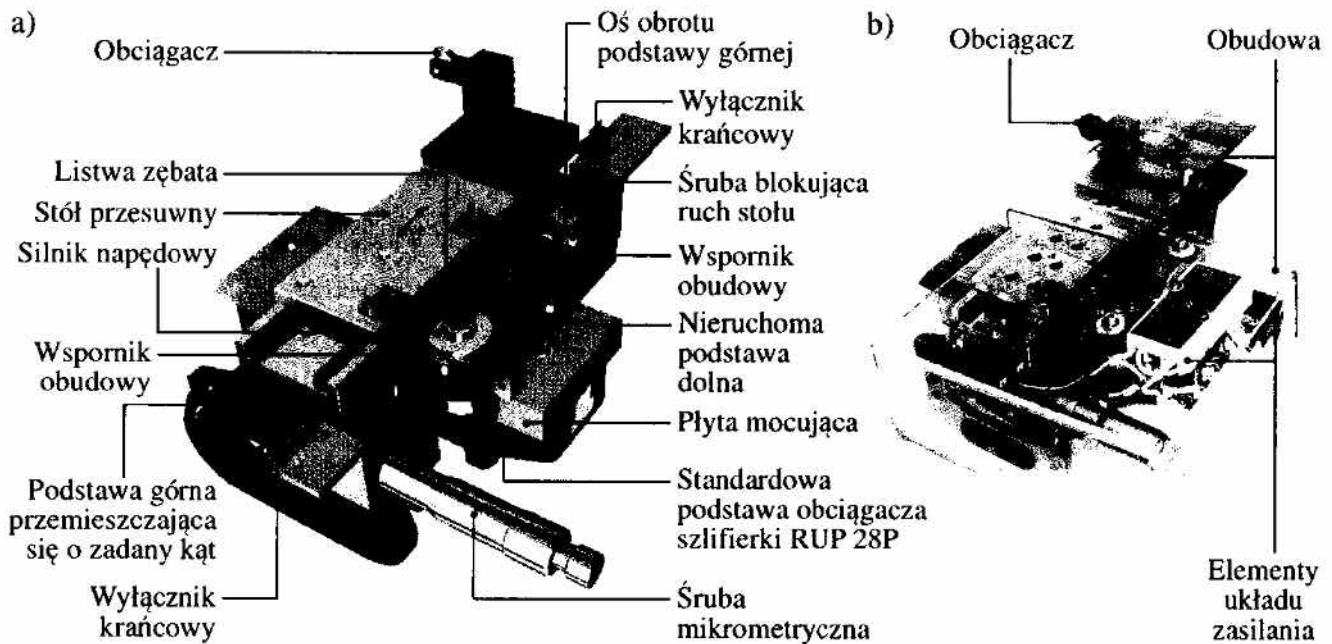
- system doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego od wewnątrz ściernicy;
- przyrząd do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy wraz z osprzętem;
- przyrząd do kształtowania mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernicy wraz z osprzętem
- oraz przyrządy i urządzenia pomiarowe.

Stanowisko to umożliwiało realizację procesów szlifowania otworów w kinematyce szlifowania jednoprzeciściowego, szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, szlifowania wgłębnego oraz szlifowania wgłębnego z oscylacjami.

#### **4.1.3. Przyrząd do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy**

Efektywna realizacja procesu jednoprzeciściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie możliwa jest przy zapewnieniu precyzyjnego kształtowania makrogeometrii badanych ściernic. Zarówno konstrukcja szlifierek konwencjonalnych, jak i CNC pozwala na zmianę położenia kąтового wrzeciona ściernicy, dzięki czemu możliwe jest wykonanie nakroju stożkowego na CPS. Takie zmiany ustawień obrabiarki są jednak pracochłonne i w związku z tym nieopłacalne w przypadku konieczności ich dokonywania przy każdym zabiegu obciążania. Ponadto nie zapewniają dostatecznej dokładności pozycjonowania kąтового i nie dają pewności powrotu do ustawienia wyjściowego.

Aby umożliwić szybkie kształtowanie nakroju stożkowego o określonych parametrach geometrycznych na czynnej powierzchni ściernicy, konieczne było opracowanie specjalnego przyrządu, którego konstrukcję następnie zgłoszonego do ochrony patentowej [223]. Najważniejszym elementem urządzenia, przedstawionego na rysunku 4.3, jest stół przesuwny na prowadnicach tocnych, do którego przytwierdzona została tarczowa oprawa jednoziarnistego obciążacza diamentowego oraz śruba mikrometryczna, dzięki której można z wysoką precyzją zadawać żądane wartości kąta nakroju. Przyrząd wyposażono w układ napędu stołu. Całość zamocowano do górnej części podstawy, w celu zachowania niezmiennych kinematyki obciążania przy różnych wartościach kąta nakroju. Części składowe opisywanego przyrządu zamocowane zostały na standardowej podstawie obciążacza szlifiarki RUP 28P.



Rys. 4.3. Przyrząd do kształtowania makrogeometrii ściernicy: a) elementy funkcjonalne; b) widok urządzenia w stanie gotowym do pracy [223]

Fig. 4.3. Device for forming the grinding wheel macrogeometry: a) functional elements; b) view of the test-ready device [223]

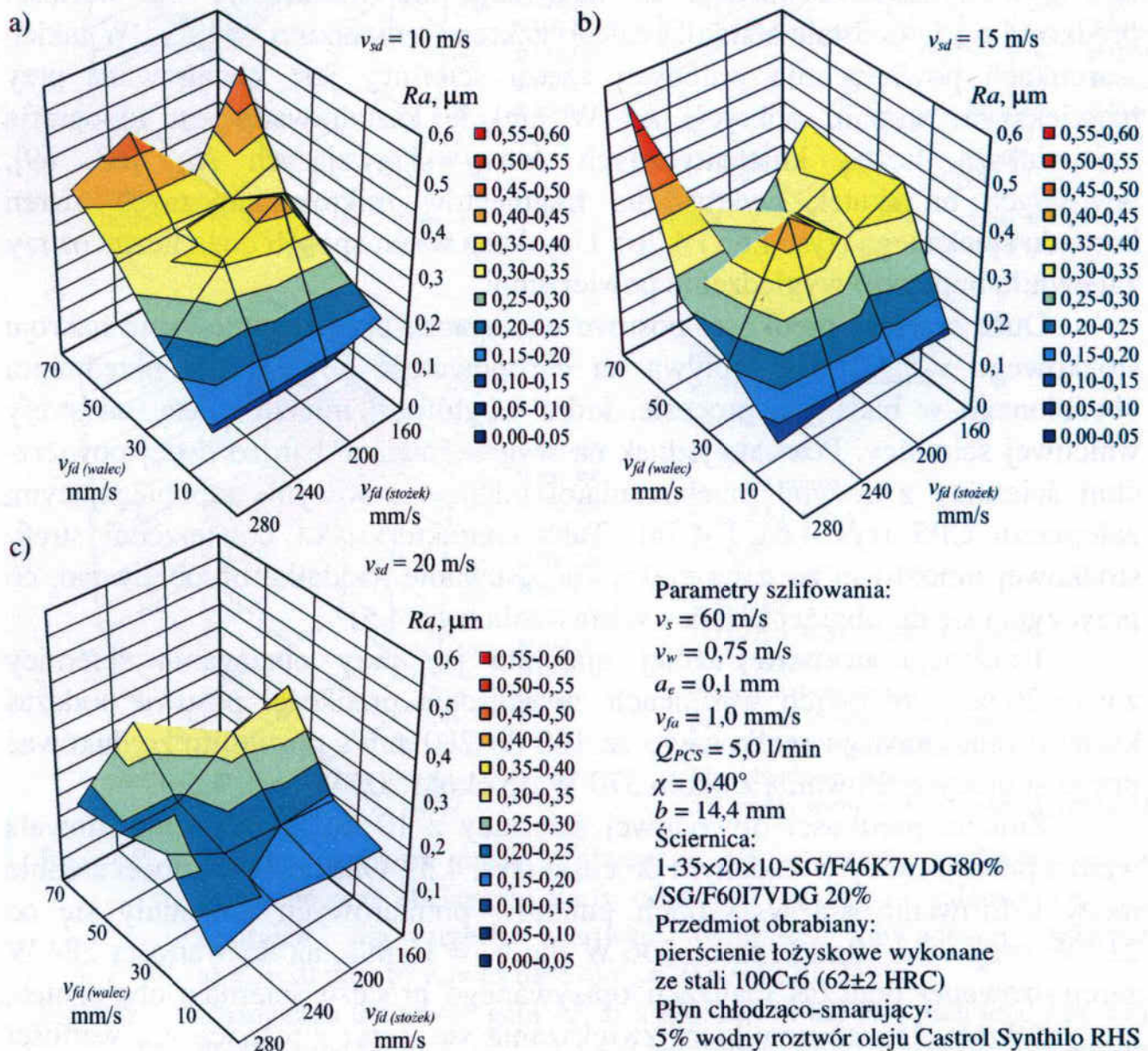
#### 4.1.4. Kształtowanie struktury geometrycznej czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie

Przy użyciu opracowanego przyrządu przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów kształtowania czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie.

Do parametrów, od których zależy stan ściernicy po obciążeniu, należy zaliczyć: prędkość obwodową ściernicy  $v_{sd}$ , prędkość posuwu osiowego obciągacza  $v_{fd}$  oraz głębokość usuwanej warstwy ściernicy  $a_d$ . Do obciążania zastosowano jednoziarnisty obciągacz diamentowy o masie  $Q_d = 1,25$  kr i czynnej szerokości ostrza wynoszącej  $b_d = 0,276$  mm. W trakcie badań stała pozostawała wartość głębokości obciążania, która wynosiła  $a_{ed} = 0,0125$  mm oraz liczba przejść obciążających:  $i_d(\text{stożek}) = 20$ ,  $i_d(\text{walec}) = 6$ .

W przypadku ściernic ze stożkową częścią szlifowania zgrubnego zabieg obciążania podzielony był na dwa etapy. W pierwszym kształtowano nakrój o zadanych parametrach geometrycznych ( $\chi, b$ ), w drugim natomiast wyrównywano i ostrzono walcową strefę szlifowania wykończeniowego. Taki podział umożliwił zróżnicowanie wartości prędkości posuwu osiowego podczas obciążania każdej ze stref funkcjonalnych ściernicy. Zastosowanie odmiennych wartości  $v_{fd}$  podczas kształtowania poszczególnych części ściernicy miało na celu podniesienie zdolności skrawnej w strefie stożkowej oraz zapewnienie jak najlepszego wygładzenia powierzchni przez strefę walcową.

Na rysunku 4.4 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań wpływu prędkości posuwu osiowego przy kształtowaniu strefy stożkowej  $v_{fd(stożek)}$  i walcowej  $v_{fd(walec)}$  ściernicy na chropowatość powierzchni po szlifowaniu. Rysunek ten zawiera zestawienie wykresów zmian średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni po szlifowaniu  $Ra$  dla prędkości obwodowej ściernicy  $v_{sd} = 10$  (rys. 4.4a),  $v_{sd} = 15$  (rys. 4.4b) i  $v_{sd} = 20$  m/s (rys. 4.4c).



**Rys. 4.4.** Zmiany średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni obrabianej  $Ra$  w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciąganiu strefy stożkowej ( $v_{fd(stożek)}$ ) i walcowej ( $v_{fd(walec)}$ ) [220, 256]

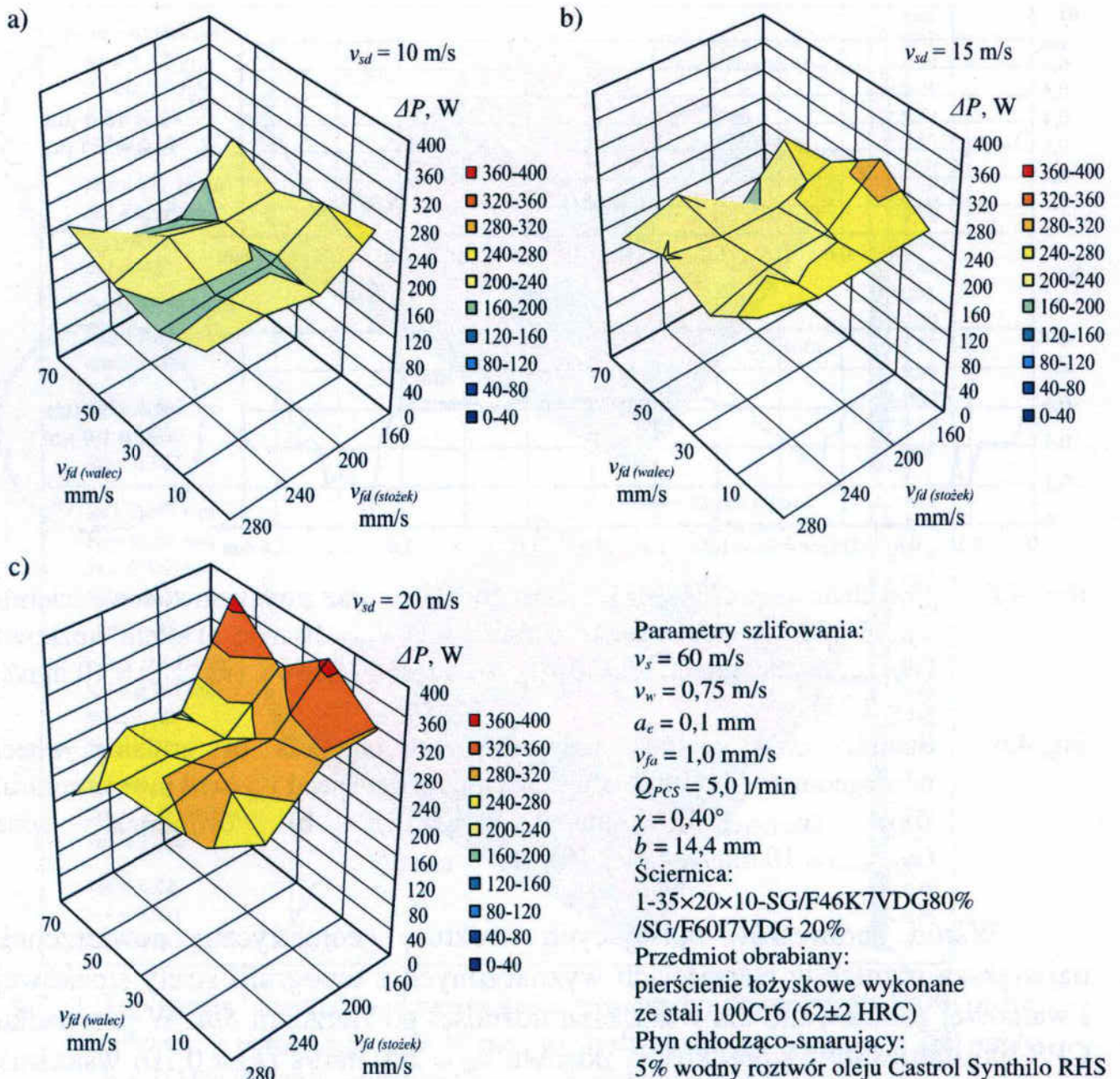
**Fig. 4.4.** Changes in the arithmetic mean roughness of the machined surface  $Ra$  as a function of the tool path feed rate while conical ( $v_{fd(stożek)}$ ) and cylindrical ( $v_{fd(walec)}$ ) zone dressing [220, 256]

Porównanie zmian wartości parametru  $Ra$  w funkcji prędkości posuwu osiowego przy ostrzeniu części walcowej ściernicy wskazuje na znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni przedmiotów szlifowanych ściernicą obciążoną z najmniejszą wartością  $v_{fd(walec)}$ . Dla  $v_{sd} = 10$  m/s zarejestrowano ponadtrzykrotne obniżenie średniego arytmetycznego odchylenia profilu  $Ra$  z wartości około  $0,50 \mu\text{m}$  przy  $v_{fd(walec)} = 70$  mm/s do  $0,14 \mu\text{m}$  przy  $v_{fd(walec)} = 10$  mm/s. Tendencja ta utrzymuje się niezależnie od wartości prędkości  $v_{sd}$  i pozostaje stała dla całego zakresu zmienności  $v_{fd(stożek)}$ . W takich warunkach powierzchnia walcowej części ściernicy jest kształtowana przy największym stopniu pokrycia  $k_d$ . W efekcie kształtowana jest topografia z największą liczbą kinematycznych ostrzy skrawających  $N_{kin}$  [68, 69], powstałych na skutek wykruszania fragmentów mikrokryształicznych ziaren korundu spiekanego (rys. 4.6b i 4.7b). Uzyskana w ten sposób duża liczba ostrzy zapewniła najlepsze wygładzenie powierzchni.

Duża wartość prędkości posuwu obciążacza przy kształtowaniu nakroju stożkowego  $v_{fd(stożek)}$  nie wpływa na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego w badanym procesie, która w głównej mierze zależy od strefy walcowej ściernicy. Pozwala jednak na wygenerowanie bardzo ostrej powierzchni ściernicy z dużymi przestrzeniami międzyziarnowymi zapobiegającymi zalepianiu CPS (rys. 4.6a i 4.7a). Taka charakterystyka powierzchni strefy stożkowej umożliwia bardziej efektywne usuwanie nadmiaru obróbkowego, co przyczynia się do obniżenia mocy szlifowania (rys. 4.5).

Tendencja ta najwyraźniej ujawniła się przy obciążaniu ściernicy z  $v_{sd} = 20$  m/s. W takich warunkach zwiększenie prędkości posuwu podczas kształtowania nakroju stożkowego ze 160 do 280 mm/s pozwoliło zredukować przyrost mocy szlifowania z około 370 W do około 200 W (rys. 4.5c).

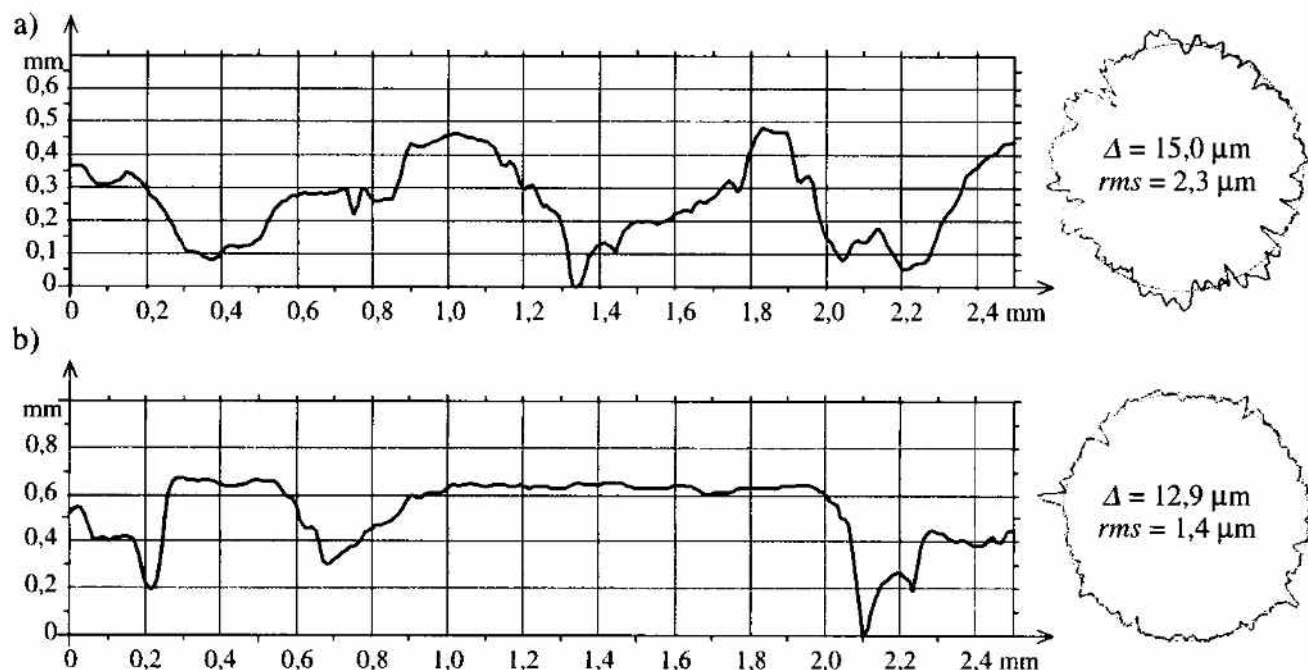
Zmiana prędkości obwodowej ściernicy z 10 do 20 m/s spowodowała wzrost poboru mocy w badanym procesie (rys. 4.5). Obliczone wartości średnie mocy szlifowania dla wszystkich punktów pomiarowych zmieniały się od 210 W przy  $v_{sd} = 10$  m/s, przez 236 W dla  $v_{sd} = 15$  m/s, aż do wartości 284 W zarejestrowanej podczas realizacji opisywanego procesu ściernicą obciążoną z  $v_{sd} = 20$  m/s. Jest to wynikiem zwiększania się, wraz z rosnącą  $v_{sd}$ , wartości stopnia pokrycia  $k_d$ , co prowadzi do generowania coraz większej liczby kinematycznych ostrzy skrawających  $N_{kin}$  [68].



Rys. 4.5. Zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciążaniu strefy stożkowej ( $v_{fd(stożek)}$ ) i walcowej ( $v_{fd(walec)}$ ) ściernicy dla trzech wartości prędkości obwodowej ściernicy: a)  $v_{sd} = 10$  m/s; b)  $v_{sd} = 15$  m/s; c)  $v_{sd} = 20$  m/s [220, 256]

Fig. 4.5. Changes in the power gain  $\Delta P$  as a function of the tool path feed rate while dressing the conical ( $v_{fd(stożek)}$ ) and cylindrical ( $v_{fd(walec)}$ ) zones of a grinding zone for three values of the grinding wheel peripheral speed: a)  $v_{sd} = 10$  m/s; b)  $v_{sd} = 15$  m/s; c)  $v_{sd} = 20$  m/s [220, 256]

Porównanie mikrogeometrii poszczególnych stref funkcjonalnych ściernicy przedstawiono na rysunku 4.6 i 4.7. Aby uwidocznic różnice wynikające jedynie z przyjętych parametrów obciążania każdej ze stref, przedstawiono profile osiowe oraz mikrotopografie i parametry chropowatości powierzchni ściernicy wykonanej w całości z ziaren SG<sup>TM</sup> o rozmiarze 46.

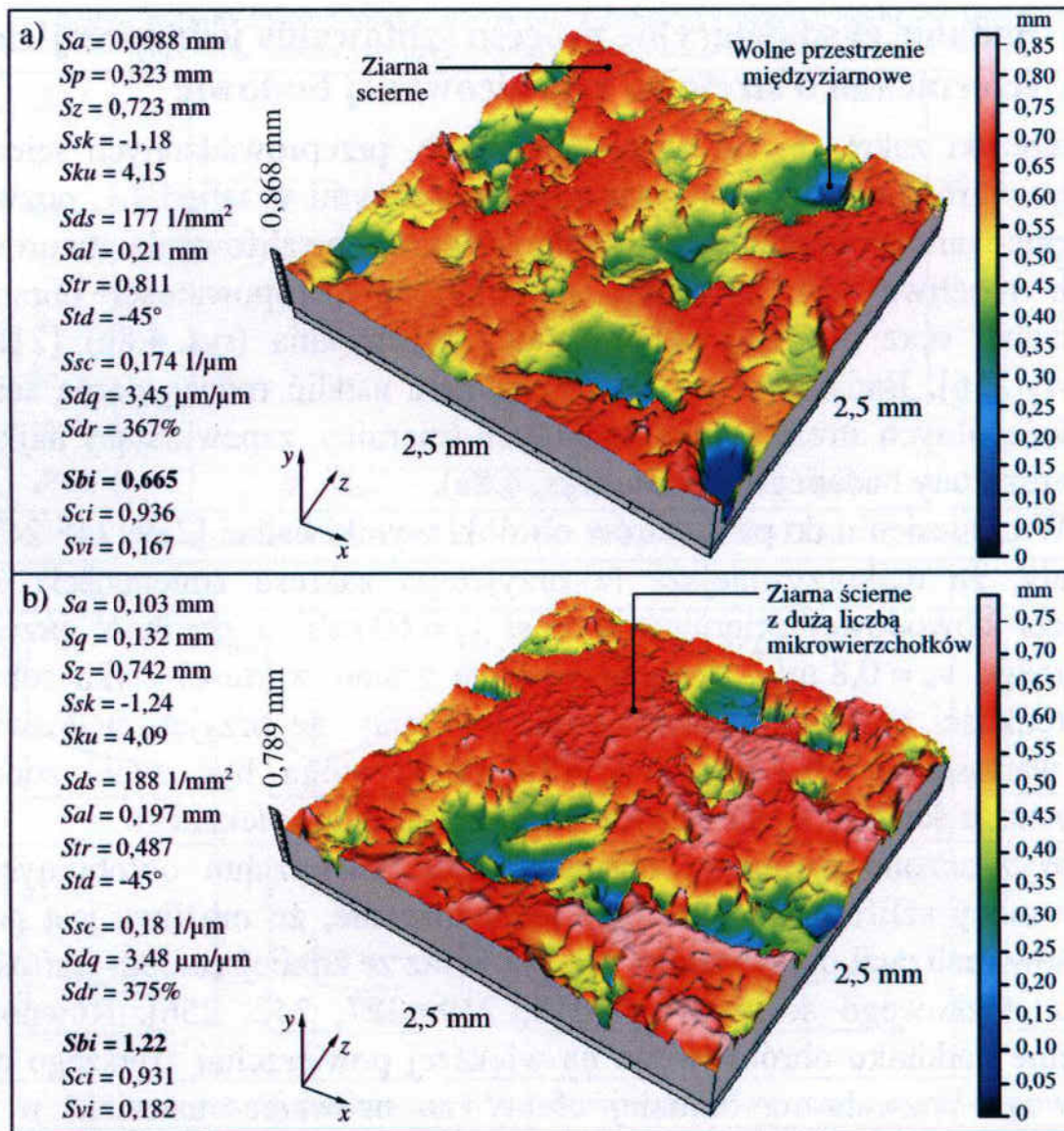


Rys. 4.6. Przykładowe profile osiowe mikrogeometrii oraz zarysy obwodowe ściernicy 46-100% po obciążeniu z prędkością  $v_{sd} = 10$  m/s: a) strefa stożkowa ( $v_{fd(stożek)} = 280$  mm/s;  $k_d = 0,10$ ); b) część walcowa ( $v_{fd(walec)} = 10$  mm/s;  $k_d = 2,75$ )

Fig. 4.6. Sample axial profiles and peripheral contours of grinding wheel microgeometry 46-100% after dressing at the speed  $v_{sd} = 10$  m/s: a) conical zone ( $v_{fd(stożek)} = 280$  mm/s;  $k_d = 0.10$ ); b) cylindrical zone ( $v_{fd(walec)} = 10$  mm/s;  $k_d = 2.75$ )

Wśród parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni, największą różnicę w wartościach wyznaczonych z topografii strefy stożkowej i walcowej zanotowano dla wskaźnika nośności powierzchni  $S_{bi}$ . W przypadku CPS ukształtowanej z prędkością posuwu  $v_{fd} = 280$  mm/s ( $k_d = 0,10$ ) wskaźnik nośności wynosił  $S_{bi} = 0,665$  (rys. 4.7a). Na podstawie mikrotopografii CPS części realizującej szlifowanie wykończeniowe, obciążonej z prędkością posuwu  $v_{fd} = 10$  mm/s ( $k_d = 2,75$ ), wyznaczono wartość  $S_{bi} = 1,22$  (rys. 4.7b).

Wynika z tego, że poprzez odpowiedni dobór parametrów obciążania można wpływać na nośność CPS wyrażoną parametrem  $S_{bi}$ . Wzrost nośności oznacza wygenerowanie powierzchni z dużą liczbą mikrowierzchołków oraz mniejszą głębokością nierówności, czyli struktury dostosowanej do realizacji szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania.



Rys. 4.7. Topografia i parametry chropowatości powierzchni ściernicy 46-100% po obciążeniu z prędkością  $v_{sd} = 10 \text{ m/s}$ : a) strefa stożkowa ( $v_{fd(stożek)} = 280 \text{ mm/s}$ ;  $k_d = 0,10$ ); b) część walcowa ( $v_{fd(walec)} = 10 \text{ mm/s}$ ;  $k_d = 2,75$ )

Fig. 4.7. Topography and parameters of the grinding wheel surface roughness 46-100% after dressing at the speed  $v_{sd} = 10 \text{ m/s}$ : a) conical zone ( $v_{fd(stożek)} = 280 \text{ mm/s}$ ;  $k_d = 0.10$ ); b) cylindrical zone ( $v_{fd(walec)} = 10 \text{ mm/s}$ ;  $k_d = 2.75$ )

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość dostosowania stanu poszczególnych stref CPS do realizowanych przez nie różnych funkcji obróbkowych. Odpowiedni dobór  $v_{sd}$  oraz wysokie prędkości kształtowania strefy stożkowej  $v_{fd(stożek)}$  pozwalają na znaczną redukcję mocy szlifowania przy niewielkim wzroście chropowatości powierzchni szlifowanej. Natomiast na jakość przedmiotu obrobionego w największym stopniu wpływa struktura geometryczna powierzchni strefy walcowej ściernicy, którą należy starannie wyrównać i naostrzyć, stosując niewielką prędkość posuwu obciążacza  $v_{fd(walec)}$ .



#### 4.1.5. Badania eksploatacyjne procesu szlifowania jednoprzęściowego ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

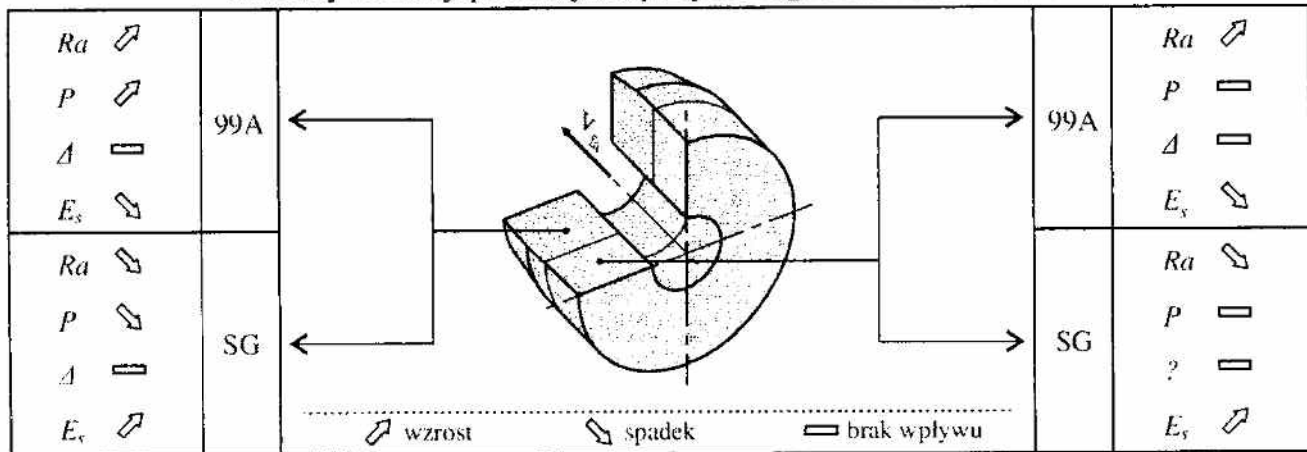
Szeroki zakres badań eksploatacyjnych, przeprowadzonych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie przedstawionymi w tabeli 4.1, pozwolił na określenie wartości parametrów jednoprzęściowego szlifowania otworów, przy których możliwe jest uzyskanie najmniejszej chropowatości obrabianych powierzchni oraz niskiego poboru mocy szlifowania (rys. 4.8b) [218, 219, 245-247, 256]. Badania te pozwoliły również ustalić rodzaj ziarna ściernego w poszczególnych strefach funkcjonalnych ściernicy, zapewniający najkorzystniejsze rezultaty badanego procesu (rys. 4.8a).

W odniesieniu do parametrów obróbki wyniki badań [219, 245-247, 256] wykazały, że najkorzystniejsza (z przyjętego zakresu zmienności) wartość prędkości obwodowej ściernicy wynosi  $v_s = 60$  m/s, a prędkość przedmiotu obrabianego  $v_w = 0,8$  m/s. Badania wpływu zmian wartości styku roboczego oraz prędkości posuwu osiowego stołu wykazały, że przyjęte w doświadczeniach wartości  $a_c = 0,1$  mm i  $v_{fa} = 1,0$  mm/s, mogą być zwiększone przy zastosowaniu ściernic zbudowanych z ziaren korundu spiekane.

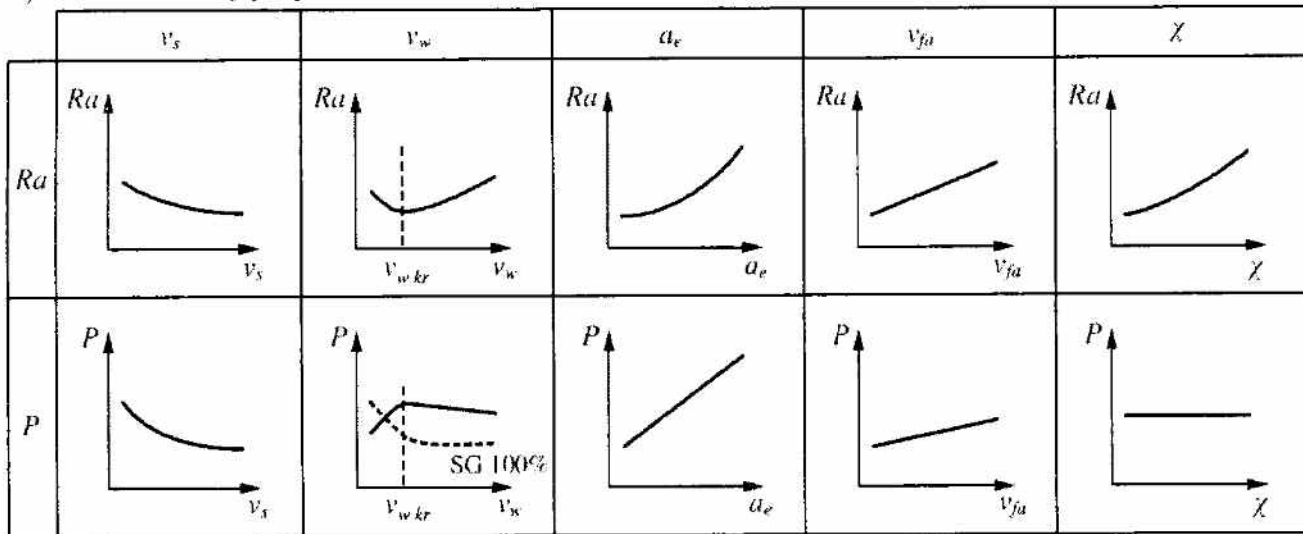
Wyznaczone parametry chropowatości powierzchni obrobionych oraz zmiany mocy szlifowania wykazały jednoznacznie, że możliwa jest poprawa warunków realizacji opisywanego procesu wraz ze zmniejszaniem wartości kąta nakroju stożkowego ściernicy  $\chi$  [218, 219, 227, 242, 256]. Równomierne rozłożenie naddatku obróbkowego na większej powierzchni szerszego nakroju stożkowego pozwala na bardziej efektywne usuwanie materiału w strefie szlifowania zgrubnego i, mimo skrócenia walcowej części ściernicy, wpływa na poprawę gładkości szlifowanych powierzchni. Modyfikacja parametrów nakroju nie wpływa znacząco na moc szlifowania. Uzyskane wyniki badań były podstawą do określenia szerokości nakroju stożkowego wynoszącej 90% szerokości strefy szlifowania zgrubnego  $b = 0,9 \cdot T_l$ . Taka wartość pozwala na maksymalne wykorzystanie szerokości strefy szlifowania zgrubnego oraz pozostawia margines na przesuwanie się końca nakroju w kierunku części walcowej, spowodowanego postępującym zużyciem krawędziowym ściernicy.

Przedstawione na rysunku 4.8 jakościowe zestawienie uzyskanych wyników badań procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie uwzględnia również wyniki badań określające wpływ parametrów kształtowania struktury geometrycznej CPS w zabiegu obciążania, opisane w podrozdziale 4.1.4 (rys. 4.8c).

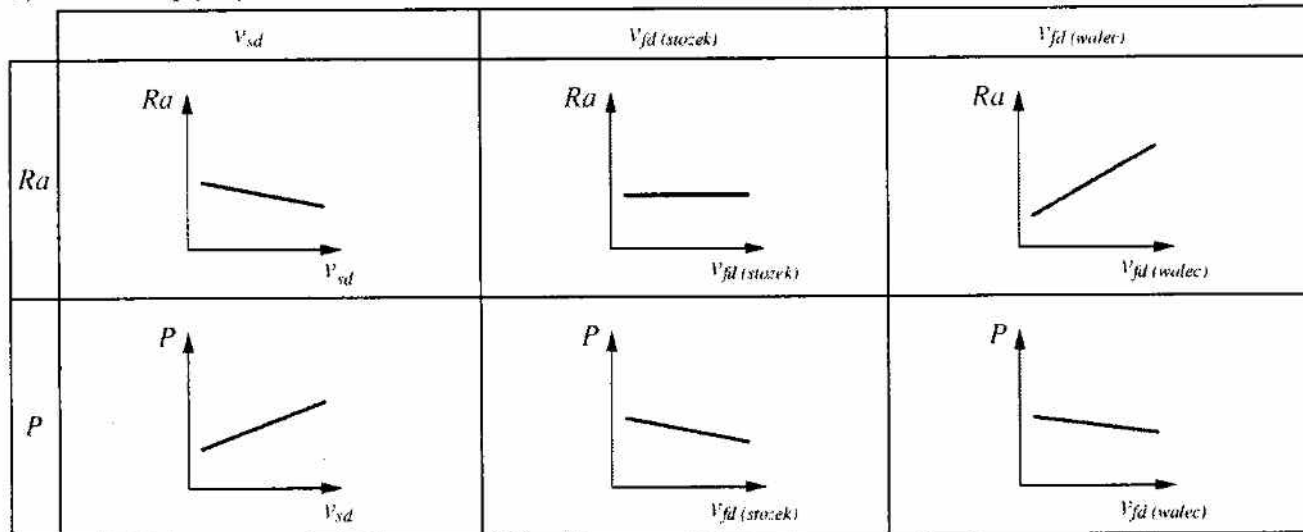
a) Wpływ rodzaju ziarna w strefie szlifowania zgrubnego i wykończeniowego ściernicy na efekty realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów



b) Wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni i moc szlifowania



c) Wpływ parametrów kształtowania CPS na chropowatość powierzchni i moc szlifowania



Rys. 4.8. Jakościowe zestawienie wpływu rodzaju ziarna w poszczególnych strefach ściernicy (a) oraz wpływ parametrów (b, c) jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie [219, 256]

Fig. 4.8. Effects of the grade of grains (a) in relevant zones of the grinding wheel and effects of parameters (b, c) of the single-pass internal cylindrical grinding using zone-diversified structure grinding wheel [219, 256]

## Wpływ parametrów szlifowania na chropowatość powierzchni i moc szlifowania

Zamieszczone na rysunku 4.8 wyniki badań uzyskane zostały przy relatywnie niskim poziomie wydajności ubytkowej szlifowania wynoszącej  $Q_w = 6,26 \text{ mm}^3/\text{s}$ . W kolejnej części badań ustalono wpływ zwiększenia głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego  $v_{fa}$  (które bezpośrednio odpowiadają za wydajność ubytkową) na przebieg i wyniki procesu jedno-przejsciowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie w całości wykonanymi z ziaren mikrokryształicznego korundu spiekane-go [219, 224, 238, 256, 268].

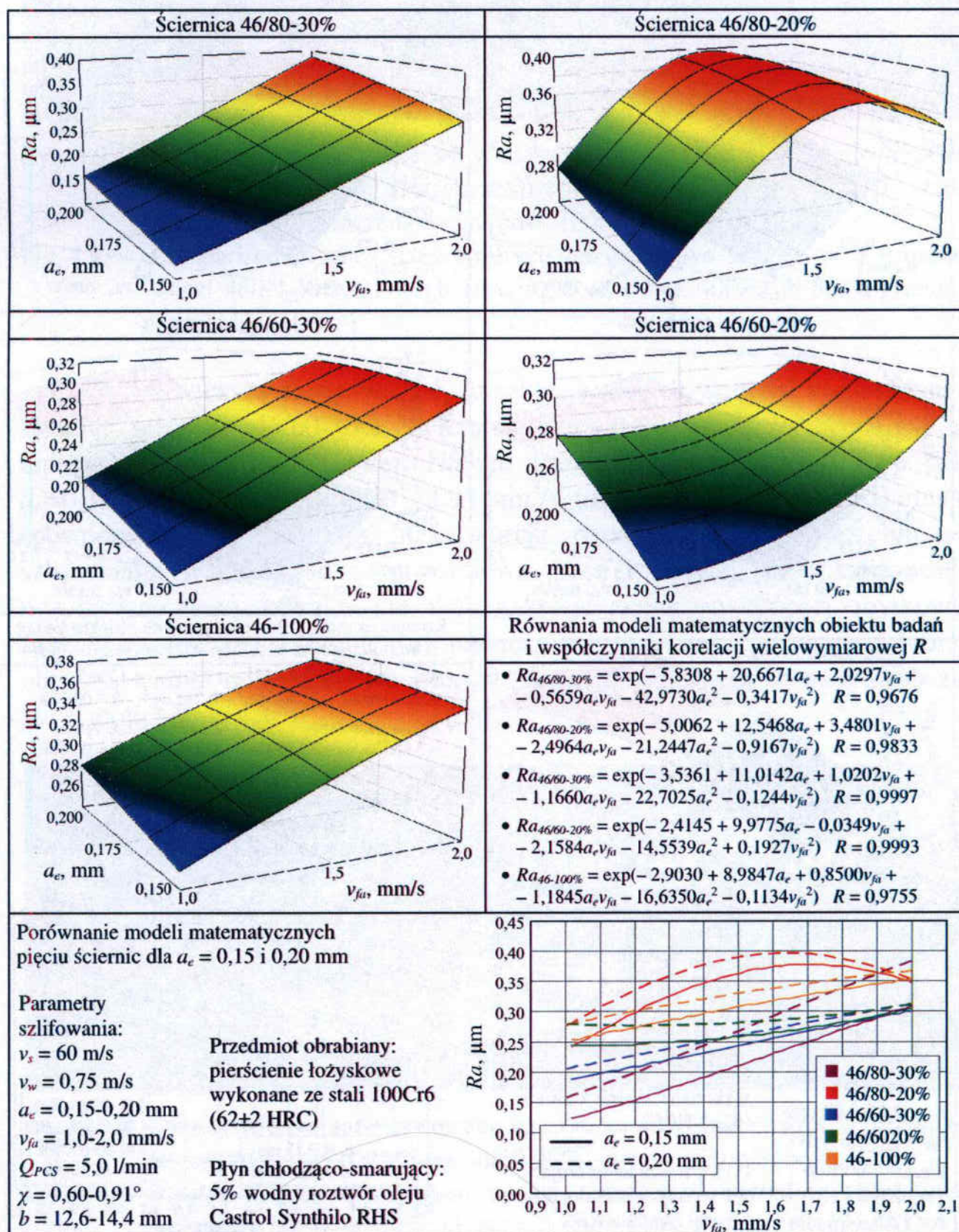
Opisywane badania zrealizowane zostały na podstawie trójpoziomowego planu eksperymentu, umożliwiającego wyznaczenie modelu nieliniowego stopnia drugiego. Spośród pięciu klas modelu matematycznego obiektu badań, które udostępniła zastosowane oprogramowanie Experiment Planner 1.0, wybrano funkcję opisującą zarejestrowane wyniki z największym dopasowaniem. Ustalono, że chropowatość powierzchni obrobionej najlepiej opisuje model wykładniczy (za kryterium przyjęto współczynnik korelacji wielowymiarowej  $R$ ). Z porównania modeli opisujących pobór mocy szlifowania wynika natomiast, że najwyższy stopień dopasowania wykazuje funkcja wielomianowa.

Wykresy zmian parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni obrobionej  $Ra$  i  $Rz$  zamieszczone w tabeli 4.2 i 4.3 wskazują, że najniższe wartości tych parametrów można osiągnąć z użyciem ściernic odznaczających się 30% udziałem strefy szlifowania wykończeniowego. Przewaga tych narzędzi jest szczególnie widoczna dla małych wartości styku roboczego i posuwu osiowego.

Najniższą wartość parametrów  $Ra$  i  $Rz$  uzyskano z użyciem ściernicy 46/80-30%, co tłumaczyć należy dużą liczbą mikrowierzchołków skrawających w strefie szlifowania wykończeniowego zbudowanej z ziaren o numerze 80. Powierzchnia wygenerowana przez część stożkową takiej ściernicy zostaje ostatecznie wykończona i wyiskrzona dużą liczbą ostrzy znajdujących się na powierzchni strefy walcowej. O takim przebiegu procesu świadczy porównanie wielkości wiórów zaobserwowanych na czynnej powierzchni obu stref tego narzędzia ściernego (rys. 4.9).

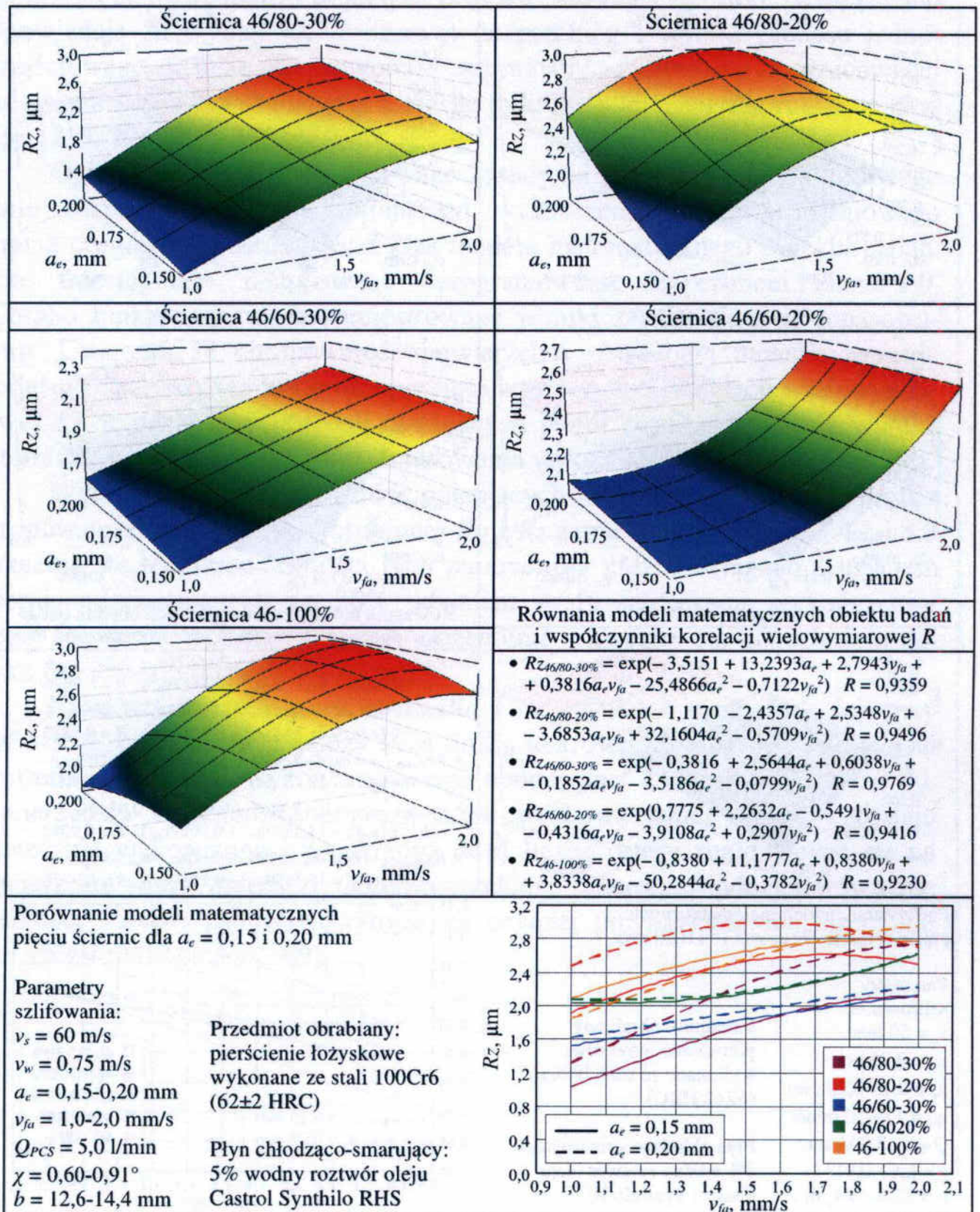
Tab. 4.2. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażone parametrem  $Ra$  w funkcji głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  [219]

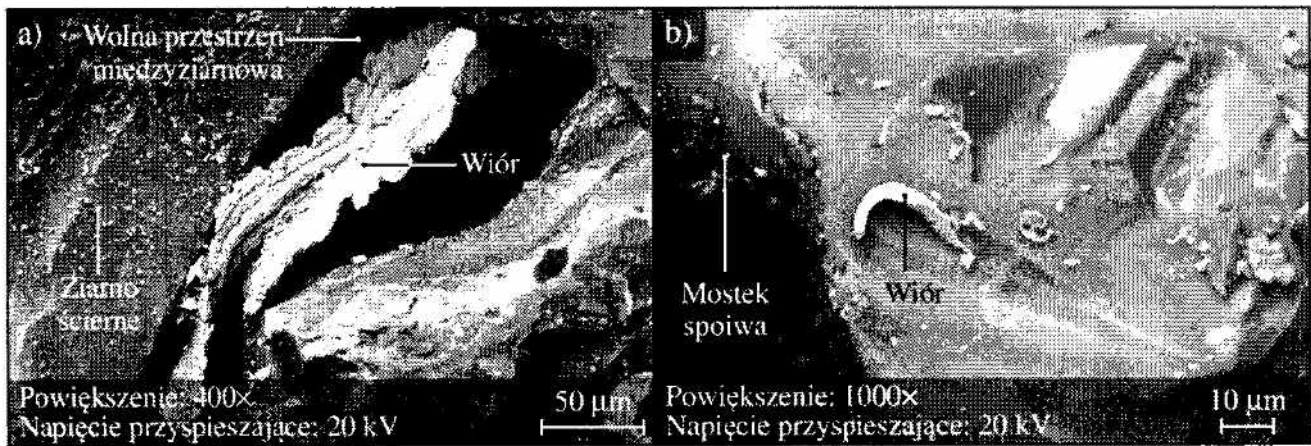
Tab. 4.2. Breakdown of mathematical models describing the changes in the surface roughness of a workpiece described by  $Ra$  parameter as a function of the working engagement  $a_e$  and axial table feed speed  $v_{fa}$  [219]



Tab. 4.3. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażone parametrem  $R_z$  w funkcji głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  [219]

Tab. 4.3. Breakdown of mathematical models describing the changes in the surface roughness of a workpiece described by  $R_z$  parameter as a function of the working engagement  $a_e$  and axial table feed speed  $v_{fa}$  [219]

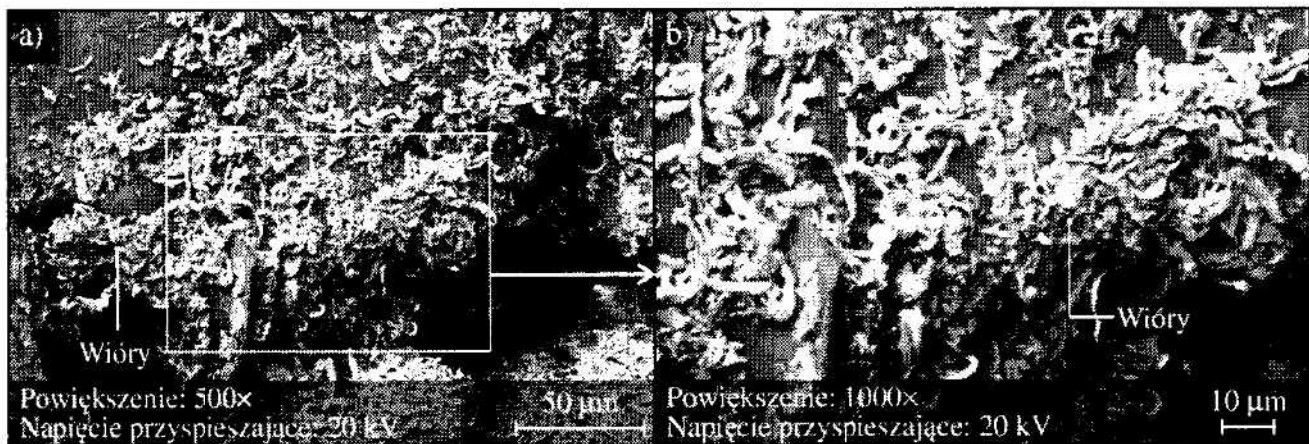




Rys. 4.9. Porównanie wielkości wiórów zaobserwowanych na czynnej powierzchni ściernicy 46/80-30%: a) strefa szlifowania zgrubnego (pow. 400×); b) strefa szlifowania wykończeniowego (pow. 1000×)

Fig. 4.9. Comparison of chip sizes observed on the active surface of a grinding wheel 46/80-30%: a) rough grinding zone (Mag. 400×); b) finish grinding zone (Mag. 1000×)

Nieco większą chropowatość, w zakresie niskich wartości  $v_{fa}$ , uzyskano, stosując ściernicę 46/60-30%. Ściernica ta okazała się mniej wrażliwa na zmiany wydajności ubytkowej. Niemal trzykrotny wzrost  $Q_w$  z 8,96 (dla  $a_e=0,15$  mm,  $v_{fa}=1,0$  mm/s) do 23,93 mm<sup>3</sup>/s (dla  $a_e=0,20$  mm,  $v_{fa}=2,0$  mm/s) spowodował jedynie około 30% wzrost parametru  $Ra$  powierzchni po szlifowaniu. Wskazuje to na prawidłową pracę walcowej strefy szlifowania wykończeniowego, która w szerokim zakresie zmian wydajności ubytkowej zapewnia wyiskrzenie obrabianych powierzchni. Przebieg tego procesu dobrze obrazują widoki mikroskopowe wiórów zarejestrowane w opisywanym obszarze ściernicy (rys. 4.10).



Rys. 4.10. Obrazy wiórów zaobserwowane na czynnej powierzchni strefy szlifowania wykończeniowego ściernicy 46/60-30%: a) pow. 500×; b) pow. 1000×

Fig. 4.10. Images of chips observed on the active surface of a grinding wheel finish grinding zone 46/60-30%: a) magnification 500×; b) magnification 1000×

Jeszcze mniejszą zmienność zarejestrowano dla drugiej ściernicy z ziarnem o numerze 60 w strefie wykończeniowej o wysokości  $T_2 = 0,2 \cdot T$ . Widoczny jest również wzrost chropowatości powierzchni obrobionych tym narzędziem. Można zatem wnioskować, że zastosowanie większych ziaren w walcowej strefie ściernicy wpływa negatywnie na osiąganą jakość powierzchni przedmiotu po szlifowaniu. Wynika to z mniejszej koncentracji większych ziaren na CPS, powodującej zmniejszenie liczby wierzchołków aktywnych i wzrost przekroju warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem, przez co tworzą się większe wióry i wzrasta chropowatość powierzchni obrobionej.

Największe wartości parametrów  $Ra$  i  $Rz$  spośród przebadanych narzędzi odnotowano dla powierzchni szlifowanych ściernicą 46/80-20%. Wyniki pomiarów były mniej korzystne nawet w odniesieniu do rezultatów uzyskanych ściernicą 46-100%, stanowiącą odniesienie dla ściernic o strefowym zróżnicowaniu budowy. O ile wartości początkowe i końcowe kształtują się na poziomie bardzo zbliżonym do rezultatów szlifowania innym narzędziem z 20% strefą wykończeniową (46/60-20%) oraz ściernicą 46-100%, to powierzchnie uzyskane przy  $v_{fa} = 1,5$  mm/s znacznie od nich odbiegają. Otrzymany kształt funkcji aproksymującej zmiany chropowatości powierzchni obrobionych narzędziem 46/60-20% wyraźnie odstaje od pozostałych modeli. Pozwala to sądzić, że wyniki szlifowania tą ściernicą, dla posuwu osiowego stołu równego 1,5 mm/s, zostały zakłócone działaniem czynników losowych wpływających na badany proces.

Z uzyskanych wyników zmian wartości parametrów  $Ra$  i  $Rz$  wynika, że największy wpływ na parametry wysokościowe profilu chropowatości przedmiotu obrobionego ma udział strefy szlifowania wykończeniowego. Zwiększenie wartości  $T_2$  z 20 do 30% całkowitej wysokości ściernicy  $T$  pozwoliło na znaczne zredukowanie (w najlepszym przypadku nawet o 50%) średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości obrobionej powierzchni. Mimo różnicy w wielkości ziarna użytego do budowy strefy walcowej, narzędzia ścierne o jednakowym stosunku  $T_1/T_2$  osiągają korzystniejsze rezultaty obróbki niż pozostałe ściernice, co świadczy o kluczowym wpływie tego parametru na ostateczną chropowatość obrobionego przedmiotu. Porównując parametry  $Ra$  i  $Rz$  zmierzone po szlifowaniu z prędkością posuwu osiowego wynoszącą 1,0 mm/s, zauważalny jest podział na dwie grupy ściernic. Niższe wartości uzyskały narzędzia z 30% strefą  $T_2$ , natomiast pozostałe ściernice kształtowały powierzchnie o większej chropowatości. W przypadku dwóch narzędzi z dłuższą strefą walcową (46/80-30% i 46/60-30%), o chropowatości decydowała wielkość ziarna w tej części ściernicy.

Opisanym tendencjom zmian wartości parametrów wysokościowych profilu chropowatości przedmiotu obrobionego odpowiadały przebiegi średniego rozstępu wierzchołków profilu chropowatości  $Sm$  (tab. 4.4). Dla wszystkich narzędzi ściernych zanotowano nieznaczny spadek wartości parametru  $Sm$ , który odpowiada większej powierzchniowej gęstości wierzchołków, czyli większemu rozwinięciu ukształtowanej powierzchni. Zmierzone różnice między wartościami tego parametru uzyskanymi z zastosowaniem poszczególnych ściernic, mają analogiczny charakter do opisanego wyżej zróżnicowania parametrów wysokościowych, z tym, że wzrostowi  $Ra$  i  $Rz$  towarzyszy spadek  $Sm$ .

Kolejne zestawienie (tab. 4.5) prezentuje zmiany średniego pochylenia profilu chropowatości  $\Delta a$  w funkcji styku roboczego i prędkości posuwu osiowego. Wartości tego parametru wykazują trendy wzrostowe wraz ze zwiększaniem  $a_e$  i  $v_{fa}$ , a położenie linii uzyskanych poszczególnymi ściernicami odpowiada wynikom cech wysokościowych profili zmierzonych z powierzchni przedmiotu obrobionego.

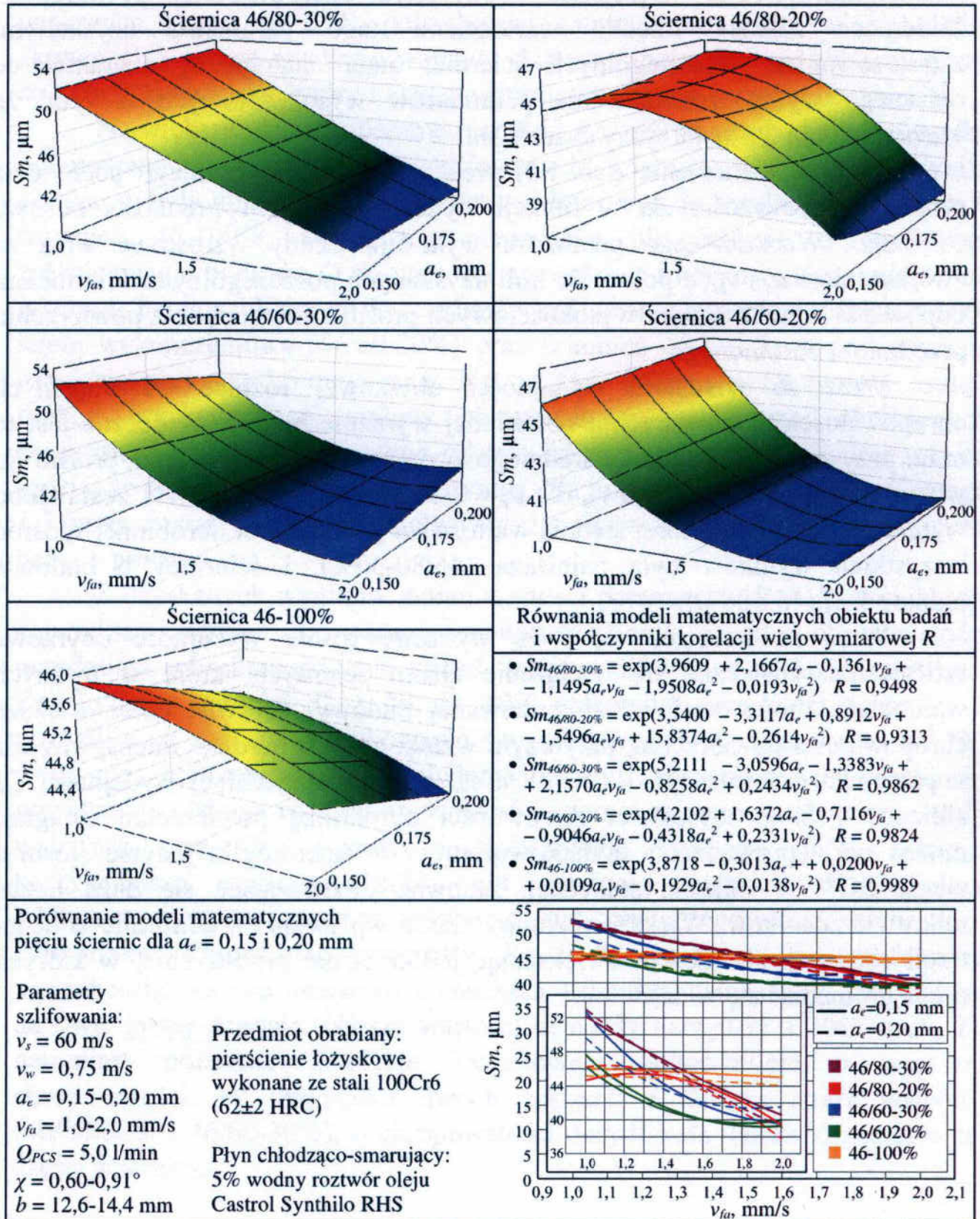
Wraz ze wzrostem wydajności ubytkowej różnice w osiągniętych chropowatościach powierzchni obrobionej wyraźnie malały. Widoczne jest to m.in. przy porównaniu zmian średniego arytmetycznego odchylenia profilu  $Ra$  w funkcji prędkości posuwu  $v_{fa}$  dla  $a_e = 0,20$  mm. Na rysunku 4.11 zestawiono wyniki dla ściernicy, której średnia wartość  $Ra$  powierzchni obrobionej spośród wszystkich wyników była najniższa (46/80-30%), i ściernicy o budowie jednorodnej (46-100%).

Wraz ze wzrostem  $a_e$  i  $v_{fa}$  wyraźnie rośnie wydajność ubytkowa szlifowania. Zwiększa się obciążenie ziaren ściernych, które w trudnych warunkach, mimo strefowo zróżnicowanej budowy, generują coraz większe chropowatości powierzchni, przy czym wzrost ten jest bardziej intensywny niż w przypadku ściernicy 46-100%. W efekcie, dla maksymalnej wydajności  $Q_w$  zbliżony poziom wysokości nierówności obrobionej powierzchni osiągnąć można bez wprowadzania dodatkowej strefy w ściernicy, a jedynie stosując ziarna  $SG^{TM}$  o mikrokrystalicznej budowie, odznaczające się dużą liczbą mikrowierzchołków. Większe rozmiary ziaren wpływają na obniżenie koncentracji ostrzy skrawających, zwiększając jednocześnie przestrzenie, w których mogą gromadzić się wióry.



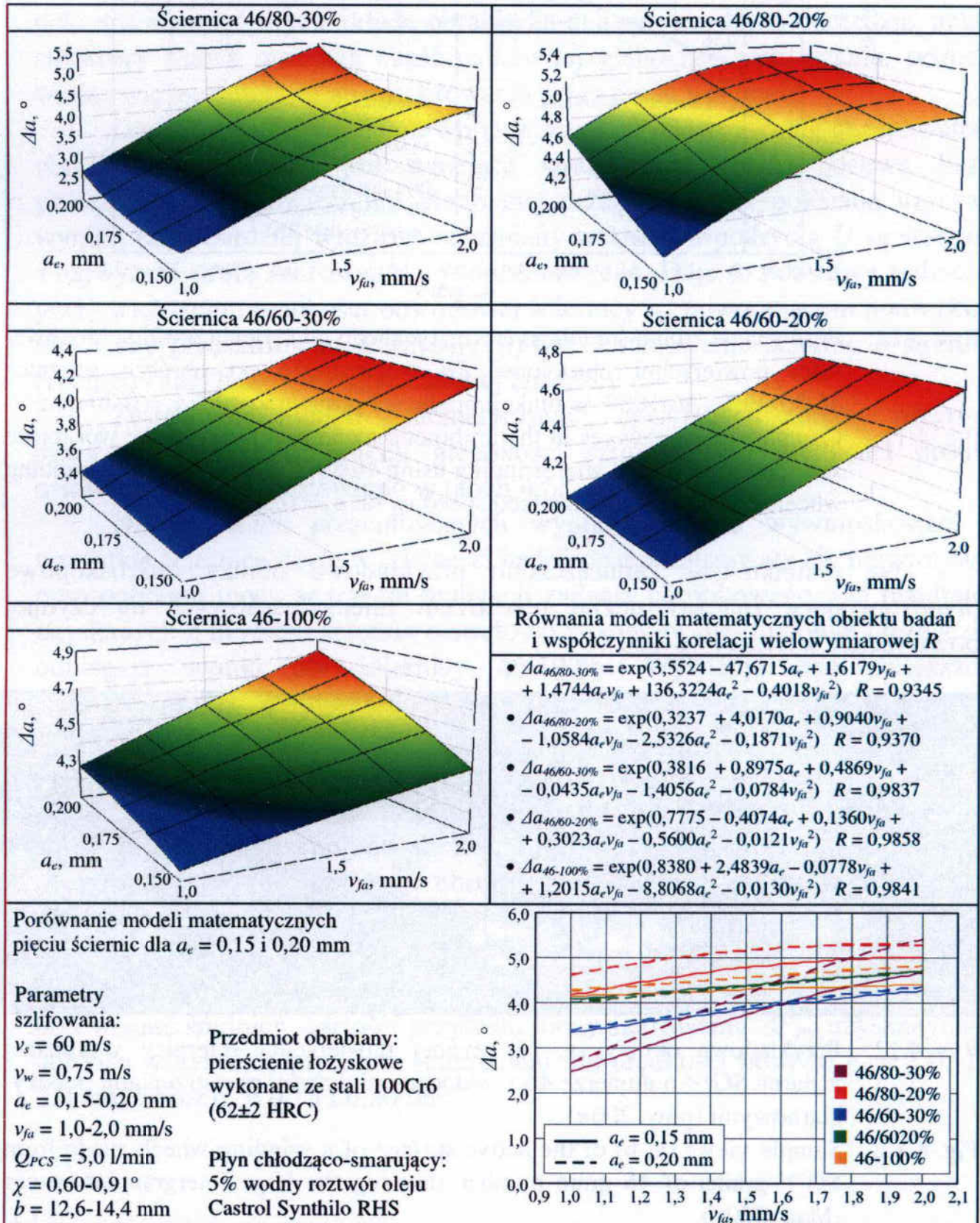
Tab. 4.4. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażone parametrem  $S_m$  w funkcji głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  [219]

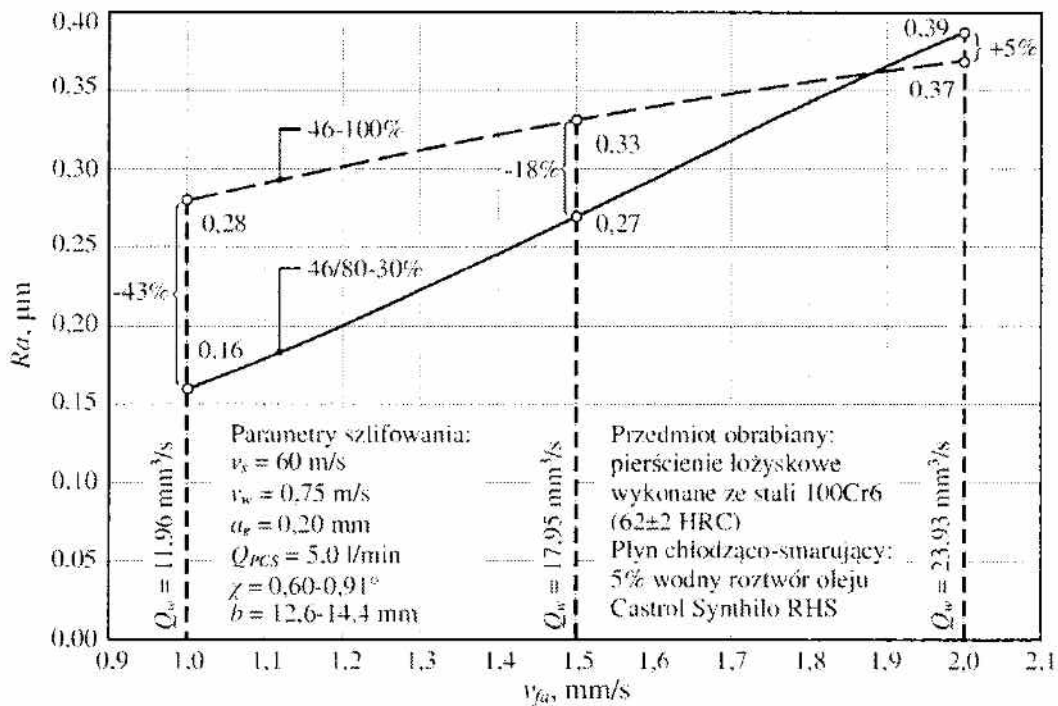
Tab. 4.4. Breakdown of mathematical models describing the changes in the surface roughness of a workpiece described by  $S_m$  parameter as a function of the working engagement  $a_e$  and axial table feed speed  $v_{fa}$  [219]



Tab. 4.5. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażone parametrem  $\Delta a$  w funkcji głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  [219]

Tab. 4.5. Breakdown of mathematical models describing the changes in the surface roughness of a workpiece described by  $\Delta a$  parameter as a function of the working engagement  $a_e$  and axial table feed speed  $v_{fa}$  [219]

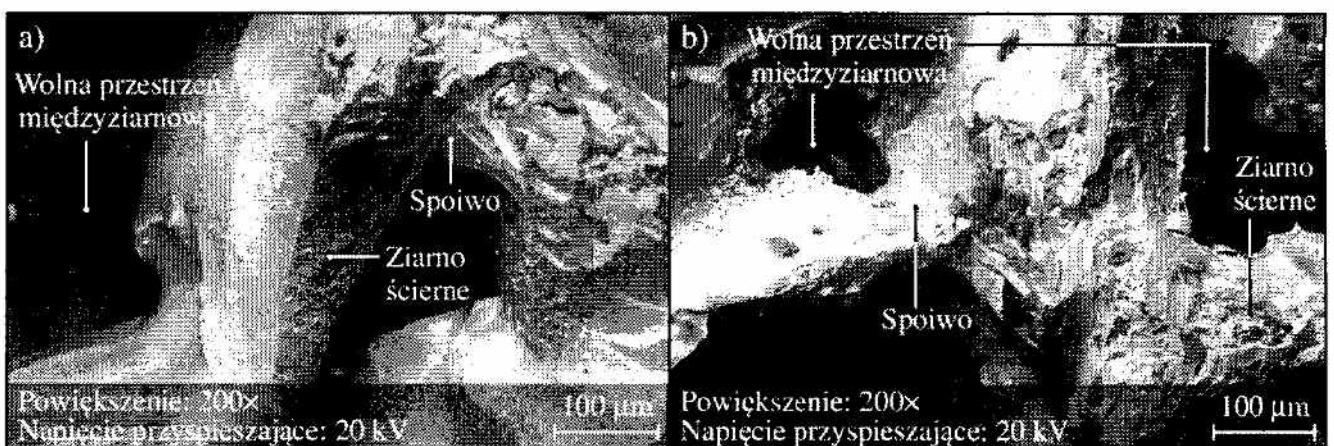




Rys. 4.11. Porównanie zmian średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni obrabianej  $Ra$  zmierzonego po obróbce ściernicą 46/80-30% i 46-100% w funkcji prędkości posuwu  $v_{fa}$  (dla  $a_e = 0.20$  mm)

Fig. 4.11. Comparison of changes in the arithmetic mean roughness of the workpiece surface  $Ra$  measured after grinding using 46/80-30% and 46-100% grinding wheels as a function of the feed speed  $v_{fa}$  (at  $a_e = 0.20$  mm)

Na rysunku 4.12 zamieszczono przykładowe obrazy mikroskopowe przedstawiające znaczny udział przestrzeni międzyziarnowych na czynnej powierzchni ściernicy 46-100%.



Rys. 4.12. Przykładowe obrazy (a, b) czynnej powierzchni ściernicy wykonanej z ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46 z widocznymi dużymi przestrzeniami międzyziarnowymi (pow. 200x)

Fig. 4.12. Sample views (a, b) of the active surface of a grinding wheels made from SG<sup>TM</sup> grains of 46 grain number showing the large intergranular spaces (Mag. 200x)

Wprowadzenie strefy szlifowania wykończeniowego o wysokości 30%, zbudowanej z ziaren o numerze 80, powoduje ograniczenie udziału bardzo porowatej powierzchni ściernicy zbudowanej z ziaren 46. Pozostała część CPS nie jest w stanie równie dobrze realizować szlifowania zgrubnego, ponieważ dostosowana została do wygładzania i wyiskrzania powierzchni. Przy większych wartościach wydajności ubytkowej, na skutek zwiększonych odkształceń sprężystych układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie, nakrój stożkowy usuwa mniejszą część całkowitej głębokości szlifowania, pozostawiając więcej materiału do zeszlifowania przez część walcową.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na podwyższanie chropowatości obrobionych otworów jest malejąca wraz ze wzrostem posuwu liczba przeszlifowań  $U$  powierzchni obrabianej przez CPS. Jak pokazują uzyskane wyniki, dużo bardziej wrażliwe na zmiany wskaźnika pokrycia  $U$  są ściernice z najwyższą strefą szlifowania wykończeniowego. Daje to podstawy sądzić, że przy zwiększeniu prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$ , powodującym podwyższenie liczby przeszlifowań, korzystny wpływ zastosowania ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie byłby bardziej znaczący.

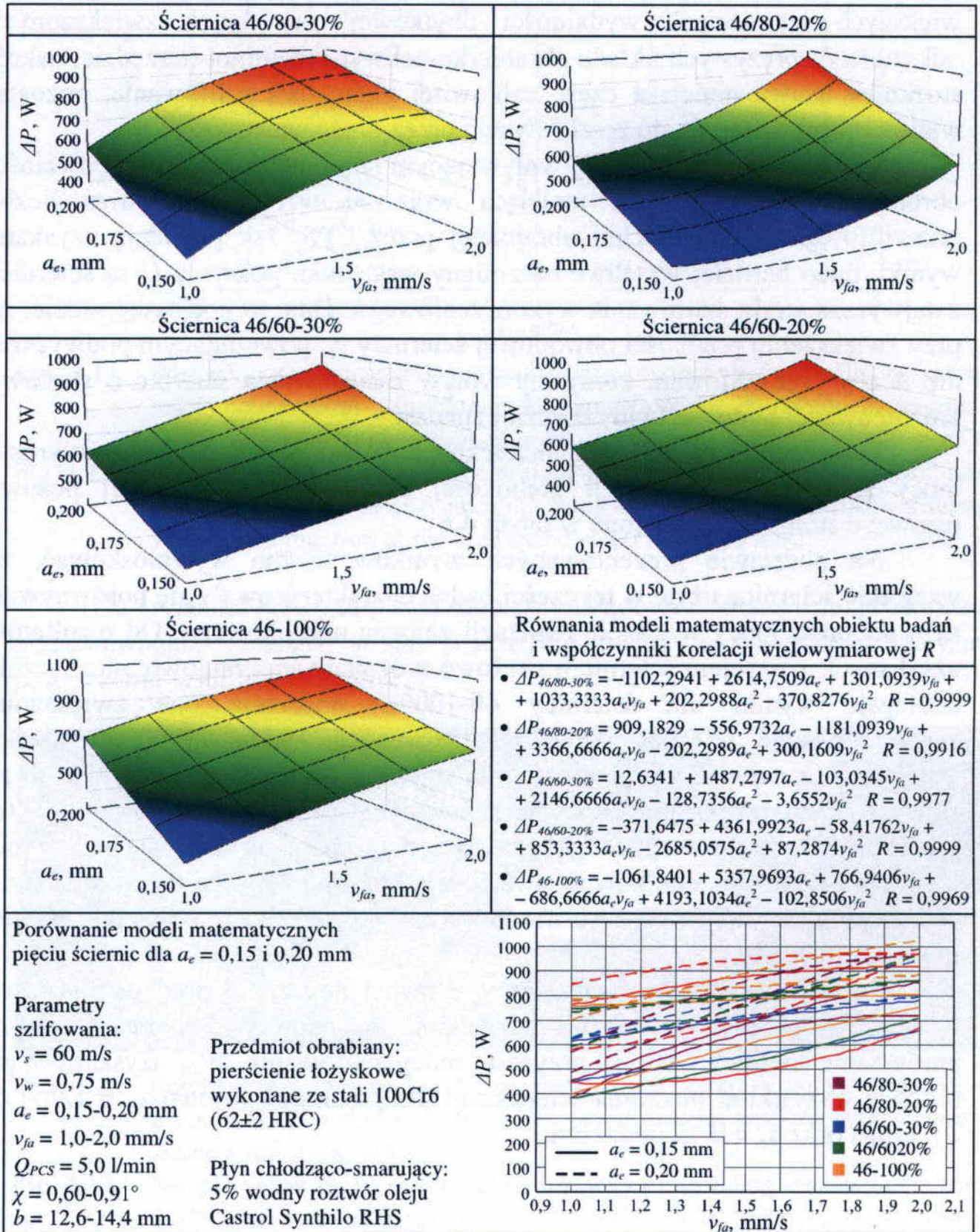
Zestawienie modeli matematycznych, opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania w funkcji głębokości szlifowania i prędkości posuwu osiowego stołu, przedstawiono w tabeli 4.6.

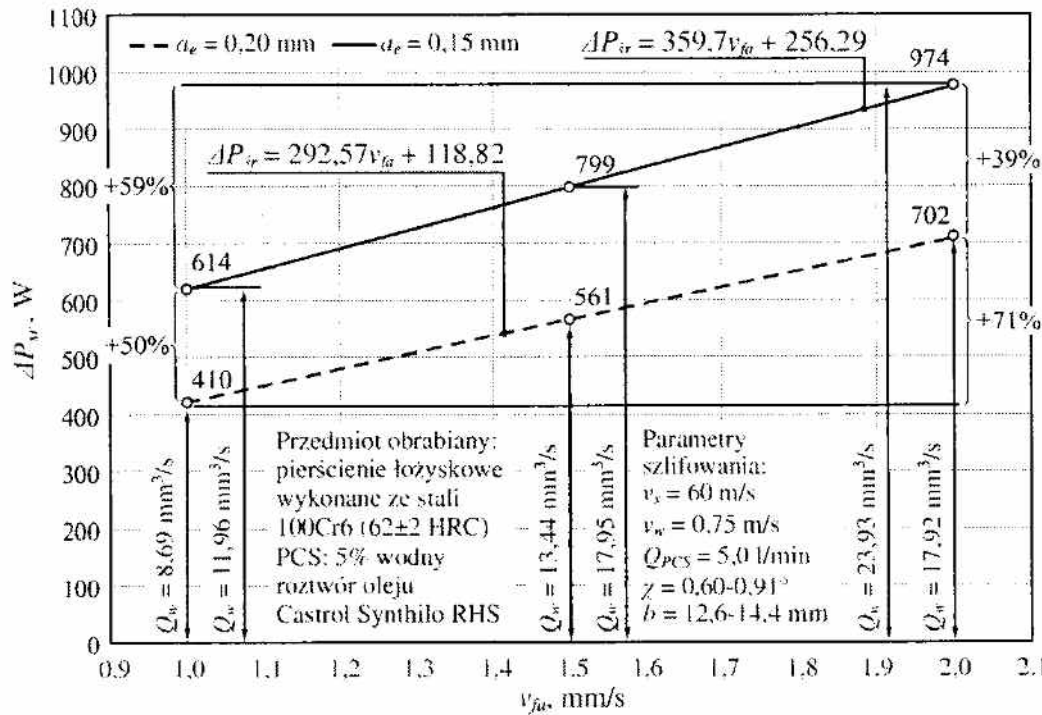
Na podstawie prezentowanych wyników można wywnioskować, że wszystkie ściernice użyte w tej części badań charakteryzowały się porównywalnym poborem mocy w trakcie realizacji zadania obróbkowego. Od rezultatów uzyskanych z użyciem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie nieznacznie odbiegają wyniki dla ściernicy 46-100%. Wykazują one zwiększone zapotrzebowanie na moc, które jest szczególnie widoczne w przypadku szlifowania z największą głębokością szlifowania  $a_e = 0,20$  mm. Wynika to ze zwiększonych przekrojów warstw skrawanych pojedynczymi ziarnami tej ściernicy. Czynna powierzchnia tego narzędzia charakteryzuje się relatywnie mniejszą liczbą wierzchołków skrawających, które poddawane są zwiększonym obciążeniom w trakcie procesu obróbkowego, co w efekcie powoduje wzrost mocy szlifowania.

Zarejestrowane zmiany zależą w głównej mierze od prędkości posuwu i głębokości szlifowania. Widać to wyraźnie na rysunku 4.13, prezentującym porównanie średnich wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$ , uzyskanych po obróbce wszystkimi pięcioma ściernicami dla prędkości posuwu  $v_{fa} = 1,0; 1,5; 2,0$  mm/s oraz  $a_e = 0,15$  i  $0,20$  mm.

Tab. 4.6. Zestawienie modeli matematycznych opisujących przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$  w funkcji głębokości szlifowania  $a_e$  i prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$  [219]

Tab. 4.6. Breakdown of mathematical models describing the grinding power gain  $\Delta P$  as a function of the working engagement  $a_e$  and axial feed speed  $v_{fa}$  [219]





Rys. 4.13. Zestawienie średnich wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_{sr}$  wyznaczonych na podstawie wyników szlifowania wszystkimi pięcioma ściernicami dla prędkości posuwu  $v_{fa} = 1,0; 1,5$  i  $2,0$  mm/s – wyniki odpowiadające naddatkowi obróbkowemu  $a_e = 0,15$  i  $0,20$  mm aproksymowano funkcją liniową

Fig. 4.13. Comparison of the mean grinding power gain values  $\Delta P_{sr}$  obtained after grinding using all the grinding wheels for the feed speed  $v_{fa} = 1.0; 1.5$  and  $2.0$  mm/s – results responding with the working engagement  $a_e = 0.15$  and  $0.20$  mm were approximated with a linear function

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 4.13 wynika, że zwiększenie wydajności ubytkowej  $Q_w$  o 33%, wynikające ze zmiany głębokości szlifowania z  $0,15$  mm do  $0,20$  mm, powoduje średnio 45% wzrost poboru mocy w badanym procesie. Natomiast podwojenie  $Q_w$ , wywołane wzrostem prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki z  $1,0$  do  $2,0$  mm/s, wpływa na zwiększenie mocy szlifowania o 59% dla  $a_e = 0,20$  mm i 71% przy  $a_e = 0,15$  mm. Oznacza to, że grubość warstwy usuwanego materiału w znacznie większym stopniu determinuje osiągnięte przyrosty mocy szlifowania niż prędkość posuwu osiowego stołu.

Z otrzymanych modeli matematycznych opisujących zmiany mocy szlifowania w funkcji  $a_e$  i  $v_{fa}$  (tab. 4.6) wynika, że znaczącym ograniczeniem dla osiągnięcia większych wydajności ubytkowych w badanym procesie jest wartość głębokości szlifowania. Przyjęty w zrealizowanych próbach zakres zmienności  $a_e$ , wynoszący od  $0,15$  mm do  $0,20$  mm, odpowiada wielkości naddatku obróbkowego pozostawianego na szlifowanie w stosowanych w przemyśle procesach wytwarzania pierścieni łożysk tocznych. Dla takich zastosowań

procesu jednoprzęciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych nie ma zatem potrzeby zwiększania wartości tego parametru. Wydajność ubytkową można natomiast podnieść poprzez zwiększanie prędkości posuwu osiowego, która w mniejszym stopniu wpływa na pobór mocy. Z przeprowadzonych badań wynika również, że moc szlifowania zmienia się w bardzo ograniczonym zakresie na skutek zróżnicowania budowy stosowanych ściernic.

### Okres trwałości ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie

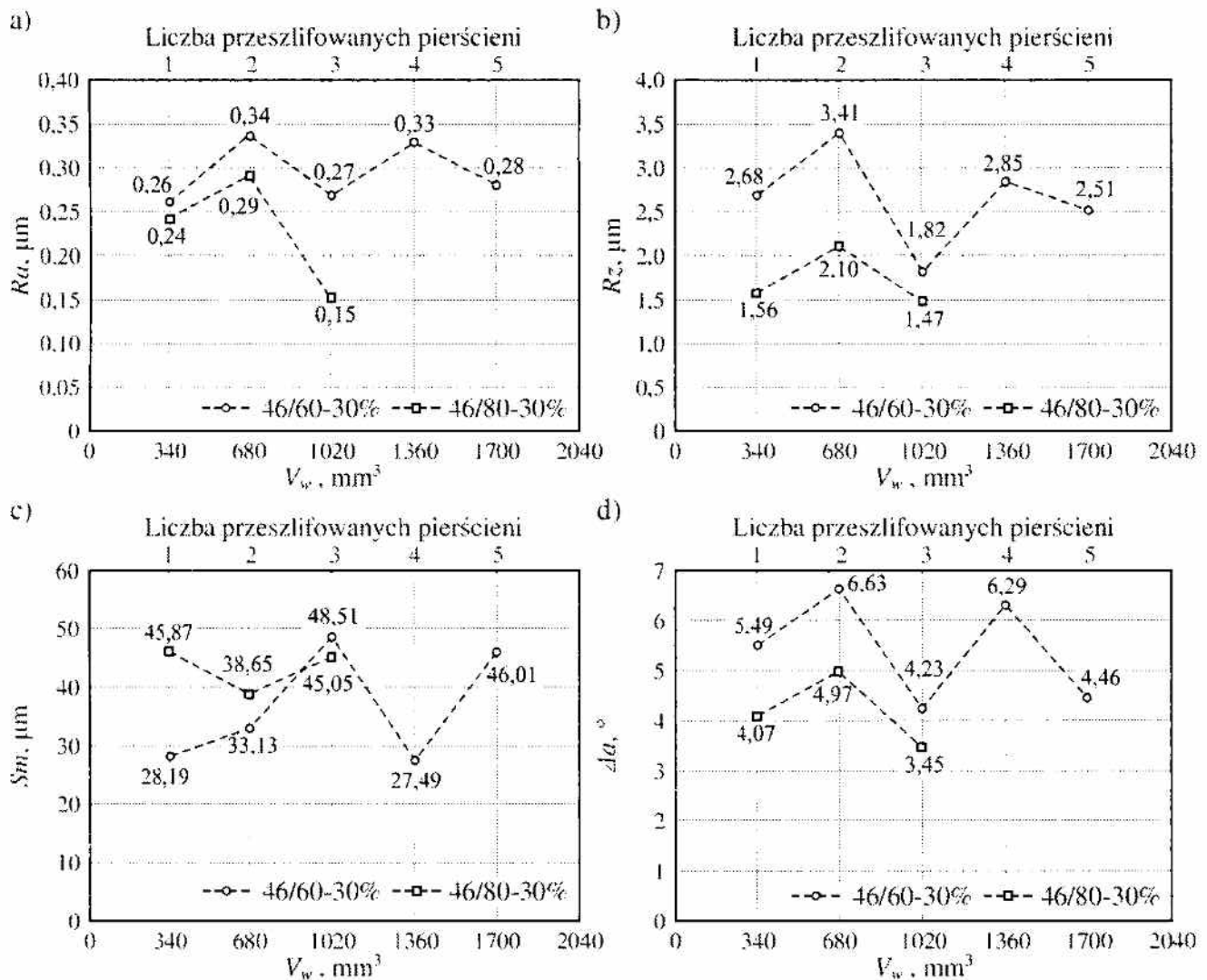
Badania doświadczalne, mające na celu wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie w procesie jednoprzęciowego szlifowania otworów, przeprowadzono z użyciem ściernic, które zapewniły najbardziej korzystne rezultaty w opisanych wyżej badaniach eksploatacyjnych. Były to narzędzia o 30% udziale drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego: 46/80-30% i 46/60-30% (tab. 4.1).

Próby przeprowadzono z wydajnością ubytkową szlifowania wynoszącą  $Q_w = 13,4 \text{ mm}^3/\text{s}$ , którą uzyskano, stosując posuw osiowy  $v_{fu} = 1,5 \text{ mm/s}$  i głębokość szlifowania  $a_e = 0,15 \text{ mm}$ . Czynna powierzchnia ściernic została w zabiegu obciążania ukształtowana i naostrzona tylko raz, przed rozpoczęciem obróbki. Wyznaczenie okresu trwałości ściernic polegało na przeszlifowaniu przez każdą ze ściernic maksymalnej liczby otworów przy zachowaniu wymaganych rezultatów obróbki [257, 272]. Jako kryterium określające całkowitą utratę zdolności skrawnych badanych ściernic przyjęto przekroczenie granicznej wartości mocy szlifowania wynoszącej  $P = 1400 \text{ W}$ , ustalonej na podstawie wcześniejszych prac badawczych.

Na podstawie wyników badań sporządzono wykresy zmian parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej, które zamieszczone zostały na rysunku 4.14. Zmiany wyznaczonych wartości przedstawiają bardziej korzystny poziom w przypadku zastosowania ściernicy z ziarnami o numerze 80 w strefie wykończeniowej, co wynika z większej koncentracji mniejszych ziaren ściernych (w porównaniu z drugim narzędziem z ziarnem o granulacji 60 w tej strefie) i w rezultacie podwyższonej liczby wierzchołków skrawających generujących bardziej gładką powierzchnię. Przebieg zmian parametrów opisujących zarówno wysokościowe (rys. 4.14a, 4.14b), jak i horyzontalne cechy profilu chropowatości (rys. 4.14c) oraz jego kształt (rys. 4.14d), wskazują na szybką utratę zdolności skrawnej badanych ściernic w przyjętych warunkach.

W przypadku ściernicy 46/80-30% zanotowano nieznaczny wzrost chropowatości powierzchni drugiego pierścienia, a po przeszlifowaniu trzeciego pierścienia zmierzono znacznie niższą chropowatość obrobionego przedmiotu. Pozwala to sądzić, że ziarna ściernic uległy stępieniu, wygładzając szlifowaną powierzchnię. Zaistniałe warunki nie pozwoliły na odnowienie czynnej

powierzchni ściernicy i wystąpienie zjawiska samoostrzenia mikrokrystalicznych ziaren SG<sup>TM</sup>. Okres trwałości ściernicy 46/60-30% był dłuższy z tego samego powodu, dla którego chropowatość powierzchni obrabianej kształtowała się na wyższym poziomie niż w przypadku ściernicy 46/80-30%.



Parametry szlifowania:

$v_s = 60$  m/s;  $v_w = 0.75$  m/s;  $a_e = 0.15$  mm;  $v_{ja} = 1.5$  mm/s;  $Q_{PCS} = 5.0$  l/min;  $\gamma = 0.68^\circ$ ;  $b = 12.6$  mm

Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe wykonane ze stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)

Płyn chłodząco-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS

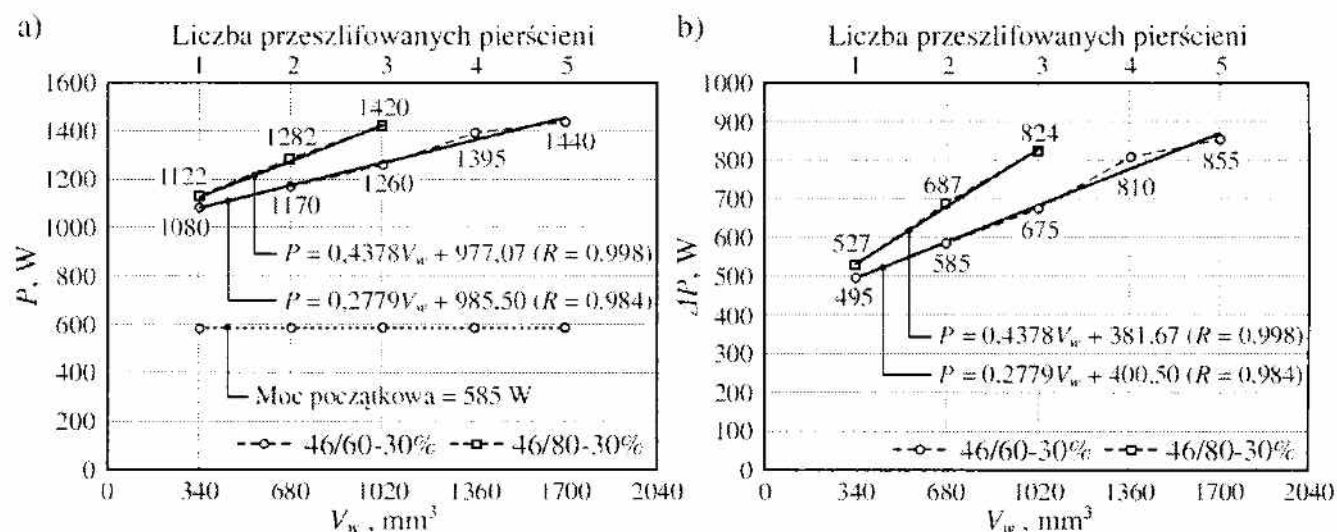
Rys. 4.14. Zmiany wartości parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej w funkcji objętości usuwanego materiału  $V_w$ : a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu  $Ra$ ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp chropowatości  $Sm$ ; d) średnie pochylenie profilu  $\Delta a$

Fig. 4.14. Changes of values of the workpiece roughness parameters as a function of the material removal  $V_w$ : a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$



Powierzchnia walcowej części narzędzia z mniejszą liczbą relatywnie większych ziaren charakteryzowała się odpowiednio zredukowaną liczbą wierzchołków skrawających, jak również większymi przestrzeniami międzyziarnowymi, pozwalającymi na wyprowadzenie produktów obróbki ze strefy szlifowania. W rezultacie zalepienia czynnej powierzchni ściernicy przyrastały wolniej i utrata zdolności skrawnej nastąpiła później.

O postępującej wraz ze wzrostem objętości usuwanego materiału  $V_w$  utracie zdolności skrawnej badanych ściernic świadczą również wykresy zmian zarejestrowanej mocy szlifowania (rys. 4.15). W przypadku obu ściernic rozerwanie nastąpiło po przekroczeniu wartości około 1400 W. Widoczna jest wyraźnie liniowa tendencja wzrostu mocy w funkcji  $V_w$ . Dla narzędzia ściernego 46/80-30% pogorszenie warunków skrawania następowało znacznie szybciej, co widać również po wartości współczynnika kierunkowego prostej aproksymującej zarejestrowane wartości, wynoszącego 0,44, w porównaniu z 0,28 dla ściernicy 46/60-30%. W rezultacie ściernica 46/80-30% przekroczyła graniczną wartość mocy szlifowania ( $P = 1400$  W) już przy obróbce trzeciego otworu, a ściernica 46/60-30% – piątego.



Parametry szlifowania:

$v_s = 60$  m/s;  $v_w = 0,75$  m/s;  $a_e = 0,15$  mm;  $v_{fu} = 1,5$  mm/s;  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min;  $\gamma = 0,68^\circ$ ;  $b = 12,6$  mm

Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe wykonane ze stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)

Płyn chłodziwo-smarujący: 5%-wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS

Rys. 4.15. Zmiany wartości mocy prądu wrzeciona ściernicy  $P$  (a) i wartości przyrostu mocy szlifowania (b) w funkcji objętości usuwanego materiału  $V_w$  w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

Fig. 4.15. Changes of the grinding wheel spindle power  $P$  (a) and grinding power gain  $\Delta P$  (b) as a function of the material removal  $V_w$  in the single-pass internal cylindrical grinding process using zone-diversified grinding wheels

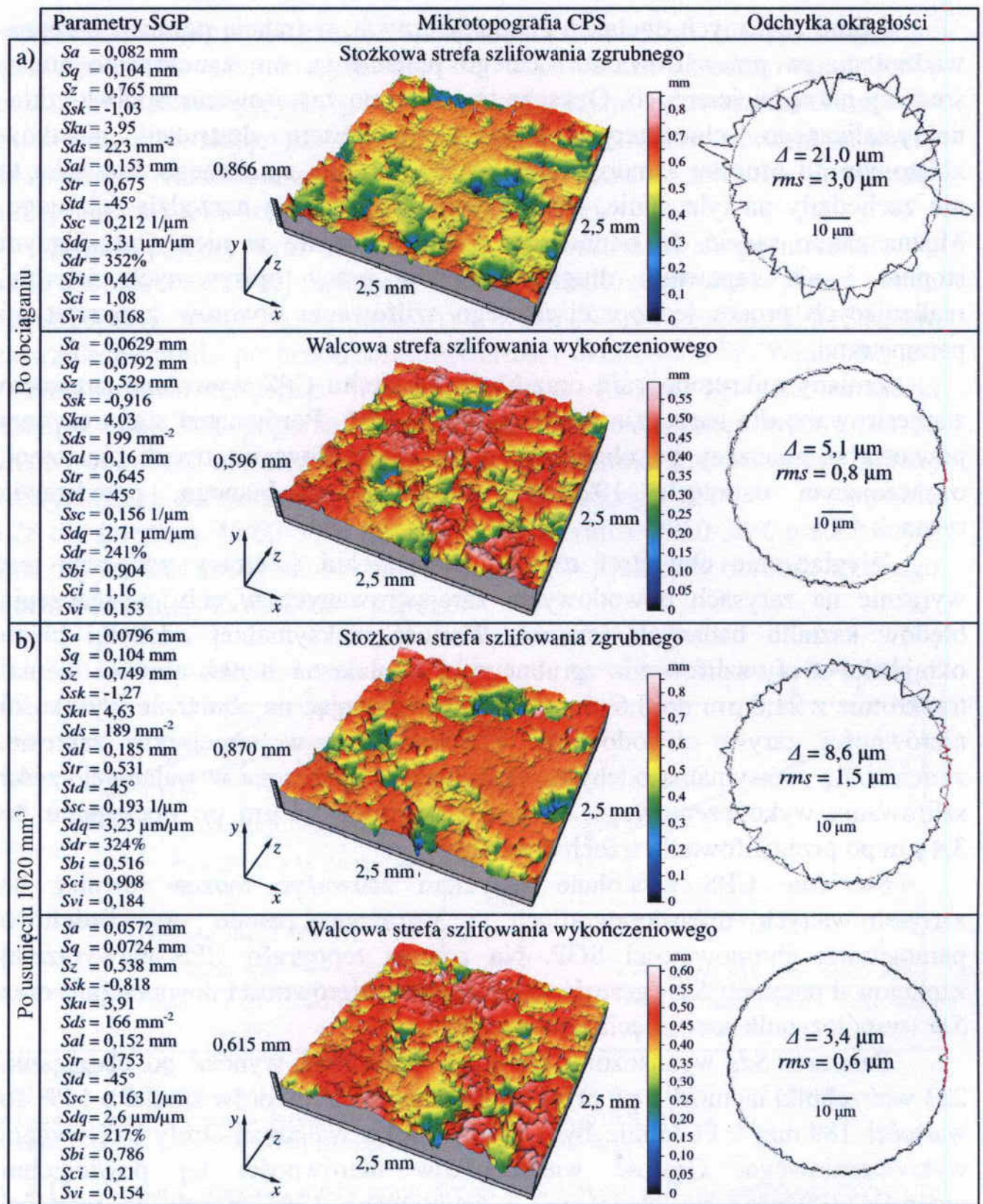
Mimo znacznych obciążeń ziaren ściernych, w trakcie pomiaru przeprowadzanego po przeszlifowaniu każdego pierścienia, nie zanotowano zmian średnicy narzędzi ściernych. Oznacza to, że mimo zastosowania spoiwa szkła-nokrystalicznego, charakteryzującego się procesem destrukcji mostków zbliżonym do procesu samoostrzenia ziaren korundu spiekanego, zjawiska te nie zachodziły na tyle silnie, by wpływały na średnicę narzędzia ściernego. Można zatem sądzić, że odnawianie CPS zachodziło w niewystarczającym stopniu i nie zapewniło długich okresów pracy opisywanych ściernic, realizujących proces jednoprzeciowego szlifowania otworów z przyjętymi parametrami.

Zmiany mikrotopografii oraz błędów kształtu CPS wywołane zużyciem zarejestrowano dla narzędzia ściernego 46/60-30%. Porównanie stanu czynnej powierzchni ściernicy po obciążeniu i po przeszlifowaniu trzech pierścieni, oznaczającym usunięcie  $1020 \text{ mm}^3$  materiału obrabianego, przedstawia rysunek 4.16.

Wyglądzenie obu stref czynnej powierzchni ściernicy widoczne jest wyraźnie na zarysach obwodowych, zarejestrowanych w celu wyznaczenia błędów kształtu badanych ściernic. Wartość maksymalnej odchyłki błędu okrągłości strefy szlifowania zgrubnego  $\Delta$  zmalała na skutek obróbki niemal trzykrotnie z  $21,0 \mu\text{m}$  do  $8,6 \mu\text{m}$ , wyraźnie wskazując na obniżenie wysokości nierówności zarysu obwodowego. Podobnie, ale w mniejszym zakresie, zmieniła się maksymalna odchyłka okrągłości  $\Delta$  zmierzona w walcowej części szlifowania wykończeniowego, to jest z wartości  $5,1 \mu\text{m}$  po obciążeniu do  $3,4 \mu\text{m}$  po przeszlifowaniu trzech otworów.

Stępienie CPS wywołane zużyciem zauważyć można również na zarejestrowanych mikrotopografiach, i wyrażone zostało ono ilościowo parametrami chropowatości SGP. Na zmiany topografii CPS najwyraźniej zareagował parametr  $Sds$  (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni) oraz  $Sdr$  (współczynnik rozwinięcia powierzchni).

Parametr  $Sds$  wyznaczony dla strefy stożkowej wynosił po obciążeniu 223 wierzchołki na  $\text{mm}^2$ , a po przeszlifowaniu trzech otworów zmalał o 15% do wartości  $189 \text{ mm}^{-2}$ . Podobnie było w przypadku walcowej strefy szlifowania wykończeniowego. Gęstość wierzchołków nierówności tej powierzchni wynosiła  $199 \text{ mm}^{-2}$  po obciążeniu i zanotowano 17% spadek do wartości  $166 \text{ mm}^{-2}$ . Współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  również zmalał z 352% do 324% w przypadku strefy stożkowej i z 241% do 217% dla walcowej strefy ściernicy. Wielkości te wyraźnie korelują ze zmianami mocy szlifowania, która z wartości 1080 W przy obróbce pierwszego otworu wzrosła o 22% do 1395 W przy szlifowaniu czwartego przedmiotu obrabianego.



Rys. 4.16. Zestawienie parametrów struktury geometrycznej, mikrotopografii oraz zarysów obwodowych stref funkcjonalnych czynnej powierzchni ściernicy 46/60-30% po obciążeniu (a) i po usunięciu 1020 mm<sup>3</sup> materiału obrabianego (b)

Fig. 4.16. Breakdown of geometrical structure of surface parameters, microtopographies and circumferential profiles of the 46/60-30% grinding wheel active surface after dressing (a) and after 1020 mm<sup>3</sup> material removal (b)

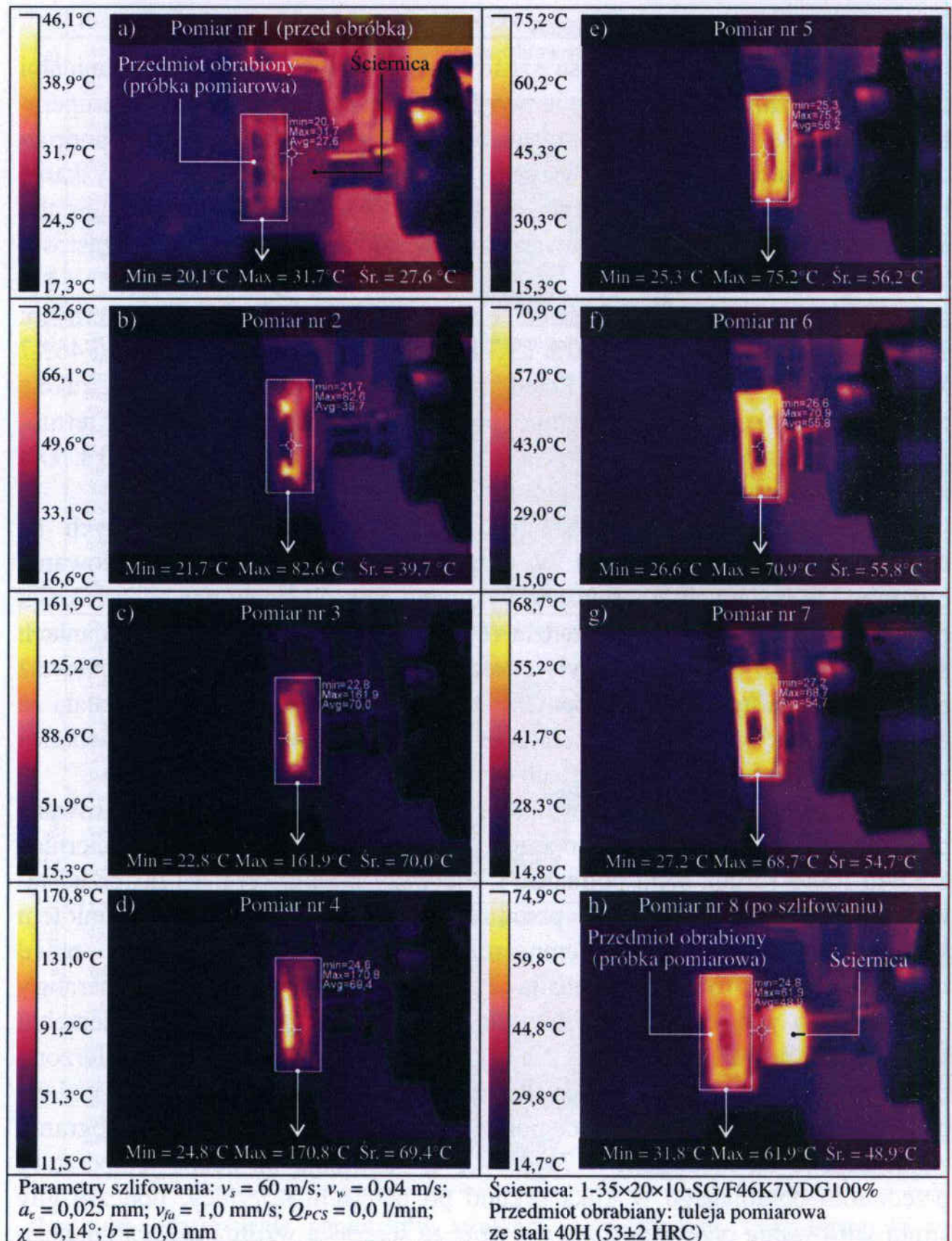
## Temperatura w strefie szlifowania

Realizując badania procesu szlifowania jednoprzęściowego ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie przeprowadzono również pomiary temperatury w trakcie szlifowania z zastosowaniem metody opisanej w podrozdziale 3.3. Zastosowanie termowizji w podczerwieni pozwoliło na uzyskanie informacji o temperaturze w bezpośredniej bliskości strefy usuwania materiału, a także na analizę porównawczą warunków termicznych szlifowania z zastosowaniem różnych ściernic.

Badaniom poddano dwie ściernice różniące się rodzajem ziaren ściernych: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG100% (SG F46 100%); i 1-35×20×10-99A/F46K7VDG100% (99A F46 100%). Przed rozpoczęciem szlifowania, w trakcie realizacji obróbki oraz bezpośrednio po jej zakończeniu rejestrowano termogramy z częstotliwością wynoszącą w przybliżeniu jeden pomiar na 3 s. Dla każdej z wytypowanych ściernic pomiary powtórzono trzykrotnie.

Celem badań było określenie wpływu rodzaju ziaren ściernych na temperaturę w strefie obróbki w jednoprzęściowym procesie szlifowania otworów. W badanych ściernicach wykonano nakrój stożkowy o szerokości równej połowie wysokości narzędzia ( $b = T/2 = 10$  mm). Użyte w badaniach ściernice celowo pozbawione były strefowo zróżnicowanej budowy, ponieważ rozdzielczość zastosowanej do pomiaru kamery termowizyjnej nie pozwalała na zarejestrowanie różnic w temperaturze wynikających z odmiennej wielkości ziaren w ich poszczególnych strefach funkcjonalnych [219, 249, 317].

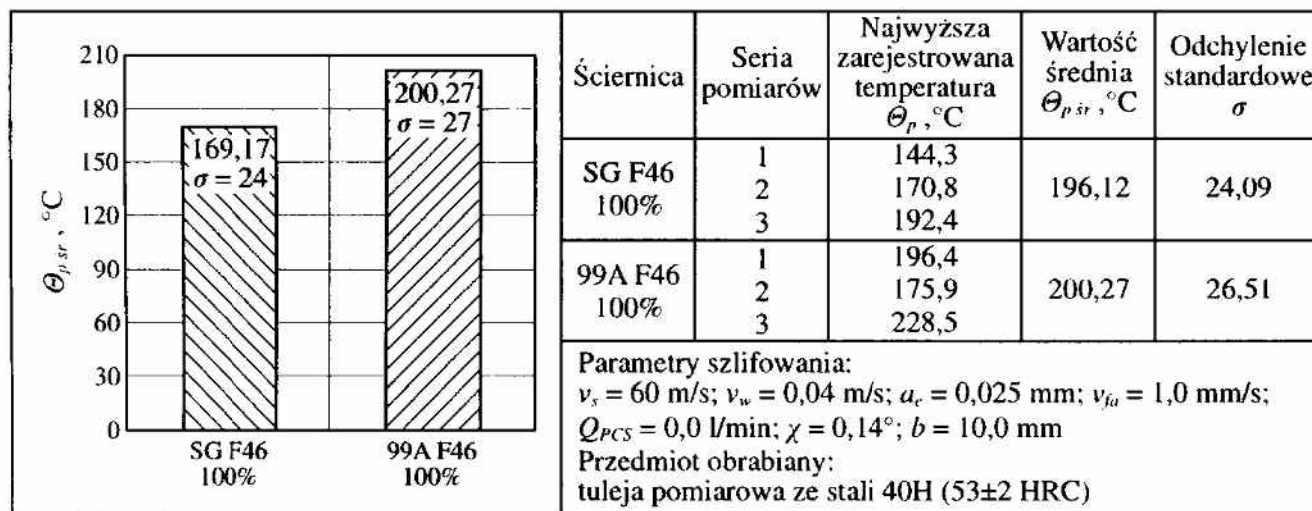
Na rysunku 4.17 przedstawiono przykładowe termogramy zarejestrowane podczas realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicą SG F46 100% (druga seria pomiarów). Pierwszy pomiar (rys. 4.17a) przedstawia obszar roboczy szlifierki przed obróbką, z widocznym przedmiotem szlifowanym i ściernicą. Temperatura przedmiotu obrabianego przed rozpoczęciem szlifowania wynosiła 31,7°C i była wyższa od temperatury otoczenia, co wynikało z wcześniejszej operacji tzw. zabielenia powierzchni wewnętrznej próbki pomiarowej. Najwyższą temperaturę (170,8°C) zmierzono na termogramach przedstawiających czynną powierzchnię ściernicy widzianą poprzez specjalny otwór w próbce pomiarowej (rys. 4.17c, 4.17d). Termogramy zamieszczone na rysunkach 4.17e do 4.17g pozwalają na ocenę temperatury przedmiotu obrabianego w kilka sekund po przejściu ściernicy, podczas gdy strefa szlifowania przemieszczała się wraz ze ściernicą wzdłuż osi obrabianego otworu. Po zakończeniu szlifowania temperatura przedmiotu obrobionego wynosiła 61,9°C, co przedstawia termogram na rysunku 4.17h. Z tego samego pomiaru wynika, że temperatura czynnej powierzchni ściernicy po zatrzymaniu obrotów wrzeczona wynosiła w tym przypadku 74,9°C (rys. 4.17h).



Rys. 4.17. Przykładowe termogramy (a-h) zarejestrowane podczas realizacji jedno-prześciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicą SG F46 100% [219, 249, 317]

Fig. 4.17. Sample thermograms (a-h) recorded during single-pass internal cylindrical grinding using SG F46 100% grinding wheel [219, 249, 317]

Wyniki zrealizowanych pomiarów termowizyjnych zamieszczono w formie wykresu na rysunku 4.18.



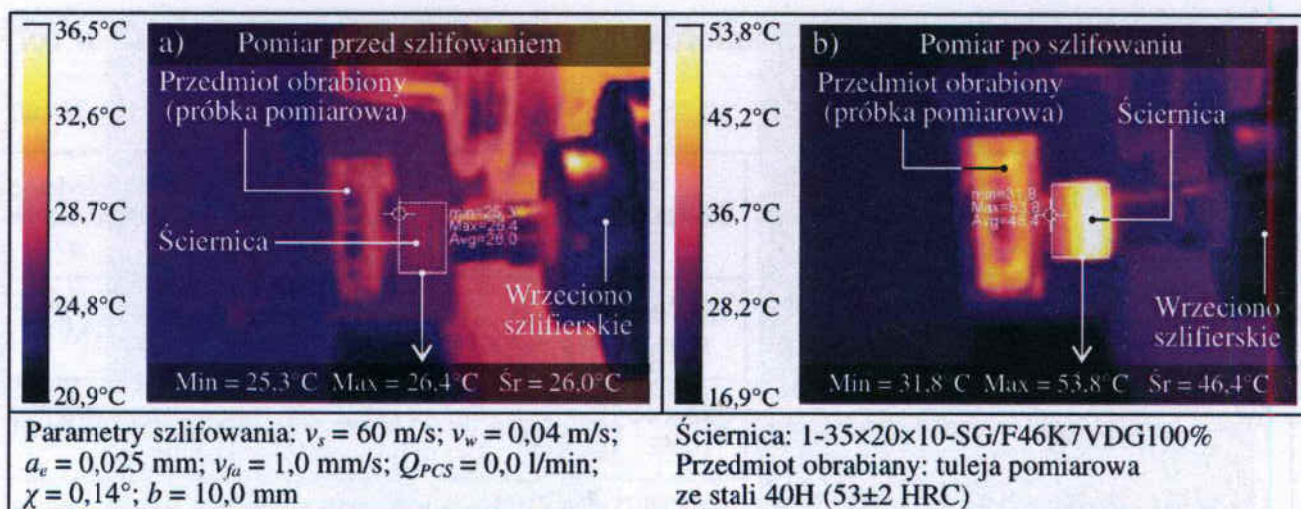
Rys. 4.18. Wyniki pomiarów temperatury w strefie obróbki podczas procesu jedno-prześciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane SG<sup>TM</sup> i elektrokorundu szlachetnego 99A

Fig. 4.18. Results of the temperature measurements conducted during single-pass internal cylindrical grinding using grinding wheels made of microcrystalline sintered corundum SG<sup>TM</sup> and white corundum 99A

Porównanie wyników badań dla ściernicy SG F46 100% i 99A F46 100%, czyli narzędzi ściernych zbudowanych z różnych rodzajów ziaren ściernych, wskazuje na korzystniejszy termicznie przebieg obróbki przy zastosowaniu mikrokrystalicznych ziaren korundu spiekane. Temperatura w strefie szlifowania z użyciem ściernicy 99A F46 100% była o ponad 18% wyższa ( $\Theta_{p, sr} = 200,27^\circ\text{C}$ ) niż w przypadku ściernicy SG F46 100% ( $\Theta_{p, sr} = 169,17^\circ\text{C}$ ). Wynika to przede wszystkim z różnicy wartości współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  wynoszącego  $\sim 14$  W/m·K dla elektrokorundu [295] i  $\sim 30$  W/m·K w przypadku korundu spiekane [6, 55]. Na zarejestrowane wartości wpływa również większa zdolność skrawna ziaren SG<sup>TM</sup> będąca efektem mikrokrystalicznej budowy tego materiału ściernego.

Porównanie termogramów ściernicy przed i po szlifowaniu jednoprześciowym wskazuje na niemal dwukrotny wzrost temperatury ściernicy z początkowych  $26,4^\circ\text{C}$  do  $53,8^\circ\text{C}$  (rys. 4.19).

Na wartość zmierzonej temperatury ściernicy po obróbce miał przede wszystkim wpływ brak chłodzenia w prowadzonych próbach oraz zjawisko chłodzenia powietrzem ściernicy wirującej z prędkością blisko 40 000 obr./min.



Rys. 4.19. Termogramy ściernicy SG F46 100%: a) przed szlifowaniem; b) po szlifowaniu [219, 249, 317]

Fig. 4.19. Thermograms of the SG F46 100% grinding wheel: a) before grinding; b) after grinding [219, 249, 317]

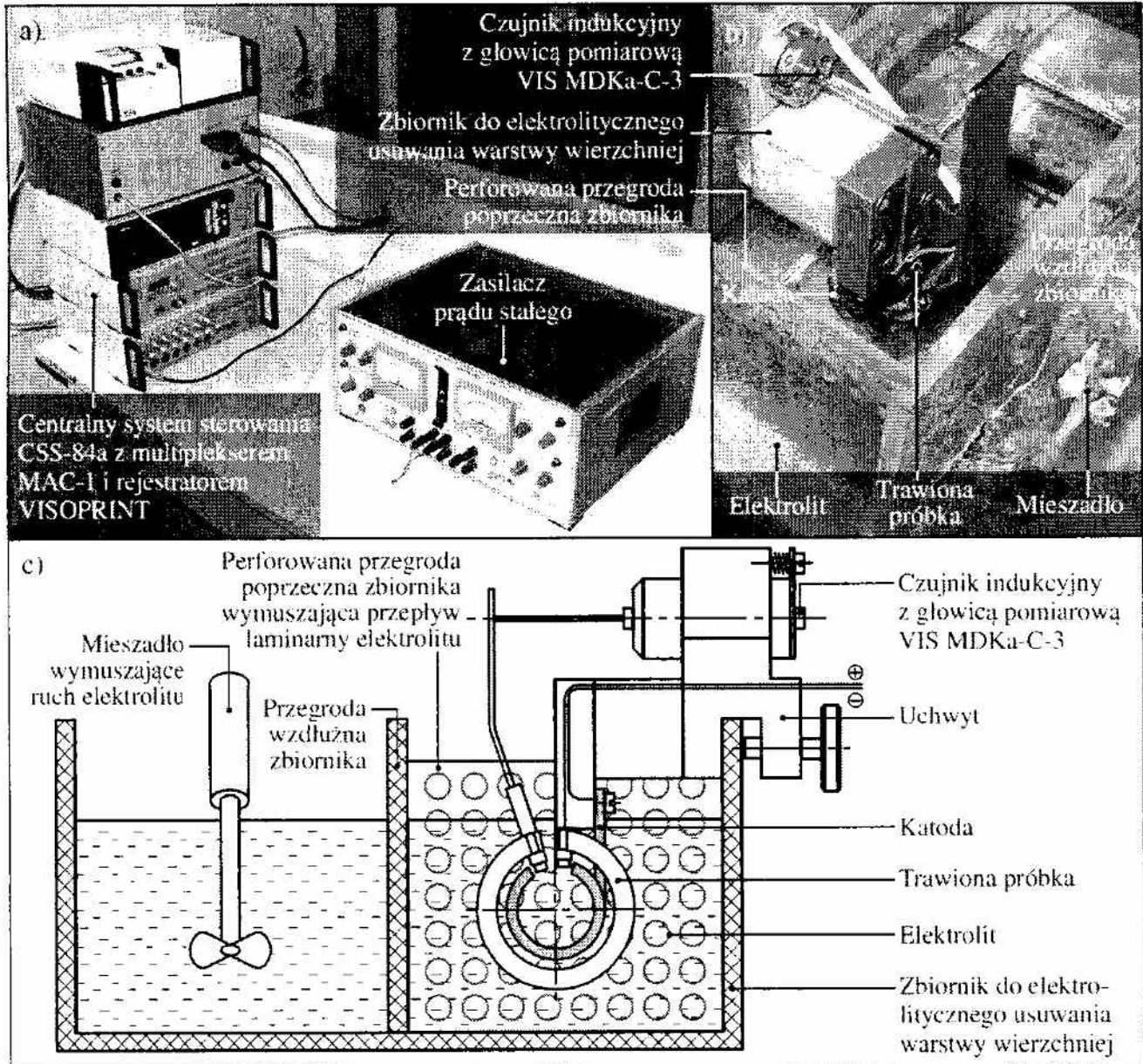
Mimo że zmierzone wartości maksymalne temperatury w badanym procesie wynosiły około  $200^\circ\text{C}$ , po kilkunastu sekundach od zakończenia szlifowania, potrzebnych na zatrzymanie ruchu obrotowego wrzeciona ściernicy, zarejestrowana temperatura narzędzia była czterokrotnie niższa.

### Ocena stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów po szlifowaniu

Pomiary naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów po szlifowaniu metodą Weismana-Philipsa wykonano jedynie w przypadku oceny wpływu zastosowania ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie na efekty procesu szlifowania jednoprzęściowego walcowych powierzchni wewnętrznych. Spośród wszystkich zaproponowanych modyfikacji budowy ściernic z ziarnami mikrokryształicznego korundu spiekane, jedynie w przypadku realizacji procesu w jednym przejściu ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie zdecydowanie zwiększono wydajność ubytkową obróbki. Związany z tym wzrost obciążenia CPS, wynikający z wartości nadmiaru obróbkowego dochodzącej do  $a_e = 0,2$  mm, mógł spowodować niekorzystny wpływ na stan naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych. Uzasadniało to potrzebę pomiaru stanu naprężeń w przypadku badań dotyczących tej strukturalnej modyfikacji ściernicy.

Realizując badania z użyciem pozostałych zaproponowanych innowacyjnych modyfikacji budowy ściernic, nie wprowadzano istotnych zmian w wartościach parametrów obróbkowych, wpływających na wydajność ubytkową szlifowania. Dlatego w tych przypadkach nie prowadzono pomiarów naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych.

Badania sprawdzające stan naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego przeprowadzono za pomocą metody usuwania kolejnych warstw materiału na drodze elektrolitycznego trawienia i pomiaru odkształceń próbki (Weismana-Philipsa). Na rysunku 4.20 przedstawiono stanowisko pomiarowe wraz z jego schematem działania.



Rys. 4.20. Stanowisko do pomiaru naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu po szlifowaniu metodą Weismana-Philipsa: a) centralny system sterowania pracą stanowiska; b) zbiornik do elektrolitycznego usuwania warstwy wierzchniej; c) schemat stanowiska

Fig. 4.20. Position to measure the stresses in the surface layer of the workpiece after grinding with Weisman-Philips method: a) position controlling system; b) tank for electrolytic remove of the surface layer; c) position scheme



Najważniejszymi elementami stanowiska pomiarowego (rys. 4.20) były:

- elektrolizer (zbiornik do elektrolitycznego usuwania warstwy wierzchniej);
- układ mocowania (uchwyt);
- analogowy czujnik indukcyjny z głowicą pomiarową VIS MDKa-C-3 i wskaźnikiem cyfrowym VIS CIMETR 1 o tolerancji wskazań  $\pm 1 \mu\text{m}$ ;
- zespół regulacji temperatury;
- zespół regulacji wymuszonego ruchu elektrolitu w zbiorniku;
- centralny system sterowania CSS-84a z multiplekserem MAC-1 i rejestratorem VISOPRINT drukującym wyniki pomiarów czujnika indukcyjnego;
- zasilacz prądu stałego;
- elektrolit (10% mieszanina wodna kwasu azotowego  $\text{HNO}_3$  i kwasu solnego  $\text{HCl}$  w proporcjach 1:3).

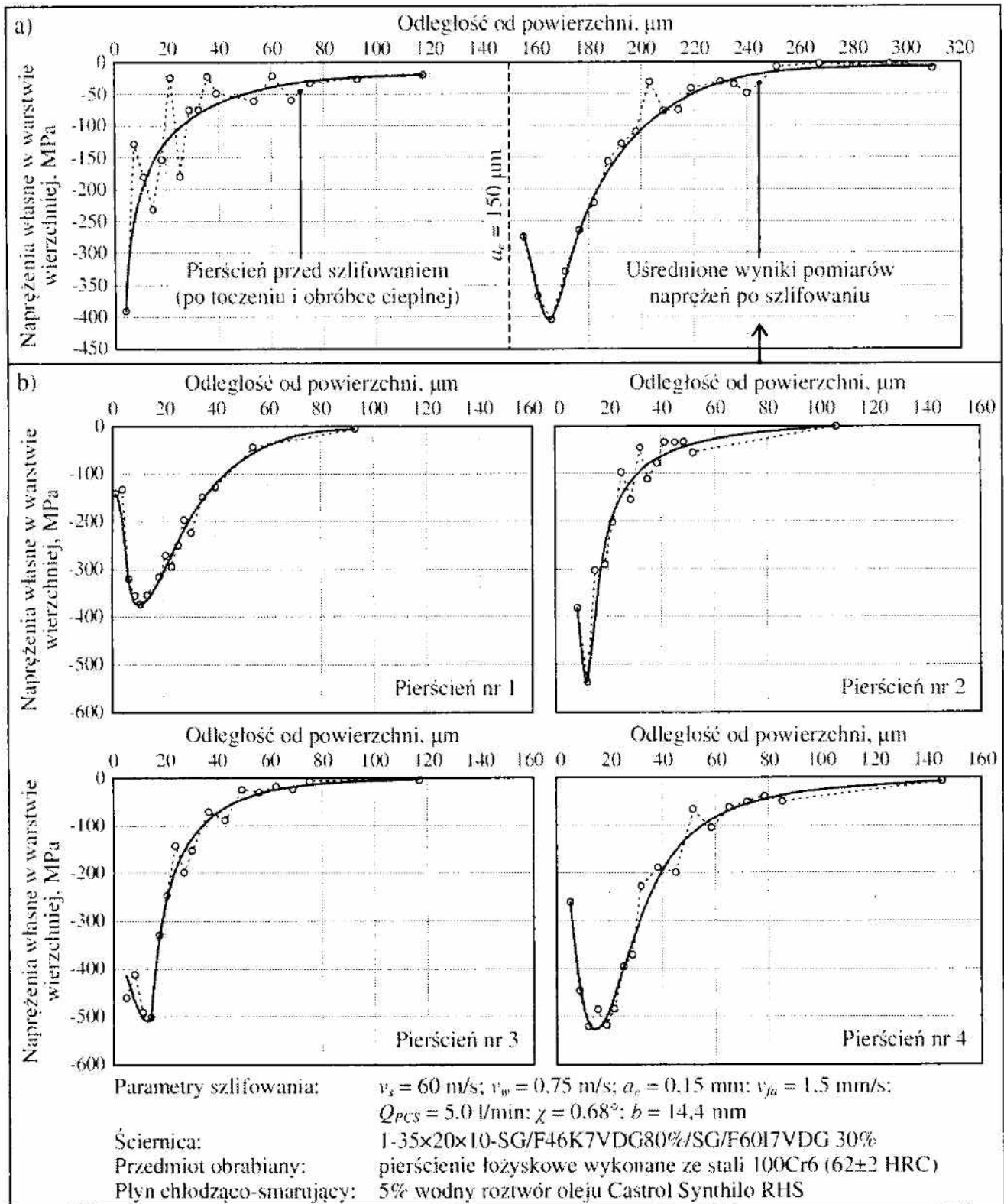
Pomiary wykonywano, rejestrując odkształcenia trawionej próbki (wartości strzałki ugięcia) w trakcie trawienia z częstotliwością 60 s, przy zapewnieniu niezmiennej temperatury ( $T = 18^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ) i natężenia prądu  $I = 4 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ . Stałe warunki trawienia warstwy wierzchniej zapewniono poprzez zastosowanie urządzeń do pomiaru i regulacji temperatury (termometr kontaktowy, grzałka) oraz mieszadła wymuszającego ruch elektrolitu w kierunku równoległym do trawionej powierzchni.

Zarejestrowane wyniki pomiarów strzałki ugięcia trawionej próbki, wraz z pozostałymi danymi wejściowymi określającymi m.in. masę, geometrię i właściwości materiałowe próbki oraz czas jej trawienia, stanowią podstawę do określenia wartości naprężeń z użyciem dedykowanego tej metodzie oprogramowania pod nazwą TENS.

Na podstawie zarejestrowanych odkształceń w czasie trawienia próbki sporządzono szereg wykresów rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów obrobionych, a także przedmiotu przed szlifowaniem (po toczeniu i obróbce cieplnej). Na rysunku 4.21 przedstawiono wyniki pomiarów próbek po szlifowaniu jednoprzęściowym ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie (rys. 4.21b) oraz porównanie stanu naprężeń przed szlifowaniem i uśrednionych wyników pomiarów po szlifowaniu (rys. 4.21a).

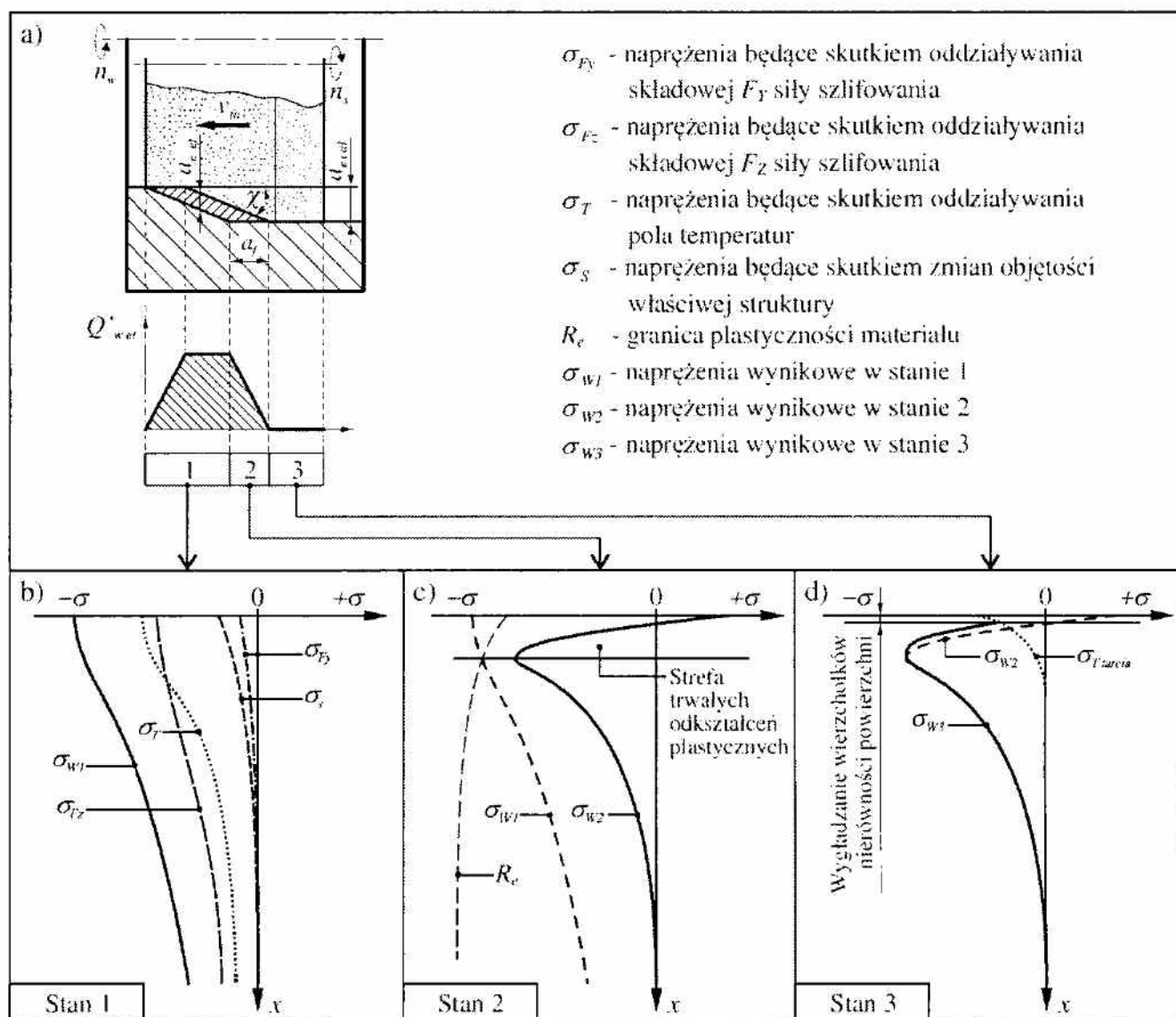
Wyniki pomiarów wskazują, że w warstwie wierzchniej przeszlifowanych pierścieni łożyskowych znajdują się naprężenia ściskające, których maksymalne wartości występują na głębokości 10-20  $\mu\text{m}$  od powierzchni próbki. W strefach przypowierzchniowych zaobserwowano charakterystyczne zmniejszenie wartości naprężeń.

Charakter rozkładu naprężeń wynika ze specyfiki procesu szlifowania jednoprzęściowego ściernicą z nakrojem stożkowym oraz z rodzaju zastosowanych ziaren ściernych i struktury ściernicy (rys. 4.22).



Rys. 4.21. Wyniki pomiarów rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu po szlifowaniu jednoprzeciowym ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie (b) oraz porównanie stanu naprężeń przed i po szlifowaniu (a)

Fig. 4.21. The results of measurements of the residual stress distribution in the workpiece surface layer after single-pass internal cylindrical grinding using zone-diversified structure grinding wheel (b) and comparison of stress state before and after grinding (a)



Rys. 4.22. Model powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego w procesie jednoprzęciowym z wykorzystaniem ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie (wykonanej z ziaren mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$ ): a) schemat procesu szlifowania; b-d) stan naprężeń w kolejnych etapach kształtowania warstwy wierzchniej [269]

Fig. 4.22. Model of the stress formation in the workpiece top layer in a single-pass process using the grinding wheel of zone-diversified construction (made of sol-gel alumina grains): a) scheme of the grinding process; b-d) stresses state in the subsequent stages of the surface layer formation [269]

Podczas zdejmowania materiału przez stożkową część czynnej powierzchni ściernicy, w materiale obrabianym konstyтуują się naprężenia ściskające wynikające z oddziaływania składowych siły szlifowania, ciepła wynikającego z odkształceń plastycznych w strefie szlifowania oraz z odpowiadających im zmian objętości właściwej składników struktury ( $\sigma_{W1}$  na rys. 4.22).

Największe obciążenie występuje w końcowej części stożka ściernicy, a po przekroczeniu granicy plastyczności materiału następują trwałe odkształce-

nia plastyczne materiału obrabianego, wywołując stan naprężeń  $\sigma_{w2}$  (rys. 4.22). W strefie przypowierzchniowej występują naprężenia rozciągające, przechodząc w warstwach położonych dalej od powierzchni szlifowanej w naprężenia ściskające. Strefa walcowa ściernicy wygładza wierzchołki nierówności szlifowanego przedmiotu, zdejmując mikronowe objętości warstwy materiału, przy jednoczesnym udziale tarcia i niewielkim wzroście temperatury w przypowierzchniowych strefach warstwy wierzchniej. Powoduje to, że stan naprężeń ( $\sigma_{w2}$ ) w samej strefie przypowierzchniowej zmienia się. W rezultacie takiej relaksacji naprężeń kształtuje się stan naprężeń ściskających  $\sigma_{w3}$  widoczny na rys. 4.22.

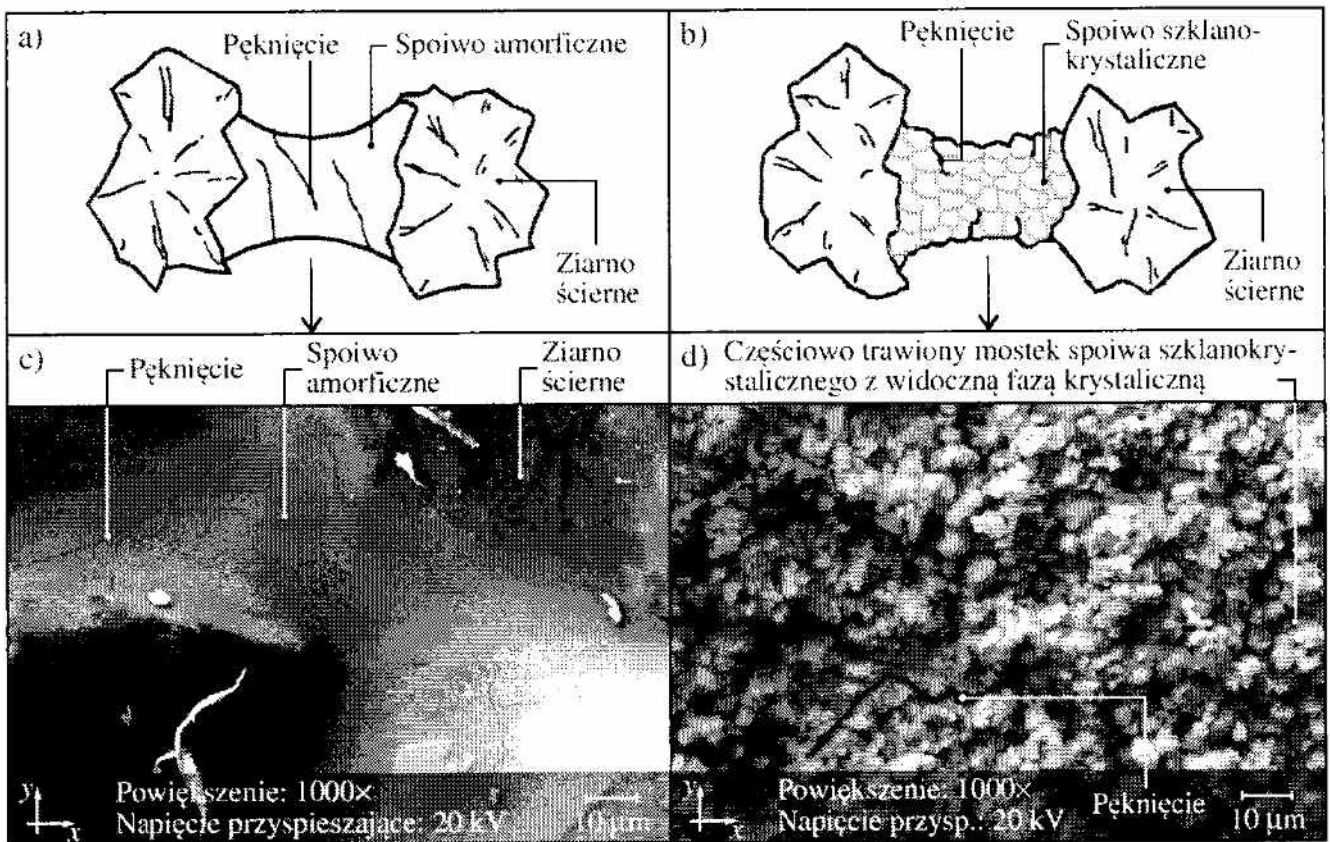
Taki charakter naprężeń wynika zarówno z charakterystycznych właściwości mikrokrystalicznych ziaren SG<sup>TM</sup> (zdolność do ciągłego samoostrzenia w wyniku wykuszania mikrowierzchołków ziaren), ich dobrej przewodności cieplnej  $\lambda \approx 30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (dwukrotnie większej niż elektrokorundu szlachetnego 99A), jak i z dużej otwartości struktury. Ponadto niewielki posuw osiowy  $v_{fu}$  nie wywołuje dużych obciążeń cieplnych przedmiotu obrabianego, natomiast szeroka strefa kontaktu części wygładzającej ściernicy z przedmiotem szlifowanym zmniejsza intensywność gradientów temperatury. Chłodzenie powierzchni następuje stopniowo, nie wprowadzając dodatkowych istotnych zmian w stanie naprężeń.

Podsumowując analizę stanu warstwy wierzchniej w przedmiotach po szlifowaniu jednoprzęściowym ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie, należy stwierdzić, że naprężenia ostateczne przedmiotu mają charakter ściskający. Rozkład ten jest korzystny ze względu na właściwości eksploatacyjne kształtowanych powierzchni i zbliżony do rozkładu naprężeń po szlifowaniu ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru. Konstytuowanie się naprężeń w procesie szlifowania zostało przeanalizowane na podstawie modelu jakościowego, który umożliwia opis zjawisk cieplno-mechanicznych zachodzących w strefie szlifowania ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie.

## 4.2. Modyfikacja spoiwa ceramicznego

W ostatnich latach dokonał się istotny postęp w zakresie spoiw ceramicznych stosowanych w spojonych narzędziach ściernych, w tym w ściernicach [154, 203, 204, 334]. Takie cechy spoiwa ceramicznego, jak znaczna twardość i kruchość, w porównaniu z innymi typami spoiw, zapewniają łatwość kształtowania profilu ściernicy oraz jej obciążanie bezpośrednio w obszarze roboczym szlifierki. Spoiwa ceramiczne pozwalają również na uzyskiwanie narzędzi o dużej porowatości. Wszystkie te zalety powodują, że stosowane są one w niemal połowie produkowanych obecnie ściernic ze ścierniwami konwencjonalnymi [203]. Klasyczne spoiwa szklane, charakteryzujące się strukturą amorficzną są jednak coraz częściej zastępowane tworzywami szkla-

nokrystalicznymi o różnej mikrostrukturze i stopniu krystaliczności. Pozwalają one na ograniczenie propagacji kruchej pęknięcia (rys. 4.23) i w efekcie zmianę procesu zużywania mostków spoiwa w trakcie pracy ściernicy [273, 397].



Rys. 4.23. Schematy (a, b) i widoki mikroskopowe (c, d) przedstawiające porównanie procesu propagacji pęknięć w spoiwie amorficznym (a, c) i spoiwie szklo-kryształicznym (b, d) [395]

Fig. 4.23. Schemes (a, b) and microscopic views (c, d) presented comparison of crack propagation mechanism in the amorphous bond (a, c) and glass-crystalline bond (b, d) [395]

Tworzywa szklo-kryształiczne mają budowę polimikrokrystaliczną i zawierają tzw. pozostałość szklistą, czyli szczątkową fazę szklaną. Otrzymuje się je ze szkła, które w wyniku przemian fazowych zachodzących w trakcie kontrolowanej obróbki cieplnej zmienia się w drobnoziarnisty materiał polikrystaliczny o wymaganych właściwościach. Właściwości te zależą od wielu zmiennych procesu krystalizacji [93, 95].

Otrzymanie szkła krystalicznego zależy przede wszystkim od utworzenia odpowiednio dużej liczby zarodków krystalizacji, które powinny być równomiernie rozmieszczone w fazie szklanej. Należy zapewnić im wzrost do wielkości około  $0,1 \mu\text{m}$  do  $1 \mu\text{m}$  w warunkach podwyższonej temperatury, aż do osiągnięcia objętości fazy krystalicznej wynoszącej pomiędzy 50% a 100% pierwotnej fazy szkła. Pozostałość szklista, czyli materiał niekrystaliczny, ma

duże znaczenie w formowaniu prawidłowych mostków wiążących, niezbędnych dla uzyskania jednorodnej ściernicy. Skład chemiczny tworzywa szklanokrystalicznego musi być tak dobrany, by zapewnić otrzymanie wystarczającej pozostałości szklistej dla wywołania przyciągania poszczególnych ziaren podczas wypalania, na skutek działania sił napięcia powierzchniowego. Uzyskana w procesie krystalizacji struktura spoiwa szklanokrystalicznego, tj. liczba i rozmiar ziaren fazy krystalicznej, kształt kryształów, ich wzajemna orientacja, ilość pozostałej fazy szklanej, a także występowanie wewnętrznych niejednorodnych naprężeń, mają wpływ na jego właściwości użytkowe. Zaznaczyć przy tym należy, że skład fazowy i struktura mogą być dostosowywane do projektowanych właściwości [92, 93, 95, 97, 98, 137, 171].

Niewielkie różnice współczynników rozszerzalności termicznej ziarna ściernego i spoiwa szklanokrystalicznego wpływają korzystnie na wytrzymałość ściernicy. Przy ochładzaniu oba składniki ściernicy zmieniają objętość w różnym stopniu i wywołują stan naprężeń. W cienkich warstwach spoiwa oblewającego ziarna powstają naprężenia ściskające. Jest to zjawisko korzystne, ponieważ do mikrowykruszenia ziarna potrzebna jest większa siła, niż gdyby ziarno nie było powleczone taką warstwą. Równocześnie umożliwia to ściernicy pracę z większymi prędkościami obrotowymi, ponieważ istniejące w spoiwie naprężenia ściskające powodują wyższą wytrzymałość na rozrywanie.

Spoiwa szklanokrystaliczne, w porównaniu ze spoiwami szklanymi, charakteryzują się wieloma korzystnymi właściwościami. Mają wyższą twardość, drobnokrystaliczną strukturę, dużo wyższą wytrzymałość mechaniczną, trwałość termiczną i odporność na deformację w wysokich temperaturach. Właściwości mechaniczne tych spoiw zależą m.in. od: wymiarów ziaren, struktury wewnętrznej, międzyfazowej mocy wiązania, udziałów objętościowych fazy krystalicznej i szklistej oraz od ich współczynników rozszerzalności.

Spoiwa szklane charakteryzują się niskim poziomem wytrzymałości ( $40-70 \text{ MN/m}^2$ ), który ma bezpośredni wpływ na wytrzymałość ściernicy. Spoiwa szklanokrystaliczne mają wytrzymałość większą od szkła, wynikającą z odmiennego procesu rozprzestrzeniania się pęknięć. Destrukcja spoiwa jest procesem dwuetapowym. Pierwszy etap polega na wytworzeniu pęknięcia, a w drugim etapie wzrasta ono aż do wykruszenia się fragmentu spoiwa. W jednorodnym izotropowym szkłe pęknięcia rozchodzą się zazwyczaj bez przeszkód i niełatwo się rozgałęziają (rys. 4.23a, 4.23c). Natomiast w materiale szklanokrystalicznym granice kryształów mogą hamować rozprzestrzenianie się pęknięć lub ograniczać ich długość (rys. 4.23b, 4.23d), a tym samym powodować wzrost wytrzymałości spoiwa. Prędkość rozprzestrzeniania się pęknięcia może zmniejszyć się nawet do zera na granicy pomiędzy ziarnem krystalicznym tworzywa szklanokrystalicznego i fazą szklistą.

Spoiwa szklanokrystaliczne, w porównaniu ze spoiwami szklanymi i tradycyjnymi ceramicznymi, mają ponadto jeszcze tę przewagę, że w sposób kontrolowany można wpływać na takie ich właściwości, jak: wytrzymałość mechaniczna, współczynnik rozszerzalności cieplnej, odporność na ścieranie czy przewodnictwo cieplne.

W tej części pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością modyfikacji budowy ściernicy poprzez dobór składu fazowego spoiwa szklanokrystalicznego. Celem takiej modyfikacji było przede wszystkim wydłużenie okresu trwałości ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego, stosowanych w procesach szlifowania otworów. Cel ten zamierzano osiągnąć poprzez wytypowanie najkorzystniejszej odmiany spoiwa szklanokrystalicznego spośród trzech tworzyw odznaczających się różną mikrostrukturą i różnymi właściwościami. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych z zastosowaniem ściernic ze spoiwami szklanokrystalicznymi porównano z rezultatami szlifowania ściernicą, w której zastosowano typowe spoiwo szklane (amorficzne), stosowane przez krajowych producentów spojonych narzędzi ściernych.

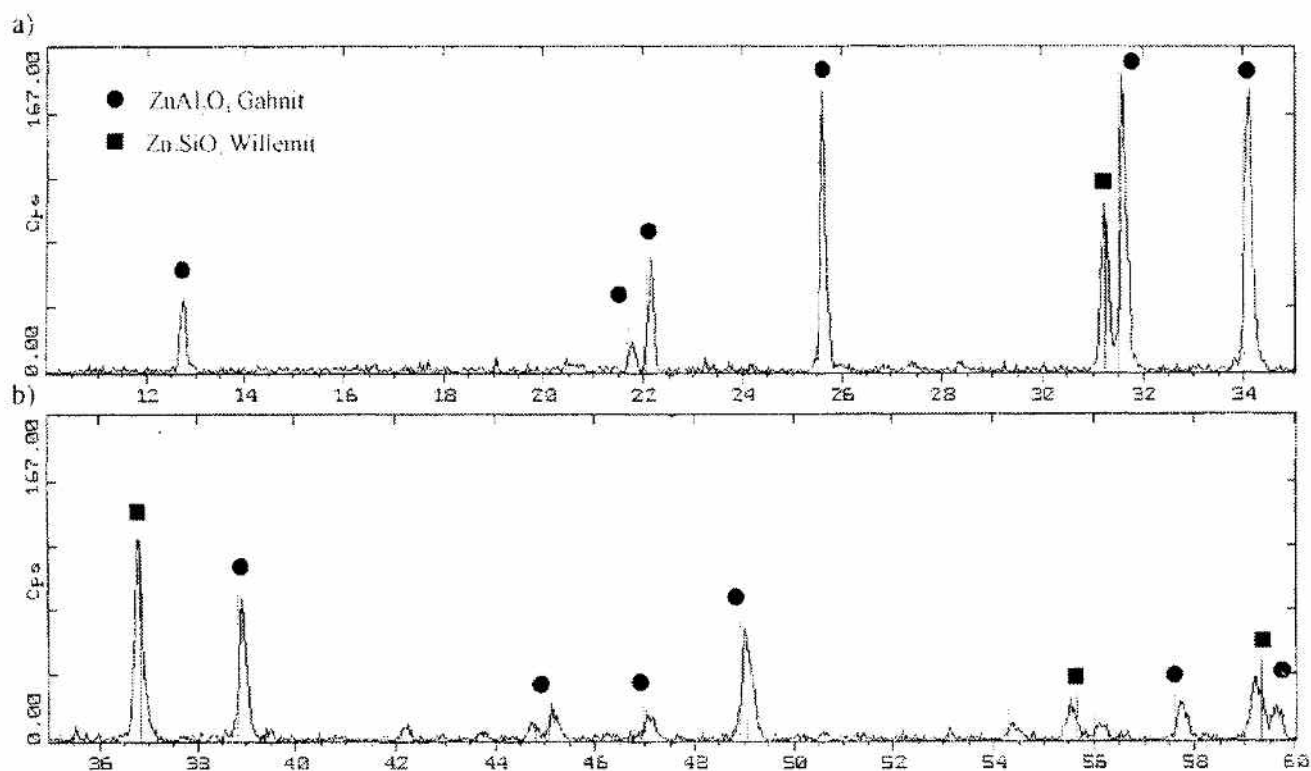
#### **4.2.1. Charakterystyka i właściwości zastosowanych odmian spoiwa ceramicznego**

Spoiwa szklanokrystaliczne z układu CMAS ( $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) [397] charakteryzują się dobrą zwilżalnością, a obecność podstawowej fazy krystalicznej typu piroksenów podnosi ich odporność na zużycie ściernie oraz mikrotwardość tworzywa, w porównaniu ze spoiwami szklanymi [421]. Ponadto tworzywa te dają możliwość wykorzystania tanich surowców do ich produkcji. Na potrzeby badań zmodyfikowano skład chemiczny tworzyw szklanokrystalicznych z układu CMAS do układu  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-MgO-ZnO-CaO-SiO}_2$ , dla wygenerowania faz krystalicznych o wyższej odporności na kruche pękanie [102, 304].

Dzięki odpowiednio dobranym parametrom obróbki termicznej oraz odpowiedniej modyfikacji składu chemicznego szkła macierzystego, możliwe jest stworzenie odpowiednich warunków do zainicjowania procesu krystalizacji określonej fazy krystalicznej determinującej właściwości całego spoiwa szklanokrystalicznego. Obecność fazy krystalicznej, takiej jak faza spinelowa (np. spinel cynkowy – gahnit:  $\text{Zn}^{+2}\text{Al}_2^{+3}\text{O}_4$ ), charakteryzującej się wysoką twardością (8-8,5 w skali Mohsa) i wysoką odpornością na zużycie ściernie, może podwyższać właściwości mechaniczne spoiwa, a tym samym wytrzymałość mechaniczną narzędzia ściernego [306].

Opracowano trzy odmiany tworzywa szklanokrystalicznego (spoiwo A, B i C), które syntetyzowano w sposób typowy dla technologii stosowanej w przemyśle szklarskim. Zaprojektowane spoiwa szklanokrystaliczne różniły się przede wszystkim rodzajem fazy krystalicznej powstałej w wyniku procesu

obróbki termicznej tych tworzyw. W celu ustalenia składu fazowego otrzymanych spoiw dokonano analizy z użyciem dyfraktometru rentgenowskiego Siemens D 5000, stosując promieniowanie CuK (czas zliczeń 5 s, rotacja próbki 1 obr./min, zakres pomiaru 10-60 s). Skład chemiczny spoiwa A został opracowany dla umożliwienia krystalizacji w pozostałości szklistej spinelowej fazy gahnitu o wysokiej twardości. Na rysunku 4.24 przedstawiono dyfraktogram spoiwa A, który wykazał obecność dwóch faz krystalicznych: fazy spinelowej ( $ZnAl_2O_4$ ) w postaci gahnitu oraz willemitu ( $Zn_2SiO_4$ ) [9].

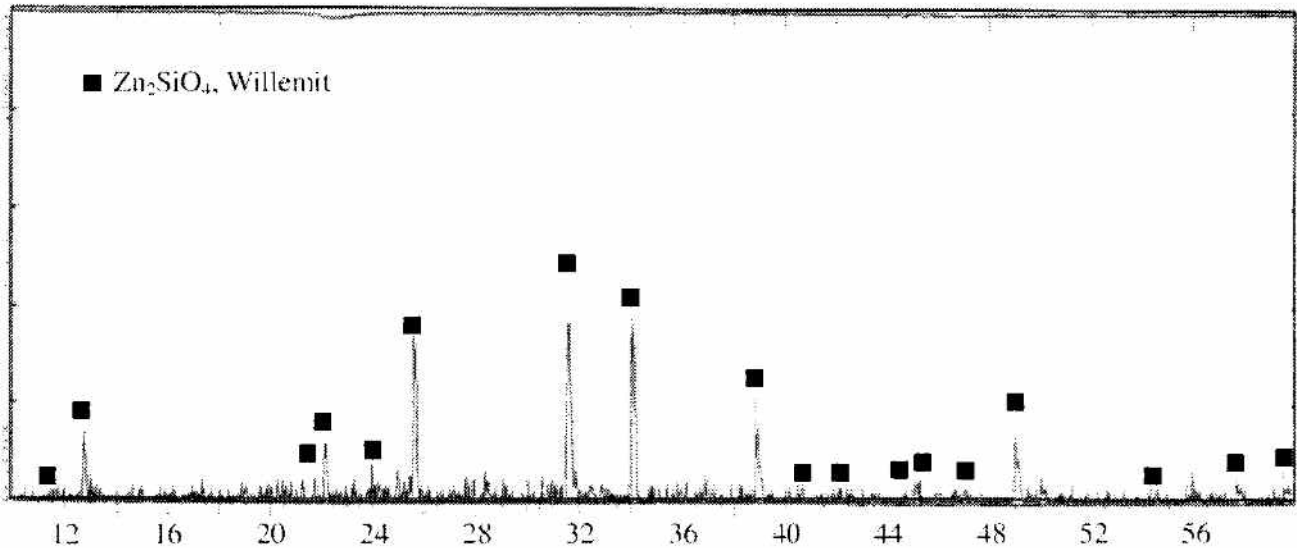


Rys. 4.24. Dyfraktogram próbki spoiwa A obrabianego termicznie w temperaturze 1100°C przez 1 h, przy której wytwarzane są ściernice z jego udziałem – natężenie ugiętej wiązki promieniowania rentgenowskiego dla kąta odbłyśku wiązki w zakresie: a) od 10° do 35°; b) od 35° do 60° [305]

Fig. 4.24. X-ray powdered-crystal pattern of the A bond thermally treated at 1100°C for 1 hour, at which the grinding wheels are produced with this bond – the intensity of the deflected X-ray beam for an angle of beam reflection within the range: a) from 10° to 35°; b) from 35° to 60° [305]

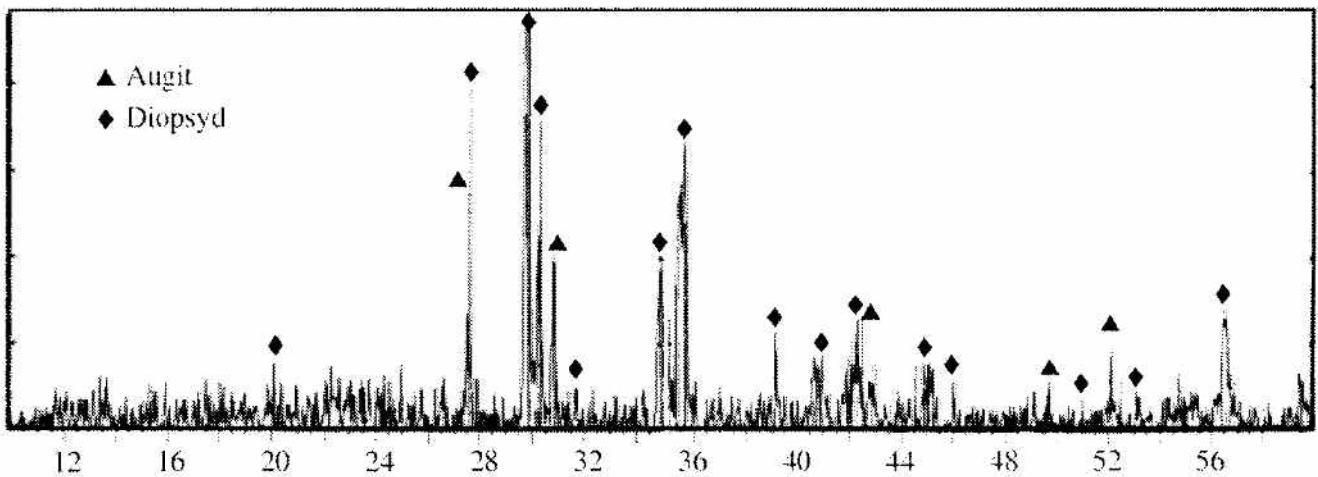
Przedstawiony na rysunku 4.25 wynik analizy struktury krystalicznej spoiwa B wykazał obecność fazy krzemianowej w postaci willemitu, charakteryzującego się twardością 5,5 w skali Mohsa. Spoiwo C było projektowane dla uzyskania fazy piroksenowej (twardość 6,5-7 w skali Mohsa), która jest fazą podstawową w tworzywach powstałych na bazie tlenków z układu CMAS. Na rysunku 4.26 przedstawiono dyfraktogram spoiwa C, który wykazał obecność w próbce dwóch faz krystalicznych z grupy piroksenów: augitu i diopsydu.





Rys. 4.25. Dyfraktogram próbki spoiwa B obrabianego termicznie w temperaturze  $1000^{\circ}\text{C}$  przez 1 h, przy której wytwarzane są ściernice z jego udziałem – natężenie ugiętej wiązki promieniowania rentgenowskiego dla kąta odbłyску wiązki w zakresie od  $10^{\circ}$  do  $60^{\circ}$  [305]

Fig. 4.25. X-ray powdered-crystal pattern of the B bond thermally treated at  $1000^{\circ}\text{C}$  for 1 hour, at which the grinding wheels are produced with this bond – the intensity of the deflected X-ray beam for an angle of beam reflection within the range from  $10^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  [305]

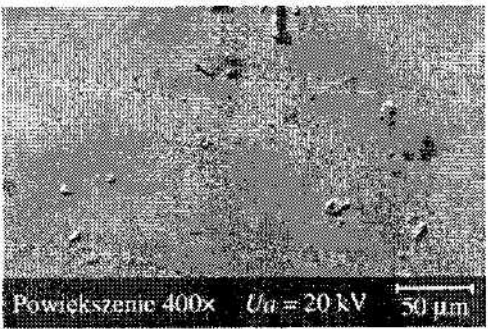
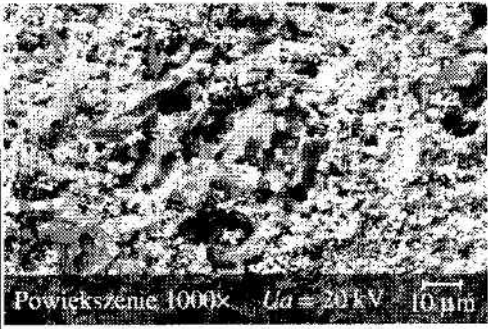
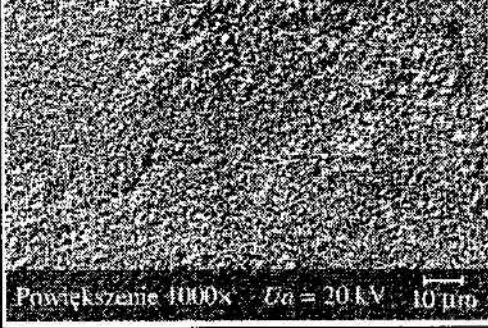




Rys. 4.26. Dyfraktogram próbki spoiwa C obrabianego termicznie w temperaturze  $1000^{\circ}\text{C}$  przez 1 h, przy której wytwarzane są ściernice z jego udziałem – natężenie ugiętej wiązki promieniowania rentgenowskiego dla kąta odbłyску wiązki w zakresie od  $10^{\circ}$  do  $60^{\circ}$  [304]

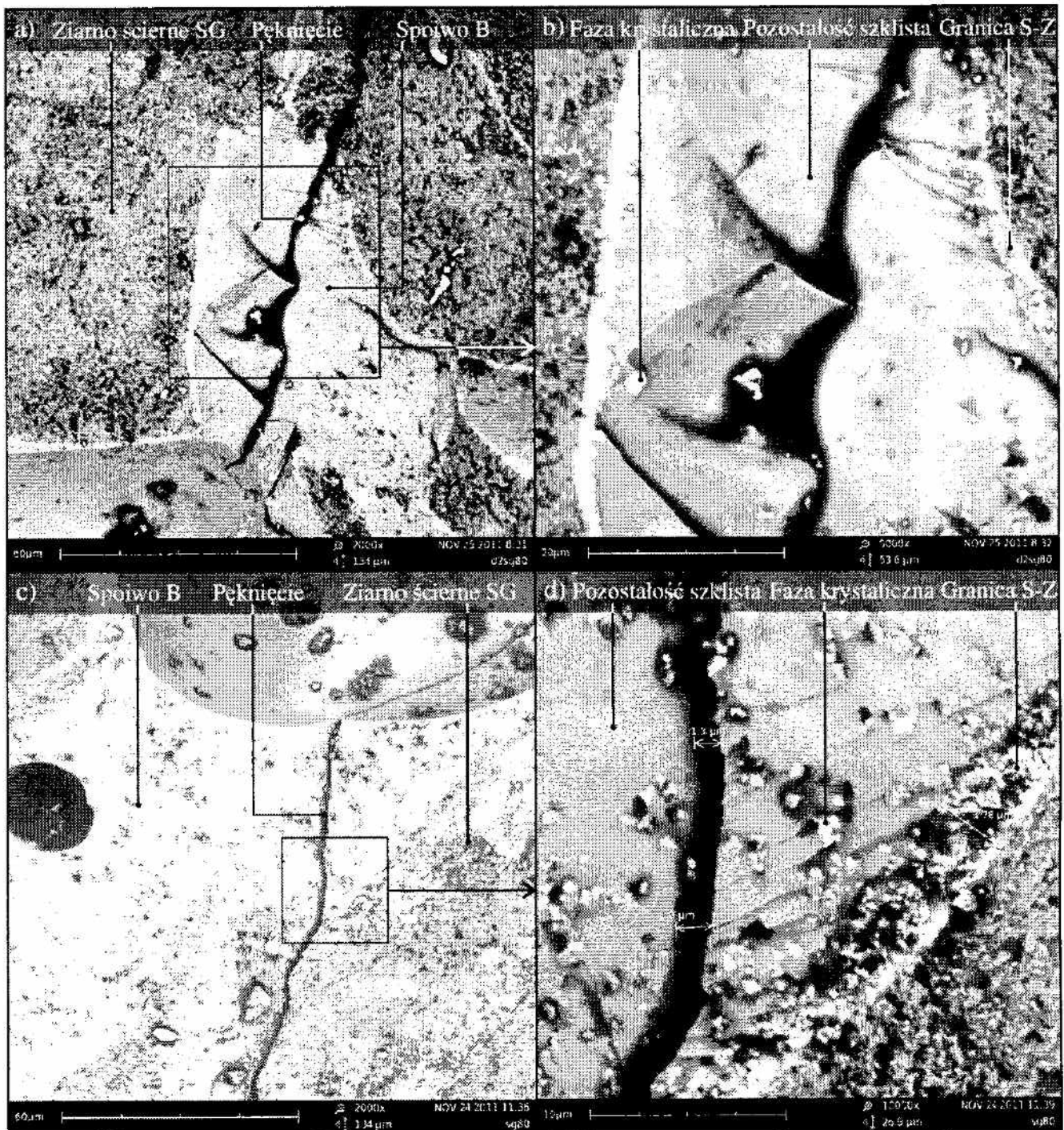
Fig. 4.26. X-ray powdered-crystal pattern of the B bond thermally treated at  $1000^{\circ}\text{C}$  for 1 hour, at which the grinding wheels are produced with this bond – the intensity of the deflected X-ray beam for an angle of beam reflection within the range from  $10^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  [304]

W tabeli 4.7 zestawiono najważniejsze właściwości strukturalne i fizykochemiczne badanych spoiw oraz ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane.

Tab. 4.7. Charakterystyka badanych spoiw oraz ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego SG<sup>TM</sup> [244, 396]Tab. 4.7. Characteristics of the examined bonds and SG<sup>TM</sup> grains [244, 396]

Rodzaj tworzywa	Struktura	Rodzaj i udział fazy krystalicznej	Średni wymiar ziarna, $\mu\text{m}$	$K_{IC}$ , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Widok mikroskopowy SEM struktury (tworzywo A, B i C – próbka częściowo trawiona w 10% roztworze HF)
szkło (S)	amorficzna	–	–	0.91	 Powiększenie 400× $U_a = 20 \text{ kV}$ 50 $\mu\text{m}$
szkłano-krystaliczne (A)	polimikrokrystaliczno-amorficzna	gahnit i willemit 40.65%	>1	1.72	 Powiększenie 1000× $U_a = 20 \text{ kV}$ 10 $\mu\text{m}$
szkłano-krystaliczne (B)	polimikrokrystaliczno-amorficzna	willemit 55.36%	<1	1.19	 Powiększenie 1000× $U_a = 20 \text{ kV}$ 10 $\mu\text{m}$
szkłano-krystaliczne (C)	polimikrokrystaliczno-amorficzna	augit i diposyd 29.02%	>5	1.15	 Powiększenie 1000× $U_a = 20 \text{ kV}$ 10 $\mu\text{m}$
spiekany $\text{Al}_2\text{O}_3$	polimikrokrystaliczna	$\text{Al}_2\text{O}_3$	<1	2.7	 Powiększenie 10000× $U_a = 20 \text{ kV}$ 1 $\mu\text{m}$

Na rysunku 4.27 przedstawiono przykładowe widoki mikroskopowe przelomów ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego ze spoiwem B.



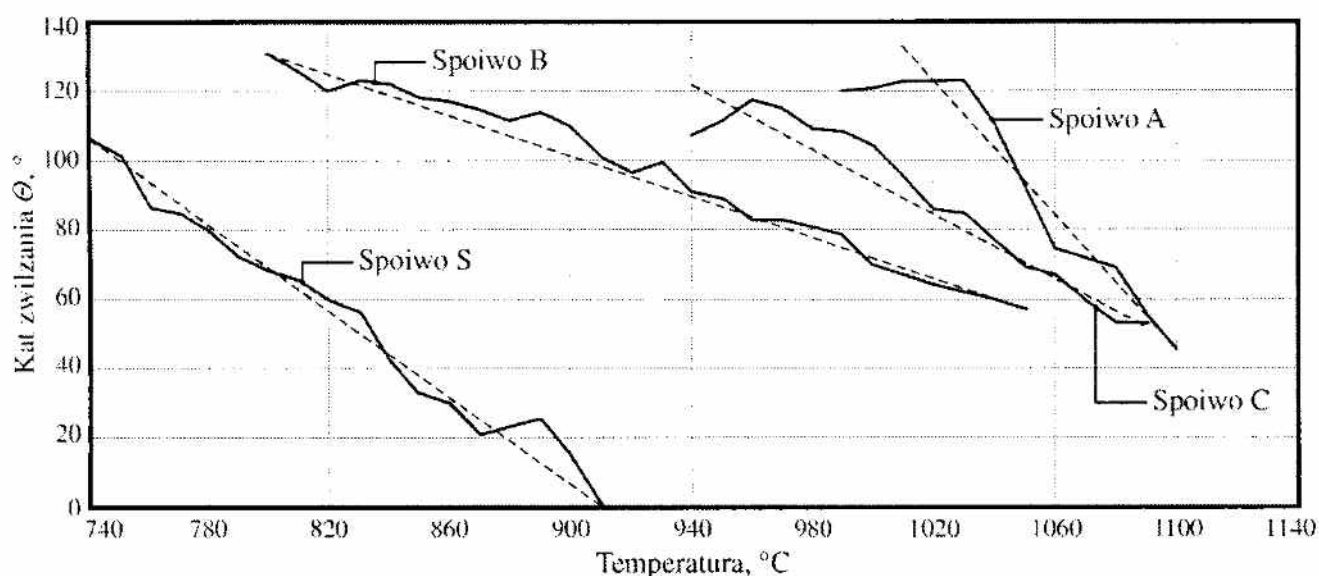
Rys. 4.27. Widoki mikroskopowe SEM przelomu ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego ze spoiwem B: a, c) powiększenie 2000 $\times$ ; b) powiększenie 5000 $\times$ ; d) powiększenie 10000 $\times$

Fig. 4.27. Microscopic views of fracture of the grinding wheel with sintered corundum abrasive grains and bond type B: a, c) magnification 2000 $\times$ ; b) magnification 5000 $\times$ ; d) magnification 1000 $\times$

Na obrazach zamieszczonych na rysunku 4.27 widoczna jest budowa spoiwa składającego się z fazy krystalicznej (willemitu) w osnowie pozostałości szklistej (rys. 4.27b, 4.27d). Zauważyć można na nich również efekt hamowania propagacji pęknięcia w mostku spoiwa (rys. 4.27a) oraz wielkość strefy na granicy styku spoiwa i ziarna (granica S-Z na rys. 4.27b i 4.27d).

Obecność fazy spinelowej (gahnitu) w strukturze tworzywa A podwyższa wartość współczynnika odporności na kruche pęknięcie (tab. 4.7) w porównaniu z tworzywami B i C, w których obecna jest wyłącznie faza należąca do krzemianów wyspowych i łańcuchowych, tj. willemitu oraz diopsydu i augitu. Może to być bezpośrednio związane z hamującym działaniem struktur krystalicznych gahnitu o wysokiej twardości na proces propagacji pęknięć.

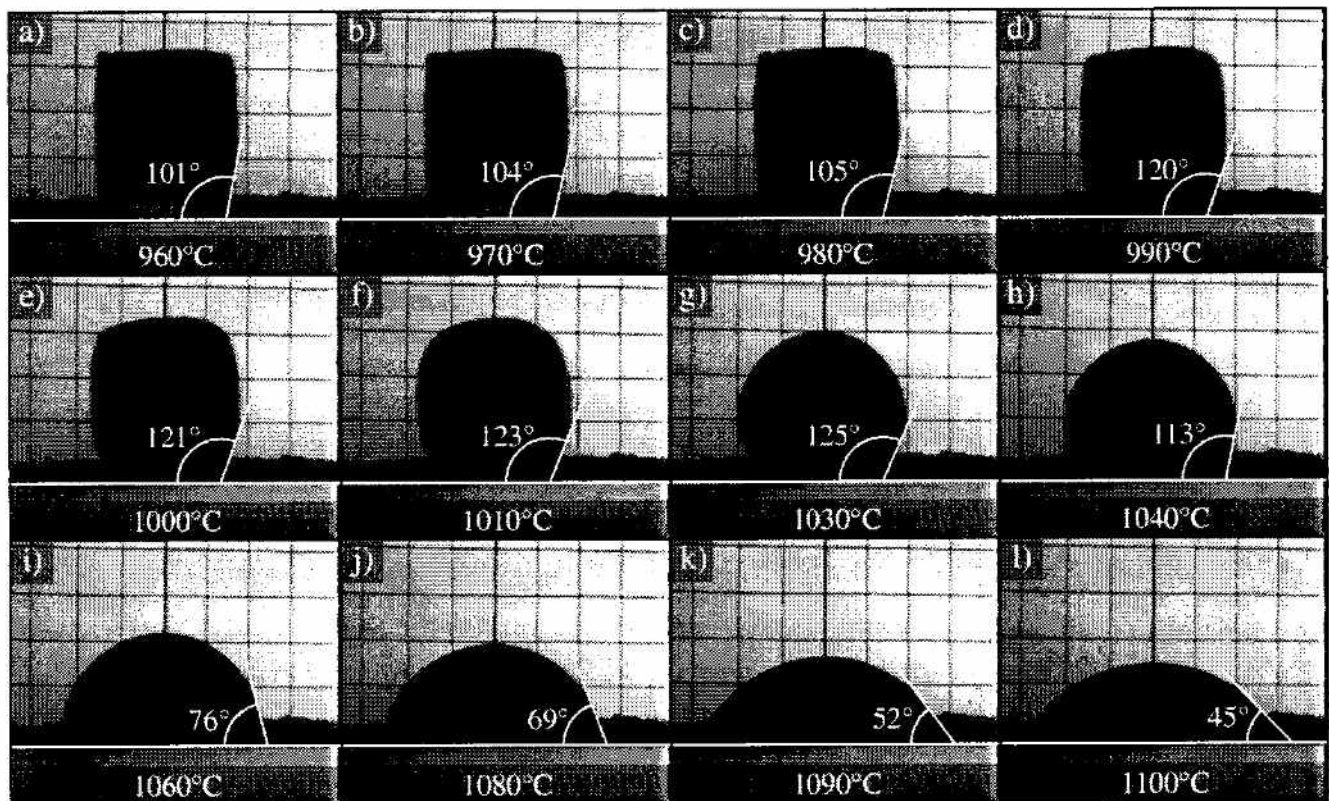
Badane spoiwa różniły się również zwilżalnością ziaren ściernych, która w znacznym stopniu decyduje o prawidłowym wiązaniu ziaren w ściernicy i związaną z tym wytrzymałością narzędzia. Na rysunku 4.28 przedstawiono zmiany wartości kąta zwilżania badanych spoiw w funkcji temperatury.



Rys. 4.28. Wykres zmian kąta zwilżania badanych spoiw w funkcji temperatury [96]

Fig. 4.28. Diagram of wetting angle changes over temperature for tested bonds [96]

Z wykresu przedstawionego na rysunku 4.28 wynika, że najkorzystniejszy przebieg zmian kąta zwilżania ma miejsce w przypadku spoiwa szklanego. Najniższa temperatura topnienia szkła powoduje, że wymagany stopień zwilżania uzyskuje się już przy temperaturze poniżej 900°C. Występowanie faz krystalicznych wyraźnie wpływa na pogorszenie zwilżalności, podnosząc zakres wymaganej temperatury do około 1100°C. Na rysunku 4.29 zestawiono przykład zmian kształtu próbki wywołanych temperaturą dla próbki wykonanej ze spoiwa A, zarejestrowane z użyciem mikroskopu wysokotemperaturowego firmy Ernst Leitz Wetzlar GmbH.



Rys. 4.29. Obrazy przedstawiające etapy zwilżania przez spoiwo odmiany A w zakresie temperatur od 960°C do 1100°C (a-l)

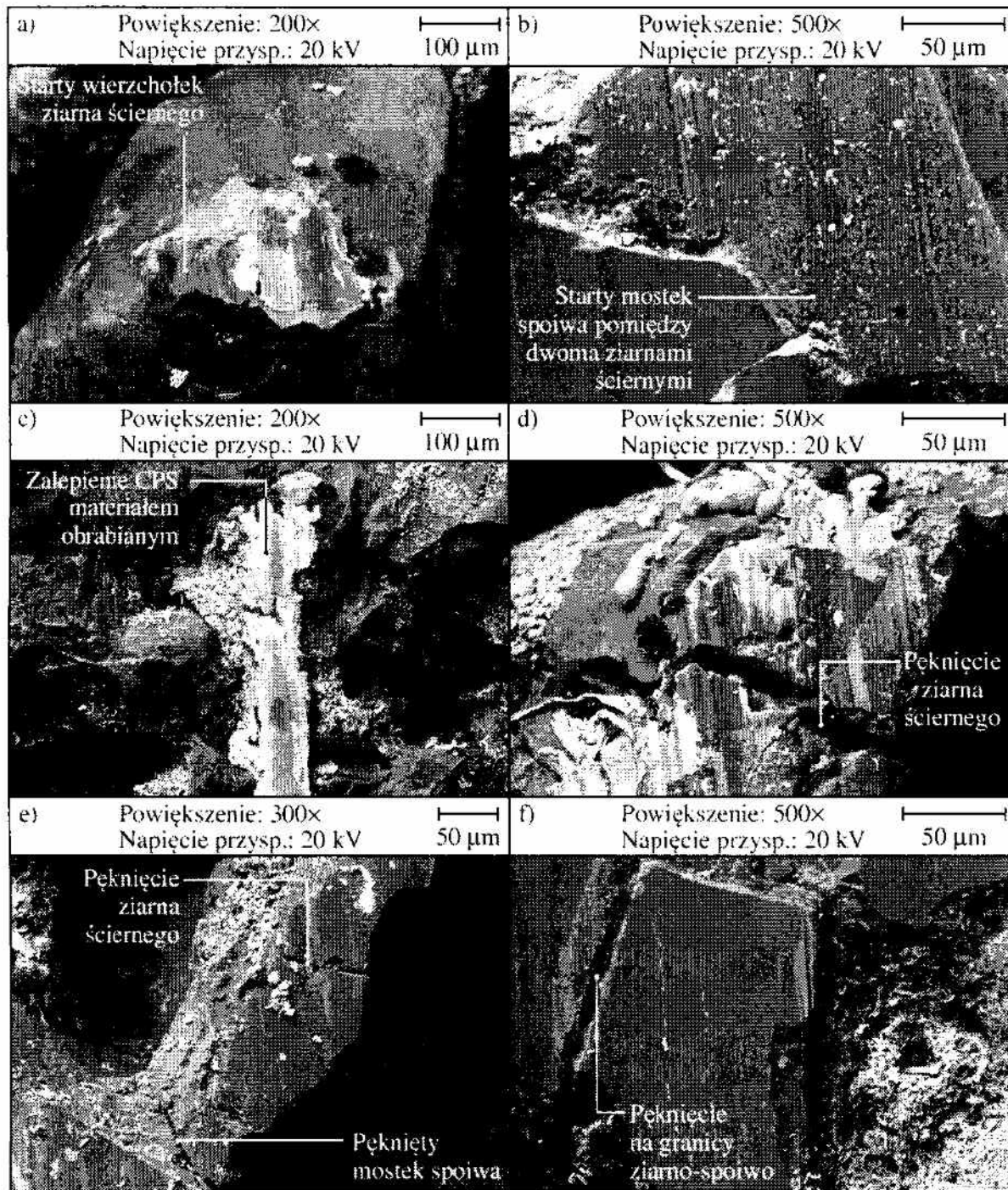
Fig. 4.29. Images of the wetting stages by the bond type A in the temperature range from 960°C to 1100°C (a-l)

#### 4.2.2. Procesy zużycia czynnej powierzchni ściernicy

Do najważniejszych procesów zużycia składników CPS zalicza się zużycie ściernic i wytrzymałościowe [27, 116, 117, 204, 399]. Procesy te zachodzą zarówno w ziarnach ściernych, jak i w spoiwie, stąd można wyróżnić:

- zużycie ściernic wierzchołków aktywnych ziaren ściernych;
- zużycie ściernic spoiwa w miejscach kontaktu z materiałem obrabianym;
- zużycie wytrzymałościowe ziaren ściernych pod wpływem obciążeń mechanicznych i cieplnych;
- zużycie wytrzymałościowe mostków spoiwa;
- zużycie wytrzymałościowe na granicy faz pomiędzy ziarnem ściernym a mostkiem spoiwa;
- zalepianie wierzchołków ziaren i przestrzeni międzyziarnowych materiałem obrabianym.

Na rysunku 4.30 przedstawiono przykładowe widoki mikroskopowe ilustrujące podstawowe procesy zużycia składników ściernicy.



Rys. 4.30. Widoki mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy przedstawiające skutki procesów zużycia ściernicy: a) zużycie ściernicze ziaren ściernych; b) zużycie ściernicze spoiwa; c) zalepienie wierzchołków ziaren i przestrzeni międzyziarnowych materiałem obrabianym; d) zużycie wytrzymałościowe ziaren ściernych; e) zużycie wytrzymałościowe mostków spoiwa; f) zużycie wytrzymałościowe na granicy ziarno-spoivo

Fig. 4.30. Microscopic SEM views of the grinding wheel active surface presenting the effects of processes of grinding wheel wear: a) abrasive wear of vertexes of the active abrasive grains; b) abrasive wear of bond; c) smear of abrasive vertexes and intergranular free spaces by workpiece material; d) fracture of abrasive grains; e) fracture of bond bridges; f) fracture at the interface between the abrasive grain and bond bridge

Tępienie wierzchołków ziaren wywołane zużyciem ściernym występuje na skutek szeregu zjawisk zachodzących w mikroskali, takich jak [116]:

- 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 pęknięcia lub wykruszania cząsteczek ziaren ściernych oraz wykruszania cząsteczek spoiwa i pęknięcia jego mostków, należy zaliczyć [27]:

- 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.

#### **4.2.3. Wpływ modyfikacji mikrostruktury spoiwa ceramicznego na okres trwałości ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego**

Celem badań było określenie wpływu modyfikacji mikrostruktury spoiwa na okres trwałości ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły na określenie dominujących procesów zużywania się czynnej powierzchni ściernicy w szlifowaniu wgłębnym z oscylacjami – odmianie kinematycznej szlifowania otworów powszechnie stosowanej m.in. w przemyśle łożyskowym. W badaniach tych, jako referencyjną, uwzględniono dodatkowo ściernicę ze spoiwem szklanym o strukturze amorficznej.

#### **Metodyka badań**

Próby przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w szlifierkę uniwersalną RUP 28P (podrozdział 4.1.2) z następującymi wartościami parametrów obróbkowych:  $v_s = 60$  m/s,  $v_w = 1,5$  m/s,  $a_{e\ cat} = 0,2$  mm,  $v_{fi} = 0,2$  mm/min,  $v_{fa} = 20$  mm/s. Każdorazowo po czasie 60 s, po którym zatrzymywany był posuw wgłębny, ściernica wykonywała sześć przejść w celu wyiskrzenia powierzchni obrobionej, w czasie około 5 s. Zastosowane w badaniach wartości

parametrów odpowiadają wydajności ubytkowej szlifowania  $Q_w = 7,14 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Z porównywalną wydajnością szlifowane były pierścienie łożysk tocznych w Fabryce Łożysk Tocznych w Kraśniku w badaniach opisanych w pracy [172].

W badaniach zastosowano ściernice typu I o wymiarach  $35 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ , wykonane z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego SG<sup>TM</sup> o numerze 46, spojone spoiwem szklanokrystalicznym odmiany A, B i C, którego udział objętościowy wynosił 11,5%, co odpowiadało strukturze 10 i twardości G. Dołączona do programu badań ściernica referencyjna (oznaczona jako S) wytworzona została w jednej partii razem ze ściernicami ze spoiwem szklanokrystalicznym, z użyciem tego samego ziarna ściernego, a zastosowane spoiwo szklane było typowym tworzywem używanym m.in. przez krajowych producentów spojonych narzędzi ściernych. Przed przystąpieniem do prób makrogeometrię ściernicy kształtowano w zabiegu obciągania z użyciem jednoziarnistego obciągacza diamentowego o masie  $Q_d = 1,25 \text{ kr}$  ( $v_{sd} = 20 \text{ m/s}$ ,  $v_{fd} = 10 \text{ mm/s}$ ,  $a_{ed} = 0,0125 \text{ mm}$ ). Obrabiano powierzchnie wewnętrzne pierścieni łożysk tocznych wykonanych ze stali 100Cr6, po toczeniu i obróbce cieplnej (twardość  $62 \pm 2 \text{ HRC}$ ).

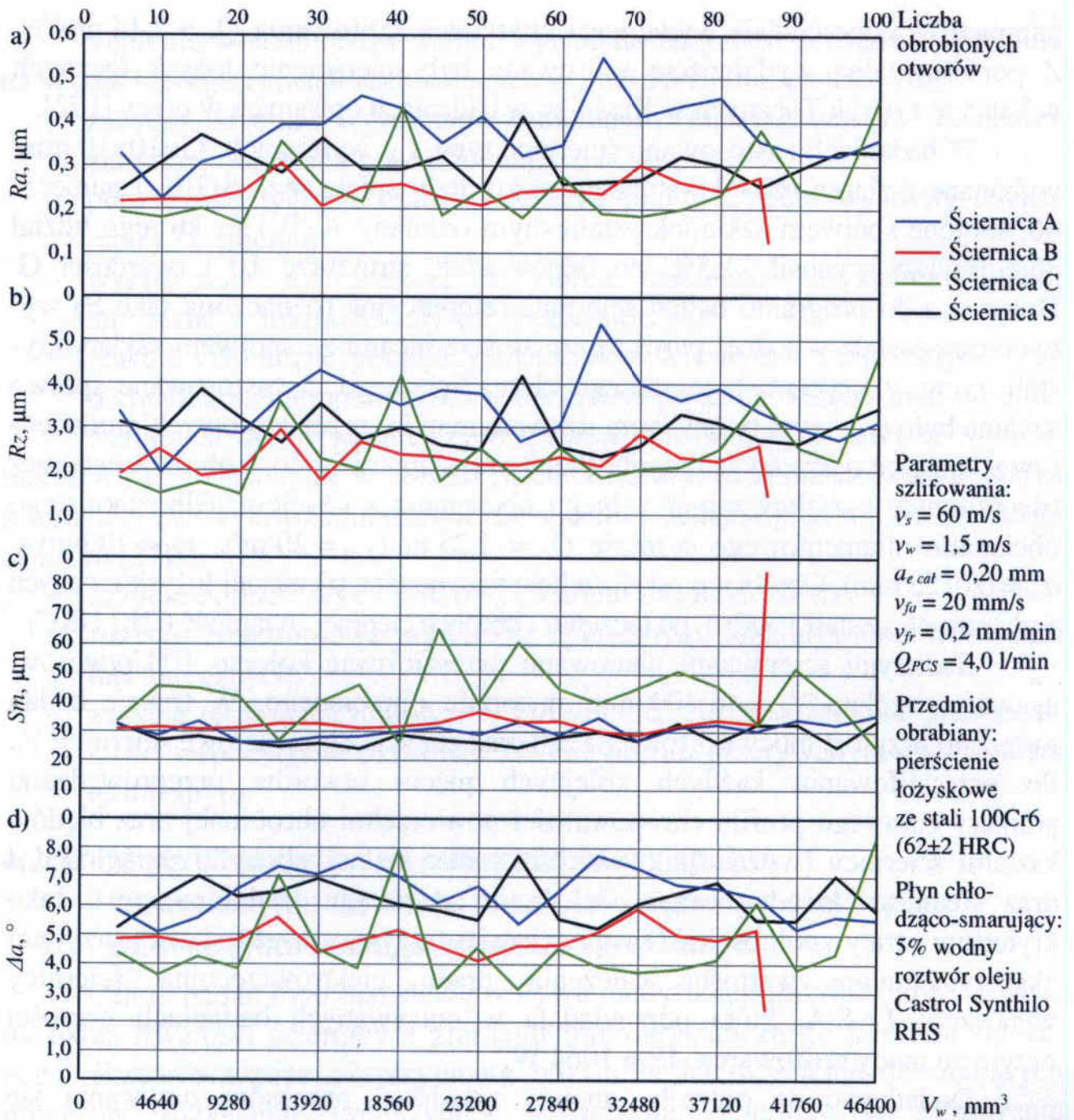
Badanymi ściernicami planowano przeszlifować kolejno 100 otworów, usuwając ogółem  $V_w = 46\,400 \text{ mm}^3$  materiału obrabianego. W trakcie badań mierzono przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$  oraz zużycie objętościowe ściernicy  $V_s$ . Po przeszlifowaniu każdego kolejnych pięciu otworów przeprowadzano pomiary osiowego profilu chropowatości powierzchni obrobionej oraz błędów kształtu ściernicy (wyznaczano wartości maksymalnej odchyłki okrągłości  $\Delta$  oraz średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego  $rms$ ). Jako kryterium utraty zdolności skrawnej ściernicy przyjęto przekroczenie przyjętej eksperymentalnie wartości natężenia prądu elektrowrzeciona ściernicy wynoszące  $I = 8 \text{ A}$ , która odpowiadała w opisywanych badaniach wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P = 1064 \text{ W}$ .

Dodatkowo na potrzeby analizy zjawisk i procesów zużywania się ściernicy zarejestrowano obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernic po obciąganiu oraz po zakończeniu badań. Użyto w tym celu skaningowego mikroskopu elektronowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd., opisanego w podrozdziale 3.4.2. Wykonano również analizę składu pierwiastkowego wybranych składników CPS metodą dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*).

## Wyniki badań doświadczalnych szlifowania

Analiza uzyskanych wykresów zmian wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej czterema badanymi ściernicami zamieszczonych na rysunku 4.31 wskazuje, że największe wartości parametrów wysokościowych uzyskano, stosując ściernicę ze spoiwem A (rys. 4.31a i 4.31b).

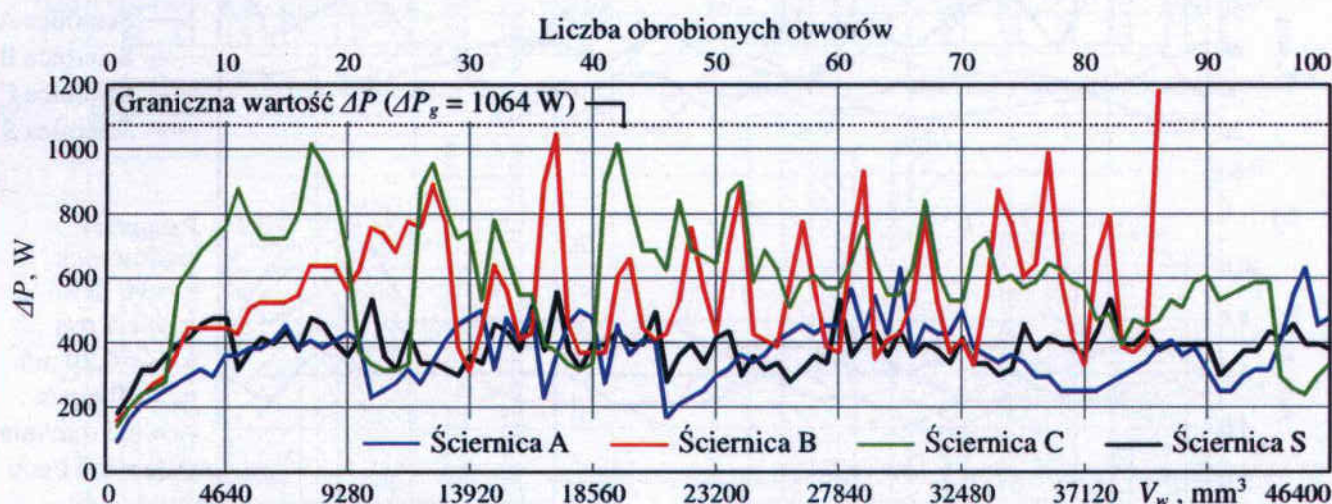




Rys. 4.31. Zmiany wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrabianej w funkcji ubytku materiału  $V_w$  w procesie szlifowania wglębnego z oscylacjami otworów ściernicami z modyfikowaną mikrostrukturą spoiwa ceramicznego: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu  $R_a$ ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów  $R_z$ ; c) średni odstęp chropowatości  $S_m$ ; d) średnie pochylenie profilu  $\Delta a$

Fig. 4.31. Changes of values of the selected workpiece surface roughness parameters over material removal  $V_w$  during internal cylindrical plunge grinding with oscillations using grinding wheels with modified microstructure of ceramic bond: a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $R_a$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $R_z$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $S_m$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$

Dla pozostałych trzech ściernic wyniki były zbliżone, przy czym ściernica ze spoiwem C odznaczała się wyraźnie większymi wartościami parametru  $Sm$ , określającego średni odstęp chropowatości (rys. 4.31c). Zauważyć można również, że okres trwałości ściernicy ze spoiwem B zakończył się po przeszlifowaniu 85 otworów. Moment zakończenia okresu trwałości tej ściernicy określono na podstawie przekroczenia wartości granicznej przyrostu mocy szlifowania, co zostało pokazane na rysunku 4.32, na którym zamieszczono wykres zmian  $\Delta P$ .



Parametry szlifowania:

$v_s = 60$  m/s;  $v_w = 1,5$  m/s;  $a_{e\ cat} = 0,20$  mm;  
 $v_{fu} = 20$  mm/s;  $v_{fr} = 0,2$  mm/min;  $Q_{PCS} = 4,0$  l/min

Przedmiot obrabiany:

pierścienie łożyskowe ze  
 stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)

Płyn chłodziwo-smarujący:

5% wodny roztwór oleju  
 Castrol Synthilo RHS

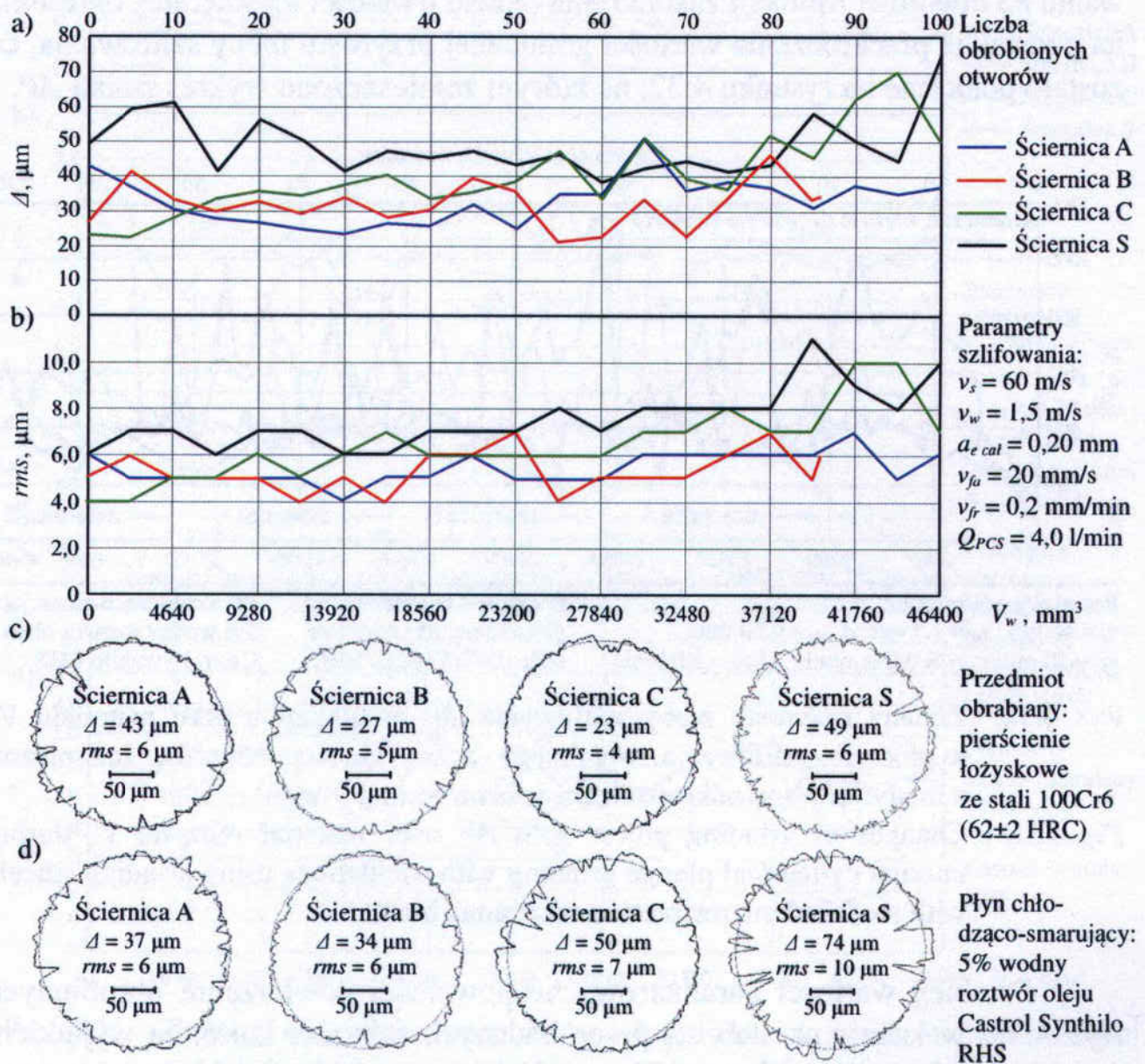
Rys. 4.32. Zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w funkcji ubytku materiału  $V_w$  w procesie szlifowania wglębnego z oscylacjami otworów ściernicami z modyfikowaną mikrostrukturą spoiwa ceramicznego

Fig. 4.32. Changes of grinding power gain  $\Delta P$  over material removal  $V_w$  during internal cylindrical plunge grinding with oscillations using grinding wheels with modified microstructure of ceramic bond

Przebieg wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianych (rys. 4.33) wskazuje na stabilną pracę badanych ściernic, które, za wyjątkiem ściernicy B, przeszlifowały po 100 otworów, zapewniając uzyskanie zakładanej jakości powierzchni po szlifowaniu. Spośród badanych ściernic najkorzystniejszy przebieg zmian mocy szlifowania zanotowano dla ściernicy ze spoiwem A oraz S (rys. 4.32). Ściernice B i C odznaczające się spoiwem szklanokrystalicznym z krzemianowymi fazami krystalicznymi w osnowie pozostałości szklistej, odznaczały się znacznie większym rozrzutem oraz wyższymi wartościami przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$ .

Na rysunku 4.33 przedstawiono zmiany parametrów błędu okrągłości badanych ściernic wraz z zarysami osiowymi ściernic po obciążeniu i po zakończeniu szlifowania. Z zaprezentowanego wykresu (rys. 4.33a) wynika, że w przypadku większości ściernic (B, C i S), wartości błędów okrągłości zmieniały

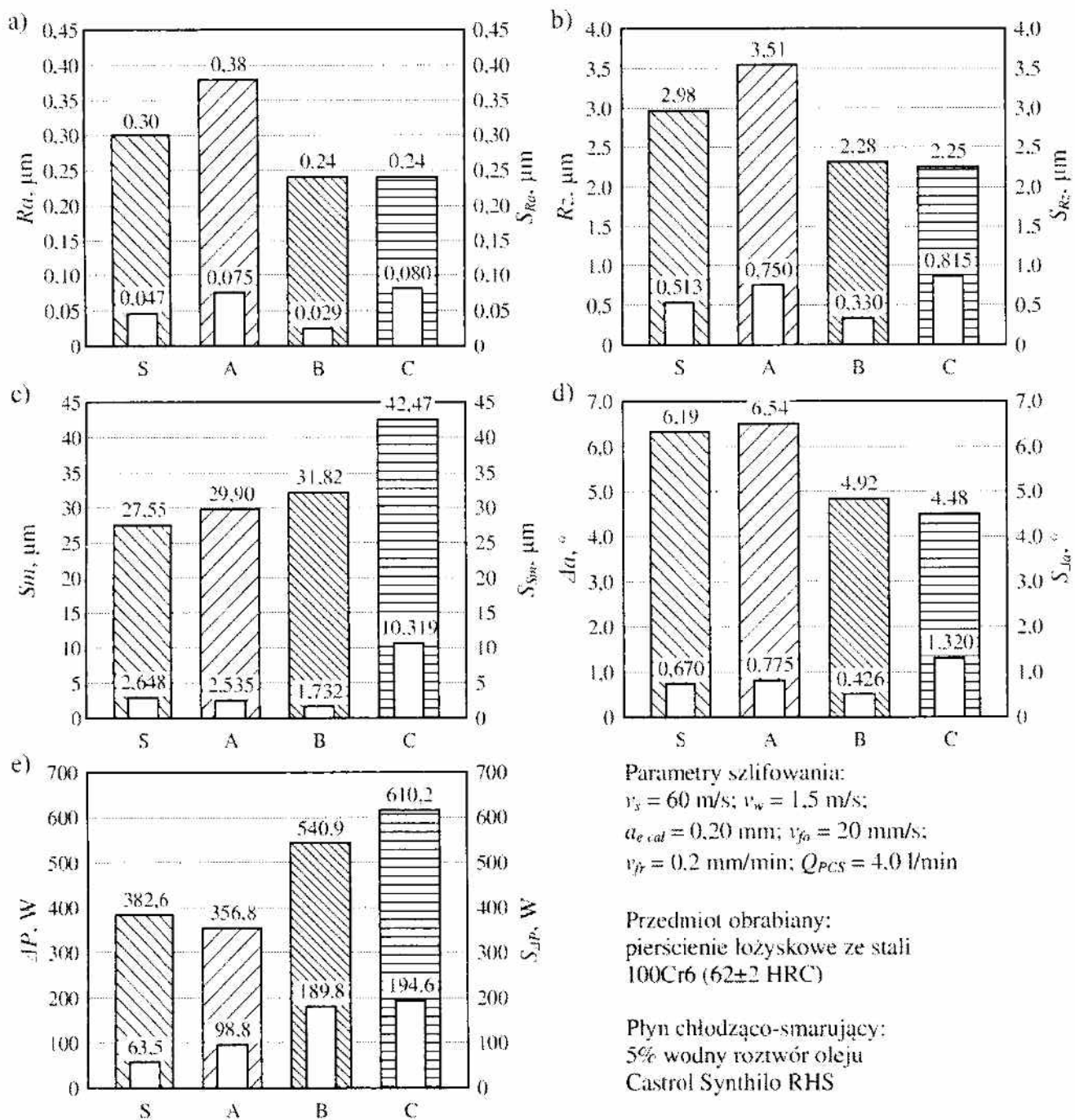
się nieznacznie aż do przeszlifowania 70-80 pierścieni. Po przekroczeniu tej wartości uwidoczniła się tendencja wzrostowa wartości ocenianych parametrów ( $\Delta$  i  $rms$ ). Wyjątek stanowi ściernica ze spoiwem A, w przypadku której wartości tych parametrów po szlifowaniu były niższe niż po obciążeniu (rys. 4.33c i 4.33d).



Rys. 4.33. Zmiany wartości maksymalnej odchyłki okrągłości  $\Delta$  (a) i średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego  $rms$  (b) w funkcji ubytku materiału  $V_w$  oraz zarysy obwodowe badanych ściernic po obciążeniu (c) i po zakończeniu procesu szlifowania wgłębnego z oscylacjami (d)

Fig. 4.33. Changes of values of the maximum roundness deviation  $\Delta$  (a) and root-mean-square deviation from mean circle  $rms$  (b) over material removal  $V_w$  as well as circumference profiles of tested grinding wheels after dressing (c) and after internal cylindrical plunge grinding with oscillations (d)

Na kolejnych dwóch rysunkach (rys. 4.34 i 4.35) sporządzono zestawienie wartości wyznaczonych parametrów szlifowania stanowiące średnią z wyni-

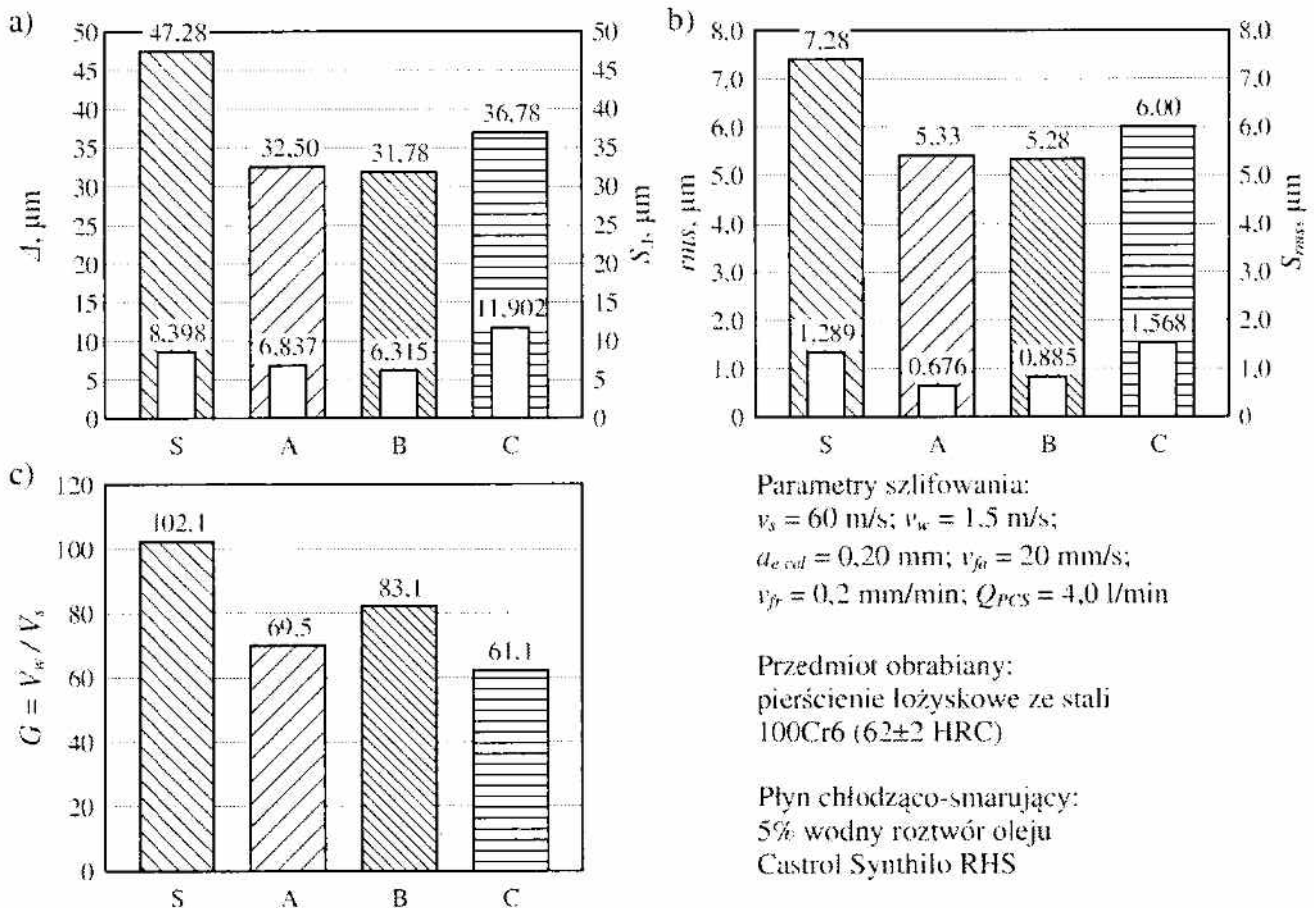


Rys. 4.34. Wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni po szlifowaniu badanymi ściernicami oraz mocy szlifowania, stanowiące średnią z wyników dla 85 pierścieni ( $V_w = 39440$  mm<sup>3</sup>): a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu  $Ra$ ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp chropowatości  $Sm$ ; d) średnie pochylenie profilu  $\Delta a$ ; e) przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$  ( $S$  – odchylenie standardowe)

Fig. 4.34. Values of the selected workpiece surface roughness parameters and grinding power designated as the average of results for 85 rings ( $V_w = 39440$  mm<sup>3</sup>) machined by tested grinding wheels: a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$ ; e) grinding power gain  $\Delta P$  ( $S$  – standard deviation)

ków dla 85 pierścieni ( $V_w = 39440 \text{ mm}^3$ ), czyli dla okresu, w którym prawidłowo zrealizowano pracę wszystkimi badanymi ściernicami.

Na rysunku 4.34 zamieszczono wartości średnie, wraz z miarą ich rozrzutu (odchylenie standardowe), wybranych parametrów chropowatości powierzchni (rys. 4.34a-d) oraz przyrostu mocy szlifowania (rys. 4.34e). Natomiast na rysunku 4.35 pokazano wykresy zmian wartości średniej maksymalnej odchyłki okrągłości  $\Delta$  (rys. 4.35a) i średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego  $rms$  (rys. 4.35b) oraz wskaźnika szlifowania  $G$  (rys. 4.35c).



Rys. 4.35. Wartości maksymalnej odchyłki okrągłości  $\Delta$  (a) i średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego  $rms$  (b) badanych ściernic oraz wskaźnika szlifowania  $G$  (c), stanowiące średnią z wyników dla 85 pierścieni ( $V_w = 39440 \text{ mm}^3$ ): S – odchylenie standardowe

Fig. 4.35. Values of the maximum roundness deviation  $\Delta$  (a) and root-mean-square deviation from mean circle  $rms$  (b) of the tested grinding wheels as well as grinding ratio  $G$  (c), designated as the average of results for 85 rings ( $V_w = 39440 \text{ mm}^3$ ): S – standard deviation

### Analiza wyników badań

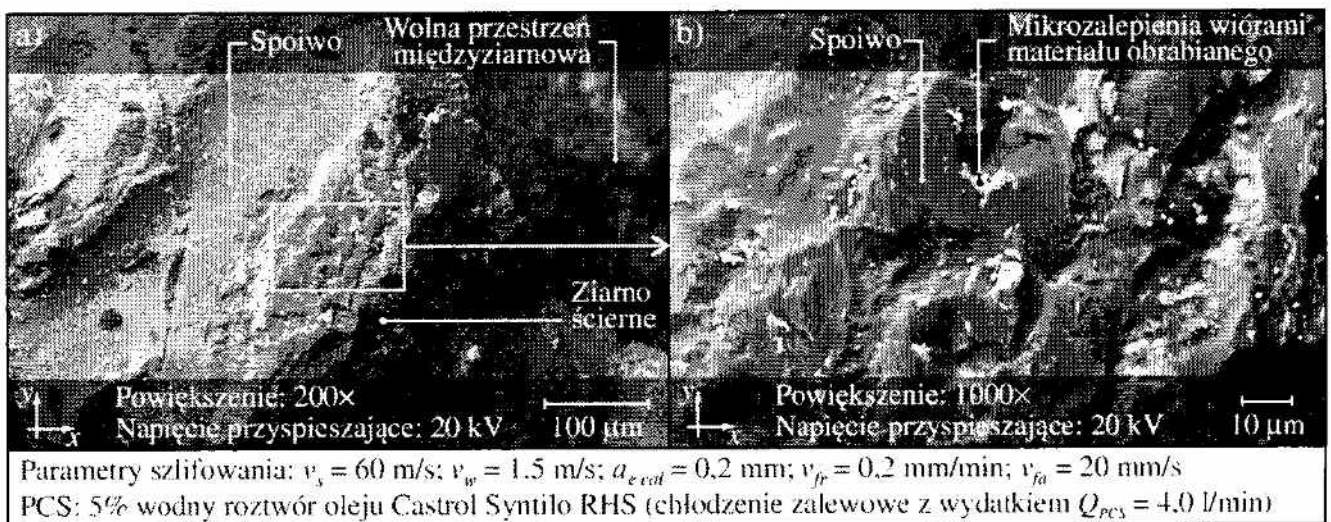
Analizując uzyskane wyniki badań przedstawione na rysunkach 4.31-4.35, można stwierdzić, że najkorzystniejsze wartości chropowatości powierzchni obrobionych uzyskano z zastosowaniem ściernic ze spoiwem szklanokrysta-

licznym odmiany B i C (rys. 4.34a). Jednak ściernica ze spoiwem B, jako jedyna, zakończyła okres trwałości przed końcem testu, a w przypadku ściernicy ze spoiwem C zapotrzebowanie na moc w procesie szlifowania wzrosło aż do 610,2 W i było o około 70% wyższe niż dla ściernicy A i S (odpowiednio 356,8 W i 382,6 W) – rys. 4.34e. Również dla ściernicy B zanotowano wysoką wartość średnią przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$ , wynoszącą 540,9 W. Szlifując trzecią ściernicą ze spoiwem szklanokrystalicznym (A), ukształtowano powierzchnię o najwyższej chropowatości (średnie  $Ra = 0,38 \mu\text{m}$ ) odpowiednio o 26% i 58% większą niż w przypadku ściernicy S ( $Ra = 0,30 \mu\text{m}$ ) oraz B i C ( $Ra = 0,24 \mu\text{m}$ ) – rys. 4.34a. Jednocześnie w przypadku tego narzędzia (A) zarejestrowano najniższą średnią wartość mocy szlifowania  $\Delta P = 356,8 \text{ W}$  (rys. 4.34e). Różnice w wartościach opisywanych parametrów dla poszczególnych ściernic wskazują na odmienne procesy ich zużywania się, wynikające z różnic w budowie mikrokrystalicznej spoiwa.

Zastosowanie spoiw szklanokrystalicznych B i C z udziałem fazy krzemianowej (willemity, augity i diopsydy) spowodowało znaczny wzrost mocy szlifowania przy jednoczesnym obniżeniu chropowatości powierzchni, w porównaniu ze ściernicą ze spoiwem A, w skład którego wchodziła faza spinelowa (gahnit). Krzemiany występujące w spoiwach B i C charakteryzują się współczynnikiem odporności na kruche pękanie  $K_{IC}$  jedynie o około 30% wyższym w odniesieniu do szkła. Ich występowanie, ze względu na twardość zbliżoną do szkła (5-7 w skali Mohsa), nie wpływa na intensywność zużycia ściernego spoiwa, a jedynie zwiększa jego udział, z powodu hamowania propagacji pęknięć mostków spoiwa i redukcji udziału zużycia zmęczeniowego. W rezultacie ziarna ściernic, mimo nieznacznego pogorszenia zwilżalności wywołanego występowaniem fazy krystalicznej, utrzymywane są z większą siłą niż ma to miejsce w przypadku szkła. Tłumaczy to niską chropowatość powierzchni obrobionej, ukształtowaną stępionymi wierzchołkami ziaren aktywnych. Jednocześnie w czasie szlifowania konieczna jest większa moc ze względu na zwiększony udział tarcia w procesie mikroskrawania. Okresowo, po przekroczeniu granicznych obciążeń mechanicznych mostków spoiwa, dochodzi do ich wykruszania i odkrywania nowych, ostrych naroży ziaren ściernic. Odnawianie zdolności skrawnej ściernicy skutkuje znaczącym spadkiem mocy szlifowania. Tego typu proces widoczny jest wyraźnie w przebiegu zmian wartości parametru  $\Delta P$  dla ściernicy B i C, charakteryzujących się dużą zmiennością (rys. 4.32). Taki proces zużywania się składników ściernicy skutkuje dodatkowo większym zużyciem objętościowym ściernic B i C w porównaniu ze ściernicą S (rys. 4.35c). Jednocześnie, aż do 70.-80. pierścienia nie wpływa na znaczący wzrost błędów kształtu (rys. 4.33). Należy jednak pamiętać, że z punktu widzenia praktyki procesu szlifowania,

duże wahania mocy są niekorzystne i skutkować mogą nieoczekiwanym, przedwczesnym zakończeniem okresu trwałości ściernicy, co miało miejsce w przypadku narzędzia ze spoiwem B.

Przedstawione wyniki procesu szlifowania wskazują, że w przypadku spoiwa odmiany A opisywane procesy zużycia zachodziły w odmienny sposób. Tworzywo to zawiera spinelową fazę krystaliczną gahnitu o twardości 8-8,5 w skali Mohsa. Zwiększa ona odporność na ścieranie spoiwa oraz wpływa na znaczący, bo aż 90% wzrost wartości współczynnika  $K_{IC}$ , w porównaniu ze spoiwem szklanym (tab. 4.7). W rezultacie ściernica z tego typu spoiwem zużywa się w odmienny sposób, niż ma to miejsce w przypadku spoiwa szklanego i tworzyw szklanokrystalicznych odmiany B i C. Dominuje mikrowykruszanie cząsteczek spoiwa z intensywnością zbliżoną do intensywności zużywania się ziaren ściernych. Większa twardość fazy spinelowej powoduje, że bierze ona bezpośredni udział w usuwaniu materiału, wspomagając pracę ziaren ściernych, co zostało przedstawione na rysunku 4.36.



Rys. 4.36. Obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernicy A po szlifowaniu: a) powiększenie 200×; b) powiększenie 500×; c) powiększenie 1000×

Fig. 4.36. Microscopic images of active surface of the A grinding wheel after grinding: a) Mag. 200×; b) Mag. 500×; c) Mag. 1000×

Skutkuje to niską mocą szlifowania wynikającą z wielu ostrych mikrowierzchołków skrawających biorących udział w mikroskrawaniu przy jednoczesnym zmniejszeniu udziału tarcia wygładzonych wierzchołków ziaren. Równomierne mikrowykruszanie zachodzące w mikroobszarach CPS wpływa również na małą wartość błędów kształtu ściernicy (rys. 4.35a-b). Intensywność wykruszania, zapewniająca zachowanie zdolności skrawnej ściernicy, powoduje jednocześnie, że zużycie objętościowe jest większe niż w przypadku ściernicy ze spoiwem szklanym (rys. 4.35c).

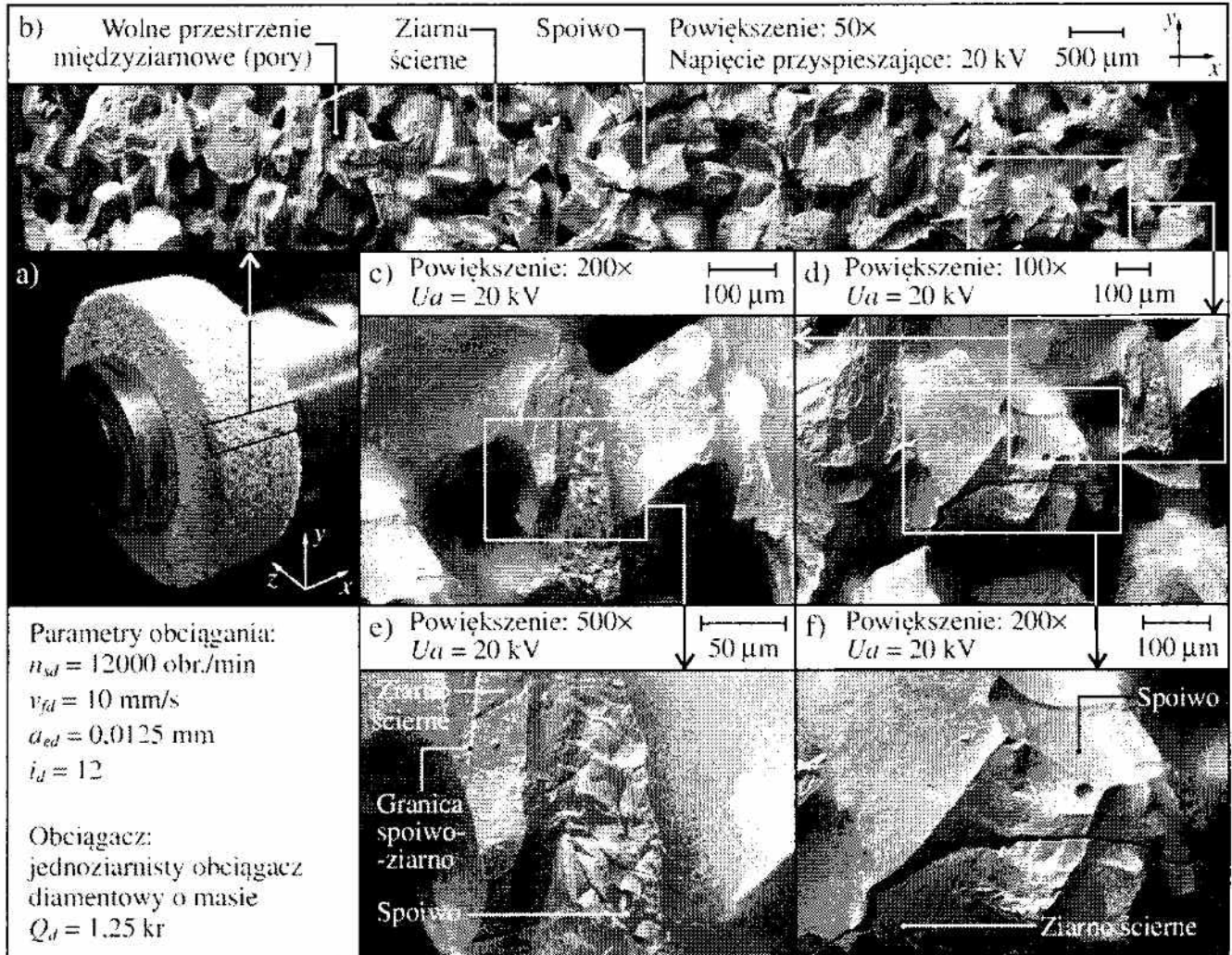
W przypadku ściernicy ze spoiwem amorficznym (S) zaobserwowano wyraźną różnicę w wartościach parametrów opisujących błędy kształtu ( $\Delta$  i  $rms$ ) oraz wskaźnik szlifowania  $G$ , w porównaniu ze ściernicami modyfikowanymi ze spoiwem szklanokrystalicznym (rys. 4.35). Średni błąd kształtu wyrażony wartością maksymalnej odchyłki okrągłości  $\Delta$  był od 22-33% mniejszy w przypadku ściernic A, B i C w porównaniu ze ściernicą S (rys. 4.35a). Jednocześnie wartości wskaźnika szlifowania  $G$  wskazują na najmniejsze zużycie objętościowe ściernicy ze spoiwem szklanym i około 20-30% większe zużycie ściernic ze spoiwem szklanokrystalicznym (rys. 4.35c). Mniejsze zużycie objętościowe ściernicy ze spoiwem amorficznym (S) wynikało z większej siły utrzymywania ziaren, będącej skutkiem lepszego zwilżania ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego przez szkło, niż ma to miejsce w przypadku tworzyw szklanokrystalicznych (rys. 4.28). Jednak, ze względu na mniejszą odporność szkła na kruche pękanie i łatwą propagację pęknięć w takim spoiwie, w przypadku przekroczenia krytycznego obciążenia mechanicznego mostka mogło dochodzić do wykruszania się fragmentów CPS o relatywnie większej objętości, niż miało to miejsce w przypadku ściernic ze spoiwem szklanokrystalicznym. Proces ten występował okresowo i objawiał się większym błędem okrągłości ściernicy S zarówno po obciążaniu, jak i w trakcie szlifowania (rys. 4.33). W tworzywie szklanokrystalicznym składniki CPS wykruszają się częściej, a wykruszenia dotyczą mikroobszarów kontaktu spoiwa i ziaren ściernych z materiałem obrabianym, ponieważ prorogacja pęknięć hamowana jest przez fazę krystaliczną o wyższej twardości. W efekcie zapewniony jest zbliżony proces zużywania się ziaren ściernych i spoiwa, błędy kształtu ściernicy są mniejsze, a ogólne zużycie objętościowe większe niż w przypadku ściernicy ze spoiwem amorficznym.

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia, można wytypować ściernice S i A jako narzędzia zapewniające żądaną jakość powierzchni obrobionej ( $Ra < 0,63 \mu m$ ) oraz najniższą moc szlifowania. Jednak odmienny charakter zużywania się spoiwa szklanokrystalicznego odmiany A spowodował, że ściernica zbudowana z jego udziałem odznaczała się znacznie niższymi wartościami błędów kształtu, które decydują o trwałości ściernicy w długim czasie jej pracy. Oznacza to, że odpowiednia modyfikacja mikrostruktury spoiwa znacząco wpływa na procesy zużywania się składników CPS i zjawiska je wywołujące. W celu zweryfikowania trafności sformułowanych wniosków dotyczących procesów zużywania się ściernic ze spoiwem szklanym (S) i szklanokrystalicznym odmiany A przeprowadzono szereg obserwacji mikroskopowych SEM czynnej powierzchni ściernicy zarówno przed, jak i po procesie szlifowania. Wykonano również analizy składu chemicznego jej charakterystycznych obszarów metodą EDS.



## Analiza stanu czynnej powierzchni ściernicy S i A po szlifowaniu na podstawie obrazów mikroskopowych SEM

Na rysunku 4.37 przedstawiono widoki mikroskopowe czynnej powierzchni ściernicy po zabiegu obciągania na przykładzie ściernicy ze spoiwem A.



Rys. 4.37. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy po obciąganiu: a) makrofotografia przedstawiająca widok ogólny ściernicy; b) pow. 50×; c) pow. 200×; d) pow. 100×; e) pow. 500×; c) pow. 200×

Fig. 4.37. Microscopic SEM views of the grinding wheel active surface after dressing: a) macrophotography with overall view of the grinding wheel; b) Mag. 50×; c) Mag. 200×; d) Mag. 100×; e) Mag. 500×; c) Mag. 200×

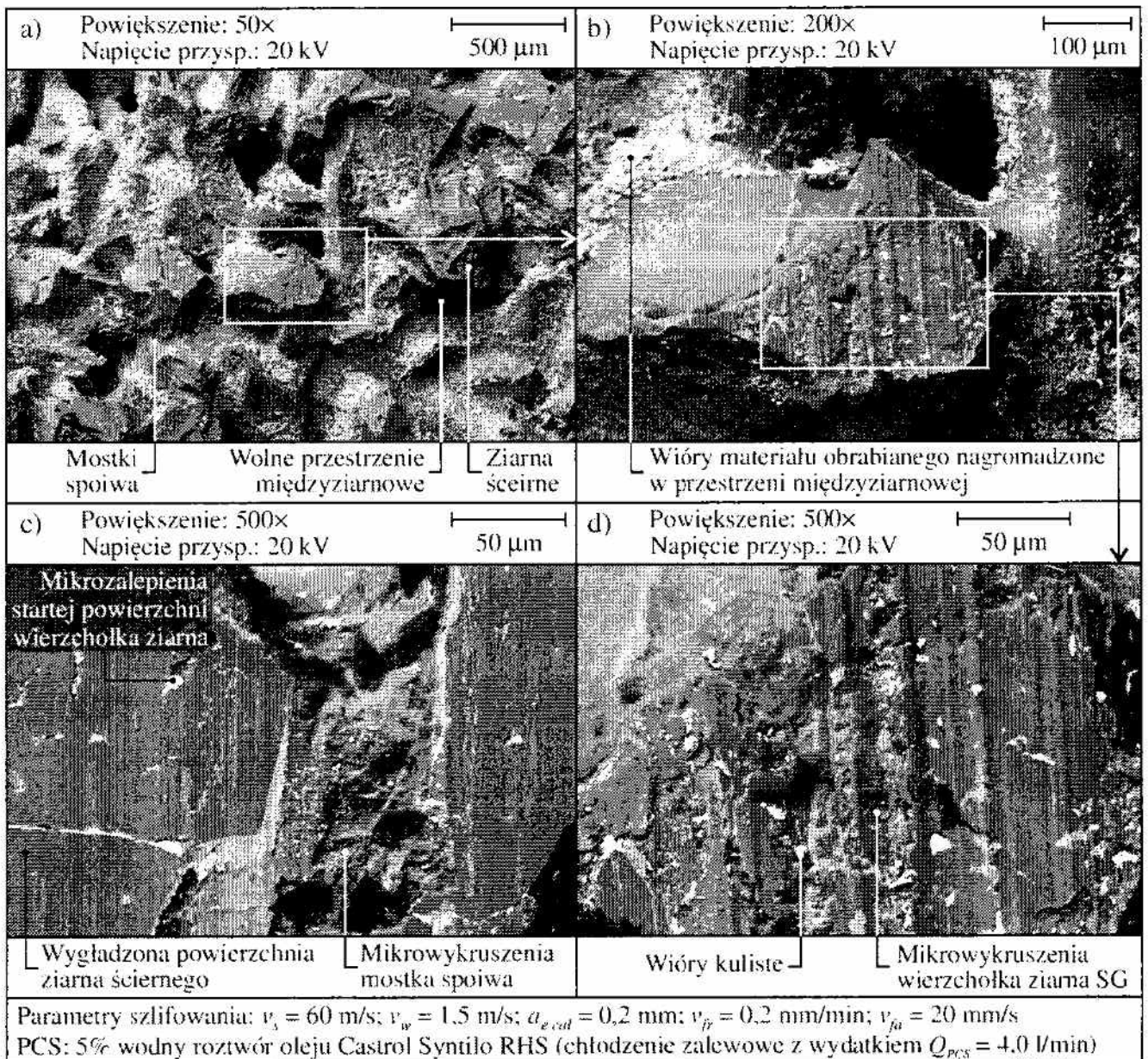
Analizując zarejestrowane obrazy, można zauważyć otwartą strukturę ściernicy z dużą liczbą wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Ziarna ścierne mikrokrystalicznego korundu spiekanego są oblane cienką warstwą spoiwa szklanokrystalicznego, co świadczy o zadowalającej zwilżalności tego tworzywa, i zostały odstłonięte jedynie w miejscach oddziaływania wierzchołka obciągacza (rys. 4.37e, 4.37f). Na rysunku 4.37e widoczny jest odmienny sposób wykruszania ziaren i spoiwa. Ziarna ścierne wykruszyły się, tworząc

plaszczyny z wyraźnie widoczną strukturą mikrokrystaliczną, natomiast w spoiwie pęknięcia propagowały aż do napotkania fazy krystalicznej. Na rysunku 4.37f pokazano, że również w przypadku ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane oddziaływanie ostrza obciążacza prowadzi do powstawania pęknięć, które powodują wykruszanie relatywnie dużych fragmentów ziaren.

Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy A i S zarejestrowano następnie po zakończeniu szlifowania i usunięciu 46 400 mm<sup>3</sup> materiału obrabianego.

Na rysunku 4.38 zamieszczono zestawienie widoków czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem szklanokrystalicznym odmiany A w różnych powiększeniach. Można na nich zauważyć mostek spoiwa (rys. 4.38c), którego powierzchnia uległa wykruszaniu w obrębie mikroobszarów, co wynika z hamowania propagacji pęknięć przez obecność fazy krystalicznej. Na rysunku 4.38d widoczne jest również stopniowe odnawianie zdolności skrawnej ziarna SG<sup>TM</sup>, które polega na mikrowykruszaniu fragmentów wygładzonej powierzchni wierzchołka aktywnego i odsłanianiu nowych, ostrych mikrokrystalików. Na rysunku 4.38c i 4.38d zauważyć można mikrozalepienia startych powierzchni wierzchołków ziaren ściernych materiałem obrabianym i produktami zużycia ściernicy, takimi jak wykruszone spoiwo i fragmenty ziaren. Znajdujące się w strefie szlifowania wióry wtarte zostały w mikropęknięcia znajdujące się na wygładzonej powierzchni ziarna.

Na czynnej powierzchni ściernicy A zaobserwowano wióry kuliste (rys. 4.38d), które świadczą o bardzo wysokiej temperaturze w mikroobszarach kontaktu ziaren ściernych z przedmiotem obrabianym. Należy przypuszczać, że temperatura wióra chwilowo osiągała temperaturę topnienia szlifowanej stali (1425-1540°C [168]), powodując formowanie pustych w środku wiórów kulistych, których kształt wynika z napięcia powierzchniowego upłynnionej stali. Tłumaczy to możliwość lokalnego uplastyczniania aktywnych wierzchołków ziaren SG<sup>TM</sup>, których kryształy są stabilne fizycznie do temperatury 1500-1700°C [349]. Poza wiórami kulistymi na czynnej powierzchni obserwowanej ściernicy widoczne są również wióry długości ponad 100 μm ukształtowane podczas szlifowania zgrubnego, jak i mikrowióry o wielkości rzędu kilku mikrometrów, powstające podczas wyiskrzania powierzchni (rys. 4.38b).

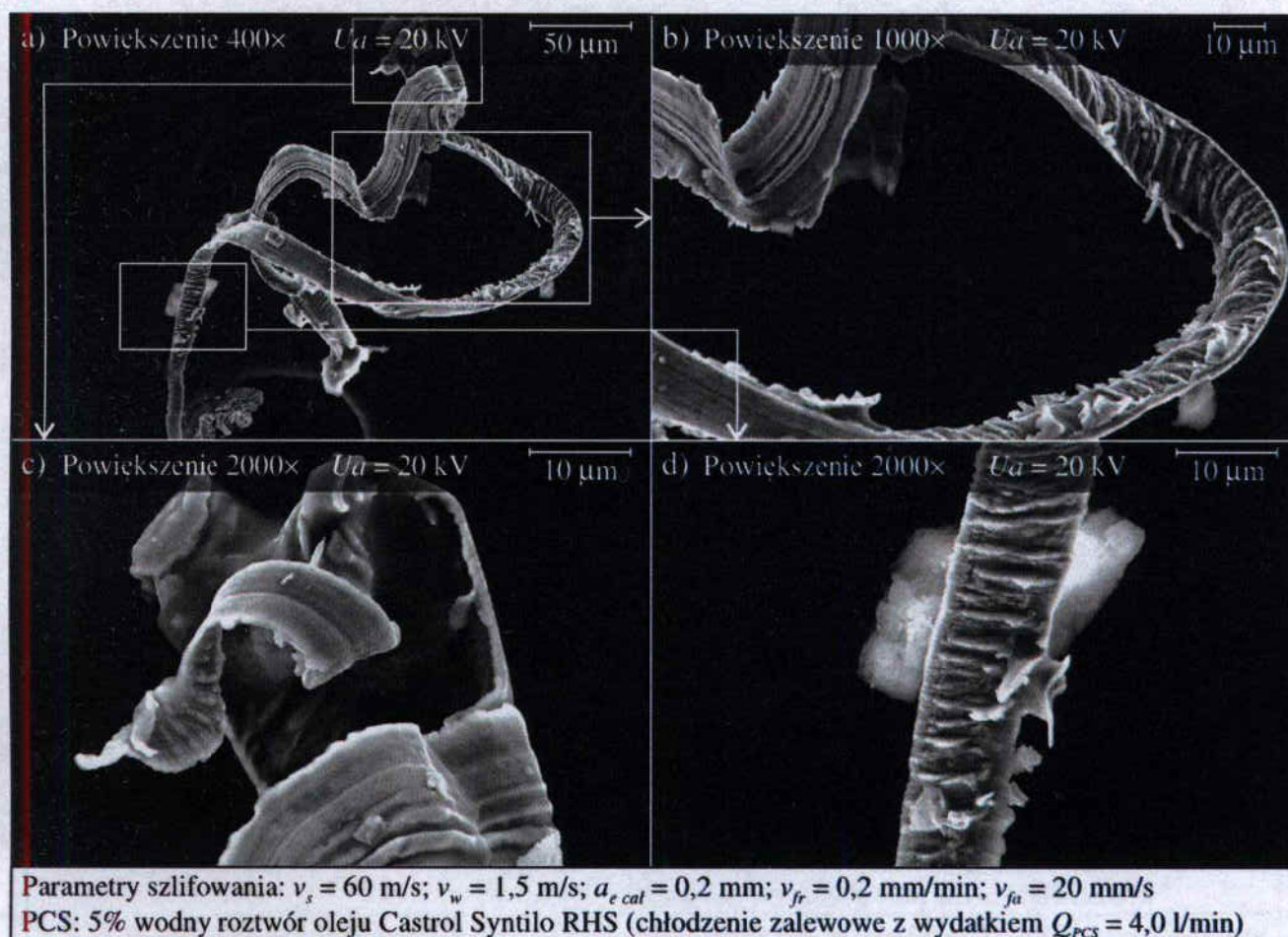


Rys. 4.38. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem odmiany A po usunięciu  $46\,400\text{ mm}^3$  materiału obrabianego: a) pow. 50×; b) pow. 200×; c) pow. 500×; d) pow. 500×

Fig. 4.38. Microscopic SEM views of the grinding wheel active surface with the A bond after removing  $46\,400\text{ mm}^3$  of workpiece: a) Mag. 50×; b) Mag. 200×; c) Mag. 500×; d) Mag. 500×

W trakcie szlifowania tworzyły się również znacznie większe wióry, które wyrzucane były ze strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Na rysunku 4.39 przedstawiono widoki mikroskopowe SEM wiórów wstępnych uchwyconych w trakcie obróbki ściernicą ze spoiwem odmiany A. Charakteryzują się one długością rzędu  $500\text{ }\mu\text{m}$ , wynikającą z długiej drogi styku ziaren ściernych z materiałem obrabianym w badanym procesie szlifowania otworów. Znaczna długość wiórów wynika również z właściwości szlifowanej stali 100Cr6 oraz świadczy o relatywnie dużym zagłębianiu się

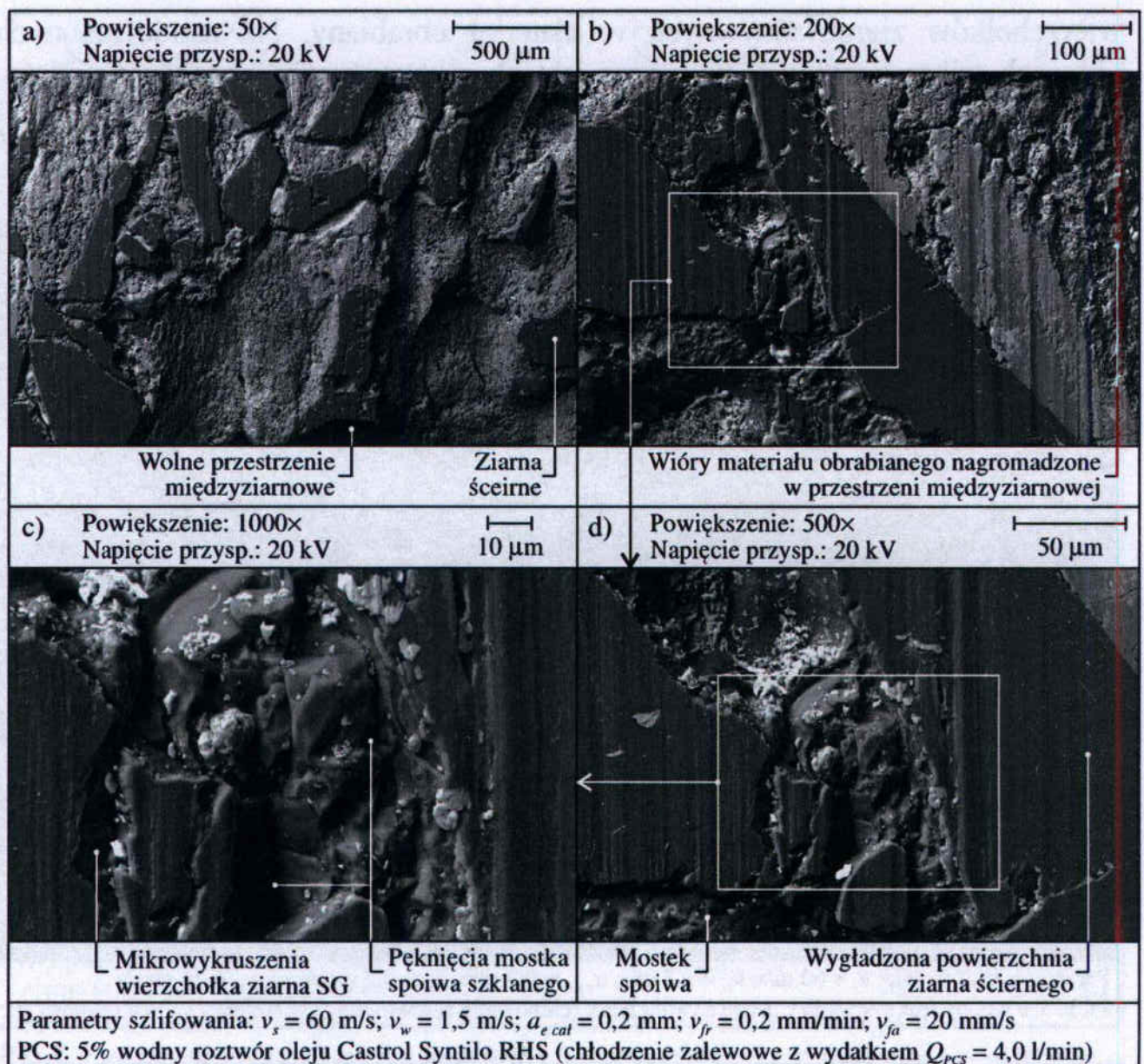
wierzchołków ziaren aktywnych w materiał obrabiany. Na zamieszczonych obrazach mikroskopowych widoczne jest charakterystyczne spęczanie wiórów z wyraźnie zaznaczonymi płaszczyznami poślizgu od górnej strony (rys. 4.39d) i gładką powierzchnią od spodu wióra (rys. 4.39c).



Rys. 4.39. Wióry materiału obrabianego (stali 100Cr6) uchwycone w trakcie szlifowania wglębego z oscylacjami prowadzonego z użyciem ściernicy ze spoiwem A: a) pow. 400×; b) pow. 1000×; c, d) pow. 2000×

Fig. 4.39. Chips of the workpiece (100Cr6 steel) caught during internal cylindrical plunge grinding with oscillations conducted using grinding wheel with bond type A: a) Mag. 400×; b) Mag. 1000×; c, d) Mag. 2000×

Na obrazach czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem S, zamieszczonych na rysunku 4.40, widać duży udział stępionych i wygładzonych ziaren ściernych – większy niż miało to miejsce w przypadku ściernicy A. Płaskie powierzchnie starcia wierzchołków ziaren świadczą o tym, że warunki w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym były trudne i spowodowały uplastycznienie wierzchołków ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego [208]. Zjawisko to wystąpiło pomimo relatywnie niedużej wydajności ubytkowej szlifowania, wynoszącej  $Q_w = 7,14$  mm<sup>3</sup>/s, oraz chłodzenia zalewowego z wydatkiem  $Q_{PCS} = 4,0$  l/min.



Rys. 4.40. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem odmiany S po usunięciu 46 400 mm<sup>3</sup> materiału obrabianego: a) pow. 50×; b) pow. 200×; c) pow. 500×; d) pow. 500×

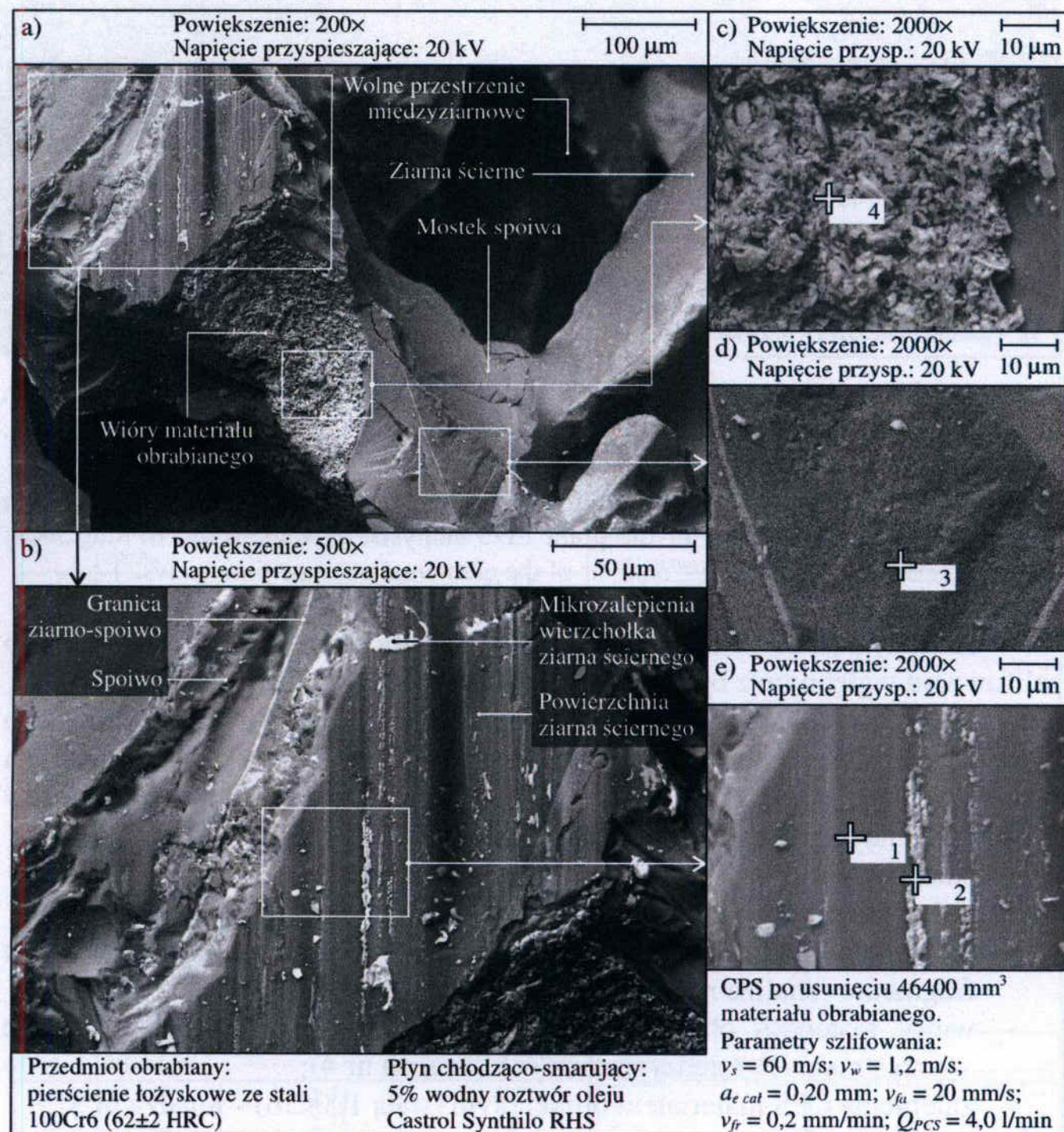
Fig. 4.40. Microscopic SEM views of the grinding wheel active surface with the S bond after removing 46 400 mm<sup>3</sup> of workpiece: a) Mag. 50×; b) Mag. 200×; c) Mag. 500×; d) Mag. 500×

Obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernicy S po szlifowaniu wykazują również wyraźną różnicę w sposobie zużywania się mostków spoiwa w odniesieniu do tworzywa szklanokrystalicznego odmiany A. W spoiwie amorficznym pęknięcia propagują znacznie dalej w głąb spoiwa i powodują wykruszanie jego większych fragmentów (rys. 4.40c).

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe potwierdziły wnioski wyciągnięte na podstawie wykresów wartości rejestrowanych parametrów szlifowania w głębego z oscylacjami, realizowanego z użyciem czterech badanych ściernic.

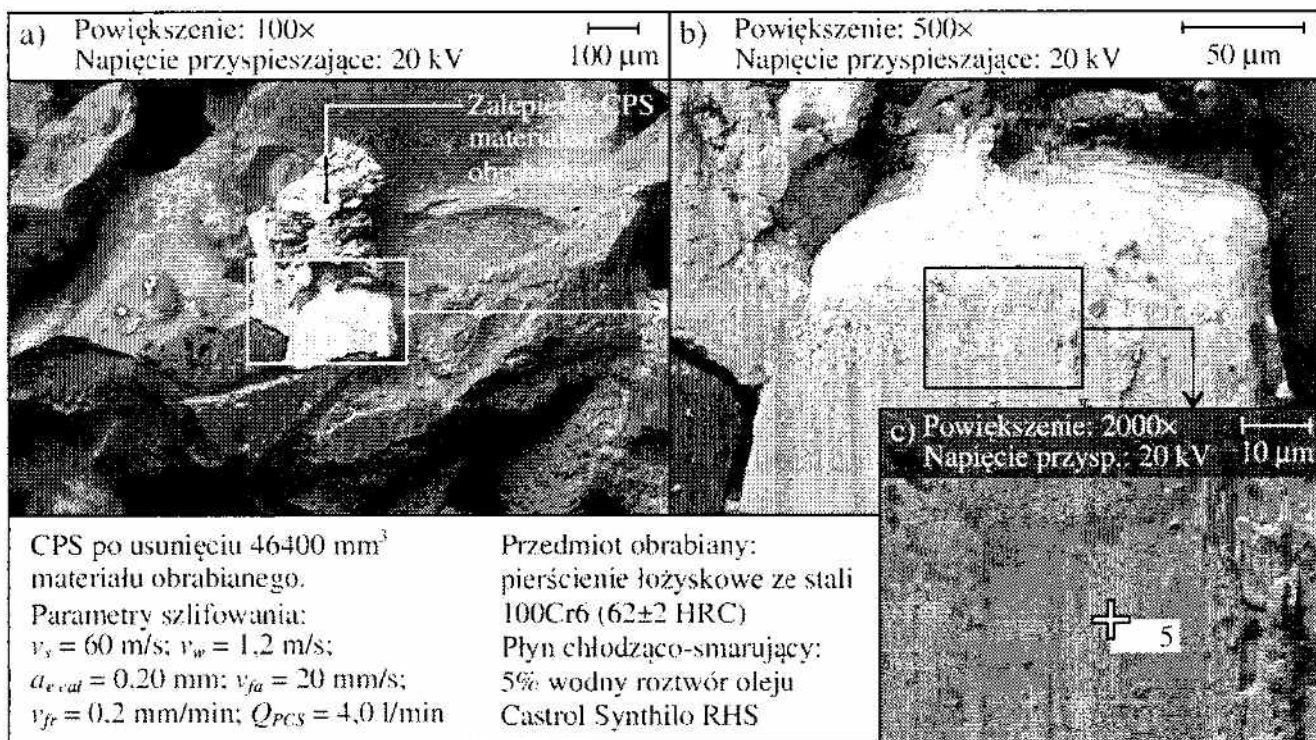
## Analiza czynnej powierzchni ściernicy metodą EDS

W celu potwierdzenia wizualnej identyfikacji charakterystycznych obiektów na CPS widocznych na obrazach mikroskopowych, wykonano analizy punktowe składu pierwiastkowego metodą dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) w miejscach zaznaczonych na rysunku 4.41 i 4.42.



Rys. 4.41. Obrazy mikroskopowe CPS ze spoiwem B z zaznaczonymi miejscami analizy punktowej EDS (1-4): a) pow. 200×; b) pow. 500×; c-e) pow. 2000×

Fig. 4.41. Microscopic views of the grinding wheel active surface with B bond with marked locations of the point EDS analysis (1-4): a) Mag. 200×; b) Mag. 500×; c-e) Mag. 2000×



Rys. 4.42. Obrazy mikroskopowe CPS ze spoiwem B z zaznaczonym miejscem przeprowadzonej analizy punktowej EDS: a) pow. 100×; b) pow. 500×; c) pow. 2000× (5 – numer analizy składu pierwiastkowego)

Fig. 4.42 Microscopic views of the grinding wheel active surface with B bond with marked locations of the point EDS analysis: a) Mag. 100×; b) Mag. 500×; c) Mag. 2000× (5 – number of the elemental composition analysis)

Analizy punktowe EDS wykonane zostały na powierzchni ściernicy B, po szlifowaniu wgłębnym z oscylacjami stali 100Cr6 ( $V_w = 39440$  mm<sup>3</sup>).

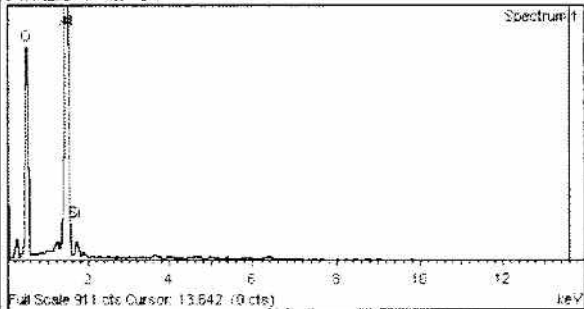
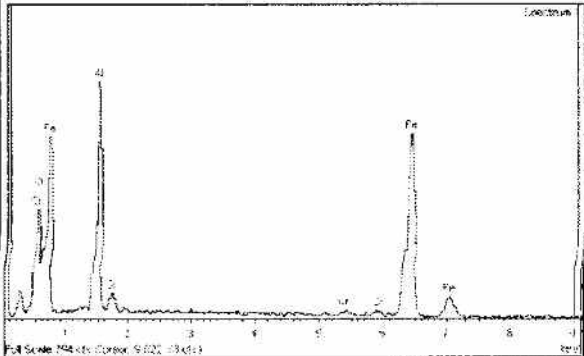
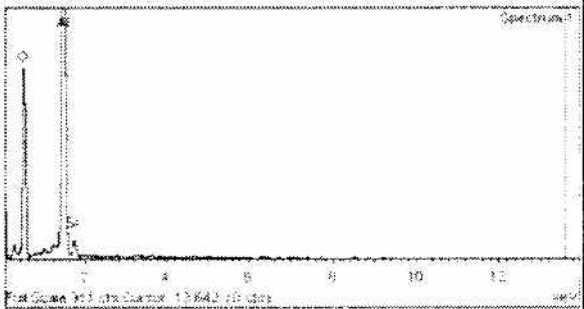
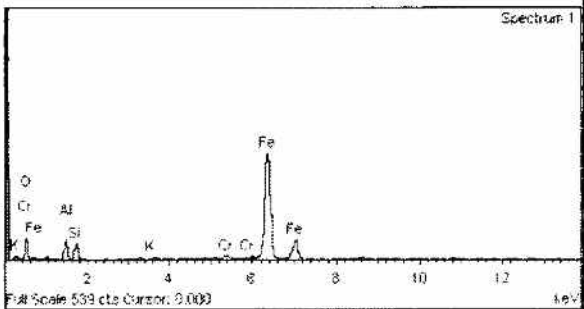
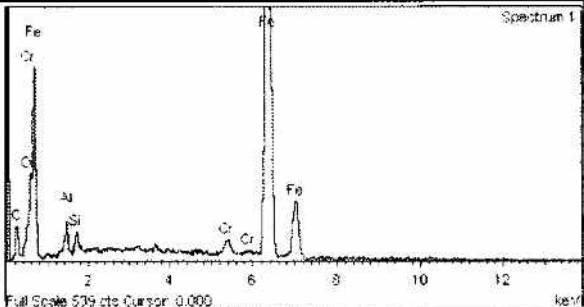
W tabeli 4.8 zestawiono wyniki analiz EDS składu pierwiastkowego wykonanych dla pięciu punktów pomiarowych na CPS, zaznaczonych na rysunkach 4.41c-e i 4.42c. Analizy dotyczyły charakterystycznych obiektów zaobserwowanych na CPS, takich jak [228]:

- starte i wygładzone wierzchołki ziaren ściernych (analiza nr 1);
- mikrozalepienia wierzchołków ziaren (analiza nr 2);
- powierzchnie ziaren ściernych w miejscach wykruszenia znacznego ich fragmentu (analiza nr 3);
- wióry materiału obrabianego i produkty zużycia ściernicy zalegające w przestrzeniach międzyziarnowych (analiza nr 4);
- zalepienia CPS materiałem obrabianym (stalą 100Cr6) – analiza nr 5.

Wyniki analizy nr 1 i 3 wyraźnie wskazują, że badane powierzchnie zbudowane są z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o czym świadczą proporcje udziału atomowego tlenu i glinu. Analizy te wykazały również śladowy udział krzemu, który jako tlenek SiO<sub>2</sub> występuje w ziarnach SG<sup>TM</sup> (na granicach mikrokryształów [184]) oraz jest podstawowym składnikiem spoiwa [94].

Tab. 4.8. Wyniki analiz składu pierwiastkowego wykonanych metodą EDS dla pięciu punktów pomiarowych na czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem B

Tab. 4.8. Results of elemental composition analysis of the five measured points on the grinding wheel active surface with B bond, carried out by EDS method

Nr analizy	Skład pierwiastkowy			Widmo EDS
	Pierwiastek	Udział wagowy, %	Udział atomowy, %	
1	O	54,13	66,60	
	Al	43,73	31,91	
	Si	2,13	1,49	
	Razem	100,00	100,00	
	Opis: wygładzona powierzchnia ziarna ściernego			
2	O	20,83	40,32	
	Al	24,49	28,10	
	Si	2,24	2,47	
	Cr	0,72	0,43	
	Fe	51,73	28,68	
	Razem	100,00	100,00	
	Opis: mikrozałepienie na startej powierzchni ziarna			
3	O	54,18	66,65	
	Al	43,33	31,60	
	Si	2,50	1,75	
	Razem	100,00	100,00	
	Opis: powierzchnia ziarna ściernego w miejscu wykruszenia			
4	O	11,41	28,56	
	Al	5,73	8,51	
	Si	4,51	6,43	
	K	0,78	0,80	
	Cr	1,35	1,04	
	Fe	76,21	54,56	
	Razem	100,00	100,00	
	Opis: wióry stali 100Cr6 i produkty zużycia ściernicy			
5	O	2,72	8,53	
	Al	2,71	5,04	
	Si	1,46	2,61	
	Cr	1,60	1,54	
	Fe	91,52	82,29	
	Razem	100,00	100,00	
	Opis: załepienie CPS materiałem obrabianym (stal 100Cr6)			



Analiza nr 2 dotyczyła mikrozałepienia na startym wierzchołku ziarna. Obecność żelaza i chromu wskazuje, że załepienie składa się przede wszystkim z wiórów materiału obrabianego (stali 100Cr6 [113]). Ponieważ załepienie występuje na ziarnie, analiza wykazała również główne pierwiastki wchodzące w skład korundu (Al i O), a także krzem występujący zarówno w ziarnach, jak i w spoiwie.

Ze składu pierwiastkowego analizy nr 4 wynika, że w przestrzeni międzyziarnowej CPS zalegają głównie wióry materiału obrabianego, na co wskazuje duży udział żelaza i występowanie chromu. W wyniku analizy zidentyfikowano także pierwiastki (Al, Si, K, O) wchodzące w skład związków tworzących ziarno ściernie i spoiwo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), co oznacza, że w badanym obszarze CPS znajduje się również pokruszone spoiwo i fragmenty ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane.

Ostatnia analiza dotyczyła załepienia CPS umiejscowionego w pobliżu startego wierzchołka ziarna ściernego (analiza nr 5). Wynika z niej, że głównym składnikiem załepienia są wióry stali 100Cr6 (Fe i Cr stanowią ponad 93% udziału wagowego i niecałe 84% udziału atomowego). Pozostałą część stanowią Al, Si i O, wchodzące w skład ziarna ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i spoiwa ( $\text{SiO}_2$ ).

Przeprowadzone analizy EDS składu pierwiastkowego potwierdziły prawidłową identyfikację składników CPS obserwowanych na obrazach mikroskopowych SEM.

### **4.3. Modyfikacja geometrii czynnej powierzchni ściernicy poprzez kształtowanie jej mikronieciągłości**

Nieciągłości kształtowane na czynnej powierzchni ściernicy można podzielić na makro- i mikronieciągłości. Nieciągłości rozumiane w skali makro to takie, które wpływają na zmianę kształtu czynnej powierzchni narzędzia ściernego. Występują one najczęściej w postaci lokalnych wybrań, przesunięć powierzchniowych i uskoków. Tego typu nieciągłości są najczęściej kształtowane w operacjach skrawania, wygniatania, wykuszania lub w procesie formowania na etapie wytwarzania [140, 149]. Makronieciągłości mają przede wszystkim na celu poprawę właściwości eksploatacyjnych narzędzia. Jak podano w pracy [175], mają one doskonały efekt chłodzący, dzięki czemu redukuje się uszkodzenia cieplne powierzchni obrobionej z ich użyciem, takie jak mikropęknięcia lub przypalenia szlifierskie. W pracy [179] wykazano, że zastosowanie ściernicy z makronieciągłościami w procesie czołowego szlifowania ceramiki pozwala na obniżenie temperatury w strefie szlifowania o około 40-80%, co znacząco wpływa również na trwałość ściernicy.

W literaturze kierunkowej można znaleźć również przykład połączenia makronieciągłości CPS z systemem podawania płynu chłodzącego od wewnątrz ściernicy [278]. Jak wykazano następnie w pracy [280] rozwiązanie takie

pozwoili zwiększyć wydajność ubytkową szlifowania przy jednoczesnym zredukowaniu wydatku chłodziwa i wyeliminowaniu zjawiska zalepiania CPS.

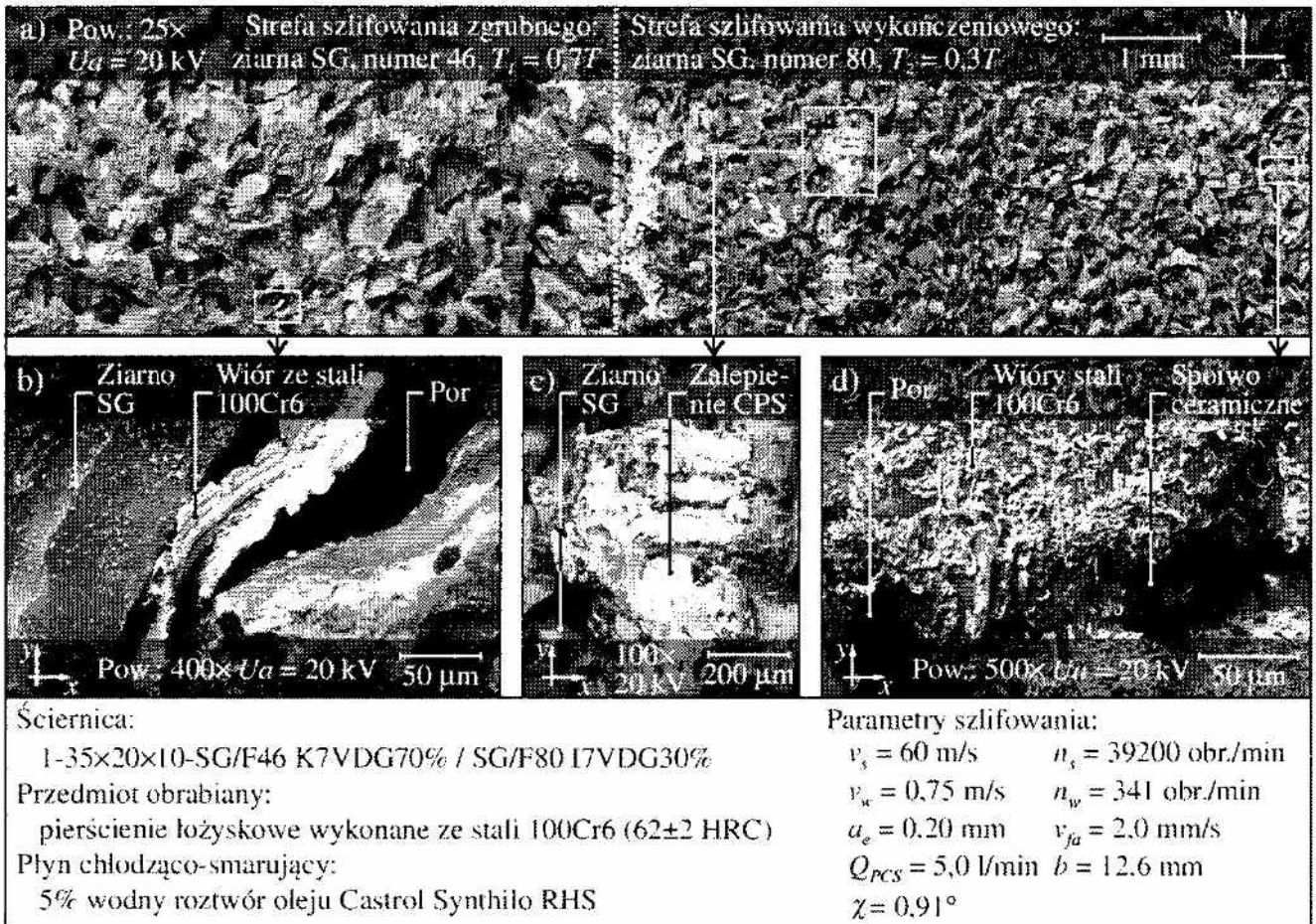
Jednakże, przy stosowaniu ściernic z makronieciągłościami napotkać można również kilka problemów. Najbardziej istotny jest wpływ zakończeń nieciągłości, które mogą powodować drgania układu obróbkowego. Makronieciągłości zmniejszają również powierzchnię czynną ściernicy, co skutkuje jej zwiększonym obciążeniem [350].

Nieciągłości typu mikro wprowadzają jedynie lokalne nieciągłości w strukturze powierzchniowej narzędzia, bez ingerencji w jego makrogeometrię. Mają one najczęściej kształt rowków i wgłębień o regularnym rozmieszczeniu. W pracy [315] określone konfiguracje mikronieciągłości uzyskiwane były przez specjalne zabiegi obciążania. Wprowadzenie mikronieciągłości ma przede wszystkim na celu takie ukształtowanie pracujących fragmentów CPS, które po odwzorowaniu na powierzchni obrabianej wpłyną korzystnie na stan jej właściwości eksploatacyjnych. Chodzi tu najczęściej o zmniejszenie tarcia, wchłanianie zanieczyszczeń, dodatkowe rozwinięcie powierzchni w celu poprawy przyczepności powłok ochronnych lub o efekty dekoracyjne.

Zastosowanie ściernic z mikronieciągłościami czynnej powierzchni korzystnie wpływa na przebieg i wyniki procesu szlifowania płaszczyzn oraz na trwałość ściernicy [315]. Wykazano korzystniejszy rozkład energii cieplno-mechanicznej w strefie szlifowania, lepsze odprowadzenie z niej ciepła oraz produktów zużycia i wiórów materiału obrabianego, a także bardziej wydajne doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego.

Opisane cechy mikronieciągłości CPS mogą być szczególnie przydatne w jednoprzeciowym szlifowaniu otworów, którego opis zamieszczony został w podrozdziale 4.1 niniejszej pracy. Wyniki badań tego procesu prowadzonych z użyciem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie (podrozdział 4.1.5) wykazały, że charakteryzuje się on dużym obciążeniem czynnej powierzchni ściernicy, głównie w strefie szlifowania zgrubnego. Na rysunku 4.43 przedstawione zostały obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie po jednoprzeciowym szlifowaniu otworów w stali 100Cr6.

Ponieważ w strefie stożkowej ściernicy usuwany jest materiał z relatywnie dużą wydajnością, kształtowane były tam wielokrotnie większe wióry (rys. 4.43c), niż miało to miejsce w drobnoziarnistej walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (rys. 4.43e). Stosowana w procesie jednoprzeciowym podwyższona wydajność ubytkowa spowodowała, że nagromadzone w strefie obróbki produkty szlifowania zalepiają CPS (rys. 4.43d). Długa droga styku utrudnia docieranie płynu chłodząco-smarującego do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym, co może powodować niepożądany wzrost temperatury i dodatkowo sprzyjać adhezji wiórów materiału obrabianego do CPS.



Rys. 4.43. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie po jednorzędowym szlifowaniu otworów w stali 100Cr6: a) strefa graniczna pomiędzy strefą szlifowania zgrubnego i wykończeniowego – pow. 25×; b) wiór na powierzchni strefy szlifowania zgrubnego – pow. 400×; c) zalepienie CPS – pow. 100×; d) wióry na powierzchni strefy szlifowania wykończeniowego – pow. 500×

Fig. 4.43. SEM microphotography of active surface of the grinding wheel with zone-diversified structure after internal deep traverse grinding of 100Cr6 steel: a) border between rough and finish grinding zone – Mag. 25×; b) chip on the surface of the rough grinding zone – Mag. 400×; c) smear of the grinding wheel active surface – Mag. 100×; d) chips on the surface of the finish grinding zone – Mag. 500×

Analiza wyników badań przedstawionych w podrozdziale 4.1 wskazuje na konieczność modyfikacji opracowanych ściernic, w celu ograniczenia zjawiska zalepiania CPS wiórami materiału obrabianego i wydłużenia okresu trwałości ściernicy. Jedną z możliwych modyfikacji budowy ściernicy polegała na ukształtowaniu mikronieciągłości w najbardziej obciążonej strefie szlifowania zgrubnego ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie.

### 4.3.1. Metody kształtowania mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie

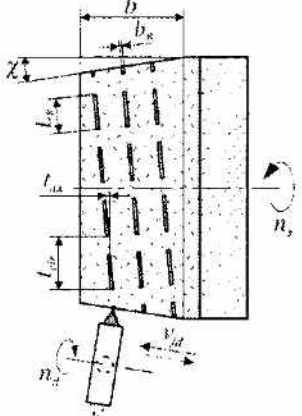
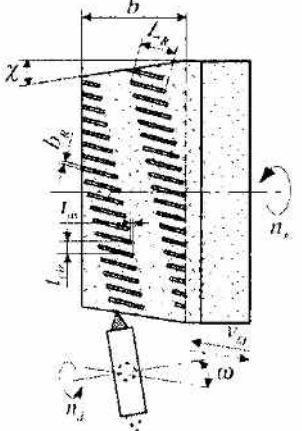
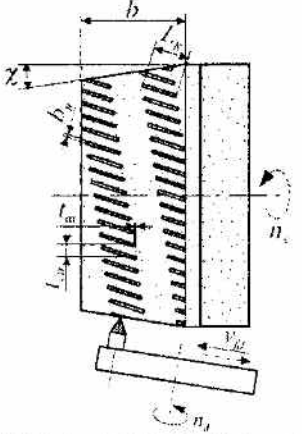
W pracy [315, 319, 320] przedstawiono metody kształtowania mikronieciągłości o różnym kształcie i ułożeniu przestrzennym na CPS, które polegają na lokalnym usuwaniu materiału ściernicy z użyciem obciążacza jednoostrzowego lub wieloostrzowego. Zabieg ten jest realizowany bezpośrednio po obciążaniu ściernicy i nie wpływa na jej makrogeometrię. W tabeli 4.9 przedstawiono schematy kinematyki wraz z parametrami kształtowania mikronieciągłości z użyciem obciążacza jednoostrzowego (tab. 4.9a-e) i obciążacza wieloostrzowego (tab. 4.9f-g). Metody te dostosowano do warunków występujących przy kształtowaniu mikronieciągłości na powierzchni strefy stożkowej ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie.

W metodach kształtowania mikronieciągłości za pomocą narzędzi jednoostrzowych, narzędzia te mogą wykonywać ruch obrotowy (tab. 4.9a-d) lub oscylacyjny (tab. 4.9e). Zarówno długość wgłębień, jak i ich konfiguracja (podziałka obwodowa i osiowa), mogą być regulowane w szerokim zakresie za pomocą zmiany prędkości obrotowej ściernicy  $n_s$  i obciążacza  $n_d$  oraz prędkości jego ruchu posuwowego  $v_{fad}$ . Wspólną cechą wszystkich metod kształtowania mikronieciągłości za pomocą narzędzi jednoostrzowych, jest możliwość sterowania zarówno kształtem, jak i rozmieszczeniem rowków i wgłębień na powierzchni ściernicy. Ponadto metody te umożliwiają również kształtowanie nominalnego (wyjściowego) zarysu czynnej powierzchni ściernicy za pomocą tych samych narzędzi, jedynie po zatrzymaniu ich ruchu roboczego.

Istota metod kształtowania mikronieciągłości przy użyciu obciążaczy wieloostrzowych polega na kształtowaniu pojedynczych wgłębień na CPS przez oddziaływanie na nią zbiorem elementów roboczych (np. ziaren ściernych). Zastosowane obciążacze wieloostrzowe charakteryzują się zmiennym promieniem działania uzyskiwanym przez mimośrodowe osadzenie ich osi obrotu (tab. 4.9f) lub przez wprowadzenie bicia czołowego i obwodowego (tab. 4.9g). Kształtowanie mikronieciągłości takimi obciążaczami pozwala na równomierny podział usuwanej objętości ściernicy na poszczególne ziarna obciążacza, przy zapewnieniu ich relatywnie małego obciążenia. Cechy te sprzyjają małemu zużyciu obciążacza wieloostrzowego i zapewniają jego długi okres trwałości. Wynika z tego, że metody te mogą być szczególnie przydatne do kształtowania mikronieciągłości na czynnych powierzchniach ściernic wykonanych z ziaren supertwardych.

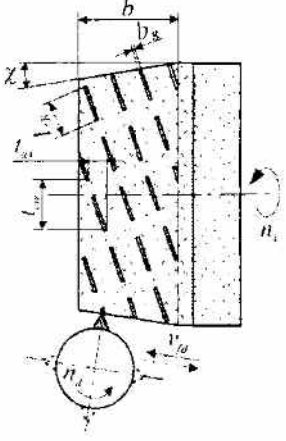
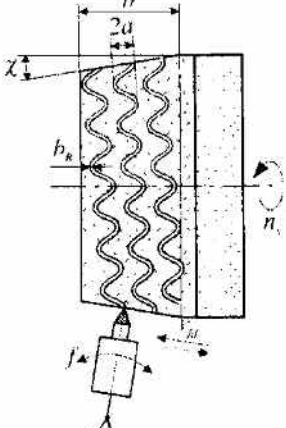
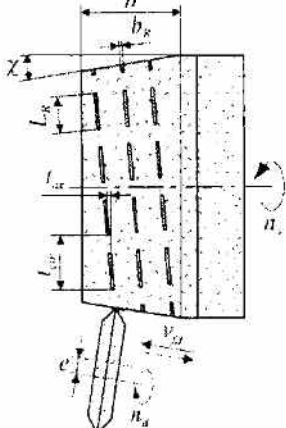
Tab. 4.9. Metody kształtowania mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z użyciem: a-e) obciągacza jednoostrzowego; f-g) obciągacza wieloostrowego

Tab. 4.9. Methods of shaping of the microdiscontinuities on the active surface of grinding wheels with zone-diversified structure: a-e) using single-grain dresser; f-g) using dressing wheel

Metoda kształtowania mikronieciągłości	Parametry mikronieciągłości
<p>a)</p> 	$L_R \approx 2d_d \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{v_{fd} n_d}{v_d}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{d_s u_d}{d_d(d_s + d_d)}}$ $t_{cir} = \pi d_s - \pi d_d \frac{v_s}{v_d i}; \quad t_{ax} = \frac{v_{fd}}{n_d i}$ $b_R = c + 2a_d \cdot tg \varepsilon_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} r}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi \cdot d_s \cdot T} \cdot 100;$ $0,8 < k < 0,9$
<p>b)</p> 	$L_R \approx d_d \sqrt{\left(\cos \omega \pm \frac{f_d n_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{v_s}{v_d}\right)^2} \cdot \varphi$ $\varphi \approx \frac{n_d}{n_s} \arccos \left(1 - \frac{2a_d}{d_s}\right)$ $t_{cir} = \pi d_s - \pi d_d \frac{v_s}{v_d i}; \quad t_{ax} = \frac{v_{fd}}{n_d i}$ $b_R = c + 2a_d \cdot tg \varepsilon_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} r}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi \cdot d_s \cdot T} \cdot 100;$ $0,7 < k < 0,9$
<p>c)</p> 	$L_R \approx d_d \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{f_d n_s}{v_d}\right)^2} \cdot \varphi$ $\varphi \approx \frac{n_d}{n_s} \arccos \left(1 - \frac{2a_d}{d_s}\right)$ $t_{cir} = \pi d_s - \pi d_d \frac{v_s}{v_d i}; \quad t_{ax} = \frac{v_{fd}}{n_d i}$ $b_R = c + 2a_d \cdot tg \varepsilon_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} r}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi \cdot d_s \cdot T} \cdot 100;$ $0,7 < k < 0,9$

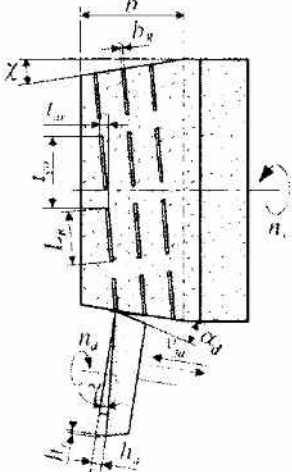
Tab. 4.9. Metody kształtowania mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z użyciem: a-e) obciągacza jednoostrzowego; f-g) obciągacza wieloostrzowego – *ciąg dalszy*

Tab. 4.9. Methods of shaping of the microdiscontinuities on the active surface of grinding wheels with zone-diversified structure: a-e) using single-grain dresser; f-g) using dressing wheel – *continued*

Metoda kształtowania mikronieciągłości	Parametry mikronieciągłości
<p>d)</p> 	$L_R \approx \sqrt{d_d^2 \left(1 \pm \frac{f_d n_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{d_s n_s}{n_d}\right)^2} \cdot \varphi$ $\varphi \approx \frac{n_d}{n_s} \arccos\left(1 - \frac{2a_d}{D}\right)$ $t_{cir} = \pi d_s - \pi d_d \frac{v_s}{v_d i}; \quad t_{ax} = \frac{v_f d}{n_d i}$ $b_R = c + 2a_d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} r}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi \cdot d_s \cdot T} \cdot 100;$ $0,8 < k < 0,9$
<p>e)</p> 	$L_T \approx \frac{\pi}{3j} \left(2d_s + \sqrt{(d_s^2 + 4a^2 \cdot j^2)}\right)$ $b_R = c + 2a_d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon_d$ $S = \frac{\pi \cdot b_R}{3j} \left(2d_s + \sqrt{(d_s^2 + 4a^2 \cdot j^2)}\right)$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{j \cdot S}{\pi \cdot d_s \cdot f_d} \cdot 100$
<p>f)</p> 	$L_R \approx d_d \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{f_d n_s}{v_d}\right)^2} \cdot \varphi$ $\varphi \approx \arccos \operatorname{tg} \left(\frac{\sqrt{a_d(2e-a_d)}}{(e-a_d)}\right)$ $t_{cir} = \pi d_d \frac{v_s}{v_d}; \quad t_{ax} = f_d \frac{n_s}{n_d}$ $b_R = c + 2a_d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} r}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi \cdot d_s \cdot T} \cdot 100;$ $0,7 < k < 0,9$

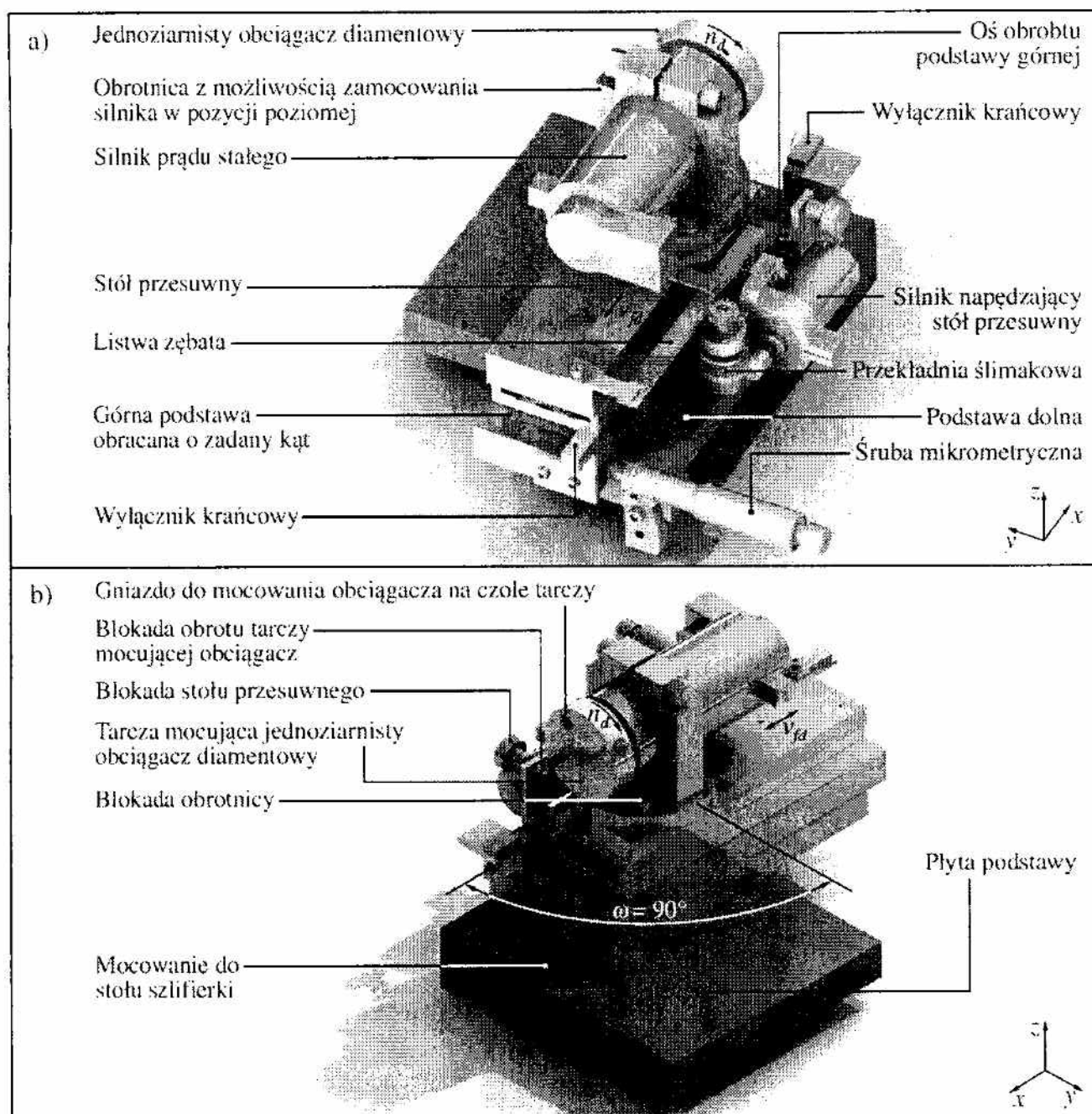
Tab. 4.9. Metody kształtowania mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z użyciem: a-e) obciążacza jednoostrzowego; f-g) obciążacza wielostrzowego – *ciąg dalszy*

Tab. 4.9. Methods of shaping of the microdiscontinuities on the active surface of grinding wheels with zone-diversified structure: a-e) using single-grain dresser; f-g) using dressing wheel – *continued*

Metoda kształtowania mikronieciągłości	Parametry mikronieciągłości
<p>g)</p> 	$L_R \approx d_d \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{f d_d n_s}{v_d}\right)^2} \cdot \varphi$ $\varphi \approx \arcsin \sqrt{\frac{2a_d}{d_d} \operatorname{ctg} \gamma \operatorname{ctg} \alpha_d}$ $t_{cir} = \pi d_d \frac{v_s}{v_d}; \quad t_{ax} = f d_d \frac{n_s}{n_d}$ $b_R = 2a_d \cdot \operatorname{ctg} \alpha_d; \quad h_a = d_d \operatorname{tg} \gamma$ $h_r = d_d \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \alpha_d; \quad r = \frac{\pi d_s}{t_{cir}}; \quad z = \frac{T}{t_{ax} T}$ <p>Względna pow. mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z_m}{\pi d_s T} \cdot 100;$ $0,6 < k < 0,8$
<p>Opis oznaczeń:</p> <p><math>2a</math> – amplituda rowka sinusoidalnego, mm</p> <p><math>a_d</math> – głębokość obciążania, mm</p> <p><math>A_R</math> – względna powierzchnia mikronieciągłości, mm<sup>2</sup></p> <p><math>b</math> – szerokość nakroju stożkowego, mm</p> <p><math>b_R</math> – szerokość wgłębienia, mm</p> <p><math>c</math> – szerokość starcia wierzchołka obciążacza, mm</p> <p><math>d_s</math> – średnica zewnętrzna ściernicy, mm</p> <p><math>d_d</math> – średnica zewnętrzna obciążacza, mm</p> <p><math>e</math> – wartość mimośrodów, mm</p> <p><math>f</math> – częstotliwość oscylacji obciążacza, Hz</p> <p><math>h_r</math> – wartość bicia promieniowego, mm</p> <p><math>h_a</math> – wartość bicia osiowego, mm</p> <p><math>i</math> – liczba obciążaczy jednoziarnistych na obwodzie</p> <p><math>j</math> – liczba oscylacji, 1/obr.</p> <p><math>L_R</math> – długość nacinanego rowka, mm</p> <p><math>L_T</math> – długość rowka w okresie <math>T_d</math> ruchu oscylacyjnego, mm</p> <p><math>n_d</math> – prędkość obrotowa obciążacza, obr./min</p> <p><math>n_s</math> – prędkość obrotowa ściernicy, obr./min</p> <p><math>r</math> – liczba wgłębien na obwodzie ściernicy</p>	<p><math>S</math> – powierzchnia rowka w okresie <math>T_d</math> ruchu oscylacyjnego, mm<sup>2</sup></p> <p><math>t_{ax}</math> – podziałka osiowa, mm</p> <p><math>t_{cir}</math> – podziałka obwodowa, mm</p> <p><math>T</math> – wysokość ściernicy, mm</p> <p><math>v_d</math> – prędkość obwodowa obciążacza, m/s</p> <p><math>v_{jd}</math> – prędkość posuwu osiowego obciążacza, obr./min</p> <p><math>v_s</math> – prędkość obwodowa ściernicy, m/s</p> <p><math>z_m</math> – liczba zwojów wgłębien na szerokości ściernicy</p> <p><math>\alpha_d</math> – kąt nakroju stożkowego narzędzia kształtującego, °</p> <p><math>\chi</math> – kąt nakroju stożkowego, °</p> <p><math>\gamma</math> – kąt ścięcia czoła narzędzia kształtującego, °</p> <p><math>\varepsilon_d</math> – kąt wierzchołkowy obciążacza, °</p> <p><math>\varphi</math> – kąt pracy obciążacza, °</p> <p><math>\omega</math> – kąt obrotu osi obciążacza, °</p> <p>+ (–) – w przypadku zgodnego (przeciwnieznego) kierunku obrotów ściernicy i obciążacza</p>

### 4.3.2. Przyrząd do precyzyjnego kształtowania makro- i mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy

W celu precyzyjnego kształtowania na CPS mikronieciągłości konieczne było opracowane specjalnego przyrządu, który umożliwiałby jednocześnie kształtowanie makrogeometrii ściernicy – zarysu stożkowo-walcowego wymaganego w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów (rys. 4.44).



Rys. 4.44. Model urządzenia do precyzyjnego kształtowania makro- i mikrogeometrii ściernicy – konfiguracja z poziomą osią wrzeciona [223, 260]: a) widok z przodu; b) widok z tyłu

Fig. 4.44. 3D model of device for precision shaping of the grinding wheel macro- and microgeometry – setup with horizontal axis of the spindle [223, 260]: a) front view; b) rear view



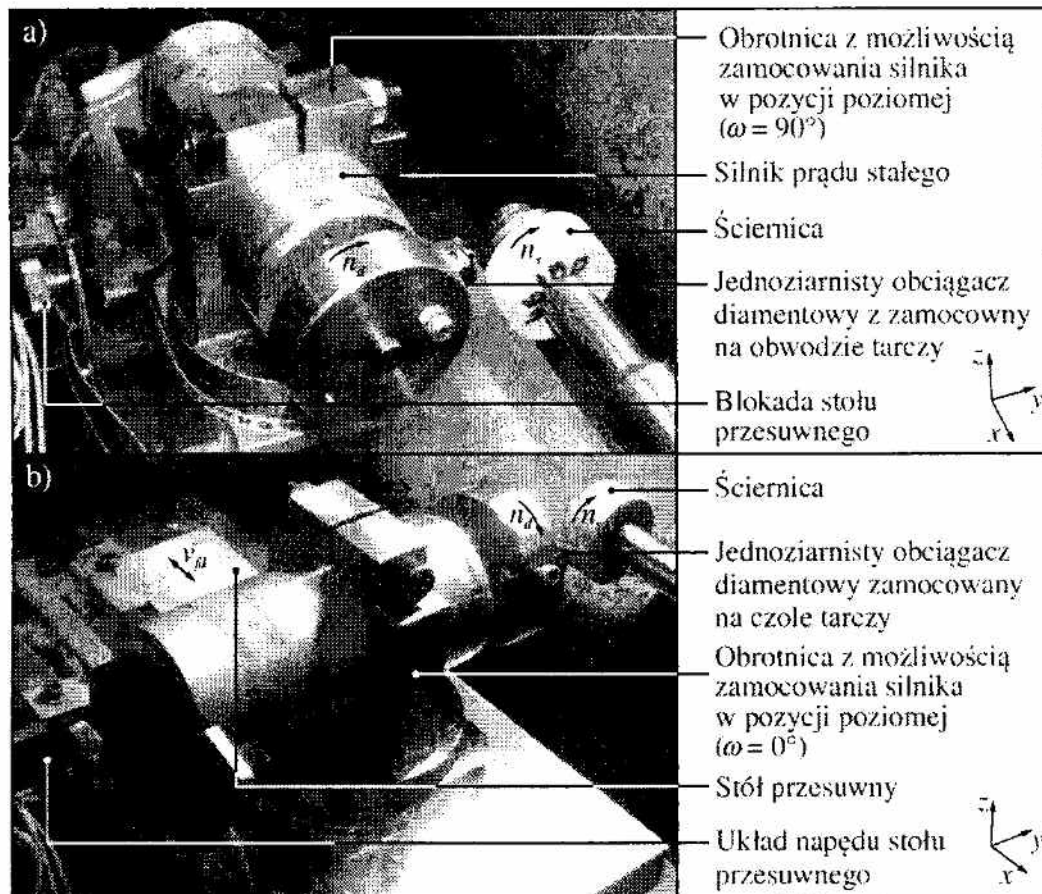
Opracowaną konstrukcję takiego przyrządu zgłoszono do ochrony patentowej w 2009 roku [260]. Kształtowanie CPS w operacji obciągania podzielone zostało na trzy zabiegi, w których kształtowane są: powierzchnia walcowa, nakrój stożkowy i mikronieciągłości [239].

W pierwszym wariantcie konstrukcji urządzenia silnik prądu stałego YDK YA-010 firmy Yamamoto Electric Corp., napędzający tarczę z jednoziarnistym obciągaczem diamentowym, został zamocowany poziomo (oś obrotu równoległa do podstawy) – rys. 4.44. Główny ruch roboczy wykonywany jest przez tarczę wirującą z prędkością  $n_d$ , do której zamocowany został obciągacz. Tarcza mocująca wyposażona została w dwa gniazda pozwalające na zamocowanie obciągacza na jej obwodzie oraz na czole tarczy. Pozwala to na realizację zabiegu kształtowania mikronieciągłości wg kinematyki przedstawionej w tabeli 4.9a-c. Dodatkowo tarczę wyposażono w blokadę, pozwalającą na jej unieruchomienie w odpowiedniej pozycji, niezbędne przy zabiegu kształtowania nakroju stożkowego.

Stolik przesuwny wprawiany jest w ruch prostoliniowo-zwrotny z prędkością  $v_{fd}$  przez układ napędowy. Dodatkowo urządzenie wyposażono w blokadę stołu przesuwego, która umożliwia kształtowanie walcowej strefy CPS z wykorzystaniem osiowego posuwu stołu szlifierki. Stół przesuwny zamocowany został na obrotowej podstawie górnej, której kąt obrotu regulowany jest przy użyciu śruby mikrometrycznej zamocowanej do dolnej podstawy. Wszystkie elementy urządzenia zamocowano na płycie mocującej, która pozwala na przytwierdzenie urządzenia do stołu roboczego szlifierki.

Prototyp urządzenia (rys. 4.45) wykonany zgodnie z opisanym wyżej projektem zamocowany został w przestrzeni roboczej szlifierki uniwersalnej RUP 28P opisanej szerzej w podrozdziale 4.1.2. Silnik zamocowany został do stolika przesuwego za pośrednictwem stołu obrotowego, który umożliwia obrót osi silnika w płaszczyźnie podstawy o kąt  $\omega = 0-90^\circ$ . Poszerza to funkcjonalność urządzenia i umożliwia kształtowanie mikronieciągłości w kinematyce przedstawionej w tabeli 4.9b-c.

Rysunek 4.45a przedstawia urządzenie ze stołem obrotowym ustawionym pod kątem  $\omega = 90^\circ$ , zablokowanym ruchem obrotowym tarczy mocującej obciągacza oraz zablokowanym ruchem stolika przesuwego. Takie ustawienie pozwala na wykonanie pierwszego zabiegu operacji kształtowania CPS, polegającego na obciągnięciu strefy walcowej ściernicy z użyciem posuwu stołu szlifierki. W kolejnym zabiegu ukształtowany zostaje nakrój stożkowy CPS. Możliwe jest to po zwolnieniu blokady i włączeniu ruchu prostoliniowo-zwrotnego stołu przesuwego. Wartość kąta nakroju stożkowego ustawiona zostaje z użyciem śruby mikrometrycznej, natomiast prędkość posuwu stolika  $v_{fd}$  regulowana jest za pomocą zasilacza silnika napędowego.



Rys. 4.45. Urządzenie do precyzyjnego kształtowania makro- i mikrogeometrii ściernicy: a) obrotnica obciągacza ustawiona pod kątem  $\omega = 90^\circ$ ; b) obrotnica obciągacza ustawiona pod kątem  $\omega = 0^\circ$

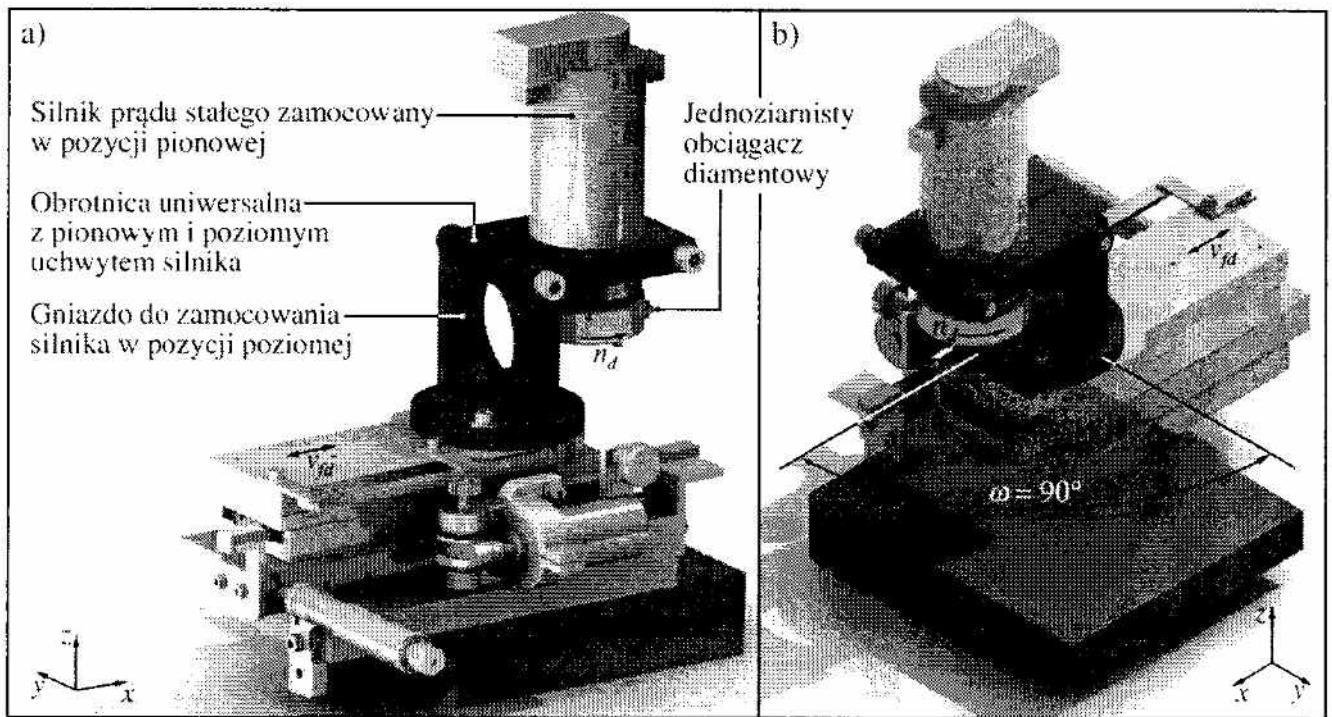
Fig. 4.45. The device for precision shaping of the grinding wheel macro- and microgeometry: a) dresser turntable rotation angle  $\omega = 90^\circ$ ; b) dresser turntable rotation angle  $\omega = 0^\circ$

Ostatnim zabiegiem jest kształtowanie mikronieciągłości CPS, który można wykonać m.in. w konfiguracji odpowiadającej tabeli 4.9c, co zostało zilustrowane na rysunku 4.45b. W tym celu należy zwolnić blokadę obrotów tarczy mocującej obciągacz i ustawić odpowiednie parametry kinematyczne dla uzyskania żadanego efektu.

We wszystkich opisanych wyżej zabiegach kształtowania makrogeometrii i mikronieciągłości CPS, głębokość obciągania regulowana była z użyciem zespołu dosuwu stołu szlifierki.

Przewidziano również rozwiązanie konstrukcyjne pozwalające na kształtowanie mikronieciągłości w układzie przedstawionym w tabeli 4.9d. W tym celu zmieniono konstrukcję uchwytu silnika w taki sposób, żeby umożliwić jego montaż zarówno w pozycji pionowej, jak i poziomej. Opracowane rozwiązanie przedstawiono na rysunku 4.46.

Taka modyfikacja konstrukcji pozwala na kształtowanie mikronieciągłości CPS w czterech odmianach kinematycznych przedstawionych w tabeli 4.9a-d.



Rys. 4.46. Model urządzenia do precyzyjnego kształtowania makro- i mikrogeometrii ściernicy – konfiguracja z pionową osią wrzeciona: a) widok z przodu; b) widok z tyłu

Fig. 4.46. 3D model of device for precision shaping of the grinding wheel macro- and microgeometry – setup with vertical axis of the spindle: a) anterior view; b) posterior view

Opisana konstrukcja urządzenia do obciągania pozwala na precyzyjne kształtowanie makro- i mikrogeometrii czynnych powierzchni ściernic. Przy użyciu jednego urządzenia możliwe jest kształtowanie powierzchni walcowych, precyzyjne kształtowanie nakroju stożkowego o niewielkich wartościach kąta  $\chi = 0-1,5^\circ$ , a także kształtowanie mikronieciągłości CPS w kilku wariantach kinematycznych.

W wyniku przeprowadzonych analiz teoretyczno-doświadczalnych ustalono, że błąd kształtowania nakroju stożkowego w zakresie  $\chi = 0-1,5^\circ$ , przy użyciu opracowanego urządzenia, wynosi w przybliżeniu  $\pm 3\%$ . Potwierdzono również poprawność działania urządzenia przy kształtowaniu mikronieciągłości CPS. Opisane urządzenie w znaczący sposób przyspiesza kształtowanie czynnych powierzchni ściernic o niekonwencjonalnej makro- i mikrogeometrii. Może być ono stosowane przede wszystkim w badaniach doświadczalnych dotyczących wpływu tego typu geometrii ściernicy na różne procesy szlifowania. Zastosowania przemysłowe obejmują procesy szlifowania jednoprzęściowego oraz procesy, w których wymagane jest uzyskanie nietypowych właściwości skrawnych i eksploatacyjnych ściernicy, np. szlifowanie materiałów trudno skrawalnych.

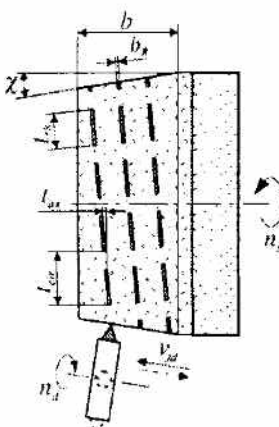
### 4.3.3. Charakterystyka czynnej powierzchni ściernicy z ukształtowanymi mikronieciągłościami

Opracowane urządzenie umożliwiło precyzyjne kształtowanie zarówno nakroju stożkowego, jak i mikronieciągłości w kilku odmianach kinematycznych. W celu sprawdzenia skuteczności działania opracowanego urządzenia ukształtowano mikronieciągłości na CPS wg kinematyki opisanej w tabeli 4.9a.

Parametry zabiegu obciągania i wyznaczone dla nich wartości parametrów geometrycznych mikronieciągłości zostały podane w tabeli 4.10.

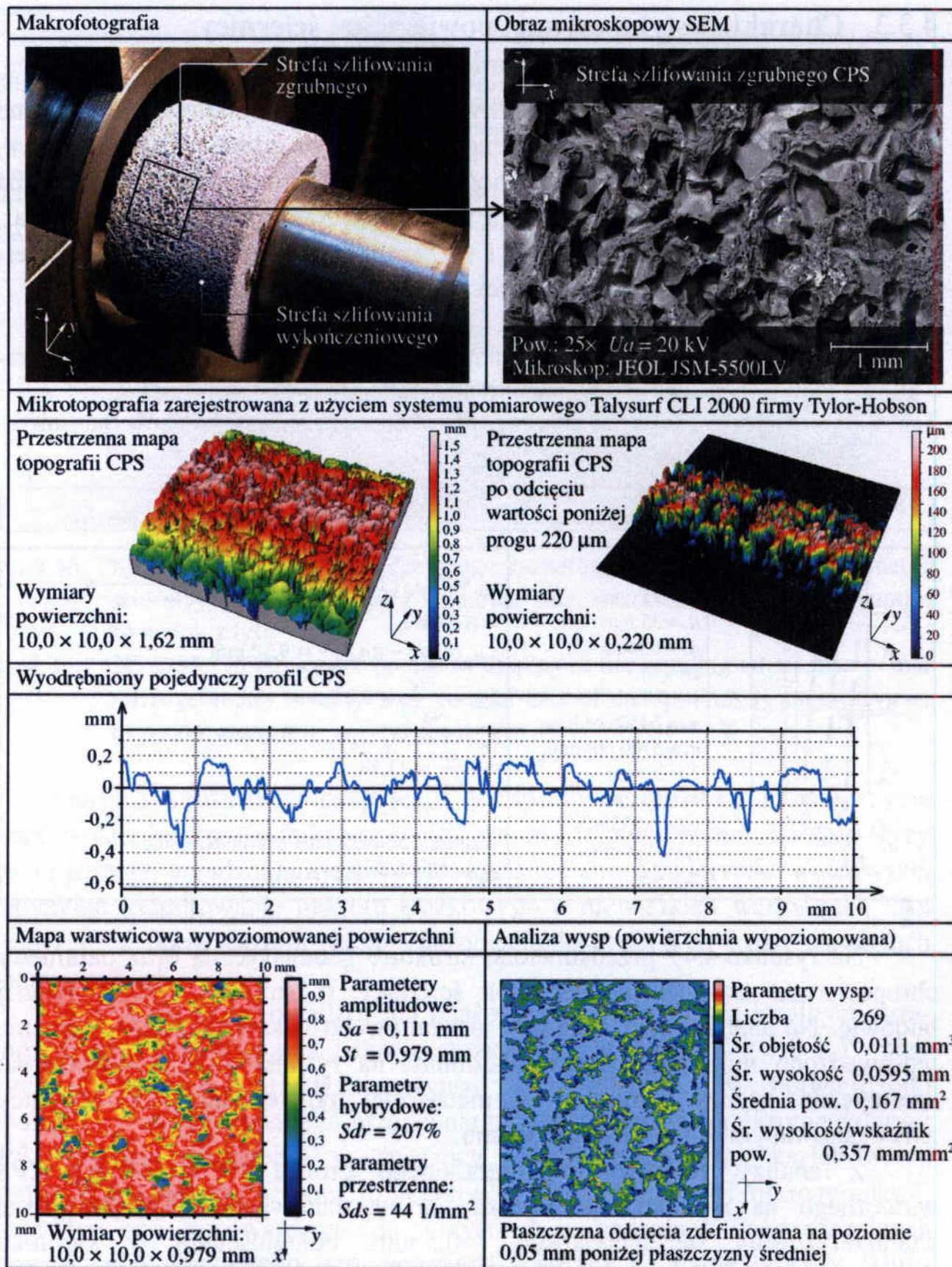
Tab. 4.10. Parametry zabiegu obciągania wraz z wyznaczonymi wartościami parametrów geometrycznych mikronieciągłości

Tab. 4.10. Parameters of the dressing cut and calculated values of the micro-discontinuities geometric parameters

Schemat kinematyki obciągania	Parametry obciągania	Wyznaczone parametry mikronieciągłości
	$a_d = 0,5 \text{ mm}$ $c = 0,1 \text{ mm}$ $d_s = 35 \text{ mm}$ $d_d = 68 \text{ mm}$ $i = 1$ $k = 0,8$ $n_d = 6450 \text{ obr./min}$ $n_s = 5900 \text{ obr./min}$ $T = 20 \text{ mm}$ $v_d = 23 \text{ m/s}$ $v_{fd} = 0,025 \text{ m/s}$ $v_s = 10,8 \text{ m/s}$ $\epsilon_d = 45^\circ$	$L_R \approx 2d_d \sqrt{\left(1 - \frac{v_s}{v_d}\right)^2 + \left(\frac{v_{fd} \cdot n_d}{v_d}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{d_s \cdot a_d}{D_d(d_s + d_d)}} =$ $= 6,43 \text{ mm}$ $t_{cir} = \pi d_s - \pi d_d \frac{v_s}{v_d i} = 9,38 \text{ mm}$ $t_{ax} = \frac{v_{fd}}{n_d \cdot i} = 0,23 \text{ mm}$ $b_R = c + 2a_d \cdot \text{tg} \epsilon_d = 1,72 \text{ mm}$ $r = \frac{\pi D}{t_{cir}} = 11,73$ $z = \frac{t_{cir}}{t_{ax} r} = 7,33$ <p>Względna powierzchnia mikronieciągłości:</p> $A_R = \frac{L_R \cdot b_R \cdot k \cdot r \cdot z}{\pi \cdot d_s \cdot T} = 34,61\%$

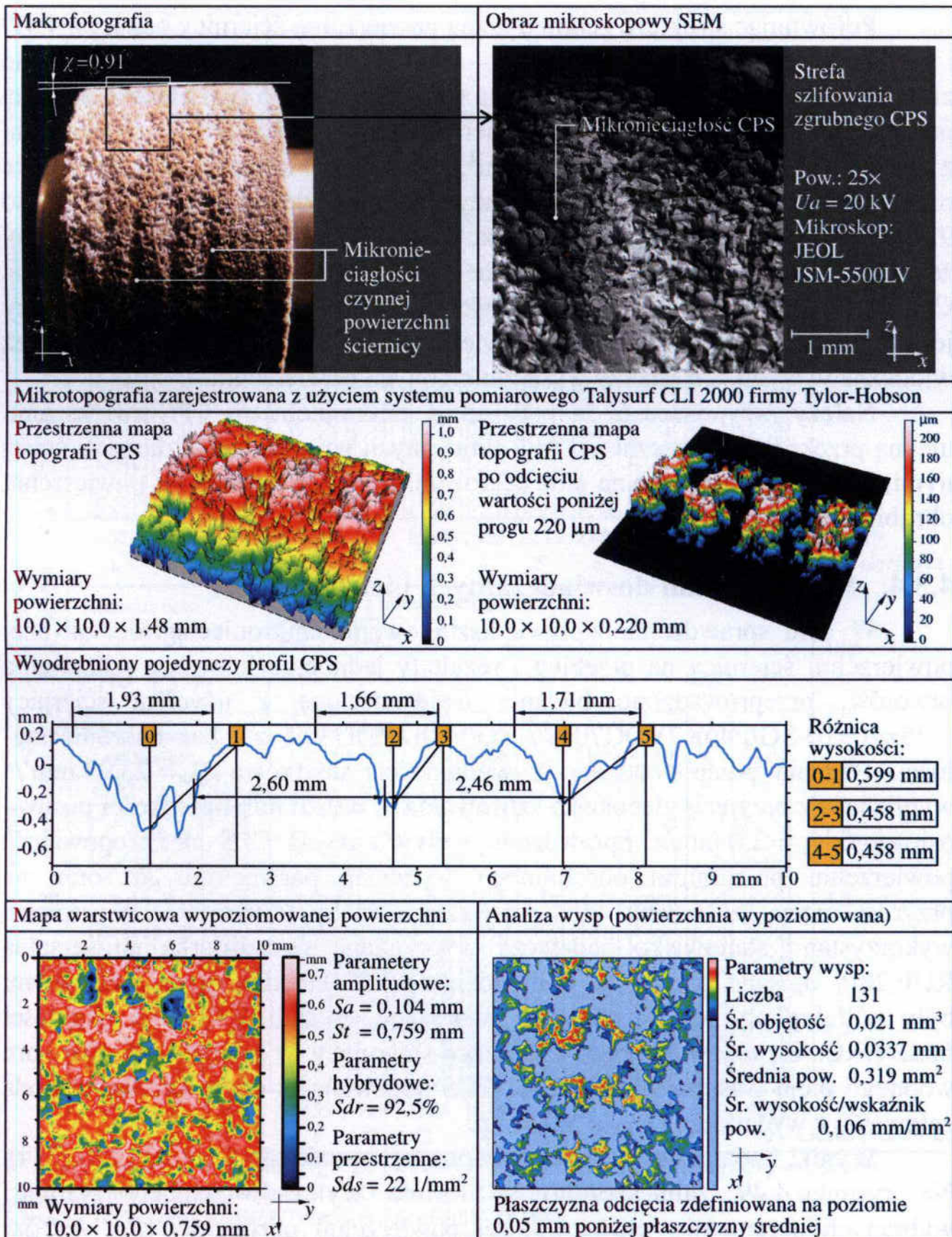
Na rysunku 4.47 przedstawiono strukturę geometryczną oraz parametry chropowatości czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie. Na analizowanej ściernicy ukształtowano nakrój stożkowy, lecz nie wprowadzono mikronieciągłości. Natomiast na rysunku 4.48 przedstawiono analogiczne analizy struktury geometrycznej powierzchni dla ściernicy z ukształtowanymi mikronieciągłościami.

Z analizy geometrii wyodrębnionego profilu chropowatości CPS widocznego na rysunku 4.48 wynika, że ukształtowane mikronieciągłości charakteryzowały się głębokością  $\approx 0,5 \text{ mm}$ , odległościami w kierunku osiowym  $\approx 2,5 \text{ mm}$  i szerokością pojedynczego rowka  $b_R \approx 1,7 \text{ mm}$ . Uzyskana geometria mikronieciągłości wynikała z przyjętych parametrów zabiegu obciągania (tab. 4.10) oraz geometrii zastosowanego obciągacza. Znaczący wpływ na uzyskany kształt mikronieciągłości miała również bardzo otwarta struktura CPS, zbudowanej z relatywnie dużych ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46.



Rys. 4.47. Struktura geometryczna czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie, bez mikronieciągłości (CPS po obciążeniu)

Fig. 4.47. Geometrical structure of the grinding wheel with zone-diversified structure active surface, without microdiscontinuities (GWAS status: after dressing)



Rys. 4.48. Struktura geometryczna czynnej powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie, z mikronieciągłościami (CPS po obciążeniu)

Fig. 4.48. Geometrical structure of the grinding wheel with zone-diversified structure active surface, with microdiscontinuities (GWAS status: after dressing)

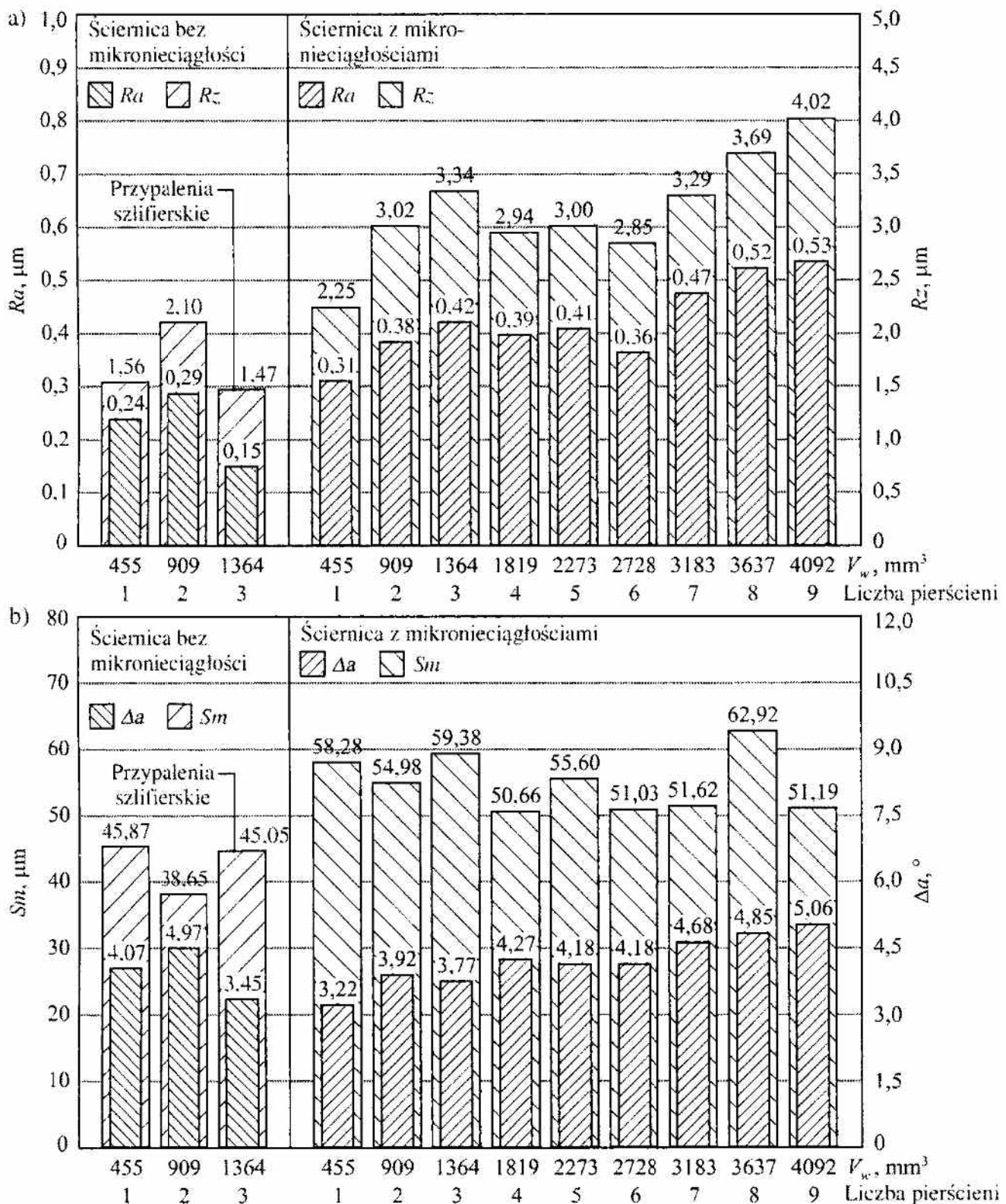
Porównując strukturę geometryczną powierzchni ściernicy bez (rys. 4.47) i z mikronieciągłościami (rys. 4.48), można stwierdzić, że dwukrotnie zmniejszyła się liczba wierzchołków na CPS. Świadczy o tym zmiana wartości parametru opisującego gęstość wierzchołków nierówności powierzchni z  $Sds = 44 \text{ l/mm}^2$  do  $Sds = 22 \text{ l/mm}^2$ . Również wartość współczynnika rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  zmniejszyła się ponaddwukrotnie z 207% do 92,5% dla czynnej powierzchni ściernicy z mikronieciągłościami. Oznacza to, że ukształtowanie z przyjętymi parametrami (tab. 4.10) mikronieciągłości na CPS pozwoliło na zwiększenie objętości przestrzeni międzyziarnowych, przy jednoczesnym zredukowaniu liczby wierzchołków o połowę. Jest to również widoczne w wynikach analizy wysp zmierzonych powierzchni.

Należy przypuszczać, że przy takiej mikrogeometrii CPS zwiększeniu ulegną przekroje poprzeczne warstw skrawanych pojedynczymi ziarnami ściernymi, co wpłynie zarówno na moc szlifowania, jak i chropowatość powierzchni obrobionej.

#### 4.3.4. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

W celu sprawdzenia wpływu kształtowania mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy na przebieg i rezultaty jednoprzeciowego szlifowania otworów, przeprowadzono badania doświadczalne z użyciem ściernicy 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30% z i bez mikronieciągłości. Badania przeprowadzono z wydajnością ubytkową  $Q_w = 23,93 \text{ mm}^3/\text{s}$  wynikającą z przyjętej głębokości szlifowania  $a_e = 0,20 \text{ mm}$  i prędkości posuwu osiowego  $v_{fa} = 2,0 \text{ mm/s}$ . Sprawdzone wpływ zużycia CPS na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażoną parametrem  $Ra$  oraz na przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$ , powtarzając próby trzykrotnie. W próbach wykorzystano stanowisko badawcze wyposażone w szlifierkę uniwersalną RUP 28P, opisane szerzej w podrozdziale 4.1.2. Przedmiotami obrabianymi były półfabrykaty łożysk tocznych wykonane ze stali 100Cr6 o twardości  $62 \pm 2 \text{ HRC}$ . Zastosowano płyn chłodząco-smarujący w postaci 5% roztworu wodnego oleju Castrol Syntilo RHS. PCS podawano w strefę obróbki metodą zalewową z wydatkiem  $Q_{PCS} = 5,0 \text{ l/min}$ .

Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 4.49 i 4.50 [230, 254]. Na rysunku 4.49 zamieszczono w formie wykresów zmiany wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Sm$  i  $\Delta a$ ) w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ , dla ściernicy z i bez ukształtowanych mikronieciągłości.



Parametry szlifowania:  $v_s = 60$  m/s;  $v_{fa} = 2.0$  mm/s;  $n_s = 39200$  obr./min;  $Q_w = 24$  mm<sup>3</sup>/s;  $v_w = 0.75$  m/s;

$Q_{PCS} = 5.0$  l/min;  $n_w = 341$  obr./min;  $b = 12.6$  mm;  $a_e = 0.20$  mm;  $\chi = 0.91^\circ$

Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%

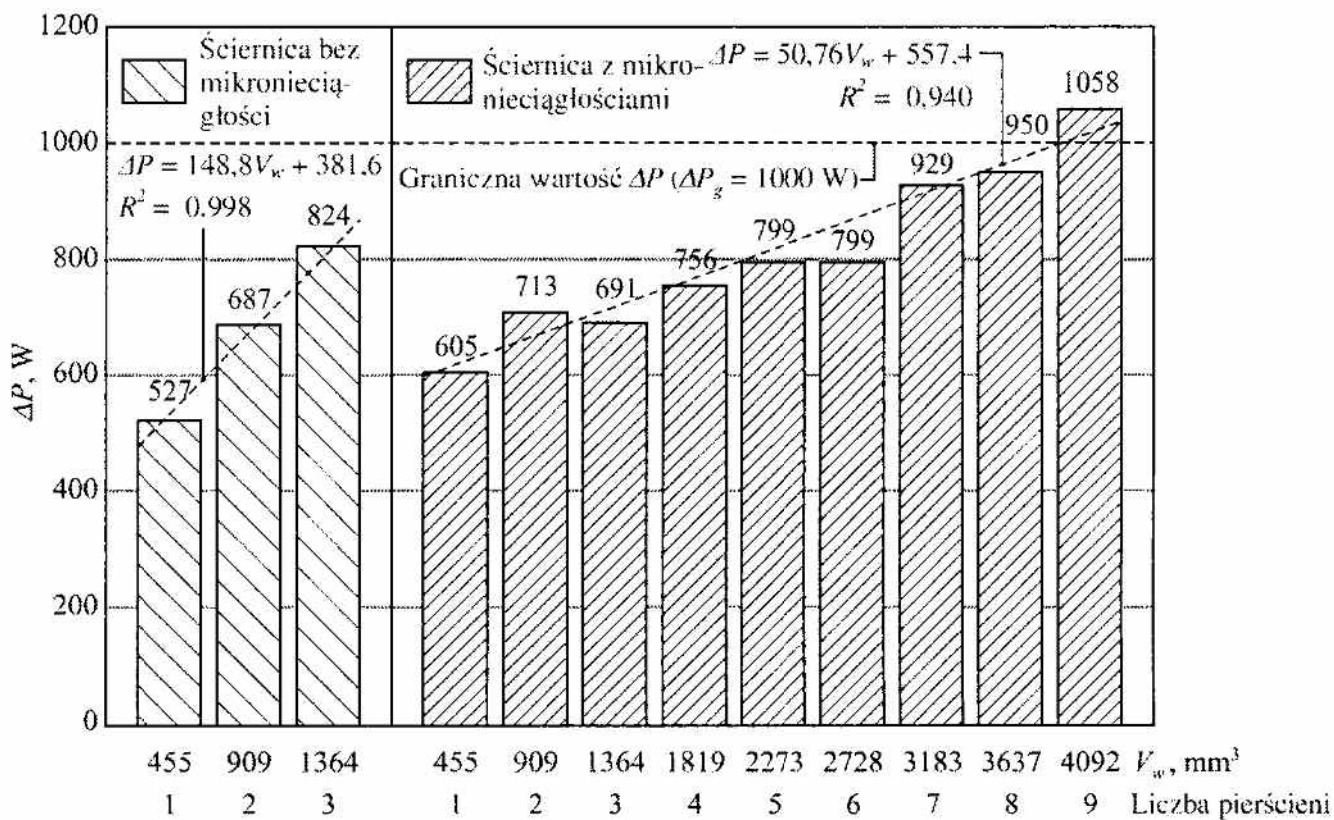
Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)

Płyn chłodziwo-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS; PCS podawany zalewowo

Rys. 4.49. Zmiany wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrabianej w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ : a)  $R_a$  i  $R_z$ , b)  $S_m$  i  $\Delta a$   
 Fig. 4.49. Changes in the values of selected roughness parameters of machined surface over material removal  $V_w$ ; a)  $R_a$  and  $R_z$ , b)  $S_m$  and  $\Delta a$



Na rysunku 4.50 pokazano wpływ zastosowania ściernicy z mikronieciągłościami na wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  dla kolejno szlifowanych pierścieni, w porównaniu z wynikami uzyskanymi z użyciem ściernicy bez mikronieciągłości czynnej powierzchni.



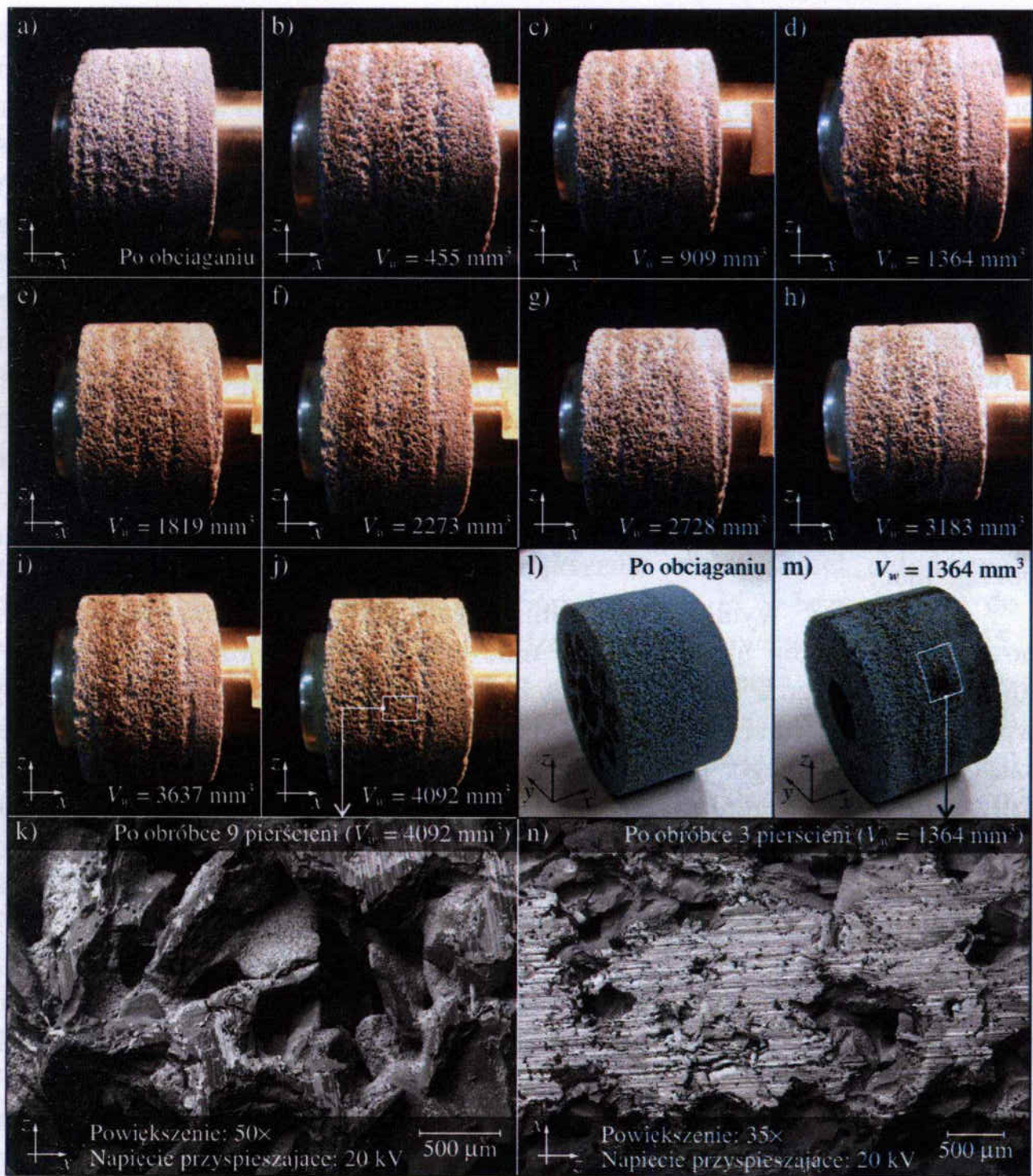
Parametry szlifowania:  $v_s = 60$  m/s;  $v_{fa} = 2,0$  mm/s;  $n_s = 39200$  obr./min;  $Q_k = 24$  mm<sup>3</sup>/s;  $v_w = 0,75$  m/s;  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min;  $n_w = 341$  obr./min;  $b = 12,6$  mm;  $a_s = 0,20$  mm;  $\chi = 0,91^\circ$   
 Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F8017VDG30%  
 Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 (62±2 HRC)  
 Płyn chłodziwo-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS; PCS podawany zalewowo

Rys. 4.50. Zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w funkcji ubytku materiału obrabianego  $V_w$

Fig. 4.50. Increase of grinding power  $\Delta P$  changes over material removal  $V_w$

Jako kryterium utraty zdolności skrawnej i zakończenia okresu trwałości badanych ściernic przyjęto przekroczenie wartości granicznej przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_g = 1000$  W. Wartość tę ustalono na podstawie wcześniejszych badań nad opisywanym procesem [229].

Najważniejszym czynnikiem ograniczającym trwałość ściernicy bez mikronieciągłości był szybki rozrost zalepień na czynnej powierzchni (rys. 4.51l-n). Zjawisko to było szczególnie intensywne na końcu stożkowej strefy szlifowania zgrubnego i spowodowało wystąpienie przypaleń szlifierskich na powierzchni obrabianej trzeciego pierścienia, co odpowiadało usunięciu 1364 mm<sup>3</sup> materiału obrabianego.



Rys. 4.51. Stan czynnej powierzchni ściernicy bez (l-n) i z mikronieciągłościami (a-k): a) po obciąganiu; b)  $V_w = 455 \text{ mm}^3$ ; c)  $V_w = 909 \text{ mm}^3$ ; d)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$ ; e)  $V_w = 1819 \text{ mm}^3$ ; f)  $V_w = 2273 \text{ mm}^3$ ; g)  $V_w = 2728 \text{ mm}^3$ ; h)  $V_w = 3183 \text{ mm}^3$ ; i)  $V_w = 3637 \text{ mm}^3$ ; j)  $V_w = 4092 \text{ mm}^3$ ; k)  $V_w = 4092 \text{ mm}^3$  – pow. 50 $\times$ ; l) po obciąganiu; m)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$ ; n)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$  – pow. 35 $\times$

Fig. 4.51. State of active surface of the grinding wheel without (l-n) and with microdiscontinuities (a-k): a) after dressing; b)  $V_w = 455 \text{ mm}^3$ ; c)  $V_w = 909 \text{ mm}^3$ ; d)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$ ; e)  $V_w = 1819 \text{ mm}^3$ ; f)  $V_w = 2273 \text{ mm}^3$ ; g)  $V_w = 2728 \text{ mm}^3$ ; h)  $V_w = 3183 \text{ mm}^3$ ; i)  $V_w = 3637 \text{ mm}^3$ ; j)  $V_w = 4092 \text{ mm}^3$ ; k)  $V_w = 4092 \text{ mm}^3$  – Mag. 50 $\times$ ; l) after dressing; m)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$ ; n)  $V_w = 1364 \text{ mm}^3$  – Mag. 35 $\times$

Wywołany tarcieniem wzrost temperatury w strefie szlifowania przyspieszył również zużycie ziaren ściernych i w efekcie średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powierzchni obrobionej wynosiło  $Ra = 0,15 \mu\text{m}$ . Ograniczona objętość przestrzeni międzyziarnowych ściernicy bez mikronieciągłości powodowała, że nagromadzone wióry powstałe przy szlifowaniu z relatywnie dużą wydajnością ubytkową szlifowania  $Q_w \approx 24 \text{ mm}^3/\text{s}$  nie były skutecznie odprowadzane ze strefy obróbki i przywierały do CPS.

W wyniku przeprowadzonych prób szlifowania ściernicą bez mikronieciągłości określono, że konieczne jest obciążanie jej czynnej powierzchni po obróbce każdego kolejnego otworu, czyli po każdym przejściu roboczym. Analogicznie postępuje się w przemyśle dla zachowania pełnej powtarzalności efektów obróbki, jednak odnowienie właściwości skrawnych ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie wiąże się z koniecznością precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego, co znacząco wydłuża zabieg obciążania.

Analizując wyniki szlifowania uzyskane z użyciem ściernicy, na powierzchni której ukształtowano mikronieciągłości, można stwierdzić, że mimo zmniejszenia liczby wierzchołków aktywnych CPS wywołanego wprowadzeniem mikronieciągłości, zarówno usuwanie materiału przez strefę szlifowania zgrubnego, jak i wygładzanie i wyiskrzanie powierzchni w strefie szlifowania wykończeniowego przebiegało poprawnie. W rezultacie uzyskano chropowatość powierzchni obrobionej wyrażoną parametrem  $Ra$  w zakresie  $0,31\text{-}0,53 \mu\text{m}$ , a parametr  $Rz$  przyjmował wartości od  $2,25 \mu\text{m}$  do  $4,14 \mu\text{m}$  (rys. 4.49a). Również średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$  oraz średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta a$  powierzchni obrobionej ściernicą z mikronieciągłościami przyjmowały wartości na akceptowalnym poziomie z zakresu od  $51,19 \mu\text{m}$  do  $62,92 \mu\text{m}$  dla  $Sm$  oraz od  $3,22^\circ$  do  $5,06^\circ$  dla  $\Delta a$  (rys. 4.49b).

Wyniki badań wykazały znaczący spadek intensywności rozrostu zalepień CPS i zdolności ściernicy do oczyszczania oraz, w ograniczonym stopniu, również do samoostrzenia czynnej powierzchni (rys. 4.51a-k). Efektem wprowadzenia opisywanej modyfikacji było przeszlifowanie dziewięciu otworów (co odpowiada usunięciu ponad  $4000 \text{ mm}^3$  materiału obrabianego), do momentu przekroczenia granicznej wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P_g$ . Oznacza to, że ukształtowanie mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernicy pozwoliło na trzykrotne wydłużenie okresu trwałości ściernicy, przy nieznacznym wzroście chropowatości powierzchni obrobionej, w odniesieniu do wyników szlifowania ściernicami bez mikronieciągłości.

#### 4.4. Ściernice składane z systemem odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego

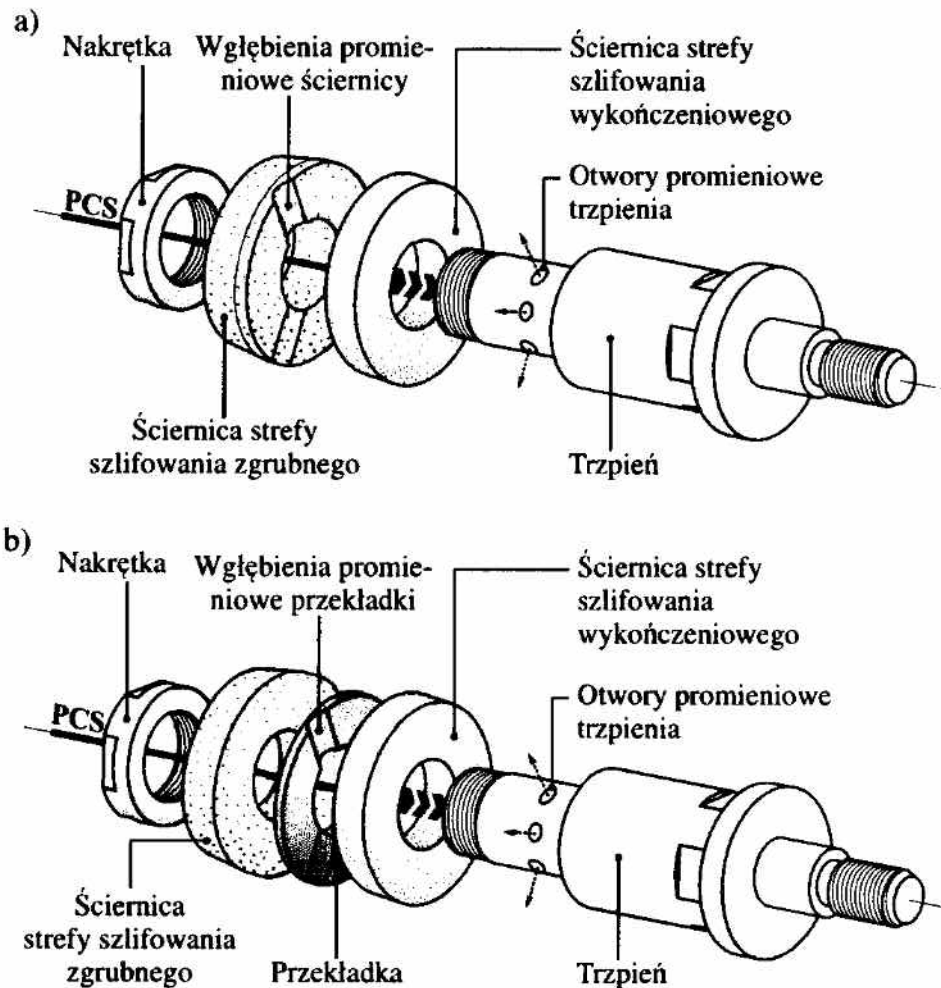
Jednym z istotnych czynników decydujących o trwałości ściernic stosowanych w tej odmianie szlifowania jest skuteczne chłodzenie i smarowanie strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym [31, 155, 300]. Zastosowanie chłodzenia zalewowego, nawet przy wydatku PCS na poziomie  $Q_{PCS} = 5$  l/min, nie zapewnia odpowiedniego usuwania wiórów ze strefy obróbki i prawidłowego jej chłodzenia, ponieważ tylko niewielka część strumienia płynu trafia bezpośrednio do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym [31, 401]. W rezultacie, przy postępującym zużyciu ściernicy może dojść do nadmiernego wzrostu temperatury i wystąpienia defektów szlifierskich na powierzchni obrobionej w postaci przypaleń szlifierskich lub mikropęknięć. W związku z powyższym opracowano szereg rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi ściernych, umożliwiających zwiększenie efektywności chłodzenia. Jedną ze znanych metod skutecznego doprowadzenia PCS bezpośrednio do strefy szlifowania jest zastosowanie chłodzenia odśrodkowego [31, 139, 155, 278-280, 294]. Metody takie stosowane są jednak do tej pory jedynie w przypadku ściernic o relatywnie dużych gabarytach, stosowanych w procesach szlifowania powierzchni płaskich i walcowych zewnętrznych, umożliwiającym zamontowanie w ich uchwytach lub korpusach elementów układu podawania PCS.

Największą korzyścią związaną z zastosowaniem chłodzenia od wewnątrz ściernicy jest znaczące podwyższenie efektywności wykorzystania strumienia PCS, który w zdecydowanie większym stopniu trafia w strefę szlifowania. Jednocześnie, możliwe jest znaczące (nawet dziesięciokrotne [141]) zredukowanie wydatku PCS, co wiąże się z korzystnym efektem ekologicznym, wynikającym ze zredukowania objętości odpadów w postaci zużytych płynów chłodząco-smarujących, których utylizacja jest kosztowna i uciążliwa dla środowiska naturalnego.

Założono zatem, że korzyści wynikające z odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy obróbki można uzyskać również w przypadku ściernic małych gabarytowych stosowanych w procesach szlifowania otworów [205, 251, 253, 259]. Tym bardziej że procesy szlifowania otworów charakteryzują się długą drogą styku ściernicy z materiałem obrabianym, co dodatkowo utrudnia wnikanie PCS do strefy obróbki. W celu sprawdzenia wpływu zastosowania systemu odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania opracowano konstrukcje specjalnych narzędzi ściernych, przeprowadzono symulacje wpływu PCS oraz wykonano badania doświadczalne w procesie jednoprzeciwnego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

#### 4.4.1. System odśrodkowego doprowadzania płynu chłodząco-smarującego w ściernicach małogabarytowych

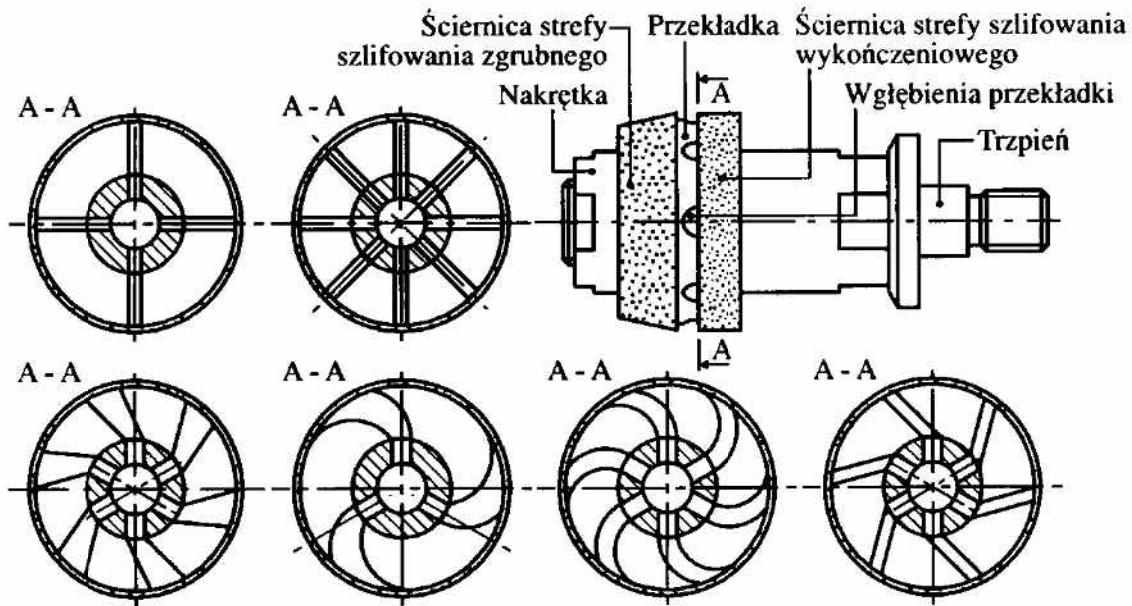
Opracowane rozwiązania zakładają możliwość doprowadzania płynu chłodząco-smarującego od wewnątrz trzpienia szlifierskiego, przez specjalne kanały, bezpośrednio w strefę kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Na rysunku 4.52 przedstawiono schematy konstrukcyjne opatentowanych w 2011 roku autorskich rozwiązań systemu odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania w dwóch wariantach. Pierwszy z nich przewiduje doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego poprzez kanały ukształtowane w ściernicy elementarnej realizującej szlifowanie zgrubne (rys. 4.52a).



Rys. 4.52. Schemat budowy ściernicy składanej z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS: a) doprowadzenie PCS poprzez kanały ukształtowane w ściernicy [264]; b) doprowadzenie PCS poprzez kanały ukształtowane w przekładce pomiędzy ściernicami elementarnymi [265]

Fig. 4.52. Schematic diagram of the sandwich grinding wheel with system of centrifugal supplying of the coolant: a) through channels formed in the grinding [264]; b) through channels formed in a divider between elementary grinding wheels [265]

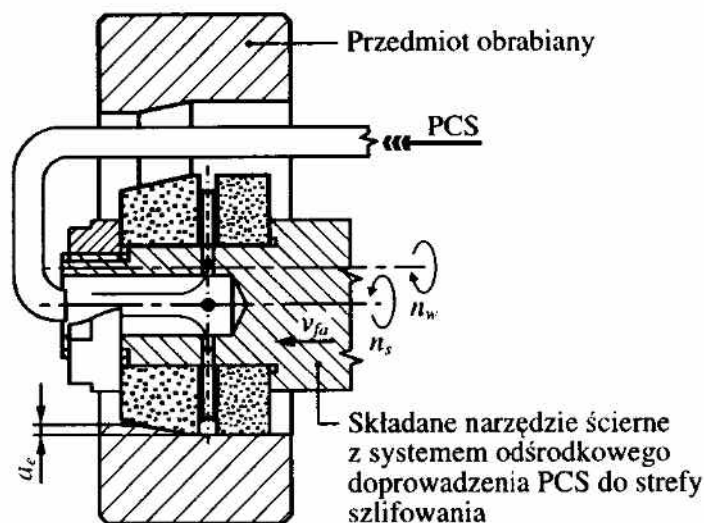
W drugim wariancie zastosowano przekładkę pomiędzy ściernicami elementarnymi, w której ukształtowano kanały doprowadzające PCS (rys. 4.52b). Rozwiązanie takie jest dużo bardziej uniwersalne, pozwala bowiem wpływać na parametry wypływu PCS poprzez wymianę przekładek, które mogą różnić się liczbą, kształtem i średnicą kanałów [264, 265]. Na rysunku 4.53 przedstawiono przykładowe warianty ukształtowania kanałów doprowadzających PCS w przekładce rozdzielającej ściernice [265].



Rys. 4.53. Przykładowe kształty kanałów doprowadzających PCS [265]

Fig. 4.53. Exemplary shapes of the divider channels supplying the coolant [265]

Kanały doprowadzające chłodziwo umiejscowione zostały na granicy pomiędzy strefą szlifowania zgrubnego, na której ukształtowany jest nakrój stożkowy, a walcową strefą szlifowania wykończeniowego (rys. 4.54).



Rys. 4.54. Przekrój poprzeczny strefy szlifowania ściernicą składaną

Fig. 4.54. Cross-section of the grinding zone using sandwich grinding wheel

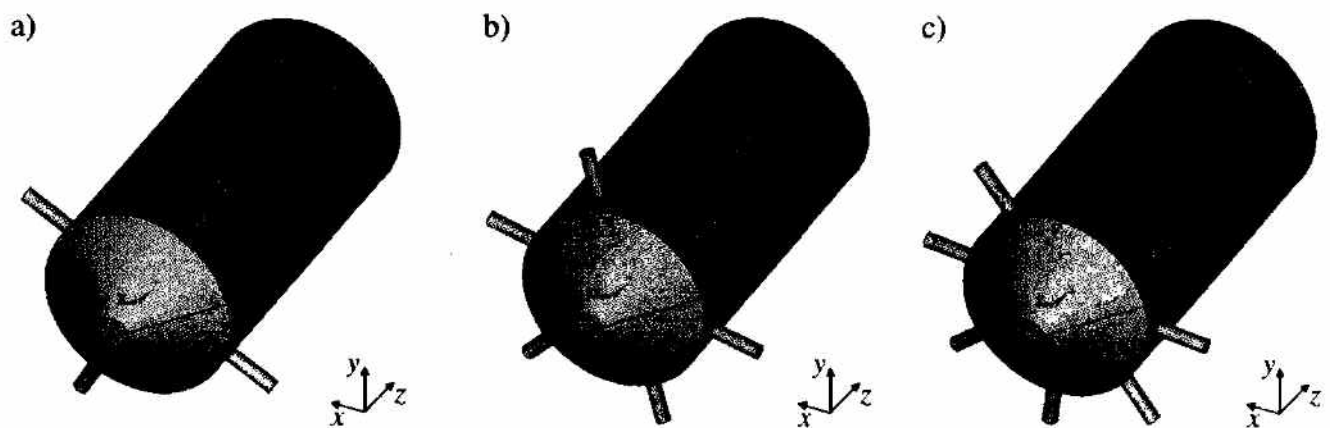
W obszarze tym występuje największe obciążenie ściernicy, a kanały takie stanowią jednocześnie nieciągłości CPS, które z kolei mogą się przyczynić do poprawy warunków obróbki w tej części ściernicy.

Zaproponowane rozwiązania konstrukcji ściernic i trzpieni szlifierskich przeanalizowano następnie z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej w celu określenia najkorzystniejszego wariantu konstrukcyjnego, który następnie poddany zostanie badaniom doświadczalnym.

#### 4.4.2. Symulacja wypływu płynu chłodząco-smarującego

Celem opracowanego modelu symulacyjnego odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania było określenie zależności między liczbą i średnicą kanałów doprowadzających PCS a prędkością jego wypływu. Prędkość ta ma zasadniczy wpływ na intensywność chłodzenia w strefie szlifowania.

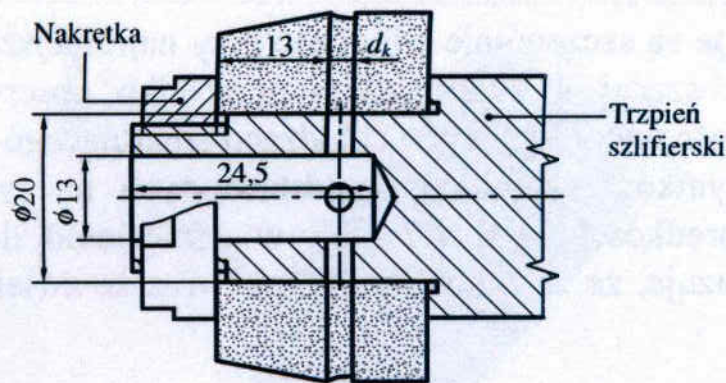
Analizę przeprowadzono z użyciem Metody Elementów Skończonych w programie ANSYS 10.0. Do obliczeń przyjęto założenie, że natężenie przepływu płynu na wlocie do trzpienia szlifierskiego zostanie istotnie zminimalizowane i będzie wynosiło  $Q_{PCS} = 1,0$  l/min, a liczba kanałów doprowadzających płyn do strefy szlifowania będzie równa 4, 6 lub 8. Na rysunku 4.55 przedstawiono trzy modele geometrii wewnętrznej przestrzeni trzpienia szlifierskiego zastosowane w badaniach symulacyjnych.



Rys. 4.55. Wewnętrzna przestrzeń trzpienia: a) 4 kanały; b) 6 kanałów; c) 8 kanałów  
Fig. 4.55. Internal space of an arbor with: a) 4 channels; b) 6 channels; c) 8 channels

Założono również, że średnica kanałów będzie równa  $d_k = 1$  mm, 2 mm i 3 mm (rys. 4.56), natomiast prędkość szlifowania będzie się zmieniać w zakresie od  $v_s = 30$  m/s do  $v_s = 60$  m/s.

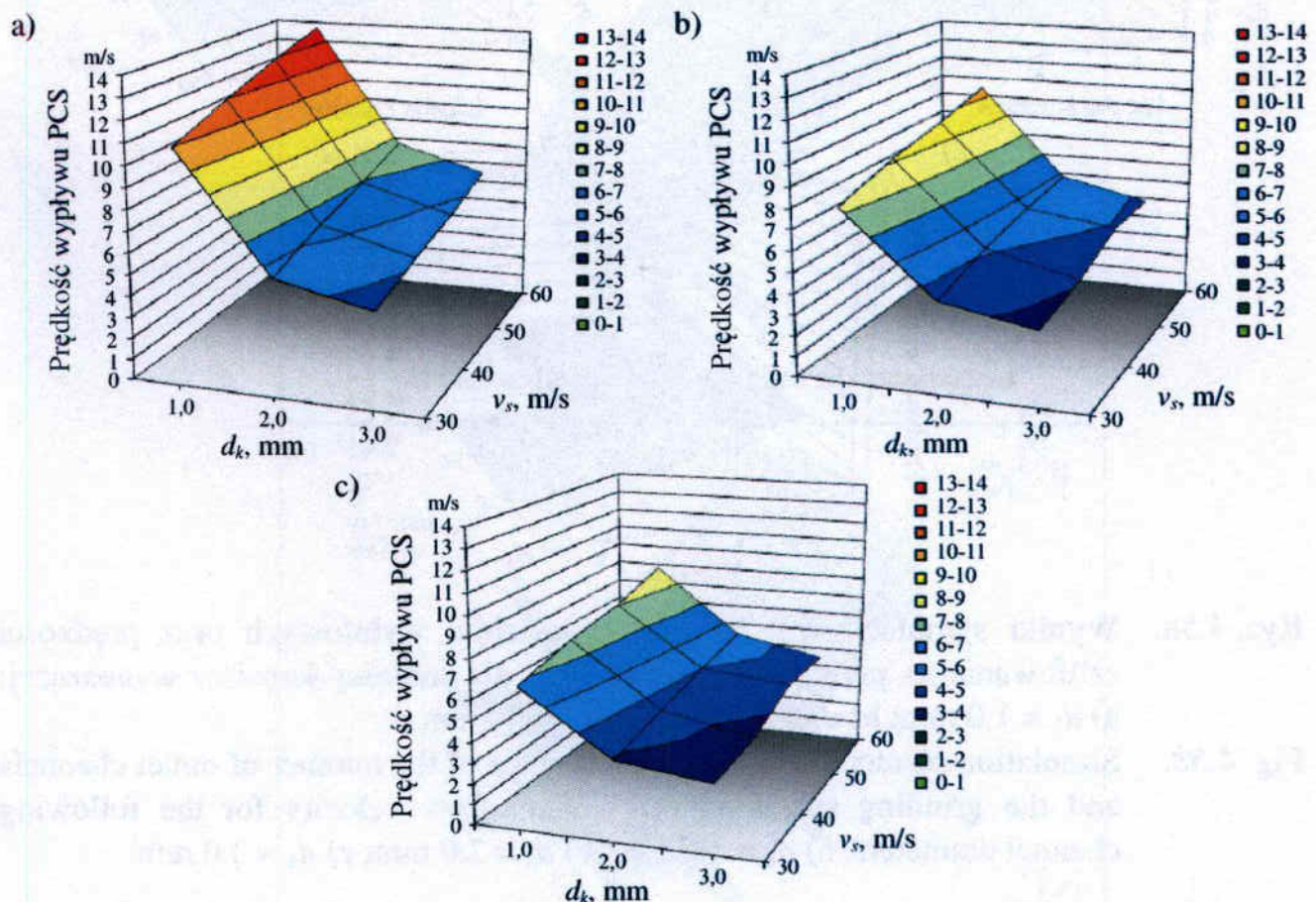
Do modelowania geometrii wewnętrznej przestrzeni trzpienia szlifierskiego zastosowano regularną siatkę MES zagęszczoną fragmentami siatki typu swobodnego. Obiekt modelowano w walcowym układzie współrzędnych oraz założono, że przepływ cieczy chłodzącej ma charakter turbulentny [62, 143, 326, 384]. Do obliczeń przyjęto stałą liczbę kroków iteracji równą 100.



Rys. 4.56. Parametry geometryczne trzpienia ( $d_k$  – średnica kanałów wylotowych)

Fig. 4.56. Geometrical parameters of an arbor ( $d_k$  – diameter of outlet channels)

Zamieszone na rysunku 4.57 wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że wraz ze zwiększeniem średnicy kanałów wylotowych, prędkość wypływu płynu chłodzącego znacząco spada, a wyraźnie wzrasta wraz ze zwiększaniem wartości prędkości szlifowania [32, 267].



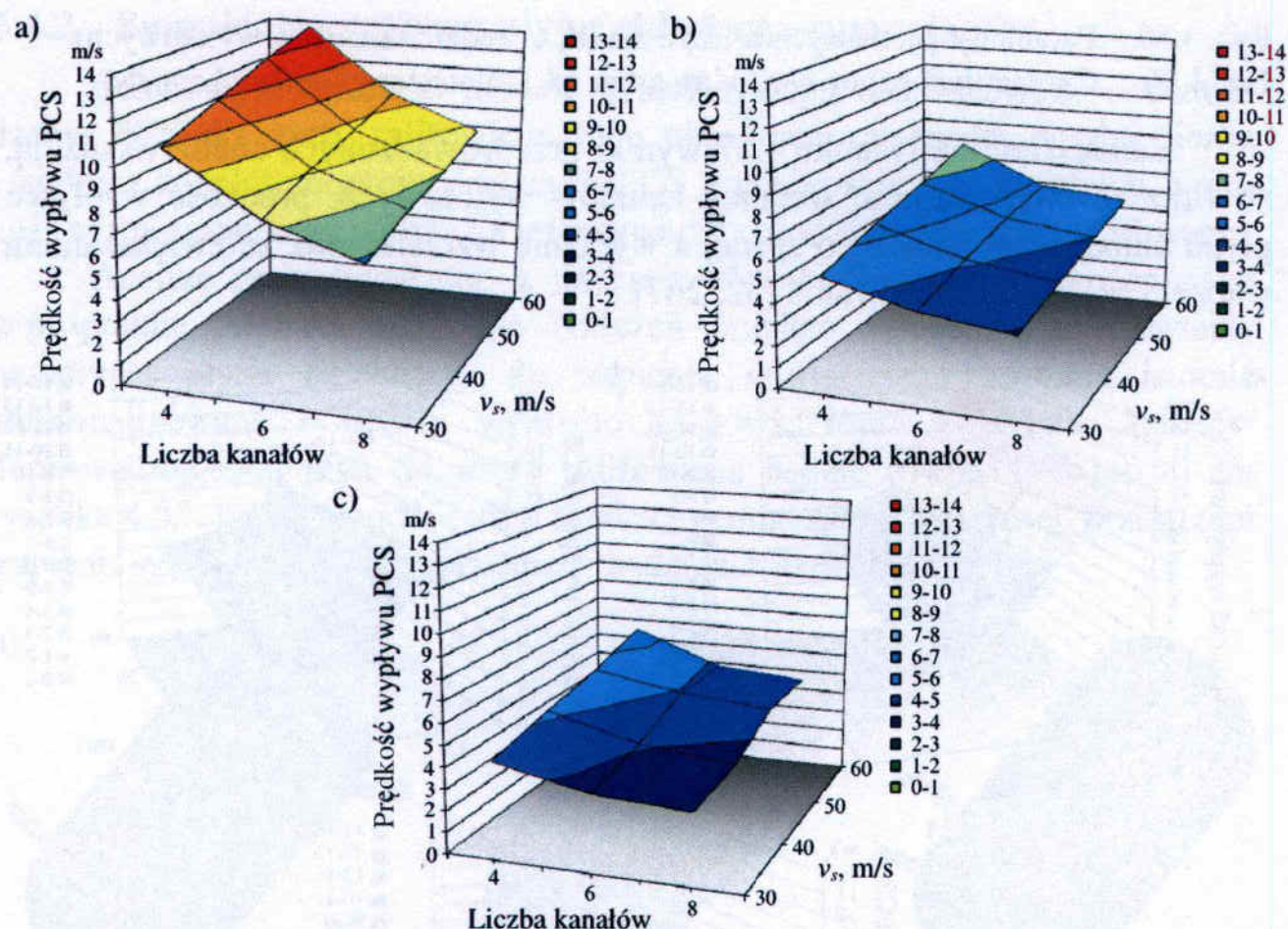
Rys. 4.57. Wyniki symulacji wpływu średnicy kanałów wylotowych oraz prędkości szlifowania na prędkość wypływu PCS: a) dla 4 kanałów wylotowych; b) dla 6 kanałów wylotowych; c) dla 8 kanałów wylotowych

Fig. 4.57. Simulation results of an influence of the outlet channel diameter and grinding speed on the coolant flow velocity: a) 4 outlet channels; b) for 6 outlet channels; c) for 8 outlet channels



Zależności te są szczególnie widoczne przy najmniejszej liczbie kanałów wylotowych wynoszącej 4. Dla takiego przypadku obserwuje się również największą prędkość wylotową płynu chłodząco-smarującego (rys. 4.57a).

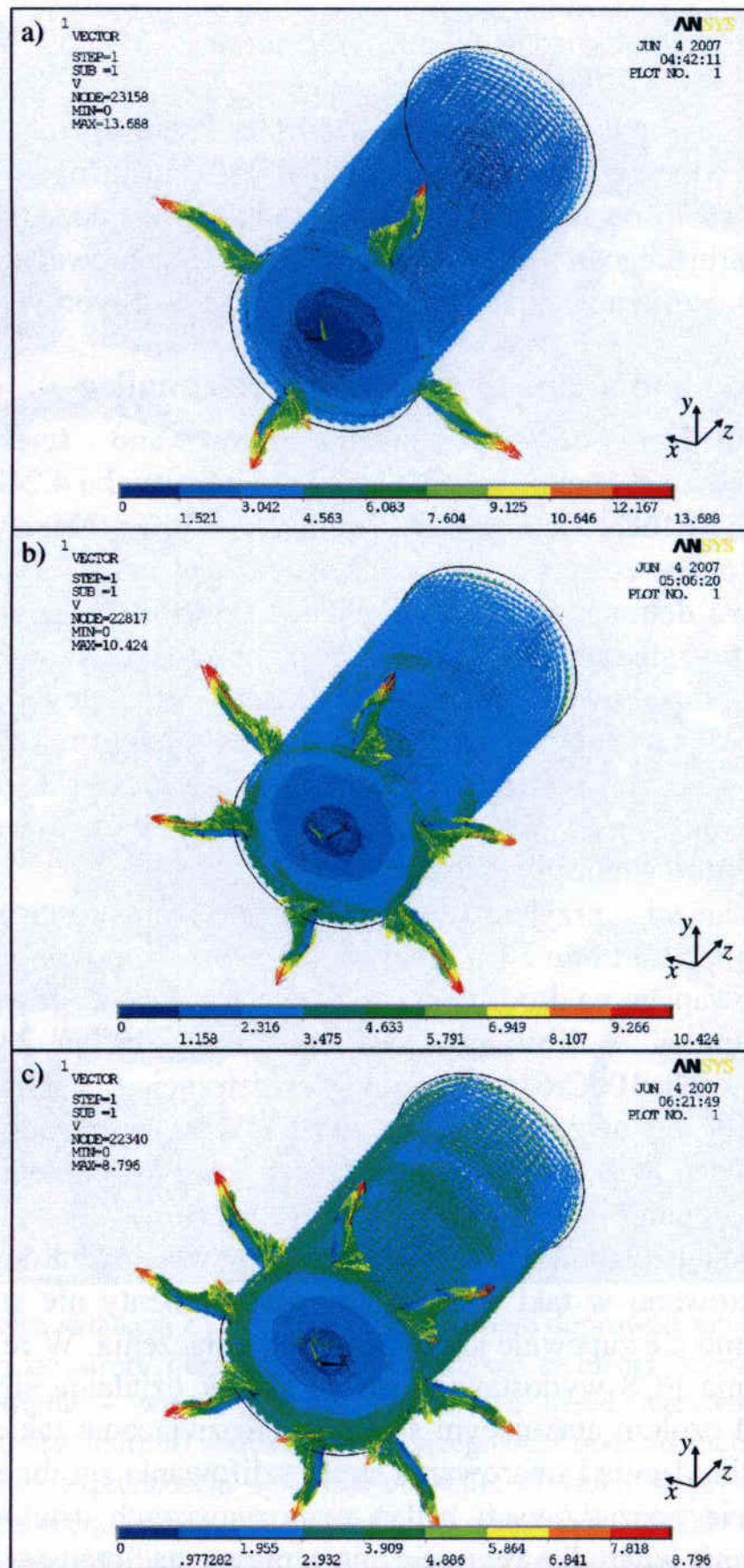
Analiza wyników symulacji przedstawionych na rysunku 4.58, dotyczących zmian prędkości wypływu PCS w odniesieniu do liczby kanałów wylotowych wskazuje, że zależność ta słabnie wraz ze zwiększaniem średnicy kanałów.



Rys. 4.58. Wyniki symulacji wpływu liczby kanałów wylotowych oraz prędkości szlifowania na prędkość wypływu PCS dla średnicy kanałów wynoszącej: a)  $d_k = 1,0$  mm; b)  $d_k = 2,0$  mm; c)  $d_k = 3,0$  mm

Fig. 4.58. Simulation results illustrating an influence of the number of outlet channels and the grinding speed on the coolant flow velocity for the following channel diameters: a)  $d_k = 1.0$  mm; b)  $d_k = 2.0$  mm; c)  $d_k = 3.0$  mm

Na rysunku 4.59 przedstawiono wybrane wyniki symulacji przepływu PCS przez komorę w trzpieniu szlifierskim oraz w kanałach wylotowych, dla których uzyskano największe prędkości wypływu. Zamieszczone zostały wyniki uzyskane dla prędkości szlifowania  $v_s = 60$  m/s w przypadku zastosowania czterech (rys. 4.59a), sześciu (rys. 4.59b) i ośmiu (rys. 4.59c) kanałów o średnicy  $d_k = 1,0$  mm, doprowadzających płyn chłodząco-smarujący.



Rys. 4.59. Przykładowe wyniki symulacji dla 4 (a), 6 (b) i 8 (c) kanałów doprowadzających PCS

Fig. 4.59. Sample results for 4 (a), 6 (b) and 8 (c) coolant supplying channels

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych (rys. 4.57-4.59) wskazują, że dla przyjętych założeń największą prędkość wylotową PCS można uzyskać stosując cztery kanały o średnicy wynoszącej 1 mm. Przedstawione wyniki badań symulacyjnych stanowiły podstawę do badań doświadczalnych sprawdzających efektywność zastosowania systemu odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego w ściernicach o strefowo zróżnicowanej budowie zastosowanych w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów.

#### 4.4.3. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

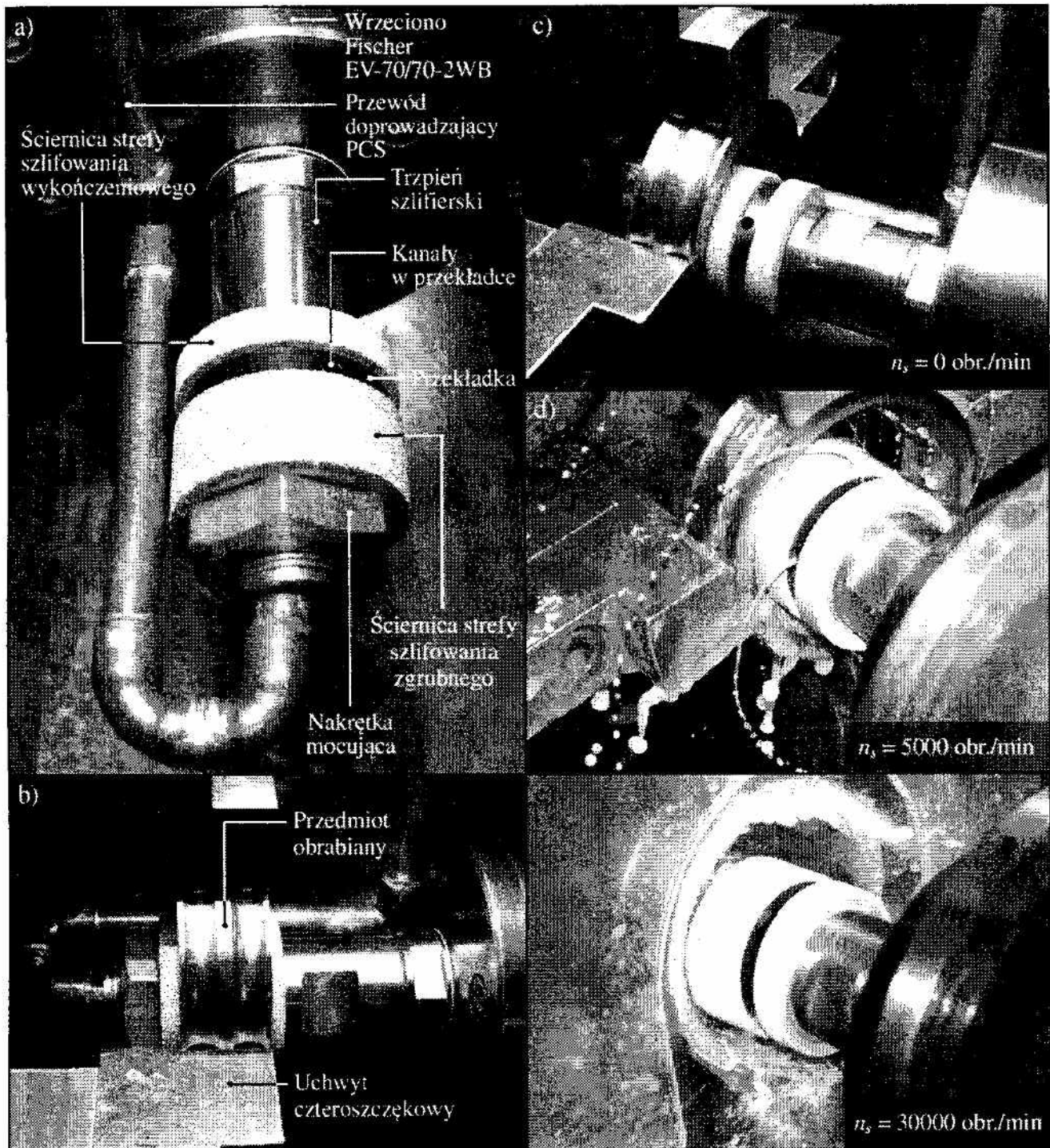
W badaniach doświadczalnych zastosowano ściernicę składaną zbudowaną według schematu przedstawionego na rysunku 4.24b o oznaczeniu: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%. Kanały doprowadzające PCS wykonane zostały w przekładce rozdzielającej ściernice elementarne, których budowa dobrana została do realizacji szlifowania zgrubnego i wykończeniowego z uwzględnieniem wyników badań opisanych w podrozdziale 4.1.5. W przekładce ukształtowane zostały cztery kanały o średnicy  $d_k = 3,0$  mm. Płyn chłodząco-smarujący doprowadzony został rurką miedzianą od czoła trzpienia szlifierskiego w sposób pokazany na rysunku 4.60a-c. Na skutek ruchu obrotowego oraz wymuszonego ciśnienia zasilającego, PCS wypływał wykonanymi kanałami w sposób widoczny na rysunku 4.60d-e.

W badaniach przyjęto trzy poziomy zmienności wydatku PCS ( $Q_{PCS} = 2,0$  l/min, 1,5 l/min i 1,0 l/min) regulowanego za pomocą zaworu kulowego zamontowanego na drodze przewodu doprowadzającego PCS.

Przedmiotami szlifowanymi w tej części badań były pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 o średnicy wewnętrznej  $d_w = 50$  mm. Pierścienie zostały dobrane z uwzględnieniem możliwości poprowadzenia przewodu doprowadzającego PCS obok ściernicy, której początkowa średnica zewnętrzna wynosiła  $d_s = 35$  mm.

Połączenie czoła trzpienia szlifierskiego z przewodem doprowadzającym CCS zaprojektowano w taki sposób, aby oba elementy nie stykały się, przy czym nie starano się zapewnić szczelności ich połączenia. W rezultacie celowo część strumienia PCS wydostawała się na skutek działania siły odśrodkowej, również przed czołem atakującym ściernicy. Rozwiązanie takie miało na celu zapewnienie chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zgrubnego ściernicy.

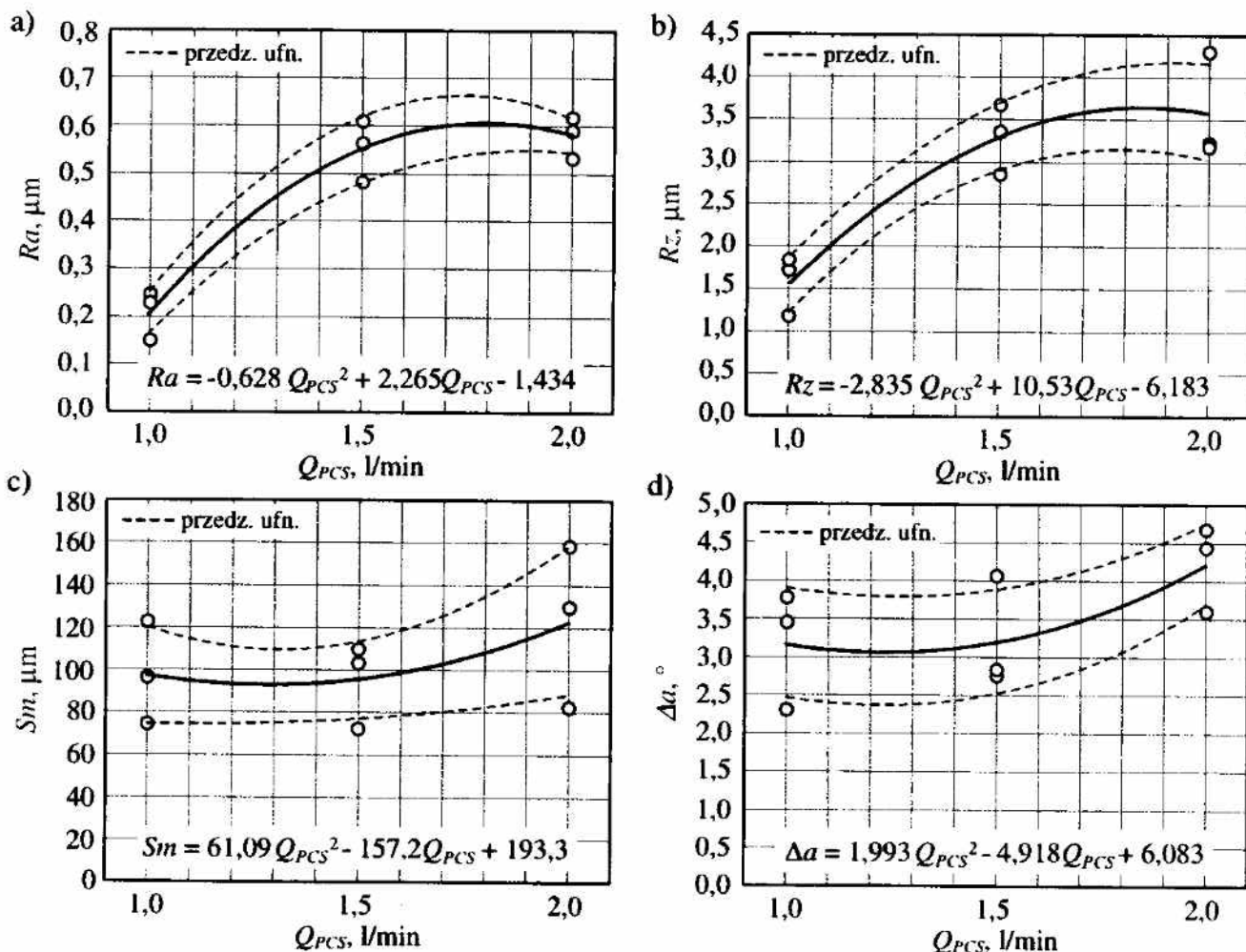
W trakcie początkowych badań rozpoznawczych ustalono, że zastosowanie chłodzenia odśrodkowego nie ma wpływu na intensywność zalepiania czynnej powierzchni ściernicy i w konsekwencji na jej okres trwałości. Oznaczało to, że zaproponowane rozwiązanie nie pozwala na podniesienie wydajności ubytkowej szlifowania uzyskiwanej w badanym procesie.



Rys. 4.60. Ściernica składana z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS bezpośrednio do strefy obróbki: a) najważniejsze elementy ściernicy; b) strefa szlifowania – widok z boku; c) ściernica przed wprowadzeniem w ruch ( $n_s = 0$  obr./min); d) widok wypływającego PCS podczas ruchu obrotowego ściernicy z prędkością  $n_s = 5000$  obr./min; e) widok wypływającego PCS podczas ruchu obrotowego ściernicy z prędkością  $n_s = 30000$  obr./min

Fig. 4.60. Sandwich grinding wheel with system of centrifugal supplying of the coolant directly to the grinding zone: a) main elements; b) side view of the grinding zone; c) grinding wheel in stationary state; d) view of the fluid outflow during the rotation of the grinding wheel ( $n_s = 5000$  rpm); e) fluid outflow during the rotation of the grinding wheel ( $n_s = 30000$  rpm)

Jako cel dalszych badań przyjęto zatem ograniczenie wydatku płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS}$  i tym samym osiągnięcie korzystnego efektu ekologicznego. Badania przeprowadzono z zastosowaniem eksperymentu planowanego (plan statystyczny randomizowany kompletny) z liczbą powtórzeń  $n=3$  dla każdego punktu planu. Na rysunkach 4.61 i 4.62 zamieszczono wykresy prezentujące wyniki badań.



Parametry szlifowania:  $v_s=60$  m/s;  $v_w=0,75$  m/s;  $a_e=0,15$  mm;  $v_{fu}=2,0$  mm/s;  $b=12,6$  mm;  $\chi=0,68^\circ$

Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SGF80I7VDG30%

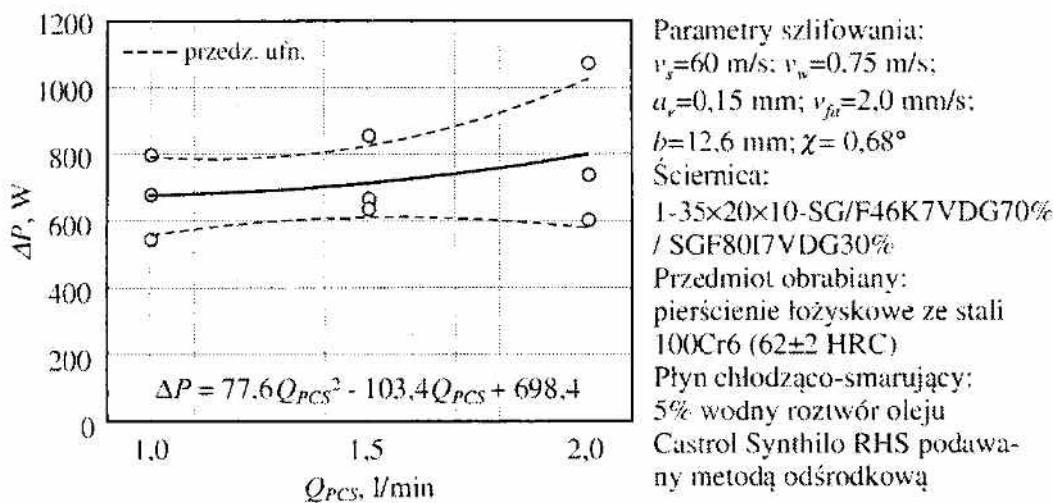
Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 (62±2 HRC)

Płyn chłodząco-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS podawany metodą odśrodkową

Rys. 4.61. Wpływ wydatku płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS}$  na wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ ; b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ ; d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta a$

Fig. 4.61. Influence of the grinding fluid output  $Q_{PCS}$  on values of the machined surface roughness parameters: a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$

Wyniki doświadczeń wskazują, że wraz ze zmniejszeniem wydatku PCS podawanego do strefy szlifowania, znacząco spada chropowatość powierzchni obrobionej (rys. 4.61) i nieznacznie moc szlifowania (rys. 4.62). Uzasadnić to można z jednej strony wzrostem intensywności tarcia w strefie szlifowania, wynikającym ze zmniejszania udziału PCS, co umożliwia łatwiejszą inicjację procesu mikroskrawania ziarnami ściernymi, a tym samym zmniejszenie intensywności bruzdowania i możliwości tworzenia wypływek bocznych. Z drugiej strony, zmniejszenie wydatku płynu w strefie szlifowania przyczynia się do lokalnego wzrostu temperatury, co w konsekwencji prowadzi do termozmęczeniowego zużycia wierzchołków ziaren aktywnych i ich wygładzenia.



Rys. 4.62. Wpływ wydatku płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS}$  na przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$

Fig. 4.62. Influence of the grinding fluid output  $Q_{PCS}$  on the grinding power gain  $\Delta P$

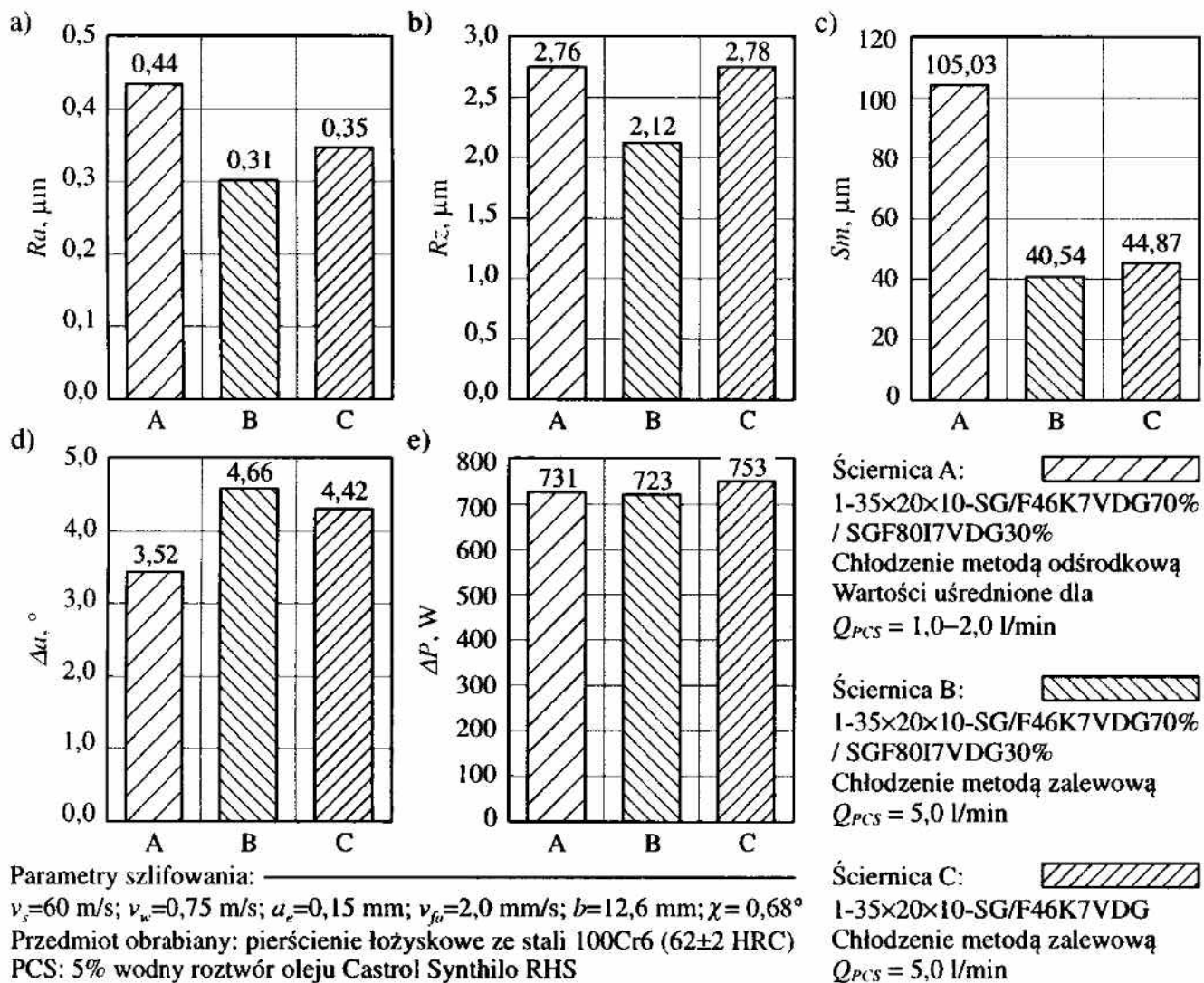
Adekwatne odniesienie dla uzyskanych wyników szlifowania ściernicą składaną z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS mogą stanowić rezultaty szlifowania ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie i ściernicą pozbawioną drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego. Wyniki takich badań powinny być wykonane w zbliżonych warunkach, tzn. ze zminimalizowanym wydatkiem PCS. Niestety, przeprowadzone próby szlifowania jednoprzęściowego z wydajnością ubytkową  $Q_w = 17,92$  mm<sup>3</sup>/s (odpowiadającą warunkom przyjętym w opisywanych badaniach) przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego z wydatkiem  $Q_{PCS} = 2,0$  l/min zakończyły się niepowodzeniem. W przypadku ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie (1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%) we wszystkich trzech próbach nastąpił szybki rozrost zalepień, który doprowadził do wystąpienia przypaleń szlifierskich na powierzchni przedmiotu obrobionego. Realizując proces szlifowania jednoprzęściowego ściernicą w całości wykonaną z ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46 (1-35×20×10-SG/F46K7VDG) nie

zaobserwowano tak wielu zalepień CPS, jednak również w tym przypadku na powierzchni obrobionej wykryto defekty w postaci przypaleń szlifierskich. Wyniki przeprowadzonych prób wykazały, że przy zastosowaniu zalewowego sposobu doprowadzania PCS do strefy szlifowania, w przyjętych warunkach obróbki nie jest możliwe skuteczne chłodzenie, smarowanie oraz oczyszczanie CPS z produktów obróbki ze zminimalizowanym wydatkiem płynu.

W celu odniesienia wyników uzyskanych ściernicą składaną do wyników uzyskanych narzędziami mogącymi stanowić referencję, zdecydowano się na porównanie z rezultatami uzyskanymi w warunkach chłodzenia zalewowego z wydatkiem  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min. Na rysunku 4.63 przedstawiono uśrednione wartości wyznaczonych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Sm$ ,  $\Delta a$ ) oraz przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  uzyskanych w przypadku szlifowania ściernicą składaną (ściernica A:  $Q_{PCS} = 1,0-2,0$  l/min; sposób podawania PCS: odśrodkowo przez ściernicę) odniesione do wyników szlifowania przeprowadzonego z zastosowaniem dwóch ściernic referencyjnych:

- ściernica B: ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie z taką samą budową stref funkcjonalnych jak ściernica składana (oznaczenie: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%;  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min; sposób podawania PCS: zalewowo);
- ściernica C: ściernica w całości wykonana z ziaren SG<sup>TM</sup> numer 46 (oznaczenie: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG;  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min; sposób podawania PCS: zalewowo).

Z przedstawionego na rysunku 4.63 zestawienia wynika, że średnio ponadtrzykrotne zredukowanie wydatku PCS (z 5,0 do 1,5 l/min) spowodowało około od 30% do 40% wzrost wartości parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni obrobionej w porównaniu ze ściernicą B. W przypadku porównania ze ściernicą C różnice były mniejsze i wynosiły 25% dla parametru  $Ra$  oraz uległo zmniejszeniu o 1% dla parametru  $Rz$ . Oceniając wartości parametru  $Sm$ , charakteryzującego średnią odległość wierzchołków profilu chropowatości powierzchni obrobionej wzdłuż jego linii średniej, można stwierdzić, że powierzchnia ukształtowana ściernicą składaną była mniej rozwinięta i posiadała mniejszą liczbę wierzchołków profilu. Potwierdza to również najniższa w porównaniu wartość kąta pochylenia wierzchołków profilu nierówności  $\Delta a$ , uzyskana dla ściernicy składanej (rys. 4.63d). Uzyskane wartości parametrów chropowatości wskazują, że powierzchnia obrobiona ściernicą składaną ze zredukowanym wydatkiem PCS, charakteryzowała się mniejszą liczbą wyższych nierówności w porównaniu z wynikami uzyskanymi ściernicami referencyjnymi przy wydatku PCS wynoszącym 5,0 l/min. Parametry chropowatości powierzchni obrobionej ściernicą składaną są jednak akceptowalne w większości potencjalnych zastosowań tego narzędzia.



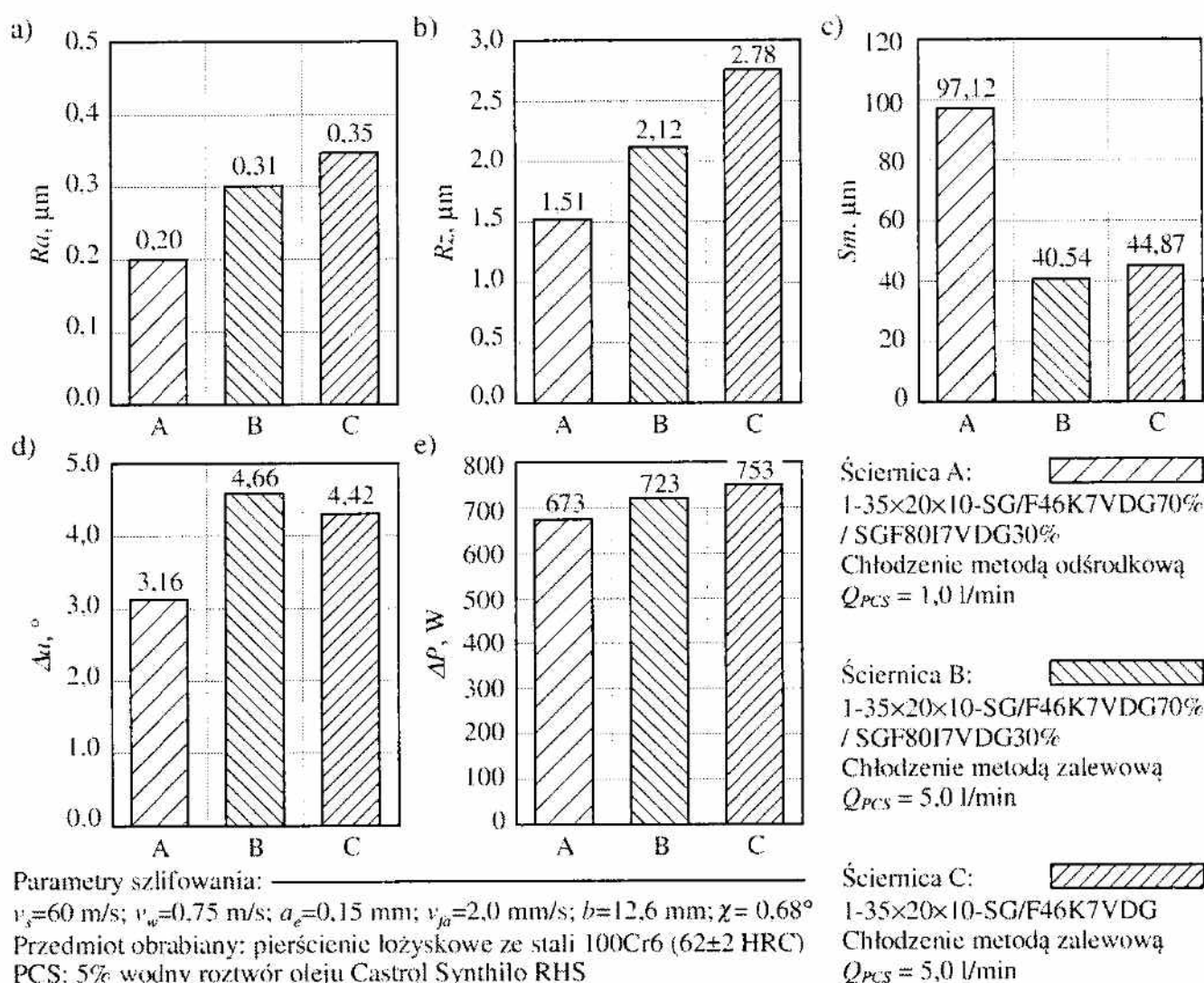
Rys. 4.63. Porównanie uśrednionych wyników (dla  $Q_{PCS} = 1,0-2,0 \text{ l/min}$ ) szlifowania ściernicą składaną (A), ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie (B) i ściernicą wykonaną w całości z ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46 (C): a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ ; b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ ; d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta\alpha$ ; e) przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$

Fig. 4.63. Comparison of the average results (for  $Q_{PCS} = 1.0-2.0 \text{ l/min}$ ) of grinding with sandwich grinding wheel (A), grinding wheel with zone-diversified structure (B) and grinding wheel made of SG<sup>TM</sup> grains no. 46 in the entire volume (C): a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta\alpha$ ; e) grinding power gain  $\Delta P$

Wprowadzenie opisywanej modyfikacji budowy ściernicy wraz z ograniczeniem wydatku PCS, nie wpłynęło w znaczący sposób na wartość przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$ , która zawierała się w zakresie od 723 W do 753 W dla wszystkich porównywanych ściernic (rys. 4.63e). Następnie sporzą-



dzono analogiczne porównanie, przyjmując dla ściernicy składanej najkorzystniejsze wartości uzyskane przy wydatku PCS wynoszącym 1,0 l/min i przedstawiono na rysunku 4.64.



Rys. 4.64. Porównanie wyników szlifowania ściernicą składaną (A), ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie (B) i ściernicą wykonaną w całości z ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46 (C): a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ ; b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ ; d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta a$ ; e) przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$

Fig. 4.64. Comparison of the grinding results with sandwich grinding wheel (A), grinding wheel with zone-diversified structure (B) and grinding wheel made of SG<sup>TM</sup> grains no. 46 in the entire volume (C): a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$ ; e) grinding power gain  $\Delta P$

Z przedstawionych na rysunku 4.64 wykresów wynika, że zastosowanie systemu odśrodkowego doprowadzenia PCS z wydatkiem 1,0 l/min pozwoliło na zmniejszenie wartości parametru  $Ra$  o około 35% w porównaniu z wynikami dla ściernicy B i 43% dla ściernicy C. Porównując wartości parametru  $Rz$ , zmiana na korzyść ściernicy składanej wynosiła odpowiednio 30% i 46% w porównaniu ze ściernicą B i C. Średnia odległość wierzchołków profilu chropowatości powierzchni obrobionej  $Sm$  dla powierzchni ukształtowanej ściernicą składaną była o 240% i 216% większa w porównaniu z wartościami zmierzonymi na powierzchniach obrobionych ściernicami B i C. Kąt pochylenia wierzchołków nierówności  $\Delta a$  był mniejszy o 32%, porównując ze ściernicą B i 29% odnosząc do wartości dla ściernicy C. Oznacza to, że w takim ujęciu, powierzchnia obrobiona ściernicą z odśrodkowym doprowadzeniem PCS do strefy szlifowania, przy wydatku  $Q_{PCS} = 1,0$  l/min, charakteryzowała się ponaddwukrotnie mniejszą liczbą nierówności, których wysokości były o ponad 30% niższe w porównaniu ze strukturą geometryczną powierzchni ukształtowaną w procesie szlifowania ściernicą B i C, z zastosowaniem chłodzenia zalewowego z wydatkiem  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min. Różnice mocy szlifowania były nadal nieznaczne – zaobserwowano zmniejszenie wartości  $\Delta P$  o 7% w porównaniu ze ściernicą B oraz o 11% w odniesieniu do ściernicy C (rys. 4.64e).

#### 4.5. Impregnacja ściernic pierwiastkami niemetalicznymi

W niniejszym rozdziale opisano wyniki prac badawczych dotyczących możliwości obniżenia adhezji produktów szlifowania, w tym głównie wiórów materiału obrabianego, do czynnej powierzchni ściernicy, na skutek wprowadzenia do masy ściernicy impregnatu w postaci siarki oraz alotropowych odmian węgla. Potrzeba tego typu modyfikacji ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego wynika przede wszystkim z rozwoju nowych materiałów konstrukcyjnych, takich jak stopy tytanu, aluminium, magnezu, niklu, kobaltu oraz stale wysokostopowe, występujących pod nazwami handlowymi Inconel<sup>®</sup>, Incoloy<sup>®</sup>, Nimonic<sup>®</sup>, Hastelloy<sup>®</sup> i inne. Materiały te zaliczane są do grupy trudno skrawalnych ze względu na [419, 377, 385, 420]:

- dużą ciągliwość, będącą przyczyną intensywnego zalepiania czynnej powierzchni narzędzi ściernych,
- dużą wytrzymałość i twardość, co wpływa na szybkie zużywanie się ziaren ściernych w wyniku doraźnego zużycia wytrzymałościowego,
- małą przewodność cieplną, powodującą duże przyrosty temperatury w strefie obróbki, co skutkuje intensywnym termicznym zużyciem ziaren ściernych i mostków spoiwa.

Materiały takie stosowane są m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, chemicznym i petrochemicznym, a także w technice medycznej.

Często wykonuje się z nich części pracujące w środowisku charakteryzującym się wysoką temperaturą i agresywnością, np. elementy turbin gazowych, silników lotniczych (łopatki i wieńce) [288]. Są to w większości precyzyjne stopy odlewnicze.

Jednym z istotnych problemów w szlifowaniu materiałów trudno skrawalnych jest intensywne zalepianie czynnej powierzchni ściernicy ciągłymi wiórami [419, 377, 385, 420]. Stąd niezwykle istotną kwestią jest poszukiwanie sposobów przeciwdziałania ich powstawaniu na CPS. Ważne jest również monitorowanie i diagnostyka stanu CPS, w celu wczesnego wykrywania zalepień i zapobiegania ich negatywnym skutkom, np. poprzez zmianę parametrów szlifowania lub przerwanie procesu i obciążenie ściernicy.

#### 4.5.1. Impregnowanie ściernic siarką

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 wieku [66, 84, 115, 119]. Obecnie związki siarki najczęściej stosowane są jako dodatki do płynów obróbkowych [40, 56, 197, 198, 276, 345] oraz wprowadzane do ściernic w formie impregnatu [78, 122, 290, 366, 372].

Impregnacja ściernicy ma głównie na celu zmniejszenie intensywności zalepiania CPS materiałem obrabianym, a tym samym wydłużenie okresu jej trwałości, oraz wpływa również pozytywnie na jakość powierzchni obrobionej. Ściernice nasiarczane znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle łożyskowym i motoryzacyjnym. Szacuje się, że aż 70% do 80% oselek do honowania jest impregnowanych siarką [122]. Zastosowanie znanych z literatury [39, 66, 84, 115, 119] metod nasiarczania ściernic w warunkach grawitacyjnych lub podwyższonego ciśnienia, powoduje często nierównomierne rozłożenie siarki w objętości ściernicy oraz całkowite wypełnienie wolnych przestrzeni międzyziarnowych. W przypadku szlifowania materiałów trudno skrawalnych ważne jest stosowanie ściernic o dużej porowatości w celu zapewnienia skutecznego transportu długich i ciągłych wiórów poza strefę obróbki. Impregnowanie tego typu ściernic siarką w sposób tradycyjny spowodowałoby utratę dużej otwartości struktury CPS. Dlatego też w opisywanych badaniach zastosowano metodę nasiarczania, w której odwirowywano nadmiar siarki [243, 410].

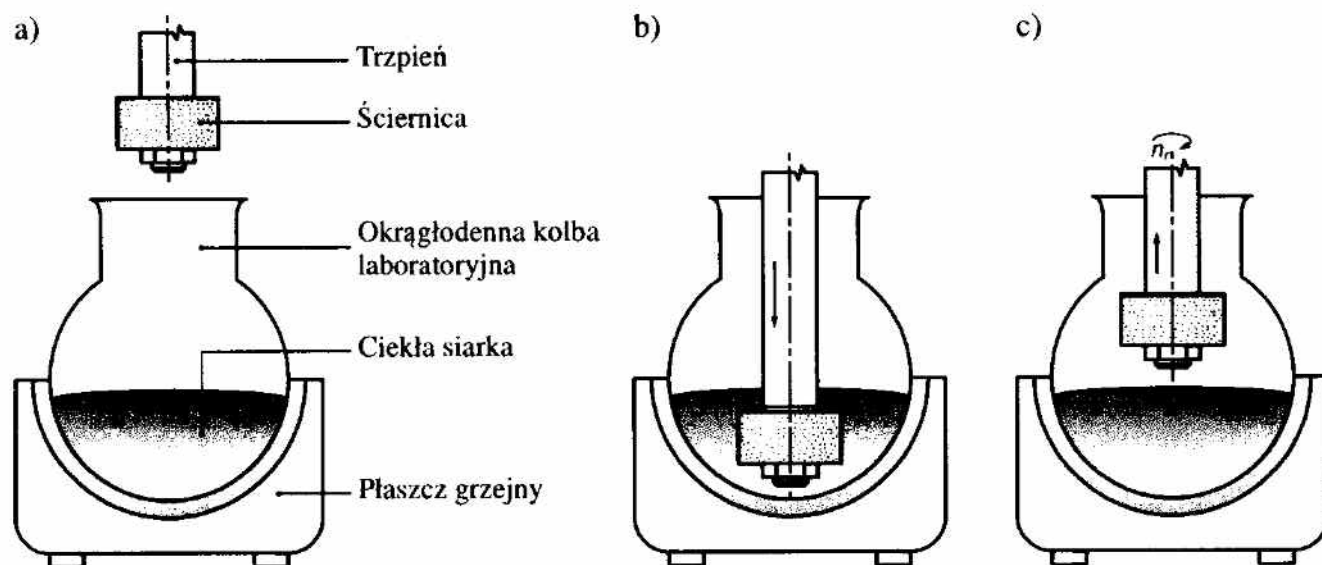
#### Metoda nasiarczania ściernic ze spoiwem ceramicznym

Przed przystąpieniem do procesu nasiarczania ściernicę o oznaczeniu 1-35×20×10-SG/F46G10VTO poddano zabiegowi osuszania w celu wyeliminowania obecności wody. Ściernicę suszono z użyciem suszarki laboratoryjnej w temperaturze 80°C (353 K) w czasie 30 minut. Osuszoną ściernicę umiesz-

czono w eksykatorze i pozostawiono do ostygnięcia. Następnie ściernicę zważono na wadze analitycznej typu WPA 180/S produkcji firmy Radwag o dokładności 0,0001 g. Waga ściernicy nienasiarczonej wynosiła  $m_l = 24,28$  g.

Po przygotowaniu ściernicy przystąpiono do procesu nasiarczania. Siarka w temperaturze pokojowej jest ciałem stałym. Jej temperatura topnienia wynosi ok. 115°C (388 K). W celu wprowadzenia siarki do całej objętości ściernicy proces nasiarczania prowadzono w przedziale temperatur wynoszącym od 120°C (393 K) do 160°C (433 K), w którym siarka jest cieczą.

Na rysunku 4.65 przedstawiono schemat stanowiska do nasiarczania ściernic ceramicznych. Głównym elementem stanowiska był płaszcz grzejny typu CMUT1000/CE firmy Thermo Fisher Scientific Inc. Został on zastosowany do wytworzenia i utrzymania żądanej temperatury w okrągłodennej kolbie laboratoryjnej, w której prowadzono nasiarczanie. Stałą siarkę umieszczono w kolbie laboratoryjnej okrągłodennej wykonanej ze szkła termoodpornego i ogrzewano z użyciem płaszcza grzejnego do temperatury 150°C (423 K) – rysunek 4.65a.



Rys. 4.65. Schemat stanowiska do nasiarczania ściernic: a) główne elementy stanowiska; b) ustawienie w fazie nasiarczania; c) ustawienie w fazie odwirowywania

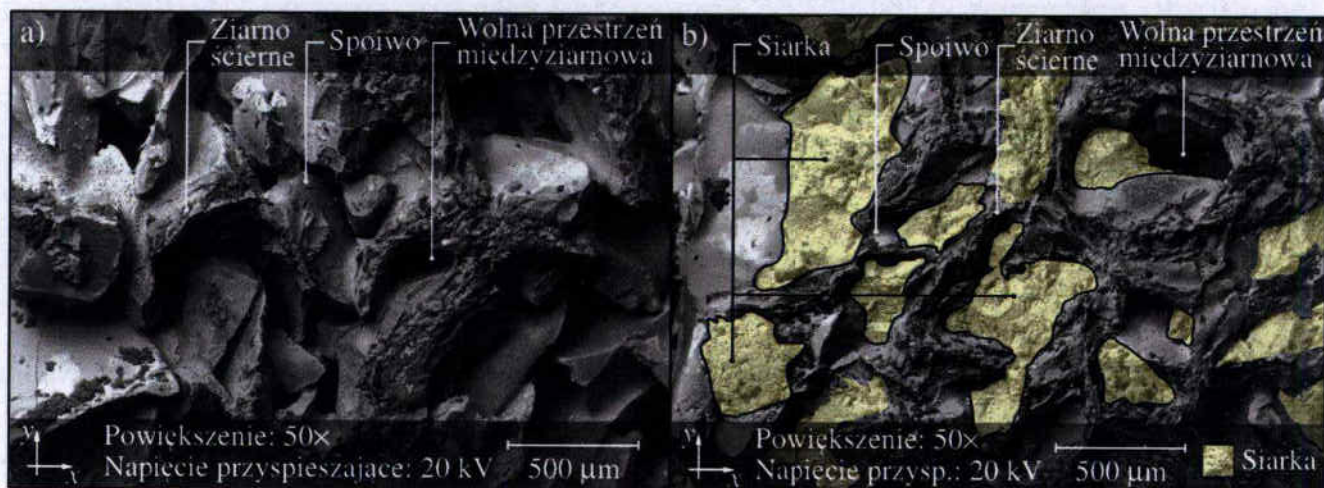
Fig. 4.65. Schematic diagram of experimental setup for sulfurization of grinding wheels: a) main elements of the setup; b) position in sulfurization stage; c) position in centrifugation stage

Ściernicę zamocowano na trzpieniu połączonym z silnikiem zapewniającym ruch obrotowy  $n_r$  ściernicy z prędkościami w zakresie od 0 do 2900  $\text{min}^{-1}$ . Dodatkowo silnik wraz z trzpieniem przymocowano do prowadnicy pozwalającej na ruch pionowy w zakresie 200 mm. Po uzyskaniu wymaganej temperatury zanurzono ściernicę w ciekłej siarce na 10 minut (rys. 4.65b). Czas ten pozwala na ogrzanie ściernicy i wyrównanie temperatury siarki w całej

objętości, co zapewnia jej równomierne wnikanie w pory ściernicy. Po 10 minutach ściernicę podniesiono na wysokość 30 mm ponad lustro ciekłej siarki i wprowadzono w ruch obrotowy z prędkością  $n_r = 1200 \text{ min}^{-1}$ , w celu odwirowania nadmiaru siarki (rys. 4.65c). Następnie wyłączono czasę grzejącą, pozwalając na obniżenie temperatury w kolbie do temperatury krzepnięcia siarki. Wirowanie zakończono po czasie  $t_r = 3 \text{ min}$ , w momencie, gdy siarka nie wydostawała się już ze ściernicy pod wpływem siły odśrodkowej. Stopień odwirowania można było regulować, dobierając wartości jego parametrów (prędkość wirowania  $n_r$  oraz czas wirowania  $t_r$ ).

Końcowe odwirowanie płynnej siarki jest bardzo istotne ze względów technologii procesu szlifowania. Dzięki odwirowaniu siarka rozprowadzana jest równomiernie w całej objętości ściernicy. Nie dochodzi do wypełnienia siarką wszystkich przestrzeni międzyziarnowych, które ułatwiają docieranie płynu chłodząco-smarującego do strefy szlifowania oraz usuwanie z niej produktów procesu. Po wystudzeniu ściernica została ponownie zważona, a jej masa wynosiła  $m_2 = 26,90 \text{ g}$ . Oznacza to, że do ściernicy wprowadzono 2,62 g siarki, a wyrażony procentowo wzrost masy ściernicy wyniósł 10,79%.

Na rysunku 4.66 przedstawiono porównanie widoków mikroskopowych CPS przed (rys. 4.66a) i po procesie nasiarczania (rys. 4.66b). Dla lepszego zobrazowania efektu nasiarczania, na rysunku 4.66b zaznaczono obszary powierzchni ściernicy z widoczną siarką.



Rys. 4.66. Obrazy mikroskopowe CPS z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane o rozmiarze 46, wykonane z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego: a) CPS przed nasiarczaniem; b) CPS po nasiarczaniu z zaznaczonymi obszarami, na których widoczna jest siarka

Fig. 4.66. SEM microphotography of the grinding wheel active surface made of microcrystalline sintered corundum grains size 46: a) before sulfurization, b) after sulfurization with marked areas of visible sulfur

Najważniejszą różnicą widoczną po porównaniu obrazów mikroskopowych CPS nienasiarzonej (rys. 4.66a) i po nasiarowaniu (rys. 4.66b) jest duży udział siarki na powierzchni ściernicy oraz zmniejszenie objętości wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Otwarta struktura ściernicy widoczna na rysunku 4.66a zapewniła równomierne rozprowadzenie siarki w całej objętości narzędzia.

Rozwiązanie takie zapewnia doprowadzenie siarki bezpośrednio do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym. Fakt, że siarka w znacznym stopniu wypełniła pory ściernicy gwarantuje, że zabiegi obciążania, kondycjonowania i ostrzenia ściernicy nie wpłyną znacząco na udział siarki w procesie szlifowania. Zauważyć jednak należy, że zapełnienie porów ściernicy powoduje ograniczenie pozytywnych skutków stosowania ściernic o otwartej strukturze czy też ściernic wielkoporowych.

### **Metodyka badań doświadczalnych szlifowania otworów w materiałach trudno skrawalnych z użyciem ściernic impregnowanych siarką**

Badania doświadczalne miały na celu ustalenie wpływu impregnowania ściernicy siarką na przebieg i wyniki procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem metody badania zjawisk zużycia CPS w zabiegu szlifowania wgłębnego ściernicą z ukształtowanymi stopniami o różnej średnicy, opisanej w podrozdziale 3.2. Proces szlifowania wgłębnego prowadzono z następującymi stałymi wartościami głównych parametrów obróbkowych:  $v_s = 30$  m/s,  $v_w = 0,75$  m/s,  $v_{ff} = 0,02$  mm/s. Próby wykonano dla dwóch wartości głębokości szlifowania:  $a_e = 0,06$  i  $0,12$  mm. Jako PCS zastosowano 5% wodny roztwór oleju Castrol Syntilo RHS, który doprowadzono do strefy szlifowania metodą zalewową z wydatkiem  $Q_{PCS} = 3,0$  l/min.

W badaniach zastosowano stanowisko badawcze wyposażone w szlifierkę uniwersalną RUP 28P (opis w podrozdziale 4.1.2). Użyto ściernic o oznaczeniu technicznym: 1-35×20×10-SG/F46G10VTO zbudowanych z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane o numerze 46 oraz z modyfikowanego szklano-krystalicznego spoiwa ceramicznego odmiany A o udziale objętościowym  $V_{sp} = 11,5\%$ , opisanego w podrozdziale 4.2.1. Ściernice podzielono na dwie grupy, z których jedna pozostała niemodyfikowana, natomiast druga została poddana procesowi impregnowania siarką w Zakładzie Chemii Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W wyniku tego procesu uzyskano 10% wzrost masy ściernicy, odpowiadający masie siarki, która została równomiernie rozprowadzona w jej całej objętości.

Stan czynnej powierzchni ściernicy po szlifowaniu oceniany był metodą topografii laserowej z użyciem systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 (opis w podrozdziale 3.2.2), metodą skaningowej mikroskopii elektronowej z użyciem

mikroskopu JSM-5500LV (opis w podrozdziale 3.4.2) oraz metodą skaterometrii laserowej na specjalnie zestawionym stanowisku pomiarowym, opisanym w podrozdziale 3.5. Dodatkowo rejestrowano moc szlifowania oraz mikrotopografie powierzchni przedmiotów po szlifowaniu z użyciem profilometru stykowego Hommel-Tester T8000, scharakteryzowanego w podrozdziale 3.2.2.

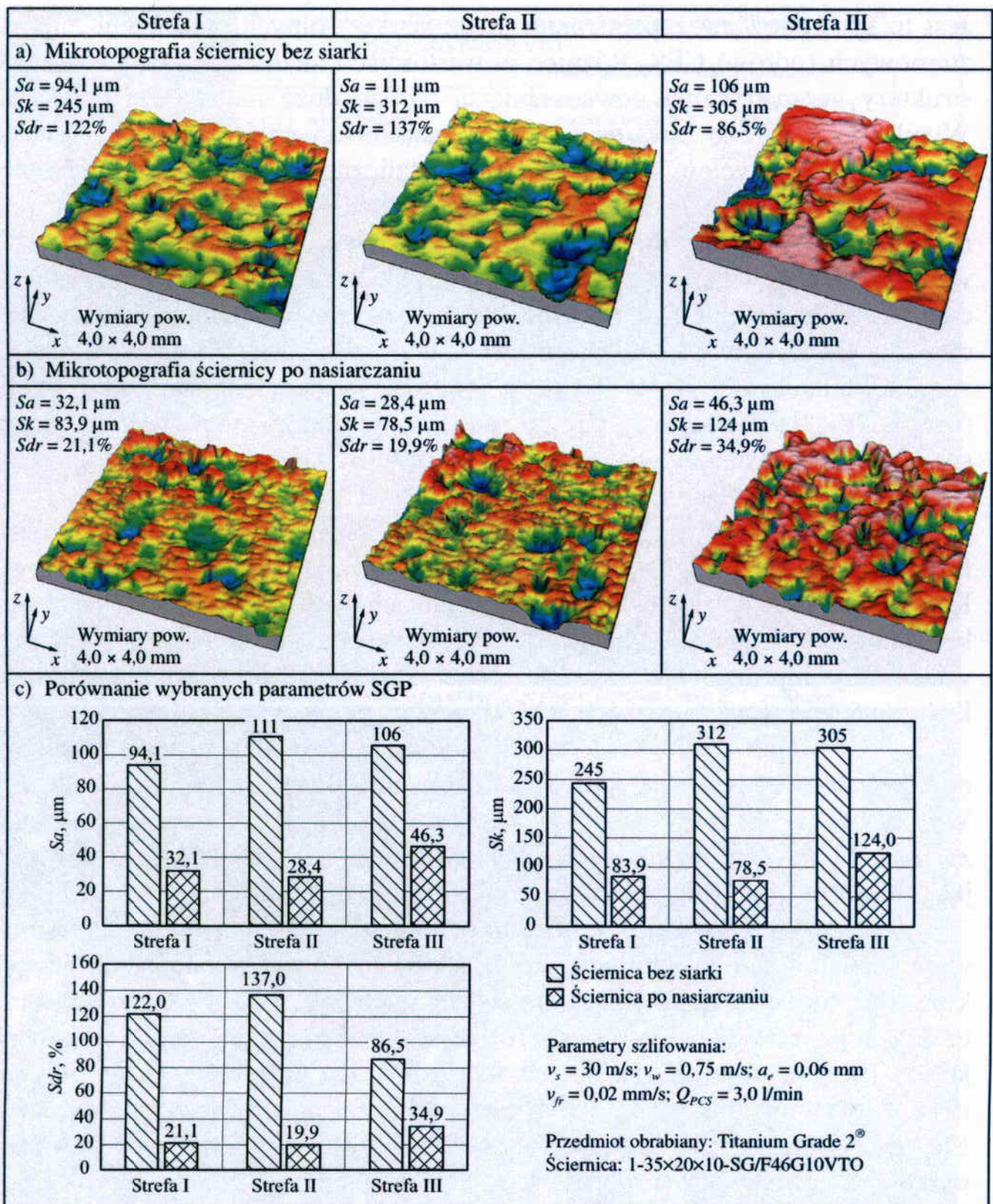
Rejestrowano mikrotopografie obszarów będących wycinkiem czynnej powierzchni ściernicy o rozmiarze  $19 \times 5$  mm lub powierzchni przedmiotu obrobionego o rozmiarze  $18 \times 5$  mm, z których następnie wydzielono i poddano poziomowaniu powierzchnie o wymiarze  $4 \times 4$  mm, odpowiadające kolejnym trzem strefom roboczym ściernicy ze stopniami o różnej średnicy. Z tak przygotowanych mikrotopografii wyznaczano następnie parametry SGP należące do grupy parametrów wysokościowych ( $Sa$  i  $St$ ) oraz parametr funkcjonalny  $Sk$  i hybrydowy  $Sdr$ . Analizując wartość wysokości chropowatości rdzenia  $Sk$  oraz współczynnika rozwinięcia powierzchni  $Sdr$ , można wnioskować o stopniu zalepienia CPS oraz o stopniu wierzchołków ziaren ściernych. W przypadku powierzchni obrobionej parametry te dają możliwość oceny jej właściwości eksploatacyjnych i przewidywania zachowania się powierzchni w różnych warunkach jej użytkowania.

### **Wyniki badań doświadczalnych szlifowania dla naddatku obróbkowego wynoszącego $a_e = 0,06$ mm**

W pierwszej części badań wykonano szereg eksperymentów z całkowitym naddatkiem obróbkowym wynoszącym  $a_e = 0,06$  mm. W takich warunkach (przy czasie szlifowania  $t \approx 3$  s) wydajność ubytkowa wynosiła  $Q_w \approx 21$  mm<sup>3</sup>/s.

W drugiej części badań naddatek obróbkowy został podwojony i w strefie I wynosił 0,04 mm, w strefie II 0,08 mm, a w strefie III 0,12 mm. Czas obróbki wynikał z przyjętej prędkości posuwu wglębnego  $v_f = 0,04$  mm/s i wynosił odpowiednio dla kolejnych stref:  $t_I \approx 1$  s,  $t_{II} \approx 2$  s,  $t_{III} \approx 3$  s. Przy takich parametrach obróbki uzyskano trzy strefy o zmiennej wartości ubytku materiału  $V_w$ , którego wartość zmieniała się od 42,22 mm<sup>3</sup> dla strefy I, do 126,67 mm<sup>3</sup> w strefie III. Szlifowanie z celowo zadaną dużą wydajnością ubytkową ( $Q_w \approx 42$  mm<sup>3</sup>/s) znacząco zintensyfikowało powstawanie zalepień na CPS.

Zestawienie wyników analiz struktury geometrycznej CPS nieimpregnowanej oraz impregnowanej siarką, po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> z naddatkiem obróbkowym  $a_e = 0,06$  mm, przedstawiono na rysunku 4.67. Porównanie wyznaczonych wartości parametrów opisujących strukturę geometryczną CPS nieimpregnowanej do wartości określonych dla ściernicy impregnowanej siarką (rys. 4.67c) wskazuje, że ściernice impregnowane odznaczają się znacznie mniejszą chropowatością.



Rys. 4.67. Porównanie mikrotopografii i wybranych parametrów SGP trzech stref CPS po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2® z nadładkiem obróbkowym  $a_e = 0,06 \text{ mm}$ : a) ściernica bez siarki; b) ściernica po nasiarczeniu; c) porównanie wartości wybranych parametrów SGP

Fig. 4.67. Comparison of microtopography (a, b) and values of selected roughness parameters (c) of the three zones of the grinding wheel without sulfur (a) and grinding wheel after sulfurization (b) –  $a_e = 0.06 \text{ mm}$



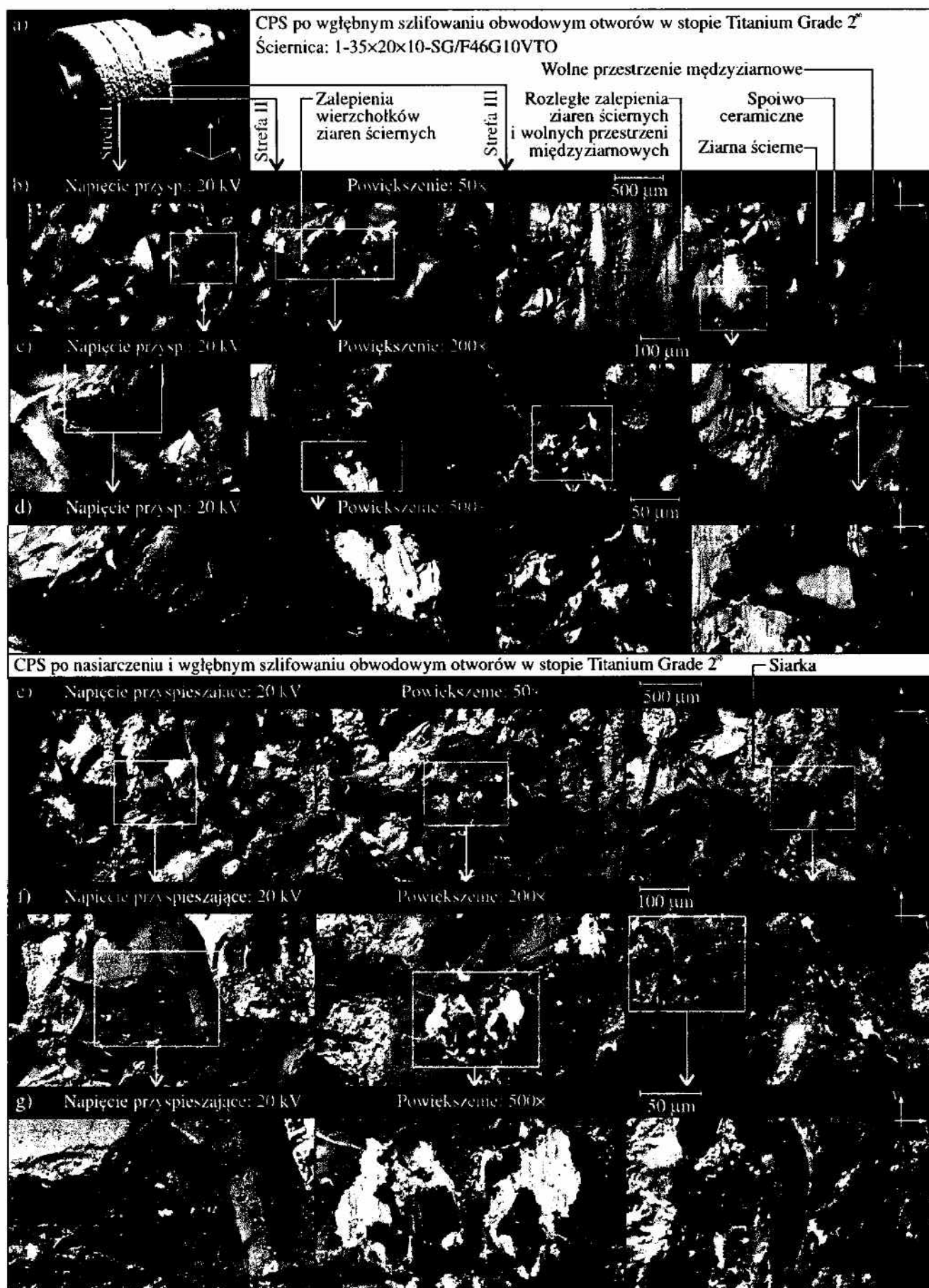
Jest to spowodowane wypełnieniem przez siarkę wolnych przestrzeni międzyziarnowych (porów) CPS. Różnice w wartościach analizowanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni są bardzo duże i dochodzą do 500%. Wynika to z bardzo otwartej struktury zastosowanych w badaniach ściernic wykonanych z użyciem spoiwa szklanokrystalicznego. W przypadku ściernicy impregnowanej, pory ściernicy wypełnione zostają siarką, przez co zmienia się radykalnie wysokość nierówności CPS. Zmiana charakteru powierzchni widoczna jest również na zestawieniu obrazów mikrotopografii CPS zamieszczonym na rysunku 4.67a i 4.67b. Mikrotopografie ujawniają również duże obszary zalepień w strefie III ściernicy nieimpregnowanej, co wpłynęło na znaczące (około 40%) zmniejszenie wartości parametru  $S_{dr}$  w tej strefie (rys. 4.67c). Na kolejnym rysunku przedstawiono obrazy mikroskopowe zarejestrowane na CPS nieimpregnowanej (rys. 4.68a-d) oraz ściernicy impregnowanej siarką (rys. 4.68e-g) po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>.

Wnioski wynikające z analizy mikrotopografii poszczególnych stref funkcjonalnych CPS potwierdzają zarejestrowane obrazy mikroskopowe. Porównując obrazy zamieszczone na rysunkach 4.68b-d z obrazami na rysunkach 4.68e-g, można wyraźnie dostrzec znacznie mniejszą liczbę porów w ściernicy impregnowanej siarką. Jest to szczególnie widoczne przy niewielkich powiększeniach (rys. 4.68a i 4.68d).

Na rysunku 4.68b dla strefy III widoczne jest bardzo rozległe zalepienie międzyziarnowe powstałe podczas szlifowania stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>. Wprowadzenie do masy ściernicy siarki pozwoliło na znaczące ograniczenie zalepienia CPS produktami szlifowania, co widać na rysunku 4.68e odpowiadającemu strefie III, która szlifowała najdłużej ( $a_e = 0,06$  mm).

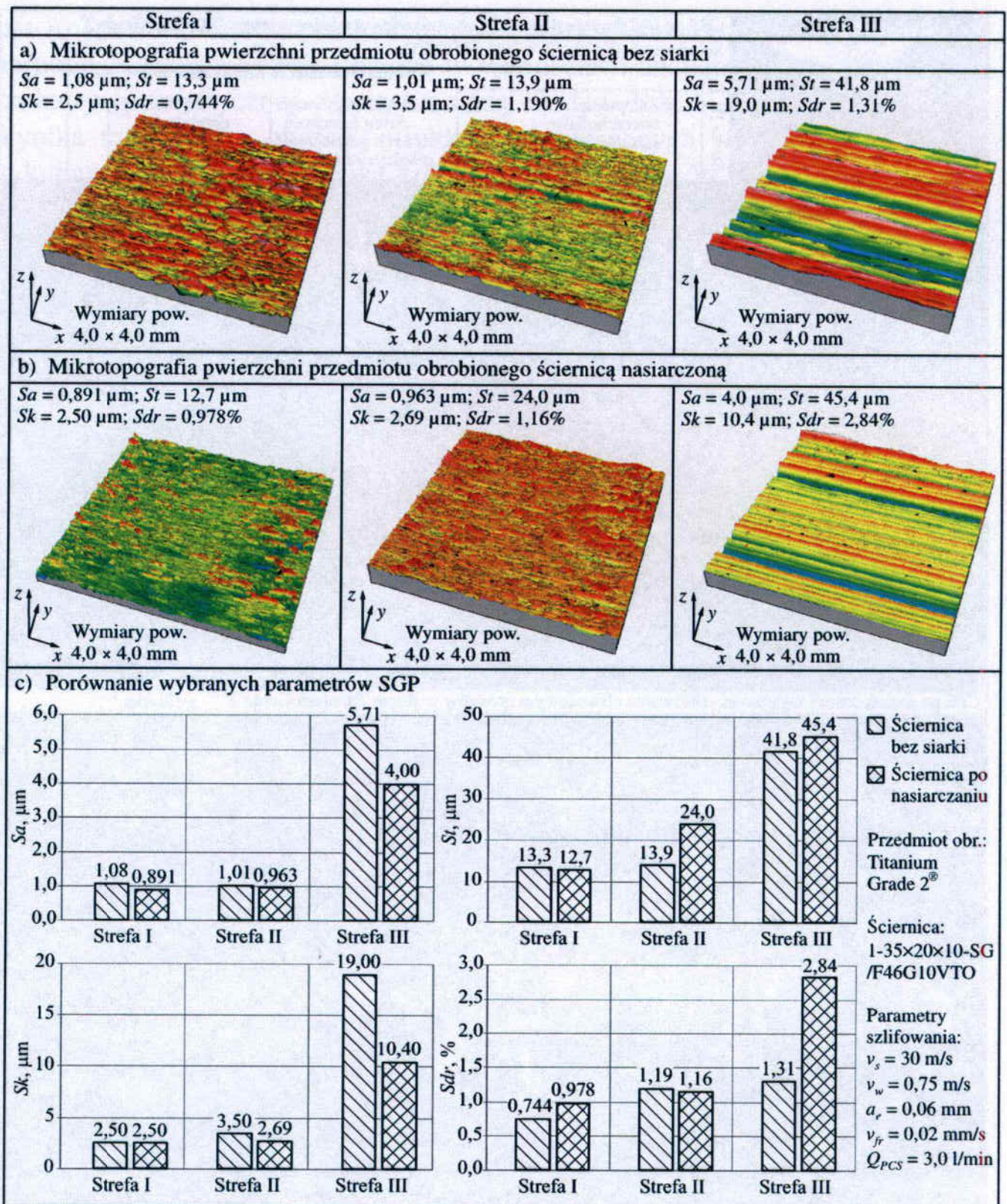
Obrazy wykonane przy większym powiększeniu ujawniły, że również w przypadku ściernicy impregnowanej siarką dochodzi do zalepienia niewielkich obszarów na wierzchołkach ziaren ściernych (rys. 4.68f i 4.68g). Świadczy to o utrudnionym docieraniu siarki w miejsca bezpośredniego styku wierzchołków skrawających z materiałem obrabianym, przez co nie zauważono wyraźnego wpływu impregnowania siarką na zjawisko zalepienia wierzchołków ziaren. Można natomiast stwierdzić, że nasiarczanie ściernicy w sposób wyraźny ogranicza zjawisko powstawania rozległych zalepień międzyziarnowych CPS.

Na rysunku 4.69 zestawiono widoki mikrotopografii powierzchni przedmiotu w kolejnych trzech strefach po szlifowaniu ściernicą nieimpregnowaną (rys. 4.69a) i ściernicą impregnowaną siarką (rys. 4.69b). Zamieszczono również wykresy wartości wyznaczonych parametrów SGP stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> po szlifowaniu (rys. 4.69c).



Rys. 4.68. Obrazy mikroskopowe SEM trzech stref CPS bez (a-d) i z siarką (e-f), po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> ( $a_e = 0,06$  mm)

Fig. 4.68. SEM images of the grinding wheel without (a-d) and with sulfur (e-f)



Rys. 4.69. Porównanie mikrotopografii i wybranych parametrów SGP trzech stref powierzchni stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> po szlifowaniu z nadładkiem obróbkowym  $a_e = 0,06 \text{ mm}$ : a) z użyciem ściernicy bez siarki; b) z użyciem ściernicy nasiarczonej; c) porównanie wartości wybranych parametrów SGP

Fig. 4.69. Comparison of microtopography (a, b) and selected roughness parameters (c) of the three zones of the Titanium Grade 2<sup>®</sup> surface after grinding using grinding wheel without (a) and with sulfur (b) –  $a_e = 0.06 \text{ mm}$

Uzyskane wartości parametrów chropowatości powierzchni wskazują na bardzo duży wzrost chropowatości w strefie III. Oznacza to, że uzyskiwana jakość powierzchni obrobionej w znaczącym stopniu zależy od głębokości szlifowania. Nie stwierdzono natomiast istotnego i jednoznacznego wpływu impregnowania czynnej powierzchni siarką na parametry opisujące strukturę geometryczną uzyskanych powierzchni po szlifowaniu. Zauważyć należy wysoki poziom wartości parametrów SGP. Wartość parametru  $Sa$  dla powierzchni po szlifowaniu nie powinna przekraczać  $Sa = 0,63 \mu\text{m}$ . Uzyskiwane w opisywanych badaniach chropowatości powierzchni obrobionej mogą jednak znacznie odbiegać od tej normy, ze względu na specyfikę zastosowanej metody badawczej, w której pomijany jest etap szlifowania wykończeniowego.

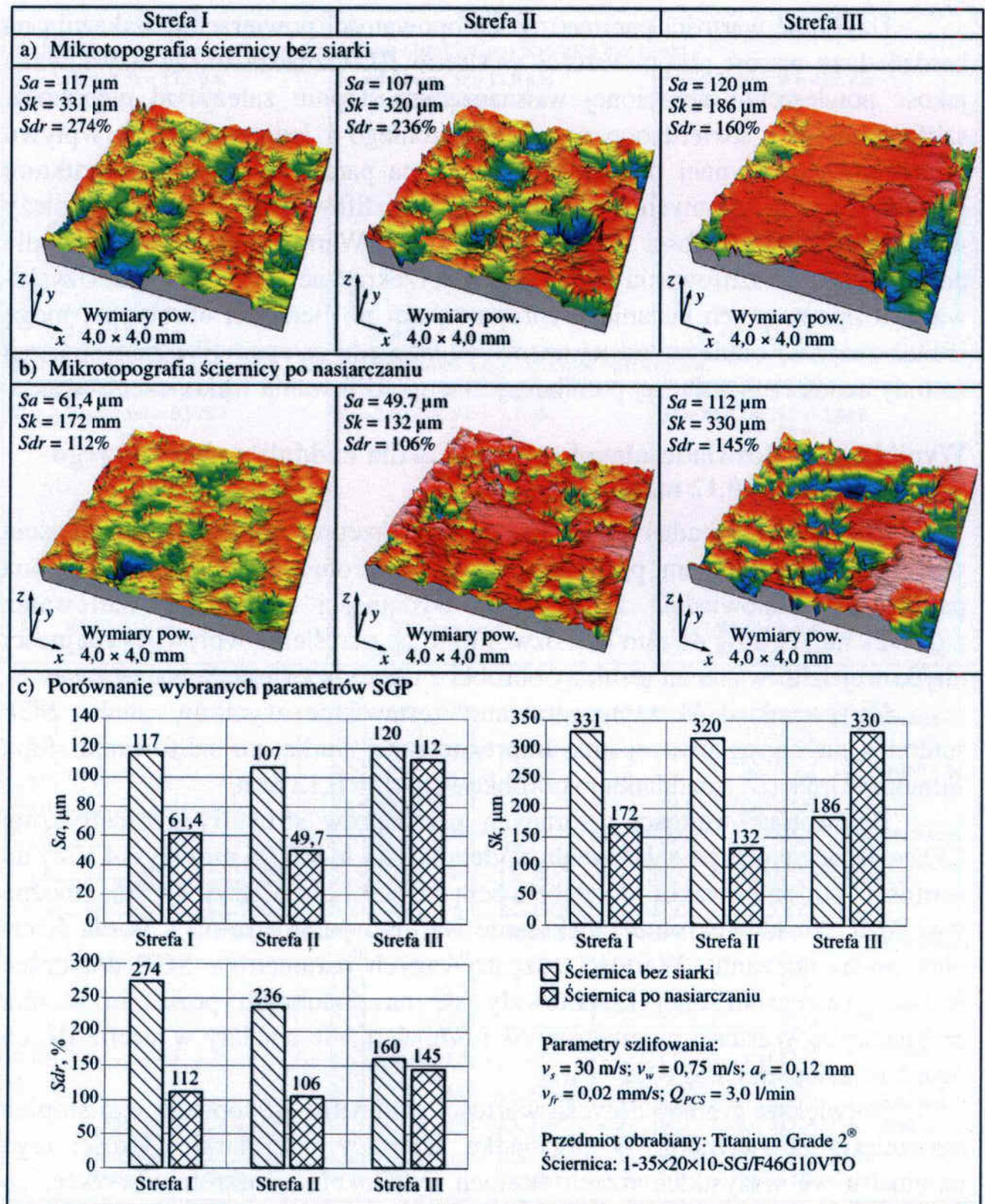
### **Wyniki badań doświadczalnych szlifowania dla naddatku obróbkowego wynoszącego $a_e = 0,12 \text{ mm}$**

Drugą część badań doświadczalnych przeprowadzono z głębokością szlifowania  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ , przy tym samym czasie obróbki  $t \approx 3 \text{ s}$ . Taka zmiana parametrów odpowiadała zwiększeniu wydajności ubytkowej szlifowania z  $Q_w \approx 21 \text{ mm}^3/\text{s}$  do  $\approx 42 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Pozwoliło to na określenie wpływu wydajności ubytkowej szlifowania na rezultaty obróbki z użyciem ściernicy nasiarczonej.

Na rysunku 4.70 zaprezentowano zestawienie wyników analiz SGP ściernicy nieimpregnowanej oraz impregnowanej siarką, po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> z naddatkiem obróbkowym  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ .

Porównując wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej CPS wyznaczonych po szlifowaniu z głębokością  $a_e = 0,06 \text{ mm}$  (rys. 4.67c) do wartości po szlifowaniu z głębokością  $a_e = 0,12 \text{ mm}$  (rys. 4.70c), można stwierdzić ponaddwukrotne zwiększenie wartości parametru  $Sa$  i  $Sk$  dla ściernicy po nasiarczeniu. Wartości rozpatrywanych parametrów SGP dotyczące ściernicy nienasiarczonej kształtowały się na podobnym poziomie w obu przypadkach. Wartości parametrów  $Sk$  i  $Sdr$  wyraźnie zmalały w strefie III, co wynika z zalepień CPS.

Największe zmiany dotyczą wartości parametru  $Sdr$  opisującego stopień rozwinięcia powierzchni. W przypadku ściernicy bez siarki wartości tego parametru we wszystkich trzech strefach były około dwukrotnie wyższe, co można tłumaczyć losowym charakterem budowy CPS. Natomiast dla ściernicy nasiarczonej różnica wynosiła ponad 500% dla strefy I (wzrost z  $Sdr = 21,1\%$  dla  $a_e = 0,06 \text{ mm}$  do  $Sdr = 112\%$  dla  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ ) i II (wzrost z  $Sdr = 19,9\%$  dla  $a_e = 0,06 \text{ mm}$  do  $Sdr = 106\%$  dla  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ ). W strefie III wartość  $Sdr$  wzrosła ponadczterokrotnie z  $Sdr = 34,9\%$  dla  $a_e = 0,06 \text{ mm}$  do  $Sdr = 145\%$  dla  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ .



Rys. 4.70. Porównanie mikrotopografii i wybranych parametrów SGP trzech stref CPS po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2® z nadatkiem obróbkowym  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ : a) ściernica bez siarki; b) ściernica po nasiarczeniu; c) porównanie wartości wybranych parametrów SGP

Fig. 4.70. Comparison of microtopography (a, b) and values of selected roughness parameters (c) of the three zones of the grinding wheel without sulfur (a) and grinding wheel after sulfurization (b) –  $a_e = 0.12 \text{ mm}$

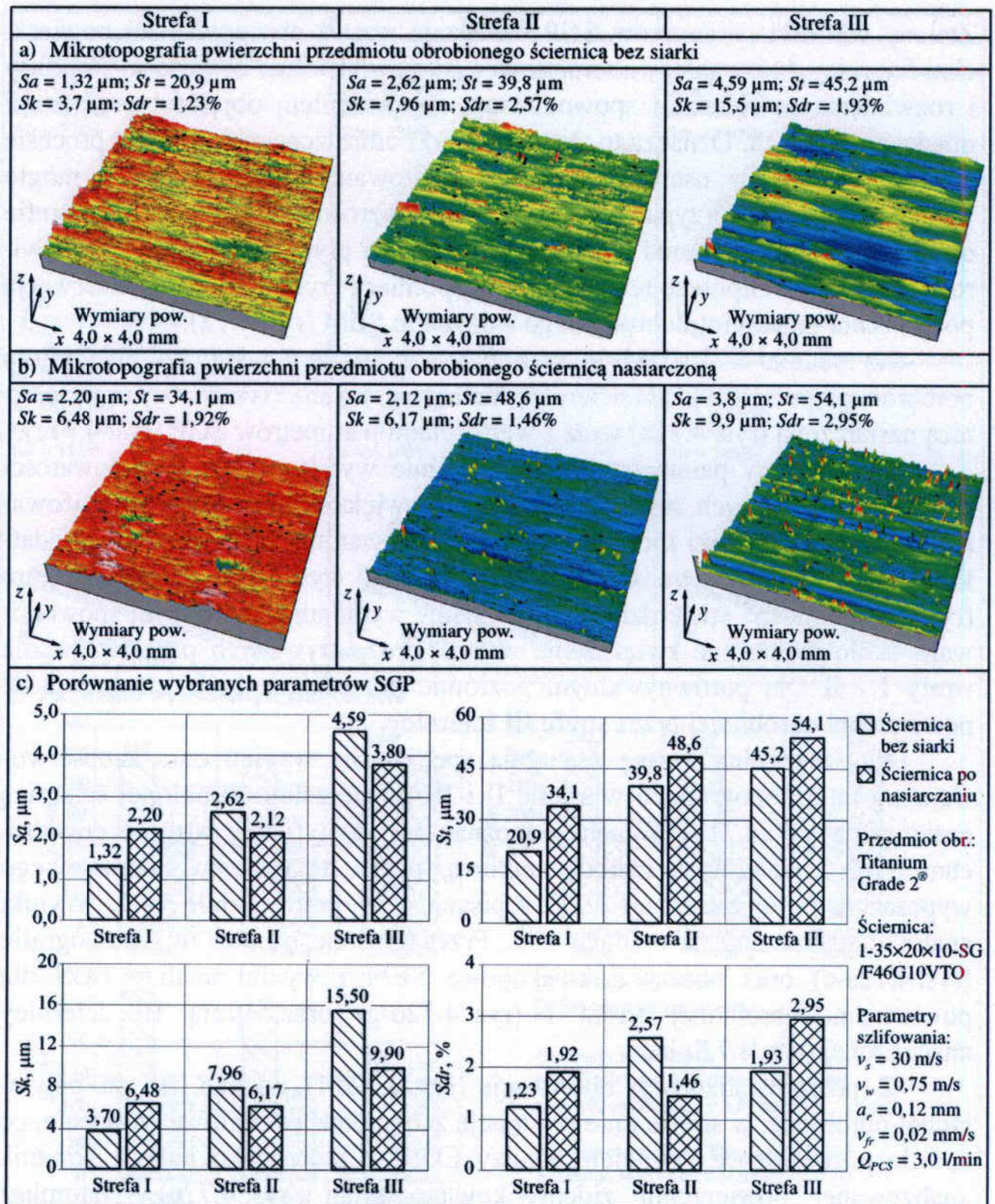
Zmiany wartości parametrów SGP oznaczają wzrost chropowatości powierzchni ściernicy, który należy interpretować jako zwiększenie otwartości struktury i rozwinięcia powierzchni spowodowany zwiększeniem objętości przestrzeni międzyziarnowych. Oznacza to, że część siarki umieszczonej w CPS w procesie nasiarczania została usunięta w trakcie szlifowania. Takie zjawisko mogło wystąpić tylko w przypadku nadmiernego wzrostu temperatury w strefie obróbki. Spowodowała ona przejście siarki w stan płynny i wywołała jej odwirowanie z CPS. Hipotezę tę potwierdzają pomiary (rys. 4.71) oraz obserwacja powierzchni przedmiotu obrobionego z użyciem SEM (rys. 4.72).

Na rysunku 4.71 przedstawiono mikrotopografie powierzchni przedmiotu obrobionego po szlifowaniu ściernicą nieimpregnowaną (rys. 5.70a) oraz ściernicą nasiarczoną (rys. 4.71b) wraz z wartościami parametrów SGP (rys. 4.71c).

Z wykresów parametrów SGP wyraźnie wynika wzrost chropowatości powierzchni kolejnych stref, odpowiadający zwiększaniu głębokości szlifowania. Porównując wyniki zarejestrowane po szlifowaniu z maksymalnym naddatkiem obróbkowym wynoszącym  $a_e = 0,06$  mm (rys. 4.69c) i  $a_e = 0,12$  mm (rys. 4.71c), można stwierdzić, że podwojenie wydajności ubytkowej spowodowało około dwukrotne zwiększenie wartości rozpatrywanych parametrów dla strefy I i II. Na porównywalnym poziomie pozostała jedynie chropowatość powierzchni obrobionej przez strefę III ściernicy.

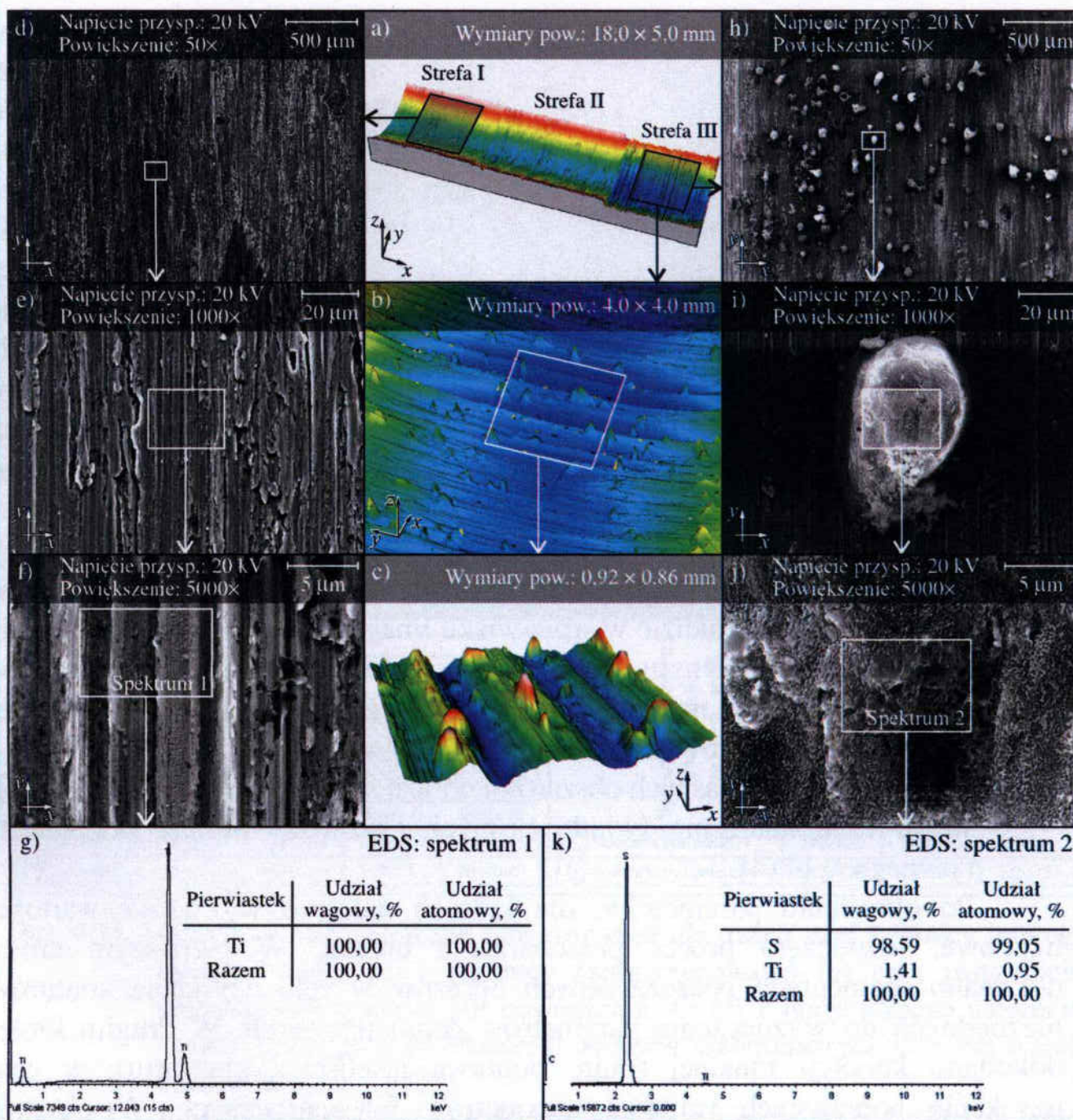
Na szczególną uwagę zasługują specyficzne wypiętrzenia zaobserwowane na mikrotopografiach w strefie II i III powierzchni obrobionej ściernicą nasiarczoną (rys. 4.71b). W celu jednoznacznej identyfikacji wtrąceń powierzchniowych zmierzonych metodą stykową, użyto mikroskopu skaningowego wyposażonego w analizator EDS, opisanego w podrozdziale 3.4.2. Wyniki analiz zamieszczono na rysunku 4.72. Przedstawiono na nim mikrotopografie (rys. 4.72a-c) oraz obrazy mikroskopowe SEM i wyniki analizy EDS dla powierzchni obrobionej strefą I (rys. 4.72d-g) oraz strefą III ściernicy nasiarczonej (rys. 4.72h-k).

Z przeprowadzonych obserwacji (rys. 4.72d-f) wynika, że na powierzchni obrobionej w strefie I nie występują żadne powierzchniowe wtrącenia, co zostało potwierdzone wynikiem analizy EDS, w której jako jedyny składnik analizowanej powierzchni zidentyfikowano tytan (rys. 4.72g). Natomiast w przypadku powierzchni w strefie III, zaobserwowano bardzo liczne wtrącenia zbliżone kształtem do kropli (rys. 4.72h-j). Analiza EDS wykazała, że zbudowane są one z siarki (rys. 4.72k). Śladowa zawartość tytanu w analizie wynika z bliskości podłoża, na którym osadziły się badane obiekty.



Rys. 4.71. Porównanie mikrotopografii i wybranych parametrów SGP trzech stref powierzchni stopu Titanium Grade 2® po szlifowaniu z nadładkiem obróbkowym  $a_e = 0,12 \text{ mm}$ : a) z użyciem ściernicy bez siarki; b) z użyciem ściernicy nasiarczonej; c) porównanie wartości wybranych parametrów SGP

Fig. 4.71. Comparison of microtopography (a, b) and selected roughness parameters (c) of the three zones of the Titanium Grade 2® surface after grinding using grinding wheel without (a) and with sulfur (b) –  $a_e = 0.12 \text{ mm}$



Rys. 4.72. Obrazy mikroskopowe SEM i wyniki analizy EDS powierzchni stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> po szlifowaniu ściernicą nasiarczoną z naddatkiem obróbkowym  $a_e = 0,12$  mm: a-c) mikrotopografia powierzchni obrobionej; d-f) obrazy SEM powierzchni przedmiotu obrobionego w strefie I; g) analiza EDS powierzchni obrobionej w strefie I; h-j) obrazy SEM powierzchni przedmiotu obrobionego w strefie III; k) analiza EDS powierzchni obrobionej w strefie III

Fig. 4.72. SEM microphotographs and EDS analysis of the workpiece surface after grinding with machining allowance  $a_e = 0.12$  mm using sulfurized grinding wheel: a-c) microtopography of the workpiece surface; d-f) SEM microphotographs of the workpiece surface in Zone I; g) EDS analysis of workpiece surface in Zone I; h-j) SEM microphotographs of the workpiece surface in Zone III; k) EDS analysis of workpiece surface in Zone III



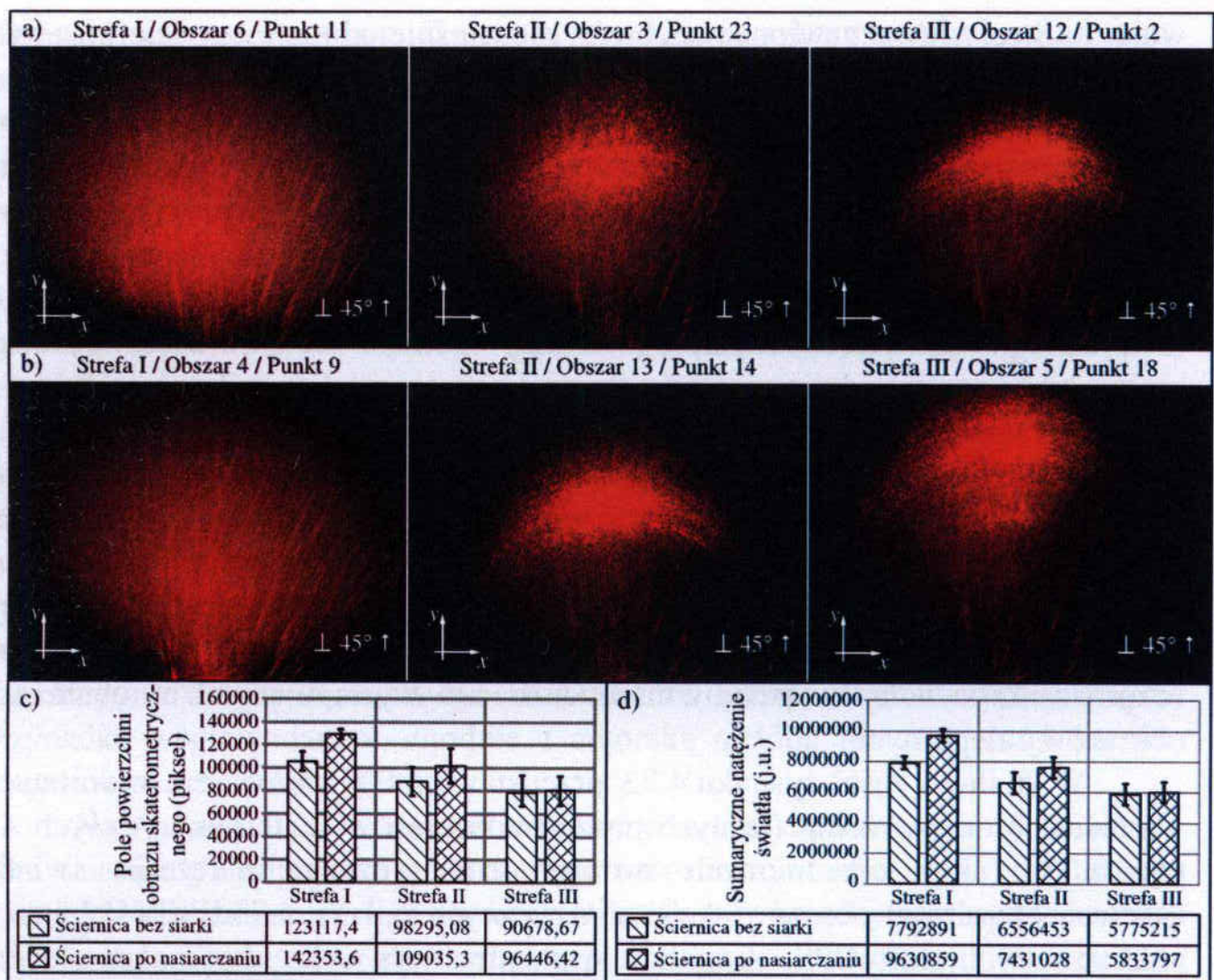
Przedstawione wyniki pomiarów CPS (rys. 4.70) oraz pomiarów chropowatości (rys. 4.71) i analiz EDS powierzchni obrabianej (rys. 4.72) wykazały, że przy zwiększonej wydajności ubytkowej szlifowania ( $Q_w \approx 42 \text{ mm}^3/\text{s}$ ) wystąpiło zjawisko odwrotne do nasiarczania. W wyniku znacznego wzrostu temperatury w strefie szlifowania nastąpiło rozgrzanie relatywnie dużych obszarów CPS do temperatury powyżej temperatury topnienia siarki. W efekcie tego siarka w stanie ciekłym została odwirowana z powierzchni ściernicy obracającej się z prędkością 33 000 obr./min. Spowodowało to rozproszenie siarki po powierzchni przedmiotu obrabianego, na której natychmiast zastygła w formach zbliżonych do kropli, wynikających z napięcia powierzchniowego płynnej siarki. Oznacza to, że w przypadku stosowania ściernic nasiarczanych opisaną metodą niezwykle istotne jest niedopuszczenie do nadmiernego wzrostu temperatury w strefie obróbki.

W tej części badań zarejestrowano i przeanalizowano również obrazy skaterometryczne CPS. Zarejestrowane obrazy światła rozproszonego poddane zostały przetworzeniu i analizie w środowisku Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics (USA). Głównym celem analizy było wyznaczenie wartości tzw. parametrów kluczowych, najlepiej opisujących cechy geometryczne i fotometryczne ocenianych obrazów. Za parametry kluczowe przyjęto:

- pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu skaterometrycznego  $A_n$  [414],
- sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu skaterometrycznego  $I_\Sigma$  [414].

Po określeniu parametrów, dla których należało wyznaczyć wartości liczbowe, rozpoczęto proces przetwarzania obrazu. W pierwszym kroku dokonano segmentacji poszczególnych obrazów w celu uzyskania konturów niezbędnych do wyznaczenia parametrów geometrycznych. W drugim kroku dokonano korekcji tonalnej (m.in. poprawa jasności i kontrastu), w celu uzyskania poprawnych wartości parametrów fotometrycznych. W obydwu przypadkach korzystano z funkcji *Count/Size*, której działanie sprowadzało się do zliczenia w trybie automatycznym wszystkich obiektów znajdujących się w ocenianym obrazie. Na podstawie liczby zliczonych obiektów wyznaczono wartości poszczególnych parametrów. Statystyczny opis otrzymanych danych pomiarowych wykonano za pomocą narzędzia *Statistics*. Pozwalało ono dodatkowo na eksport danych do dowolnego arkusza kalkulacyjnego w celu dalszego przetwarzania i wizualizacji.

Na rysunku 4.73 przedstawiono zestawienie wyników akwizycji i analizy obrazów skaterometrycznych ściernicy impregnowanej siarką i ściernicy nieimpregnowanej.



Rys. 4.73. Obrazy skaterometryczne zarejestrowane dla trzech stref ściernicy impregnowanej siarką (a) i ściernicy nieimpregnowanej (b) oraz zestawienie uśrednionych wartości pól powierzchni  $An$  (c) i sumarycznego natężenia światła  $I_{\Sigma}$  (d) jasnych obszarów obrazów skaterometrycznych, dla trzech analizowanych stref CPS

Fig. 4.73. Images of the scattered light acquired for three zones of a sulfur-impregnated grinding wheel (a) and non-impregnated grinding wheel (b) with comparison of average values of the area  $An$  (c) and integrated optical density  $I_{\Sigma}$  (d) of the bright regions of an image of scattered light, for three zones of the grinding wheel active surface

W górnej części rysunku 4.73 pokazano przykładowe obrazy skaterometryczne zarejestrowane dla CPS impregnowanej (rys. 4.73a) oraz nieimpregnowanej siarką (rys. 4.73b) po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>. Obrazy zostały uszeregowane w następującej kolejności: numer strefy, numer obszaru oraz numer punktu CPS, dla którego dokonano rejestracji. Wizualna ocena obrazów pozwoliła na stwierdzenie, iż największe rozproszenie światła, bez jakiegokolwiek regularnie ukształtowanego wzoru optycznego, występo-

wało dla strefy I (pozbawionej zalepień), niezależnie od tego, czy ściernica była impregnowana czy też nie. Dla strefy II (z niewielkimi zalepieniami) zaobserwowano obszar silnie skoncentrowanej fali światła odbitej od powierzchni metalicznego zalepienia występującą w centralnej części obrazów. Fala ta tworzyła wyraźnie widoczny wzór optyczny będący fragmentem krzywej stożkowej (okręgu) o zwiększonym natężeniu światła w porównaniu z poprzednimi obrazami. Większe natężenie światła występowało dla obrazu skaterometrycznego powierzchni impregnowanej siarką. Można więc wysunąć wniosek, że powierzchnia nieimpregnowana skuteczniej tłumiła promieniowanie – stąd wartość natężenia światła była w tym przypadku mniejsza. W strefie III (z dużymi zalepieniami) obserwowano wzmocnienie efektów widocznych na poprzednich obrazach. W centralnej części obu ocenianych obrazów występowała strefa silnie skoncentrowanej fali światła odbitej od powierzchni metalicznych zalepień. Strefa ta była szczególnie widoczna dla CPS nieimpregnowanej. Dodatkowo na obydwu obrazach zaobserwowano także liczne poboczne rozproszenia światła związane z nierównościami występującymi na obrzeżach obszarów zalepionych.

W dolnej części rysunku 4.73 przedstawiono zestawienie uśrednionych wartości pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów skaterometrycznych  $A_n$  (rys. 4.73c) oraz uśrednionych wartości sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazów skaterometrycznych  $I_{\Sigma}$  (rys. 4.73d) dla kolejnych analizowanych stref CPS. Z analizy sporządzonych wykresów można stwierdzić, że uśrednione wartości obydwu parametrów dla rozpatrywanych stref CPS nie odbiegały w dużej mierze od siebie i korespondowały z obrazami skaterometrycznymi. Wyższe wartości zarejestrowano dla CPS po impregnacji siarką, natomiast niższe dla CPS nieimpregnowanej. Wartości pól powierzchni jasnych obszarów obrazów skaterometrycznych  $A_n$  dla ściernicy nieimpregnowanej były odpowiednio o: 13,5% (strefa I) 9,8% (strefa II) oraz 5,9% (strefa III) niższe niż dla ściernicy impregnowanej. Natomiast wartości sumarycznego natężenia światła jasnych obszarów obrazów skaterometrycznych  $I_{\Sigma}$  dla ściernicy nieimpregnowanej były odpowiednio o: 19% (strefa I) 11,7% (strefa II) oraz 1% (strefa III) niższe niż dla ściernicy impregnowanej.

#### 4.5.2. Impregnowanie ściernic alotropowymi odmianami węgla

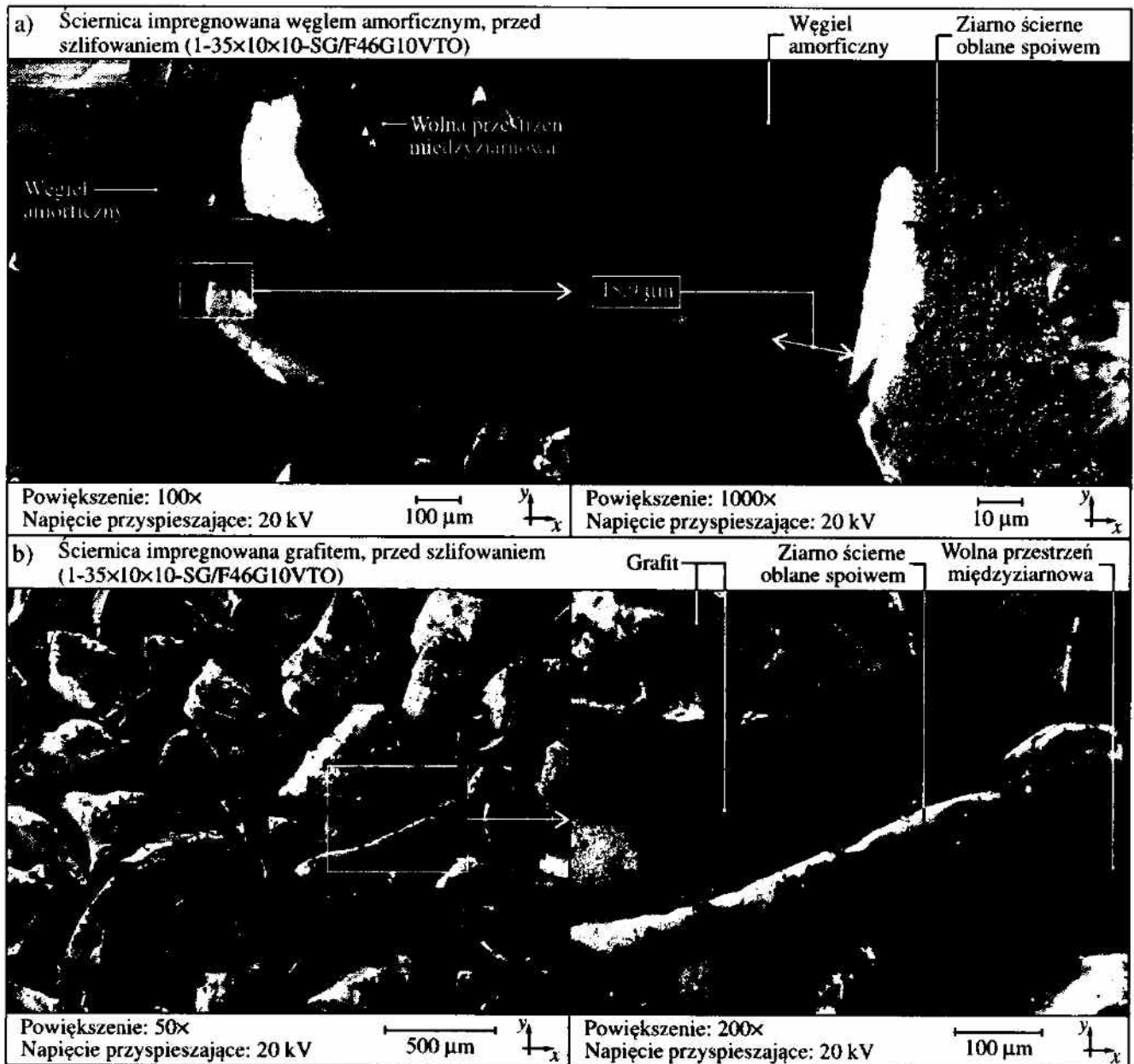
Kolejny etap badań miał na celu sprawdzenie wpływu impregnowania ściernic dwoma alotropowymi odmianami węgla: węglem amorficznym i grafitem. W kryształach grafitu atomy węgla w jednej płaszczyźnie są powiązane ze sobą silnymi wiązaniami o charakterze atomowym, natomiast w płaszczyźnie do niej prostopadłej wiązania są znacznie słabsze, typu van der Waalsa. Sprawia to, że grafit jest miękki i łupliwy. Właściwości te powodują, że grafit można

stosować jako suchy smar. Znane są przykłady wykorzystania grafitu jako środka smarnego w szlifowaniu na sucho [5, 18, 189, 110, 336, 341-343, 351] oraz wprowadzania do ściernicy w postaci obwodowo rozmieszczonych segmentów [174]. W związku z powyższym postanowiono zastosować grafit jako impregnat. Wprowadzenie węgla w takiej postaci do czynnej powierzchni ściernicy powinno zmniejszyć tarcie w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym, co w efekcie mogłoby wpłynąć na obniżenie temperatury w strefie szlifowania i obniżyć skłonność do zalepiania CPS produktami szlifowania.

W opisywanych badaniach grafit został wprowadzony poprzez zanurzenie ściernic w roztworze koloidalnym proszku grafitowego. Duża porowatość stosowanych ściernic umożliwiła wniknięcie roztworu do całej objętości narzędzia i równomierne rozprowadzenie grafitu [411].

Postanowiono przeprowadzić próby również ze ściernicami impregnowanymi węglem bezpostaciowym, który podobnie jak grafit, charakteryzuje się małą reaktywnością. 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 [344].

Na rysunku 4.74 zamieszczono obrazy mikroskopowe czynnej powierzchni ściernic po impregnowaniu węglem amorficznym (rys. 4.74a) i grafitem (rys. 4.74b). Wizualna analiza obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni ściernic po procesie impregnowania i przed procesem szlifowania wskazuje, że impregnaty zostały równomiernie rozprowadzone na całej czynnej powierzchni ściernicy, 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. 4.74) 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.



Rys. 4.74. Obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni ściernicy przed szlifowaniem, po impregnowaniu: a) węglem amorficznym; b) grafitem

Fig. 4.74. Microscopic SEM views of the grinding wheel active surface before grinding, after impregnation: a) by amorphous carbon; b) by graphite

### Metodyka badań doświadczalnych szlifowania otworów w materiałach trudno skrawalnych z użyciem ściernic impregnowanych alotropowymi odmianami węgla

Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu ustalenie wpływu impregnowania ściernicy alotropowymi odmianami węgla (węglem amorficznym i grafitem) na przebieg i wyniki procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2®.

Badania przeprowadzono w kinematyce szlifowania prostoliniowo-zwrotnego otworów, usuwając w czasie  $t = 60$  s całkowity naddatek obróbkowy

o wartości  $a_p = 0,15$  mm. Proces szlifowania prowadzono z następującymi stałymi wartościami głównych parametrów obróbkowych:  $v_s = 18$  m/s,  $v_w = 1,1$  m/s,  $v_{fu} = 20$  mm/s. Jako płyn chłodząco-smarujący zastosowano 5% wodny roztwór oleju Castrol Syntilo RHS, który doprowadzono do strefy szlifowania metodą zalewową z wydatkiem  $Q_{PCS} = 4,0$  l/min.

W badaniach zastosowano stanowisko badawcze wyposażone w szlifierkę uniwersalną RUP 28P (opis w podrozdziale 4.1.2). Podobnie jak w części badań dotyczących ściernic impregnowanych siarką, w tej części badań również użyto ściernic zbudowanych z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane o numerze 46 oraz z modyfikowanego szklanokrystalicznego spoiwa ceramicznego odmiany A ( $V_{sp} = 11,5\%$ ), opisanego w podrozdziale 4.2.1. Użyte ściernice o oznaczeniu technicznym: 1-35×10×10-SG/F46G10VTO charakteryzowały się o połowę mniejszą wysokością  $T = 10$  mm, wynikającą z odmiennej kinematyki szlifowania. Wykonano zbiór ściernic, które następnie poddano procesowi impregnowania dwoma alotropowymi odmianami węgla w Zakładzie Chemii Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Jako odniesienie do badań włączono ściernicę impregnowaną siarką oraz ściernicę nieimpregnowaną. W tabeli 4.11 zamieszczono dane dotyczące zmiany masy ściernic na skutek impregnacji dla trzech ściernic impregnowanych.

Tab. 4.11. Zmiany masy ściernic wywołane procesem impregnacji

Tab. 4.11. Changes in weight of the grinding wheels due to impregnation process

Lp.	Ściernica	Masa przed impregnacją	Masa po impregnacji	Przyrost masy
1.	Ściernica impregnowana węglem amorficznym	17,23 g	18,28 g	6,09%
2.	Ściernica impregnowana grafitem	17,22 g	17,49 g	1,57%
3.	Ściernica impregnowana siarką	11,80 g	12,40 g	5,08%

Stan czynnej powierzchni ściernicy po szlifowaniu oceniany był metodą topografii laserowej z użyciem systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 (opis w podrozdziale 3.2.2) oraz metodą skaningowej mikroskopii elektronowej z użyciem mikroskopu JSM-5500LV (opis w podrozdziale 3.4.2) wspomaganą komputerową analizą obrazu, zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 3.4. Dodatkowo rejestrowano moc szlifowania oraz profile chropowatości powierzchni przedmiotów obrobionych z użyciem profilometru stykowego Hommel-Tester T8000, scharakteryzowanego w podrozdziale 3.2.2. Profile

chropowatości powierzchni mierzone były na długości 4,0 mm. Pomiar odbywał się z prędkością  $v_t = 0,1$  mm/s. W jednym przejściu rejestrowanych było 2000 punktów z krokiem wynoszącym 20  $\mu\text{m}$ .

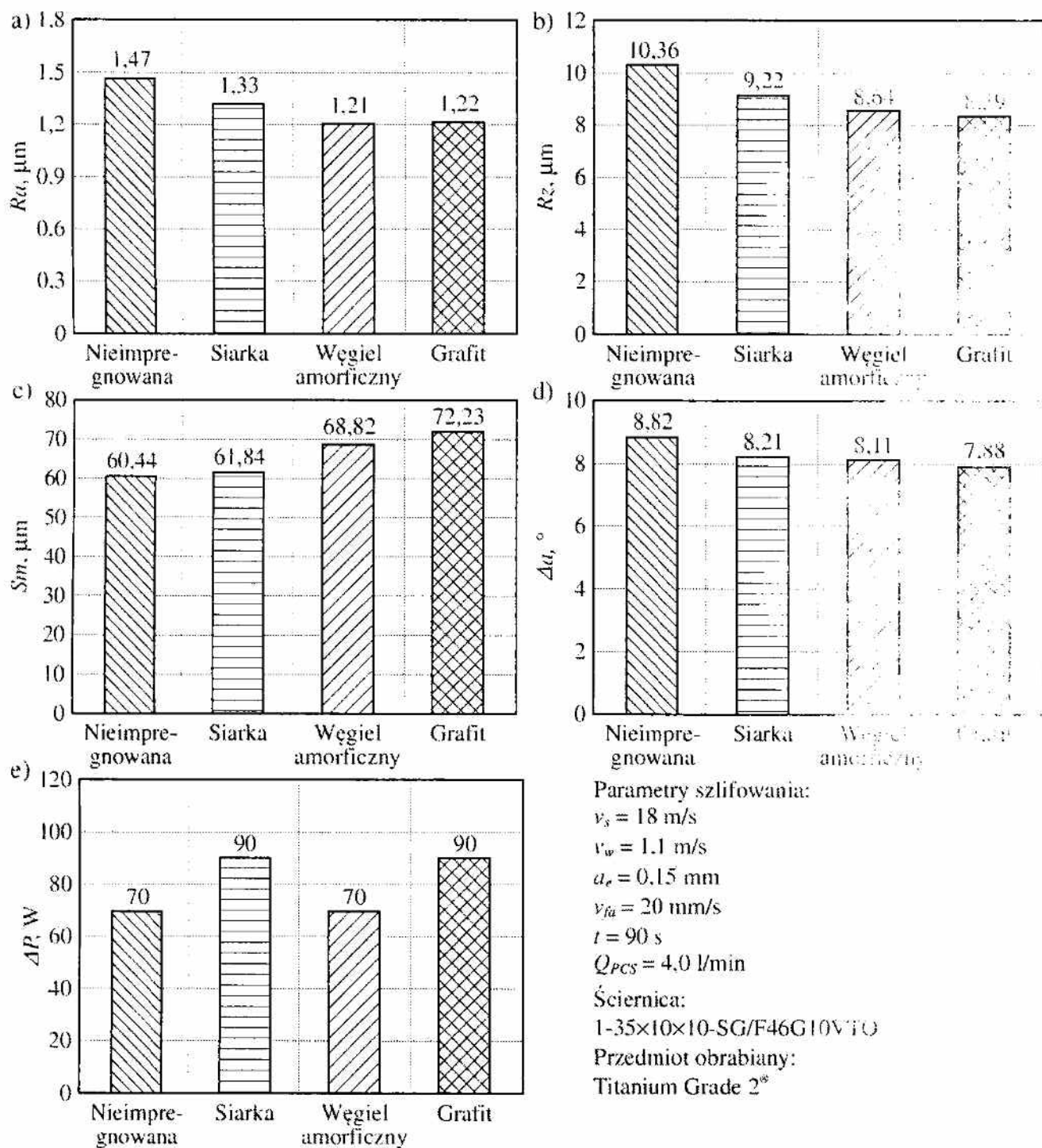
Rejestrowano mikrotopografie obszarów będących wycinkiem czynnej powierzchni ściernicy o rozmiarze 10,0  $\times$  8,5 mm. Pomiar odbywał się w 201 przejściach z krokiem co 50  $\mu\text{m}$ . W jednym przejściu rejestrowanych było 851 punktów z prędkością  $v_t = 5,5$  mm/s z krokiem co 10  $\mu\text{m}$ . Pomiar wykonywany był w trybie dwuprzebiegowym (rejestracja danych odbywała w obu kierunkach ruchu mierzonej powierzchni). Do analizy zarejestrowanych mikrotopografii wykorzystany został program TalyMap Silver 4.1.2., który na podstawie wprowadzonych danych pomiarowych obliczał wartości następujących wybranych parametrów SGP: średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni  $Sa$ , całkowitej wysokości nierówności powierzchni  $S_t$  oraz współczynnika rozwinięcia powierzchni  $S_{dr}$ . Ponieważ mikrotopografie mierzono na zewnętrznych powierzchniach walcowych przed wyznaczeniem szukanych powierzchniowych parametrów chropowatości odfiltrowywano błąd kształtu.

### **Wyniki badań doświadczalnych szlifowania otworów w stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup> z użyciem ściernic impregnowanych alotropowymi odmianami węgla**

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych, wykonanych ze stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> ściernicami impregnowanymi, wyznaczono wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego oraz przyrostu mocy szlifowania. Na rysunku 4.75 przedstawiono wykresy wpływu rodzaju impregnatu na wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni obrobionej (rys. 4.75a) oraz przyrost mocy szlifowania (rys. 4.75b).

Uzyskane wyniki procesu szlifowania wskazują na możliwość zredukowania chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego na skutek zastosowania impregnatów (rys. 4.75a-d). Spadek wartości parametru  $Ra$  wynosi od około 10% dla ściernicy nasiarczonej, do około 20% w przypadku ściernicy impregnowanej węglem bezpostaciowym i ściernicy z grafitem.

Wysokie wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości ( $Ra = 1,21-1,47$ ) wynikają z zastosowania do badań ściernic wykonanych z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane go o numerze 46. Numer ziarna dobrano, biorąc pod uwagę konieczność wykonania ściernic o dużej otwartości, zapewniającej wnikanie impregnatu do całej objętości narzędzia. Zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  nie wykazały żadnego istotnego trendu w funkcji rodzaju impregnatu (rys. 4.75e).



Rys. 4.75. Wpływ rodzaju impregnatu na przebieg i wyniki procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego otworów wykonanych ze stopu Tytanu Grade 2®: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ ; b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ ; c) średni szerokość profilu chropowatości  $Sm$ ; d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta\alpha$ ; e) przyrost mocy szlifowania  $\Delta P$

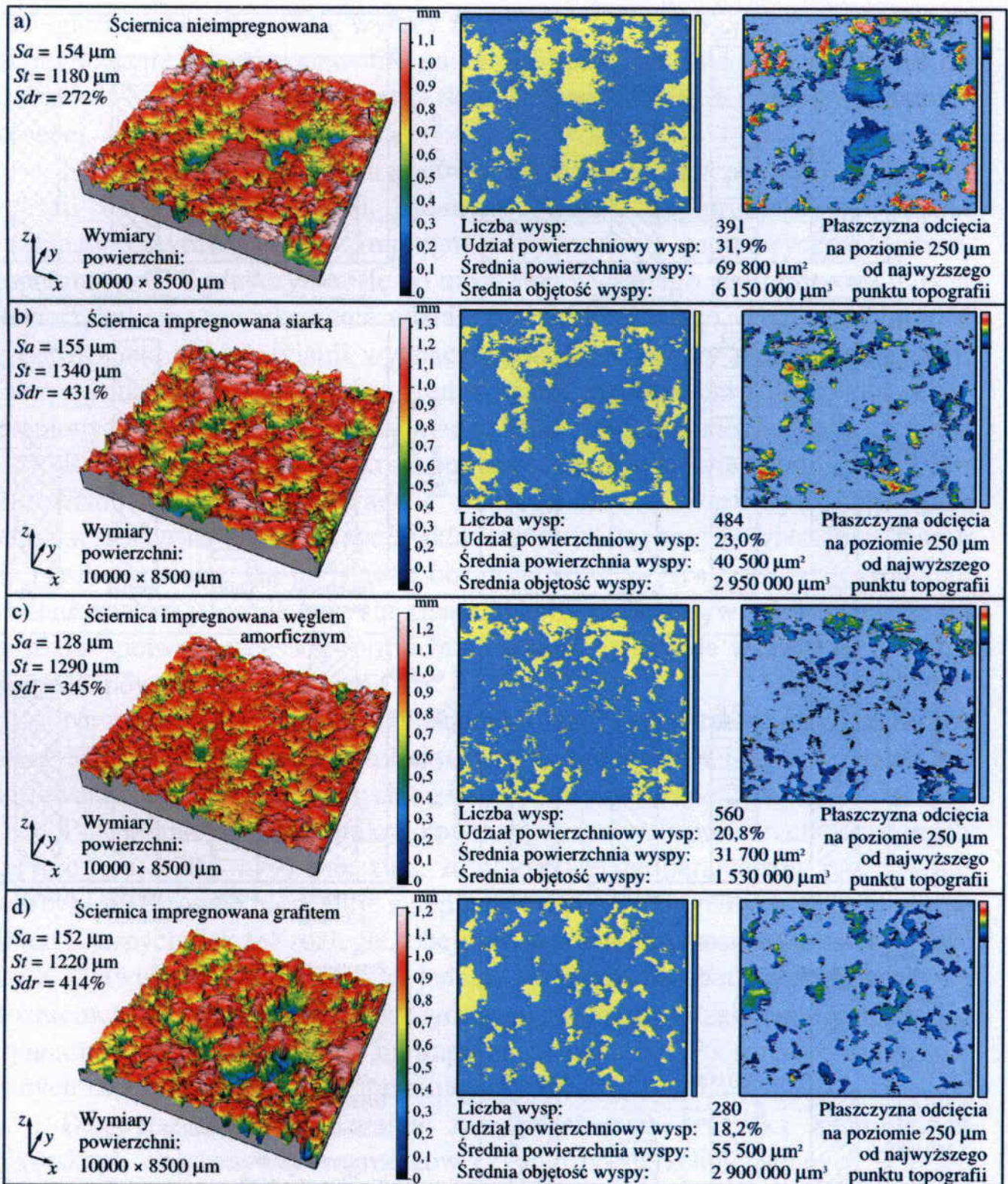
Fig. 4.75. Effect of impregnate type on the results and course of the internal cylindrical reciprocating grinding of Titanium Grade 2®: a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta\alpha$ ; e) grinding power gain  $\Delta P$



Do oceny stopnia zalepienia CPS, na podstawie zmierzonych mikrotopografii powierzchni ściernic po szlifowaniu, wytypowano następujące parametry struktury geometrycznej powierzchni: parametry wysokościowe  $Sa$  i  $St$ , jako podstawową miarę chropowatości powierzchni, oraz parametr hybrydowy  $Sdr$ . Dodatkowo posłużono się analizą tzw. wysp. Są to obszary wyodrębnione z zarejestrowanej mikrotopografii poprzez powierzchnię przecięcia przechodzącą równolegle do podstawy na zdefiniowanym przez użytkownika poziomie. W opisywanych badaniach wartość ta wynosiła 0,25 mm od najwyższego punktu topografii. Analizując wartość współczynnika rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  oraz wartości parametrów opisujących wyspy, można wnioskować o stopniu zalepienia czynnej powierzchni ściernicy oraz o stopniu wierzchołków ziaren ściernych.

Na rysunku 4.76 przedstawiono zarejestrowane mikrotopografie oraz analizy czynnej powierzchni ściernicy nieimpregnowanej (rys. 4.76a), impregnowanej siarką (rys. 4.76b), impregnowanej węglem amorficznym (rys. 4.76c) oraz impregnowanej grafitem (rys. 4.76d) po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>.

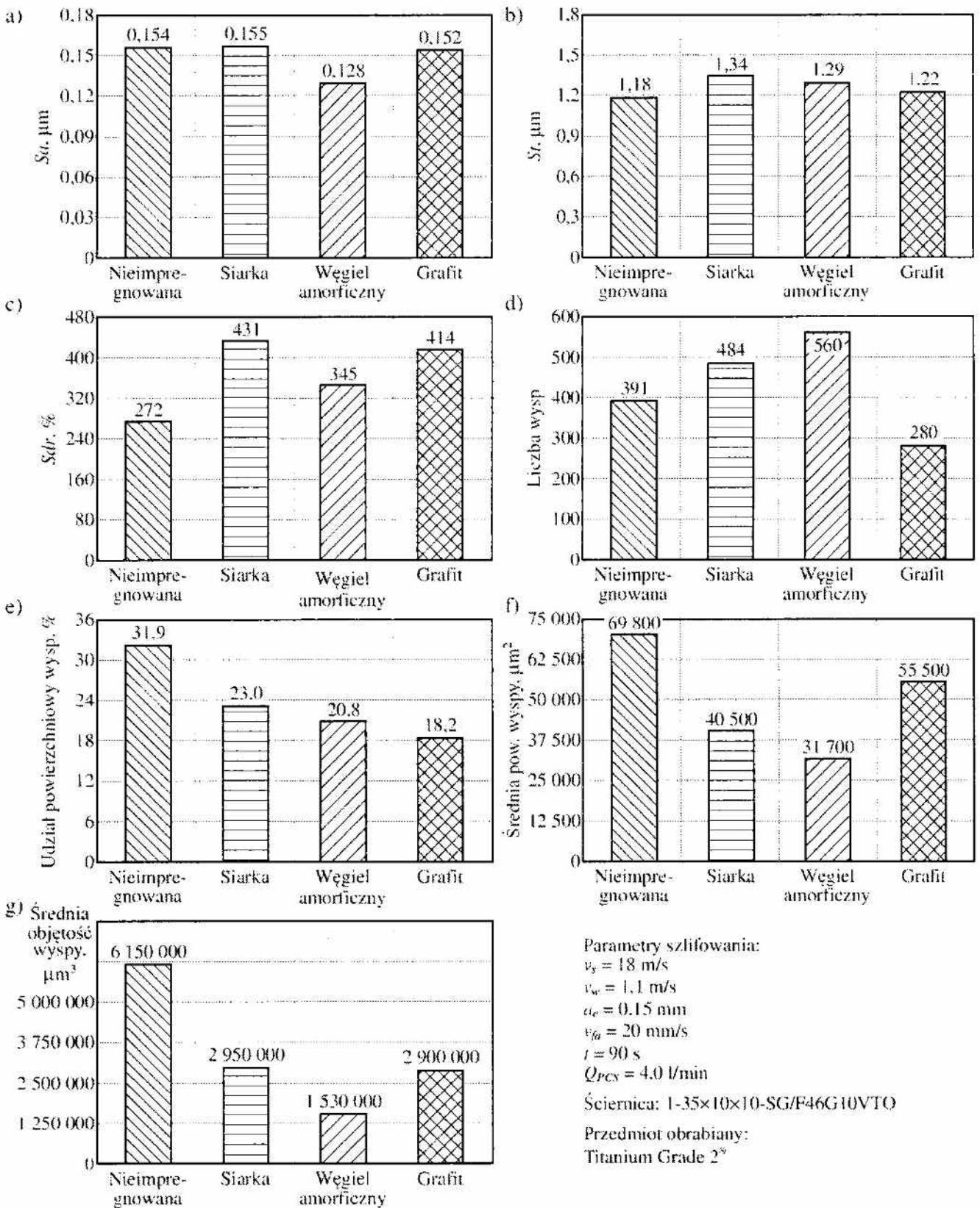
Na rysunku 4.77 przedstawiono wykresy zmian wartości parametrów struktury geometrycznej czynnej powierzchni czterech ocenianych ściernic po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup>. Uzyskane wyniki analiz mikrotopografii czynnych powierzchni badanych ściernic wskazują, że impregnacja CPS nie wpłynęła zasadniczo na chropowatość powierzchni ściernicy (rys. 4.77a i 4.77b). Na skutek zalepienia materiałem obrabianym CPS nieimpregnowanej wartość parametru  $Sdr$  określająca stopień rozwinięcia powierzchni przyjęła najniższą wartość (272%). W przypadku ściernic impregnowanych wartości tego parametru kształtowały się na poziomie od około 27% do 58% wyższym (rys. 4.77c). Na podstawie wykresu prezentującego zmiany liczby wysp (rys. 4.77d) nie można określić jednoznacznego wpływu impregnowania CPS na ten parametr. Natomiast w przypadku udziału powierzchniowego wysp (rys. 4.77e), średniej powierzchni wyspy (rys. 4.77f) oraz średniej objętości wyspy (rys. 4.77g) wyraźnie zaznaczył się pozytywny wpływ impregnowania ściernic. Udział powierzchniowy wysp (rys. 4.77e) w przypadku ściernicy impregnowanej siarką był mniejszy o 28%, dla ściernicy impregnowanej węglem amorficznym o 35%, a dla ściernicy z grafitem aż o 43%. Świadczy to o znaczącym wpływie impregnacji na intensywność zalepienia CPS, przy czym najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla ściernicy impregnowanej grafitem. Na wartości średniej powierzchni wyspy (rys. 4.77f) wpływ miała wyznaczona wcześniej liczba wysp na CPS. W tym przypadku wartości uzyskane dla ściernic impregnowanych były od 21% do 55% mniejsze w odniesieniu do ściernicy nieimpregnowanej, a najmniejszą wartość zarejestrowano dla ściernicy impregnowanej węglem bezpostaciowym.



Parametry szlifowania:  $v_s = 18 \text{ m/s}$ ;  $v_w = 1,1 \text{ m/s}$       Ściernica:      Przedmiot obrabiany:  
 $a_e = 0,15 \text{ mm}$ ;  $v_{fa} = 20 \text{ mm/s}$ ;  $t = 90 \text{ s}$ ;  $Q_{PCS} = 4,0 \text{ l/min}$     I-35×10×10-SG/F46G10VTO    Titanium Grade 2®

Rys. 4.76. Mikrotopografie, parametry SGP oraz analiza wysp czynnej powierzchni ściernicy nieimpregnowanej (a) oraz impregnowanej siarką (b), węglem amorficznym (c) i grafitem (d) po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2®

Fig. 4.76. Microtopographies, roughness parameters and islands analysis of active surface of the non impregnate grinding wheel (a) as well as the grinding wheel impregnated by sulfur (b), amorphous carbon (c) and graphite (d) after grinding of Titanium Grade 2®



Rys. 4.77. Wartości parametrów SGP ocenianych czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a)  $S_a$ ; b)  $S_t$ ; c)  $S_{dr}$ ; d) liczba wysp; e) udział pow. wysp; f) średnia pow. wyspy; g) średnia objętość wyspy

Fig. 4.77. Values of the geometrical structure of the grinding wheel active surfaces after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a)  $S_a$ ; b)  $S_t$ ; c)  $S_{dr}$ ; d) number of islands; e) percentage surface of islands; f) mean surface of island; g) mean volume of island

Analogicznie ukształtował się wykres zmian średniej objętości wysp (rys. 4.77g). Impregnowanie ściernic pozwoliło na zmniejszenie wartości tego parametru od 52% do 85% w porównaniu z wartością wyznaczoną dla ściernicy nieimpregnowanej.

Na podstawie analizy parametrów wyznaczonych z pomiarów mikropografii czynnej powierzchni badanych ściernic po procesie szlifowania stwierdzono wyraźny wpływ impregnacji na strukturę geometryczną ściernic. Impregnacja CPS przyczyniła się do uzyskania wysokiego poziomu rozwinięcia powierzchni oraz zredukowania udziału powierzchniowego wysp o około 30% w porównaniu z wartościami wyznaczonymi dla ściernicy nieimpregnowanej. Takie wyniki oznaczają wyraźne zredukowanie powierzchni i liczby obszarów zalepionych produktami szlifowania na czynnej powierzchni ściernicy.

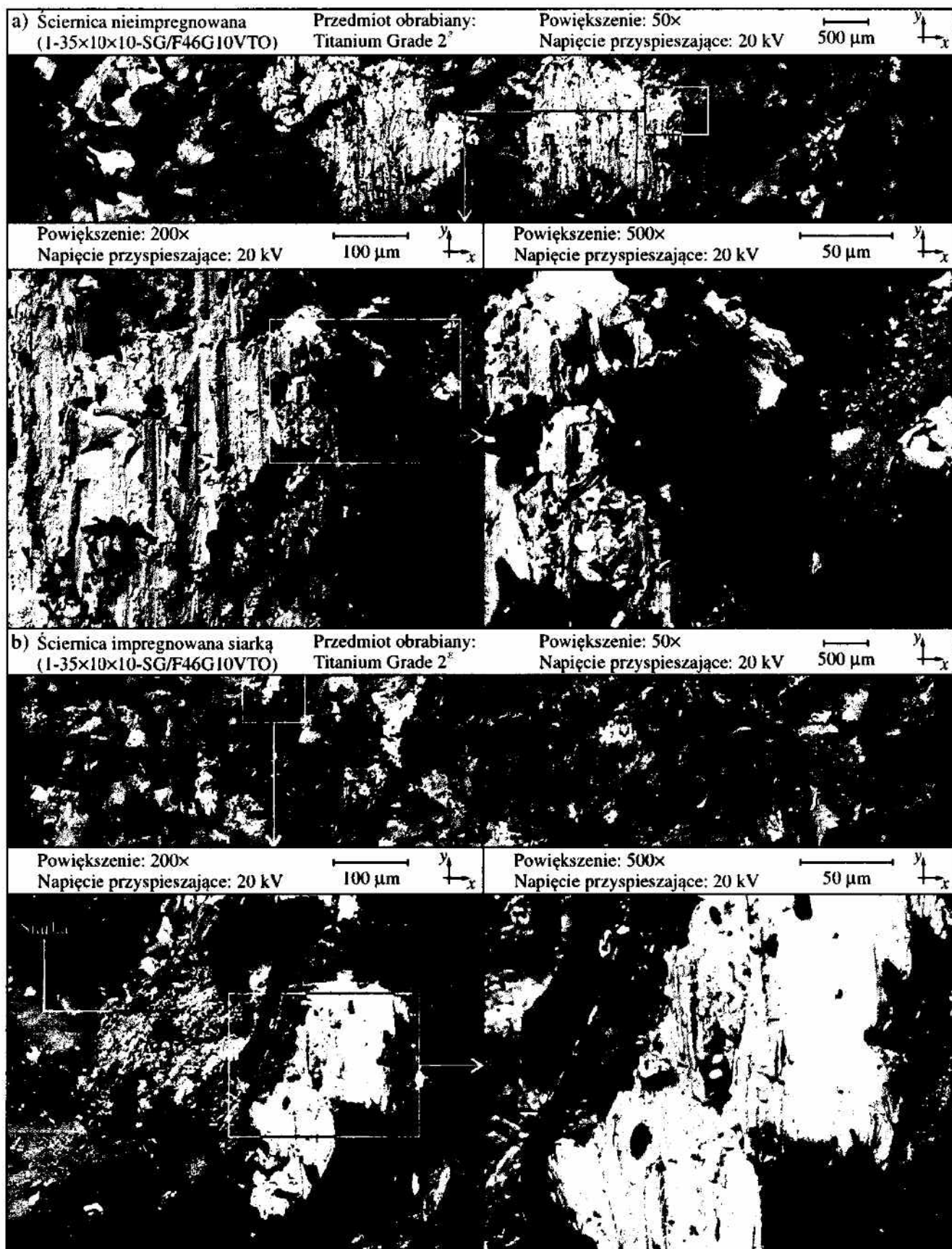
Rejestracja obrazów mikroskopowych czynnej powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> miała na celu analizę wpływu impregnowania ściernicy na formy zużycia składników jej czynnej powierzchni (ziaren ściernych i spoiwa). Na podstawie obrazów SEM możliwe jest wnioskowanie o intensywności i formie zużycia ziaren ściernych, intensywności wykruszania mostków spoiwa, procesach formowania wiórów, a przede wszystkim o intensywności powstawania zalepień CPS.

Na rysunku 4.78 i 4.79 przedstawiono zarejestrowane obrazy mikroskopowe SEM czynnych powierzchni czterech badanych ściernic w stanie po szlifowaniu otworów wykonanych ze stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>.

Porównanie obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni badanych ściernic (rys. 4.78 i 4.79) wskazuje, że dla przyjętych parametrów intensywnie tworzyły się zarówno niewielkie zalepienia dotyczące aktywnych wierzchołków ziaren ściernych, jak też rozległe, obejmujące również przestrzenie międzyziarnowe. Zjawisko to występowało jednak w przypadku badanych ściernic ze zróżnicowaną intensywnością. Zdecydowanie najbardziej zalepiona okazała się czynna powierzchnia ściernicy nieimpregnowanej. Na CPS ściernic impregnowanych zaobserwowano znacznie mniejszy udział zalepień.

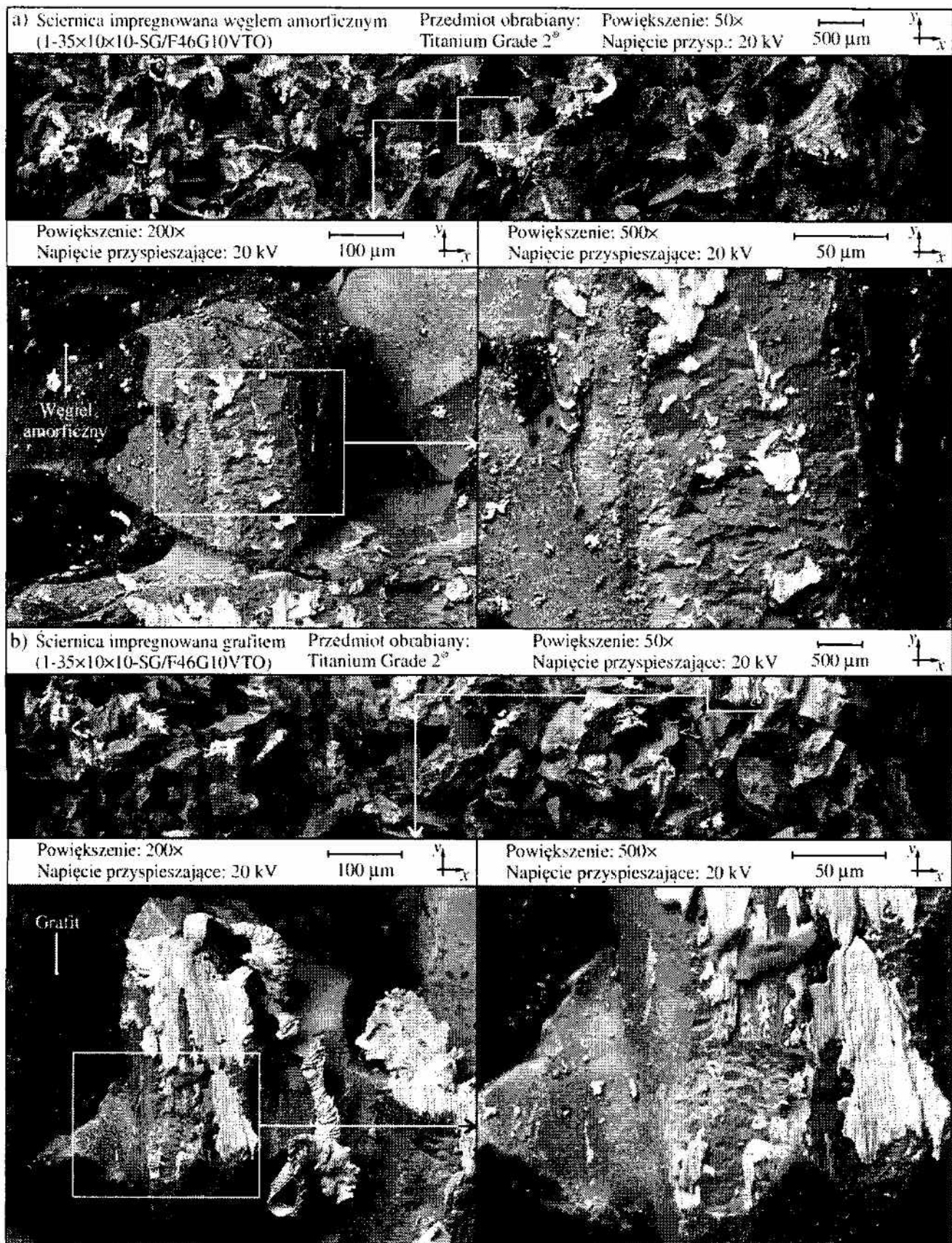
Ponieważ analiza wizualna zarejestrowanych techniką skaningowej mikroskopii elektronowej fragmentów czynnej powierzchni badanych ściernic wykazała znaczące różnice dotyczące stopnia ich zalepienia produktami szlifowania, konieczne było dokonanie bardziej szczegółowych analiz ilościowych zarejestrowanych obrazów. Miały one na celu parametryczną ocenę intensywności zalepiania CPS badanych ściernic w procesie szlifowania stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup> i zostały wykonane zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 3.4.

Na rysunkach 4.80 do 4.83 przedstawiono wyniki komputerowego przetwarzania i analizy obrazu przeprowadzonych dla czterech badanych ściernic z użyciem specjalistycznego środowiska badawczego Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1.



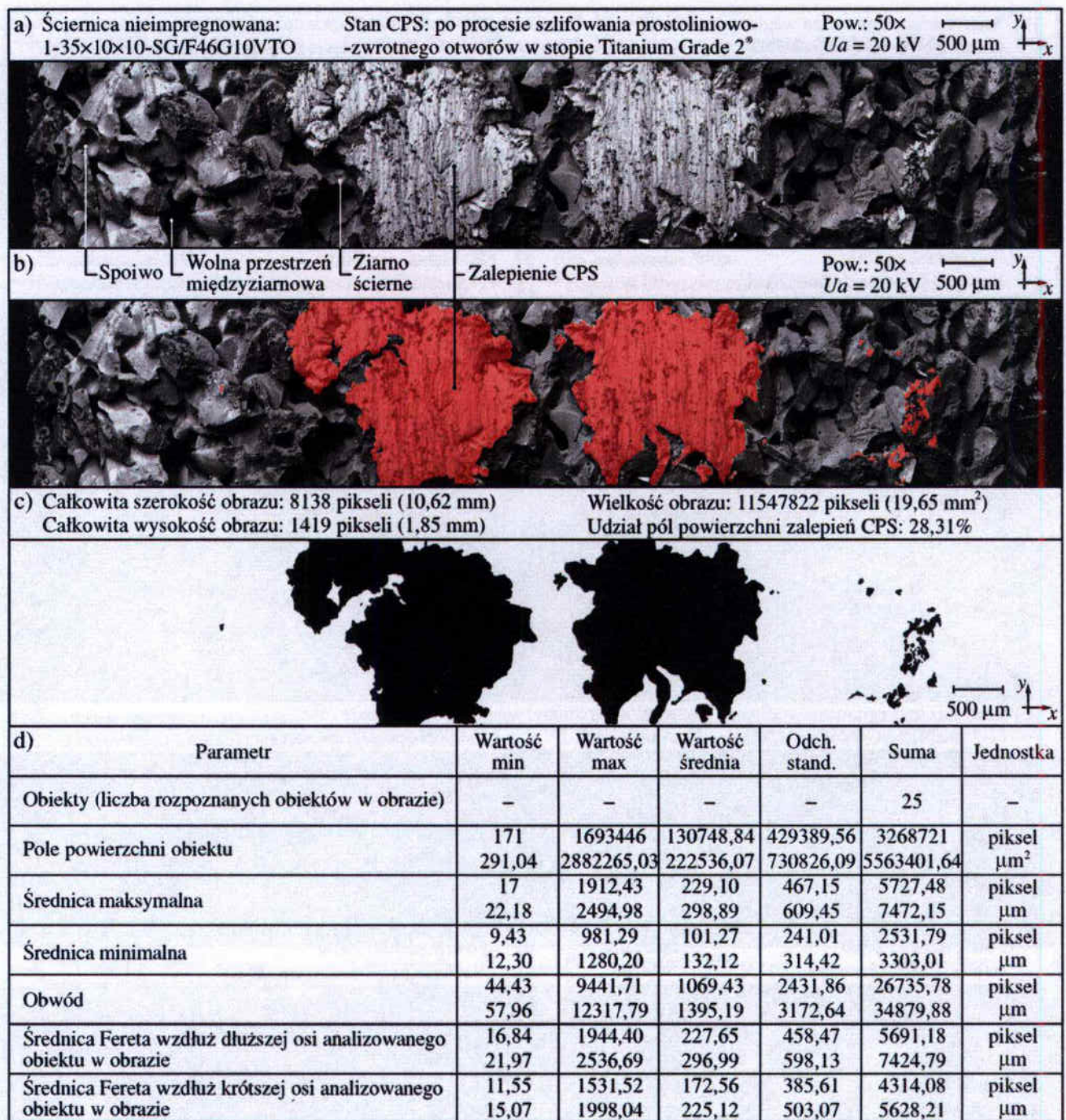
Rys. 4.78. Obrazy mikroskopowe SEM CPS po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>:  
a) ściernica nieimpregnowana; b) ściernica impregnowana siarką

Fig. 4.78. Microscopic SEM images of the grinding wheel active surface after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) grinding wheel without impregnate; b) grinding wheel impregnated by sulfur



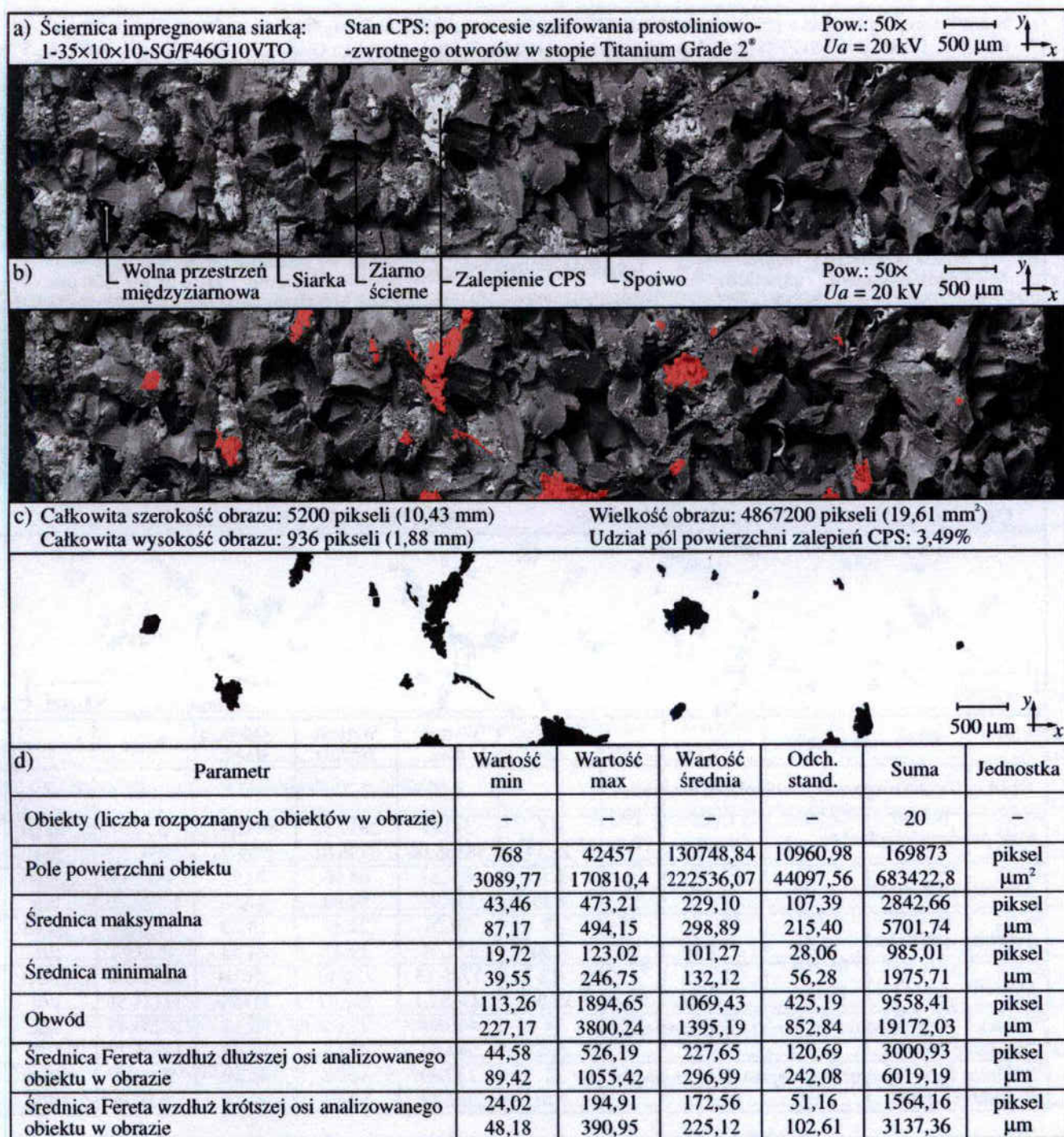
Rys. 4.79. Obrazy mikroskopowe SEM CPS po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: ściernica impregnowana węglem amorficznym (a) i grafitem (b)

Fig. 4.79. Microscopic SEM images of the grinding wheel active surface after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) grinding wheel impregnated by amorphous carbon; b) grinding wheel impregnated by graphite



Rys. 4.80. Komputerowa analiza obrazu mikroskopowego SEM czynnej powierzchni ściernicy nieimpregnowanej po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) obraz SEM czynnej powierzchni ściernicy; b) obraz CPS z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami CPS); c) wyizolowane z obrazu SEM obiekty poddawane analizie; d) wartości liczbowe wybranych parametrów geometrycznych analizowanych obiektów (zalepień CPS)

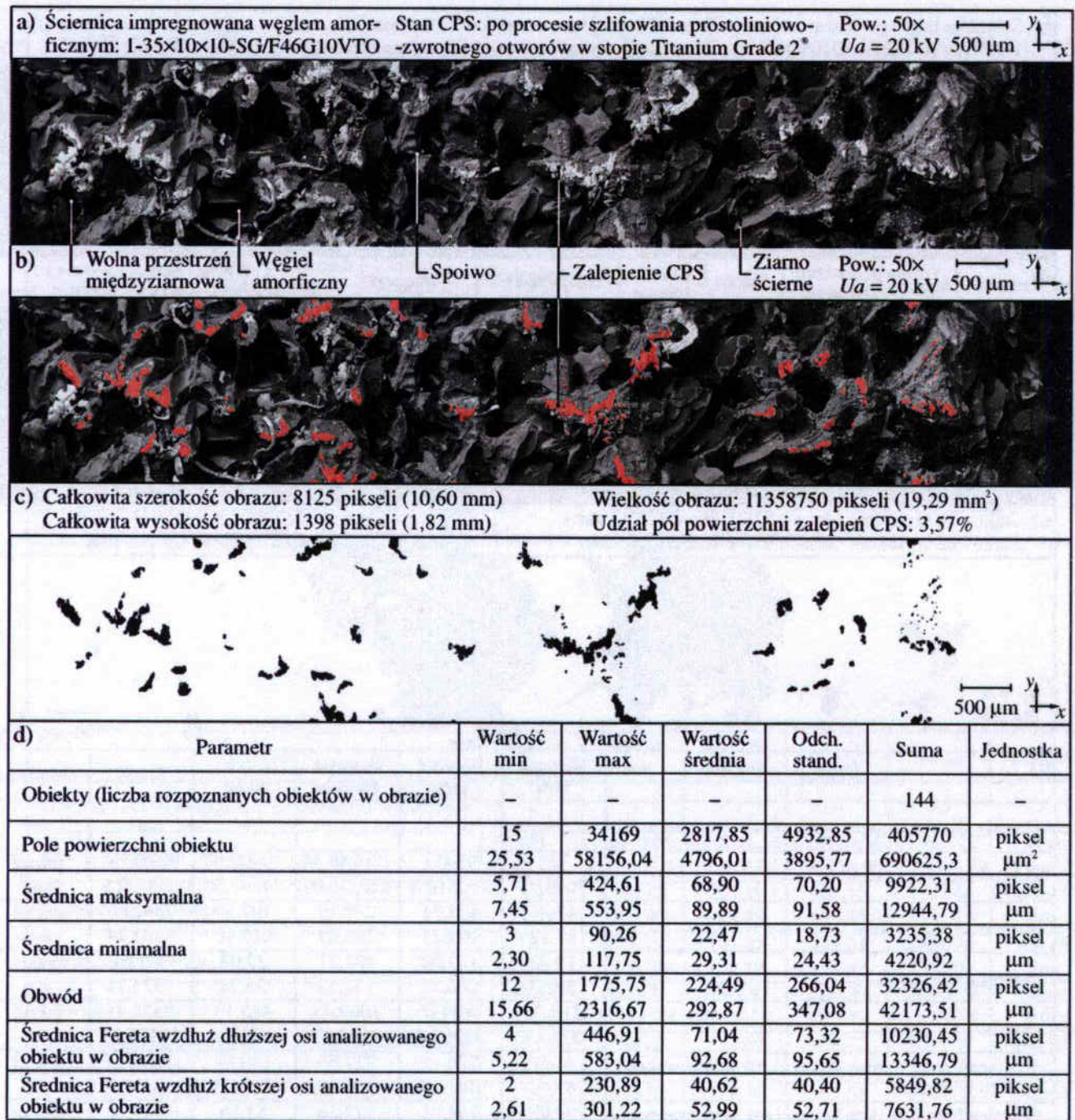
Fig. 4.80. Computer analysis of SEM image of the not impregnated grinding wheel active surface after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) SEM image of the grinding wheel active surface; b) image of the grinding wheel active surface with selected objects (smears); c) extracted analysed objects; d) numerical values of selected geometrical parameters of the analysed objects (smears)



Rys. 4.81. Komputerowa analiza obrazu mikroskopowego SEM czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej siarką po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) obraz SEM czynnej powierzchni ściernicy; b) obraz CPS z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami CPS); c) wyizolowane z obrazu SEM obiekty poddawane analizie; d) charakterystyka oraz wartości liczbowe wybranych parametrów geometrycznych analizowanych obiektów (zalepień CPS)

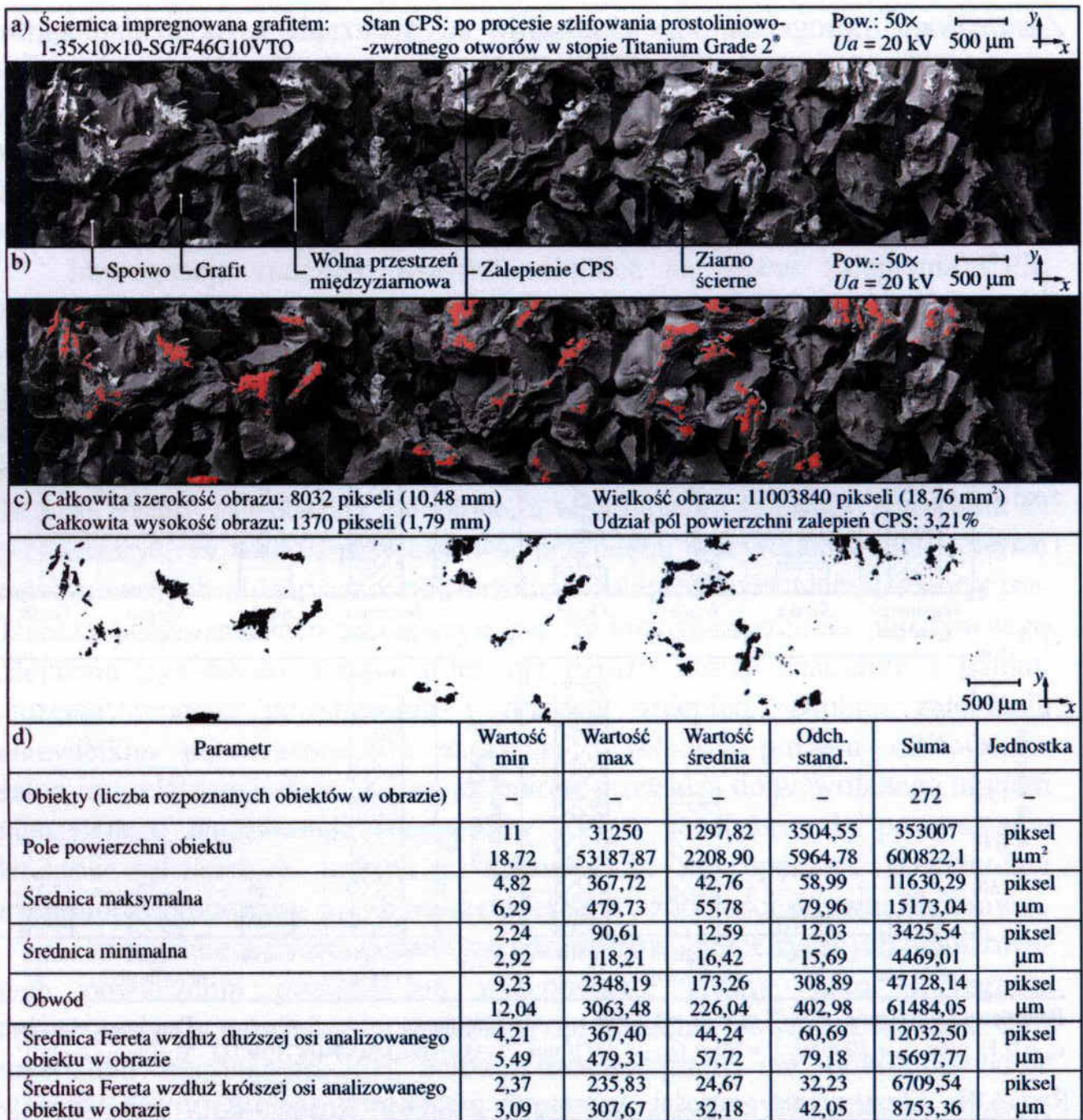
Fig. 4.81. Computer analysis of SEM image of the grinding wheel active surface impregnated by sulfur, after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) SEM image of the grinding wheel active surface; b) image of the grinding wheel active surface with selected objects (smears); c) extracted analysed objects; d) numerical values of selected geometrical parameters of the analysed objects (smears)





Rys. 4.82. Komputerowa analiza obrazu mikroskopowego SEM czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) obraz SEM czynnej powierzchni ściernicy; b) obraz CPS z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami); c) wyizolowane z obrazu SEM obiekty poddawane analizie; d) charakterystyka oraz wartości liczbowe wybranych parametrów geometrycznych analizowanych obiektów (zalepień)

Fig. 4.82. Computer analysis of SEM image of the grinding wheel active surface impregnated by amorphous carbon, after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) SEM image of the grinding wheel active surface; b) image of the grinding wheel active surface with selected objects (smears); c) extracted analysed objects; d) numerical values of selected geometrical parameters of the analysed objects (smears)

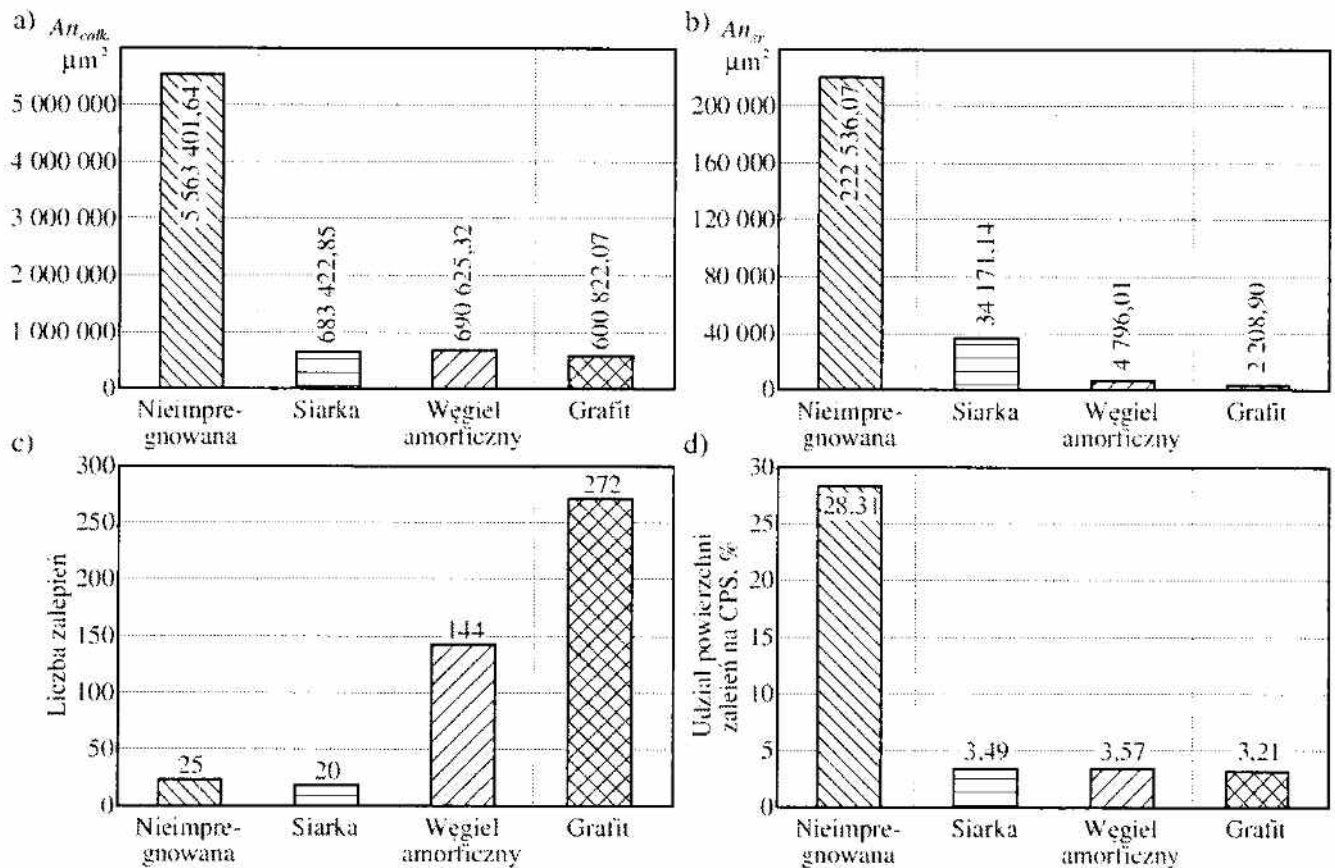


Rys. 4.83. Komputerowa analiza obrazu mikroskopowego SEM czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej grafitem po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) obraz SEM czynnej powierzchni ściernicy; b) obraz CPS z zaznaczonymi obiektami (zalepieniami CPS); c) wyizolowane z obrazu SEM obiekty poddawane analizie; d) charakterystyka oraz wartości liczbowe wybranych parametrów geometrycznych analizowanych obiektów (zalepień CPS)

Fig. 4.83. Computer analysis of SEM image of the grinding wheel active surface impregnated by graphite, after grinding of Titanium Grade 2<sup>®</sup>: a) SEM image of the grinding wheel active surface; b) image of the grinding wheel active surface with selected objects (smears); c) extracted analysed objects; d) numerical values of selected geometrical parameters of the analysed objects (smears)

Zastosowane oprogramowanie pozwoliło na wskazanie w obrazie obiektów odpowiadających zalepieniom CPS, a następnie na ich zliczenie i wyznaczenie szeregu parametrów geometrycznych je opisujących.

Rysunek 4.84 przedstawia wykresy wartości wybranych parametrów geometrycznych obszarów odpowiadających zalepieniom czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2®.



Parametry szlifowania:  $v_s = 18$  m/s;  $v_w = 1.1$  m/s

Ściernica:

Przedmiot obrabiany:

$a_e = 0,15$  mm;  $v_{f0} = 20$  mm/s;  $t = 90$  s;  $Q_{PCS} = 4,0$  l/min

1-35×10×10-SG/F46G10VTO

Titanium Grade 2®

Rys. 4.84. Zestawienie wartości wybranych parametrów geometrycznych obszarów odpowiadających zalepieniom czynnych powierzchni ściernic po szlifowaniu stopu Titanium Grade 2®: a) całkowita powierzchnia zalepień; b) średnia powierzchnia zalepień; c) liczba zalepień; d) udział powierzchni zalepień w analizowanym obrazie

Fig. 4.84. Summary of numerical values of selected geometrical parameters of geometrical objects corresponding to the smears of the grinding wheels active surfaces after grinding of Titanium Grade 2®: a) total area of smears; b) average area of smear; c) number of smears; d) percentage of the smeared area in analysed image

Przeprowadzona komputerowa analiza obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni badanych ściernic po procesie szlifowania stopu Titanium Grade 2® pozwoliła na ilościową ocenę stopnia zalepienia ocenianych

powierzchni. Wyznaczone wartości parametrów geometrycznych analizowanych obrazów zamieszczone na rysunkach 4.80 do 4.84 wskazują, że zastosowanie impregnacji ściernicy pozwoliło na niemal dziesięciokrotne zmniejszenie udziału zalepień na czynnej powierzchni ściernicy z 28,31% dla ściernicy nieimpregnowanej, do wartości z zakresu od 3,21% do 3,57% dla ściernic impregnowanych (rys. 4.84a).

Impregnacja znacząco wpłynęła również na proces zalepiania CPS. W przypadku ściernicy nieimpregnowanej uformowało się na jej czynnej powierzchni 25 rozległych zalepień. Wprowadzenie do masy ściernicy siarki znacząco zredukowało powierzchnię obszarów zalepionych, jednak nadal były one skupione w jedynie 20 zalepieniach. Impregnacja ściernicy węglem bezpostaciowym spowodowała, że na jej czynnej powierzchni po szlifowaniu zliczone zostały 144 obszary zalepione, a w przypadku ściernicy z grafitem aż 272 obszary (rys. 4.84c), przy czym w przypadku wszystkich trzech ściernic impregnowanych sumaryczna powierzchnia zalepień była niemal identyczna. Oznacza to, że znacząco zmniejszyła się średnia powierzchnia pojedynczego zalepienia (rys. 4.84b). Parametr ten ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia procesu powstawania i rozrostu zalepień. Drobne zalepienia o niewielkiej powierzchni nie zagrażają stabilności procesu szlifowania. Natomiast relatywnie duże obszary zalepione prowadzą do wywołanego tarcie intensywnego nagrzewania fragmentów CPS i w efekcie do powstawania defektów szlifierskich (przypaleń szlifierskich, mikropeknięć powierzchni przedmiotu obrobionego itp.) oraz szybkiej utraty zdolności skrawnej ściernicy.

Porównanie wartości wybranych parametrów geometrycznych analizowanych powierzchni pozwala na wytypowanie grafitu, jako impregnatu wpływającego w największym stopniu na ograniczenie zjawiska zalepiania CPS materiałem obrabianym. Co bardzo istotne, grafit nie tylko powoduje zdecydowane zmniejszenie udziału obszarów zalepionych (niemal dziesięciokrotne w porównaniu ze ściernicą nieimpregnowaną), ale również zapewnia najkorzystniejszy sposób ich rozłożenia na CPS w postaci wielu zalepień o małej powierzchni (rys. 4.84d).

## 4.6. Podsumowanie i wnioski

Opracowane innowacyjne modyfikacje budowy ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego pozwalają na efektywną poprawę zarówno warunków, jak i wyników procesów szlifowania otworów. Szeroki zakres modyfikacji pozwala na ich odpowiedni dobór w zależności od stawianego kryterium oceny efektywności. Dla przykładu, w przypadku, gdy wydajność obróbki stanowi kluczową rolę, należałoby stosować ściernice o strefowo zróżnicowanej budowie i kinematykę szlifowania jednoprzejściowego.

Natomiast przy szlifowaniu materiałów trudno skrawalnych, takich jak stopy niklu, kobaltu czy tytanu, można znacząco ograniczyć zjawisko zalepiania CPS produktami obróbki poprzez impregnację ściernicy, np. grafitem, i w ten sposób wyraźnie wydłużyć okres trwałości stosowanych ściernic.

Poniżej zamieszczono szczegółowe wnioski dotyczące poszczególnych modyfikacji ściernicy.

### Strefowe zróżnicowanie budowy ściernicy

Zrealizowany zakres badań symulacyjnych i doświadczalnych przeprowadzonych dla procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie pozwolił na sformułowanie następujących wniosków:

- uzyskane wyniki badań umożliwiły ocenę wpływu poszczególnych wielkości nastawczych badanego procesu na jego efekty i wyznaczenie najkorzystniejszych wartości podstawowych parametrów szlifowania ( $v_s = 60$  m/s,  $v_w = 0,8$  m/s,  $b = 0,9 \cdot T_1$ ) oraz kształtowania CPS ( $v_{sd} = 10$  m/s,  $v_{fd(stożek)} = 280$  mm/s,  $v_{fd(walec)} = 10$  mm/s), a także określenie wpływu pozostałych czynników ( $a_e$ ,  $v_{fd}$ );
- strefowe zróżnicowanie budowy ściernic pozwoliło uzyskać znacznie niższą chropowatość powierzchni obrobionej w porównaniu ze ściernicą referencyjną w całości wykonaną z ziaren jednego rozmiaru;
- największy wpływ na osiągnięte wartości parametrów chropowatości miała wysokość strefy szlifowania wykończeniowego  $T_2$ . W przypadku zastosowania 30% udziału tej strefy uzyskano średnio o 24% dla ściernicy 46/80-30% i o 21% dla ściernicy 46/60-30% niższą wartość parametru  $Ra$ ;
- w przypadku zastosowania strefy wykończeniowej o wysokości  $T_2 = 0,2T$ , nie zanotowano wyraźnej różnicy w chropowatości powierzchni po szlifowaniu, i to niezależnie od wielkości ziaren zastosowanych do jej budowy;
- wielkość ziaren w strefie wykończeniowej odgrywała mniejszą rolę niż udział stref  $T_1 / T_2$ . Dla ściernic z  $T_2 = 0,3T$  obniżenie rozmiaru ziaren z 60 do 80 pozwoliło na kilkuprocentową redukcję średniej wartości parametru  $Ra$  powierzchni po szlifowaniu;
- zwiększenie wydajności ubytkowej  $Q_w$  o 33% poprzez zmianę głębokości szlifowania z 0,15 mm do 0,20 mm spowodowało średnio 45% wzrost mocy szlifowania w badanym procesie, natomiast podwojenie  $Q_w$ , wywołane zwiększeniem prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki z 1,0 mm/s do 2,0 mm/s, wpłynęło na zwiększenie mocy szlifowania jedynie o około 65%;

- zwiększenie wydajności ubytkowej wpływa na zmniejszenie pozytywnego wpływu drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego, co wynika z malejącej liczby ziaren aktywnych kształtujących powierzchnię obrobioną. Obniżenia chropowatości otworów po obróbce należy się spodziewać poprzez podniesienie prędkości szlifowania  $v_s$ ;
- porównanie temperatury zmierzonej w trakcie jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami wykonanymi z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane SG<sup>TM</sup> i elektrokorundu szlachetnego 99A wykazało, że mniejsza ilość ciepła generowana jest podczas obróbki ściernicą zbudowaną z ziaren SG<sup>TM</sup>. Zastosowanie do budowy ściernicy ziaren 99A o takiej samej ziarnistości spowodowało wzrost zarejestrowanej temperatury o niemal 20%;
- z analizy stanu warstwy wierzchniej w przedmiotach po szlifowaniu w procesie jednoprzęściowym wynika, że naprężenia ostateczne przedmiotu obrobionego mają charakter ściskający.

### Modyfikacja spoiwa ceramicznego

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych procesu szlifowania wgłębnego z oscylacjami otworów, ściernicami ze spoiwem o różnej mikrostrukturze sformułowano następujące wnioski:

- możliwe jest znaczące wydłużenie okresu trwałości ściernicy poprzez modyfikację mikrostruktury spoiwa ceramicznego. Podczas usuwania 46 400 m<sup>3</sup> materiału obrabianego, w warunkach zbliżonych do stosowanych w przemyśle łożyskowym, praca ściernic o najkorzystniejszej budowie nie była przerywana zabiegami obciążania w długim czasie pracy. Ukształtowana podczas obróbki chropowatość powierzchni 100 kolejnych otworów w pierścieniach łożyskowych, wyrażona wartością średnią parametru  $Ra$ , wynosiła od 0,24  $\mu\text{m}$  do 0,38  $\mu\text{m}$ , co świadczy o uzyskaniu wymaganej chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego;
- różna budowa mikrostrukturalna badanych spoiw spowodowała znaczące różnice w uzyskanych wartościach badanych parametrów procesu szlifowania. Uwzględniając otrzymane rezultaty badań, można wytypować ściernice S i A jako narzędzia zapewniające żadaną jakość powierzchni obrobionej ( $Ra < 0,63 \mu\text{m}$ ) oraz najniższą moc szlifowania. Jednak odmienny charakter zużywania się spoiwa szklanokrystalicznego odmiany A spowodował, że ściernica zbudowana z jego udziałem odznaczała się znacznie niższymi wartościami błędów kształtu, które decydują o trwałości ściernicy w długich okresach jej pracy. Oznacza to, że odpo-

wiednia modyfikacja mikrostruktury spoiwa znacząco wpływa na procesy zużywania się składników CPS i zjawiska je wywołujące:

- przy zastosowaniu spoiwa szklanokrystalicznego odmiany A, zawierającego niemal 65% fazy krystalicznej złożonej z gahnitu i willemitu, uzyskano zadowalającą chropowatość powierzchni obrobionej (średnie  $Ra = 0,38 \mu\text{m}$ ), niską moc szlifowania (średnie  $\Delta P = 356,8 \text{ W}$ ) oraz niewielką odchyłkę okrągłości ściernicy (średnie  $\Delta = 32,5 \mu\text{m}$ ). Zaobserwowano w tym przypadku proces postępującego równomiernego odnawiania zdolności skrawnej ściernicy na skutek mikrowykruszania fragmentów ziaren ściernych i spoiwa. Rezultatem tego było nieco wyższe zużycie objętościowe ściernicy A i wynikająca z niego niższa wartość wskaźnika szlifowania  $G$ , w porównaniu ze ściernicą ze spoiwem szklanym (S). Jednak z punktu widzenia praktyki szlifowania, najbardziej istotna wydaje się bardzo stabilna praca ściernicy ze spoiwem A, która zachowywała swoją zdolność skrawną na podobnym poziomie w bardzo długim czasie pracy. Podkreślić należy, że zakończenie badań po przeszlifowaniu 100 pierścieni i usunięciu  $46\,400 \text{ mm}^3$  materiału obrabianego nie oznaczało zakończenia okresu trwałości tej ściernicy.

### **Modyfikacja geometrii CPS poprzez kształtowanie jej mikronieciągłości**

Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań procesu szlifowania ściernicami z mikronieciągłościami CPS są następujące:

- wprowadzenie dodatkowych przestrzeni wolnych i nieciągłości wpływa na lepsze odprowadzenie ciepła, produktów zużycia i wiórów poza strefę szlifowania, przy jednoczesnym wzroście efektywności chłodzenia;
- mikronieciągłości CPS przyczyniły się do zmniejszenia obciążeń cieplno-mechanicznych ziaren aktywnych i w konsekwencji do znaczącego zmniejszenia zużycia ściernego i wytrzymałościowego elementów ściernicy;
- zastosowanie ściernic z mikronieciągłościami w procesie jednoprzeciściowego szlifowania otworów pozwoliło na trzykrotne wydłużenie okresu trwałości tego narzędzia, w porównaniu ze ściernicą bez mikronieciągłości;
- mikronieciągłości ukształtowane w realizującej szlifowanie zgrubne, stożkowej strefie ściernicy, nie wpłynęły znacząco na podwyższenie chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego. Wynika to ze specyficznej konstrukcji ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, które charakteryzują się drobnoziarnistą walcową strefą szlifowania wykonczeniowego i wyiskrzania.

## Ściernice składane z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS

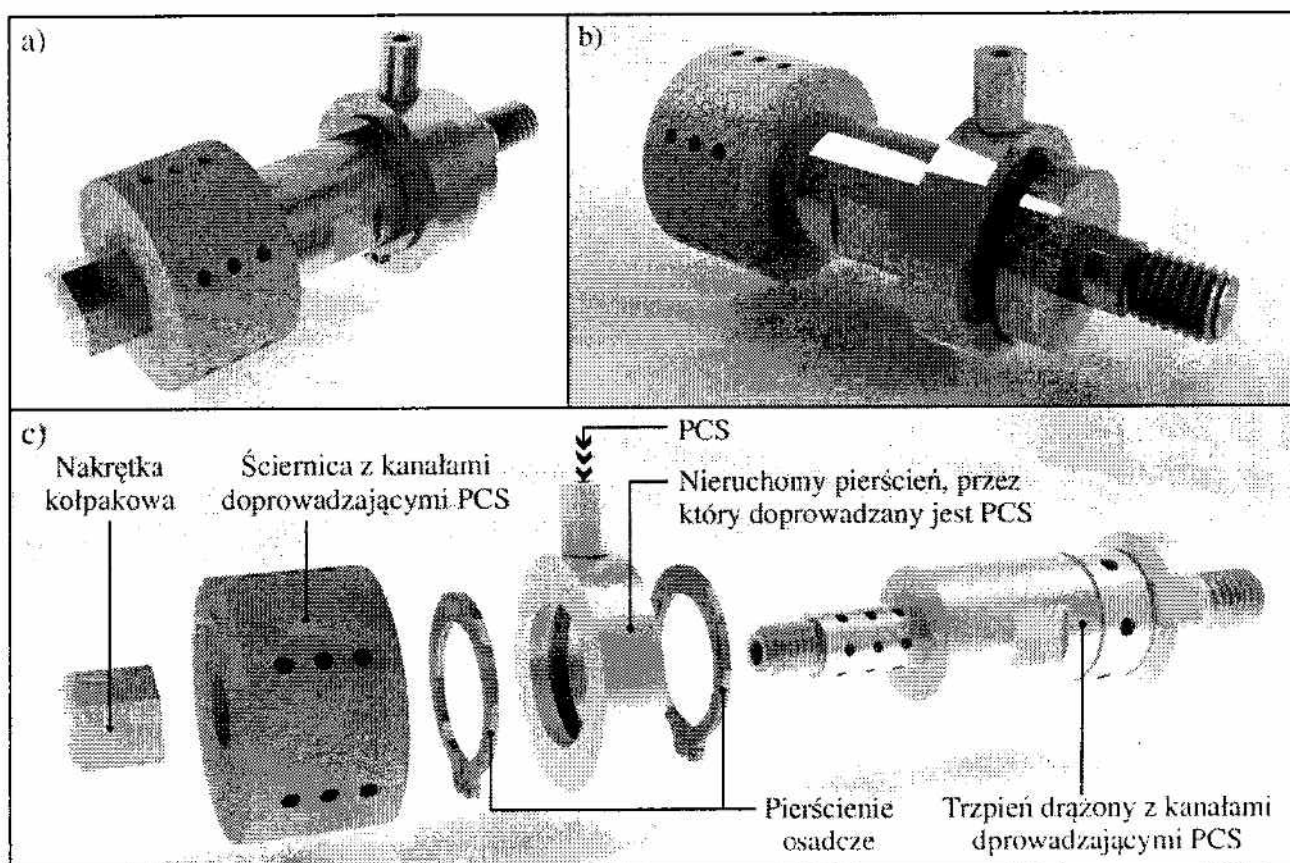
Przeprowadzone badania jednoprzęściowego szlifowania otworów z zastosowaniem ściernicy składanej, pozwalającej na doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego od wewnątrz ściernicy bezpośrednio do strefy obróbki, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- zaproponowany system doprowadzenia PCS do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym nie wpłynął na intensywność zjawiska zalepiania CPS produktami szlifowania;
- zastosowanie odśrodkowego doprowadzenia PCS spowodowało, że znacznie większa część PCS trafiła bezpośrednio w strefę szlifowania, w efekcie czego możliwe było pięciokrotne zredukowanie wydatku PCS z 5,0 l/min do 1,0 l/min, bez ujemnego wpływu na parametry energetyczne i jakościowe obróbki;
- odniesienie wyników obróbki uzyskanych ściernicą składaną, dla wydatku PCS wynoszącego 1,0 l/min, do rezultatów szlifowania ściernicą niemodyfikowaną (w całości wykonaną z ziaren SG<sup>TM</sup> o numerze 46) oraz ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie, przy zalewowym sposobie podawania PCS z wydatkiem 5,0 l/min, wykazało, że możliwe jest znaczące (ponad 30%) zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionej przy niewielkim (7-11%) spadku mocy szlifowania;
- pięciokrotne zredukowanie wydatku PCS stanowi ważny efekt ekologiczny i ekonomiczny, wynikający ze zmniejszenia objętości odpadów w postaci zużytych płynów chłodząco-smarujących, których utylizacja jest procesem kosztownym i uciążliwym dla środowiska naturalnego.

Zastosowany system odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy obróbki stwarza ograniczenia w zakresie średnicy szlifowanego otworu, wynikające z konieczności doprowadzenia chłodziwa od czoła ściernicy. Na podstawie doświadczeń zdobytych w badaniach eksploatacyjnych opracowano konstrukcję alternatywnego układu podawania PCS przez specjalny trzpień szlifierski do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym. Na rysunku 4.85 przedstawiono widok ogólny oraz opisano elementy składowe opracowanego narzędzia, w którym zasilanie w PCS odbywa się poprzez nieruchomy pierścień umiejscowiony blisko mocowania trzpienia do wrzeciona.

Zaproponowane rozwiązanie można stosować również dla narzędzia składanego ze ściernic elementarnych z przekładką, co pozwoliłoby uniknąć formowania kanałów doprowadzających CPS w ściernicy. Zastosowanie trzpienia o konstrukcji przedstawionej na rysunku 4.85 eliminuje wady poprzedniego systemu doprowadzania CPS, stwarza jednak problemy wynikające z tarcia na styku nieruchomego pierścienia z obrotowym trzpieniem, wymagające użycia materiałów o dobrych właściwościach smarujących (np. teflonu).





Rys. 4.85. Ściernica z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania poprzez nieruchomy pierścień i kanały w trzpieniu szlifierskim: a) widok z przodu; b) widok z tyłu; c) elementy składowe systemu

Fig. 4.85. Grinding wheel with system of centrifugal supplying of the coolant directly to the grinding zone thru stationary ring and channels in the arbor: a) front view; b) rear view; c) components of the system

### Impregnacja ściernic pierwiastkami niemetalicznymi

Przeprowadzone badania, których celem było określenie wpływu impregnowania CPS siarką na wyniki szlifowania stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- impregnacja ściernicy siarką w znaczący sposób zmniejsza intensywność zalepiania CPS;
- impregnacja CPS siarką w największym stopniu ogranicza powstawanie rozległych zalepień międzyziarnowych, które są najbardziej niekorzystne technologicznie;
- nie zaobserwowano istotnego wpływu impregnacji CPS siarką na intensywność powstawania zalepień w mikroobszarach wierzchołków ziaren aktywnych ściernicy;
- przy zastosowaniu ściernic nasiarczanych istnieje ryzyko zanieczyszczenia powierzchni obrobionej siarką, która na skutek nadmiernego wzrostu temperatury w strefie szlifowania może przejść w stan płynny;

z tego względu bardzo istotny jest dobór parametrów szlifowania oraz optymalizacja sposobu doprowadzenia i wydatku cieczy chłodzącej;

- wykazano, że skaterometria laserowa z powodzeniem może być zastosowana do szybkiego bezstykowego wykrywania zalepień na CPS i stanowi skuteczną alternatywę dla innych stosowanych w tym celu metod pomiarowych;
- dla ściernicy impregnowanej siarką zaobserwowano zwiększenie wartości parametrów zastosowanych do oceny obrazów skaterometrycznych (poła pow.  $A_n$  oraz sumarycznego natężenie światła  $I_{\Sigma}$ );
- zwiększenie wartości powyższych parametrów wskazuje na poprawę właściwości odbiciowych promieniowania laserowego z tego typu powierzchni, co jest korzystne ze względów pomiarowych;
- podwojenie wydajności ubytkowej szlifowania spowodowało proporcjonalny wzrost wartości parametrów SGP obrobionych zarówno ściernicą nieimpregnowaną, jak i nasiarczoną;
- uzyskane wyniki eksperymentów wskazują, że kolejne prace powinny obejmować badania prowadzące do wyznaczenia optymalnego stopnia nasiarczenia CPS, uwzględniającego strukturę ściernicy.

Na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń wpływu impregnowania ściernic alotropowymi odmianami węgla na proces szlifowania otworów w stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup> sformułowano następujące wnioski:

- uzyskane wyniki procesu szlifowania wskazują na możliwość zredukowania chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego poprzez zastosowanie impregnacji CPS alotropowymi odmianami węgla. Wartości parametru  $Ra$  maleją od około 10% dla ściernicy nasiarczonej, do około 20% w przypadku ściernicy impregnowanej węglem amorficznym i ściernicy impregnowanej grafitem;
- zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  nie wykazały żadnego istotnego trendu w funkcji rodzaju impregnatu;
- impregnacja CPS przyczyniła się do uzyskania wysokiego poziomu rozwinięcia CPS po obróbce oraz zredukowania udziału powierzchniowego wysp o około 30% w porównaniu z wartościami wyznaczonymi dla ściernicy nieimpregnowanej;
- porównanie obrazów mikroskopowych czynnych powierzchni badanych ściernic wykazało, że zjawisko zalepiania wystąpiło w przypadku wszystkich badanych ściernic ze zróżnicowaną intensywnością. Najbardziej zalepiona okazała się czynna powierzchnia ściernicy nieimpregnowanej. W przypadku wszystkich ściernic impregnowanych zaobserwowano znacznie mniejszy udział zalepień na czynnej powierzchni;

- porównanie wartości wybranych parametrów geometrycznych analizowanych powierzchni pozwoliło na wytypowanie grafitu, jako impregnatu wpływającego w największym stopniu na ograniczenie zjawiska zalepiania CPS materiałem obrabianym. Obecność grafitu spowodowała niemal dziesięciokrotne zmniejszenie udziału obszarów zalepionych (w porównaniu ze ściernicą nieimpregnowaną) oraz spowodowała najkorzystniejszy sposób rozłożenia zalepień na CPS – w postaci wielu zalepień o małej powierzchni.

Podsumowując należy stwierdzić, że zaproponowane innowacyjne modyfikacje budowy ściernicy stanowią skuteczny sposób korzystnego wpływania na szereg czynników technologicznych procesu szlifowania otworów, a w szczególności na:

- obniżenie chropowatości powierzchni obrabianej;
- zmniejszenie mocy szlifowania;
- wydłużenie okresu trwałości ściernicy;
- zwiększenie wydajności ubytkowej obróbki;
- skuteczniejsze doprowadzenie do strefy szlifowania płynu chłodząco-smarującego i ograniczenie jego wydatku;
- ograniczenie zjawiska zalepiania produktów szlifowania, w tym głównie wiórów materiału obrabianego, do czynnej powierzchni ściernicy.

Większość z opracowanych modyfikacji może być ze sobą łączona w celu uzyskania synergicznego efektu wzmocnienia ich korzystnego oddziaływania na żądany aspekt procesu szlifowania. W kolejnym rozdziale przedstawiono przykład takiego połączenia trzech modyfikacji w procesie jednoprzeciowego szlifowania otworów w stali 100Cr6.

## 5. Integracja modyfikacji ściernicy

W niniejszym rozdziale przedstawiony został wpływ łączenia modyfikacji konstrukcji ściernicy na przykładzie procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów. Rozpatrywano trzy modyfikacje: strefowe zróżnicowanie budowy, mikronieciągłości czynnej powierzchni oraz wewnętrzne doprowadzenie PCS [225].

### 5.1. Wybrane modyfikacje budowy ściernicy

Charakterystykę trzech opisywanych modyfikacji budowy ściernicy (modyfikacja A, B i C) przedstawiono w schematyczny sposób w tabeli 5.1.

Pierwsza z wymienionych w tabeli 5.1 modyfikacji ściernicy polega na strefowym zróżnicowaniu jej budowy (modyfikacja A) – szczegółowy opis w podrozdziale 4.1. Inną modyfikacją budowy ściernicy, która wpływa korzystnie na przebieg i wyniki procesu szlifowania oraz na trwałość ściernicy, jest kształtowanie mikronieciągłości na czynnej powierzchni (modyfikacja B) [315] – szerszy opis w podrozdziale 4.3. Trzecią z rozpatrywanych modyfikacji jest doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego od wewnątrz ściernicy (modyfikacja C) – więcej informacji na ten temat zawarto w podrozdziale 4.4.

### 5.2. Badania doświadczalne

W celu porównania wpływu poszczególnych modyfikacji ściernic oraz ich integracji w jednym narzędziu na przebieg i wyniki procesu szlifowania otworów, przeprowadzono badania doświadczalne.

#### 5.2.1. Metodyka badań doświadczalnych

Badania prowadzono w procesie jednoprzęściowego obwodowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych z wydajnością ubytkową  $Q_w \approx 12-24 \text{ mm}^3/\text{s}$ , wynikającą z prędkości posuwu osiowego  $v_{fa} = 1,0-2,0 \text{ mm/s}$ .

Stanowisko badawcze wyposażone było w szlifierkę uniwersalną RUP-28P i zostało szerzej opisane w podrozdziale 4.1.2.

W każdym z punktów planu eksperymentu wykonano trzy powtórzenia. W trakcie prób rejestrowano moc wrzeciona ściernicy na biegu jałowym oraz moc maksymalną w danym przejściu roboczym. Na podstawie tych wartości wyznaczono następnie wartości przyrostu mocy  $\Delta P$ . Parametry chropowatości powierzchni przeszlifowanych przedmiotów wyznaczono na podstawie profili zmierzonych metodą stykową z użyciem profilometru Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke. Topografie czynnych powierzchni ściernic rejestrowano z użyciem systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. Opis obu stanowisk do pomiarów SGP zamieszczono w podrozdziale 3.2.2.

Tab. 5.1. Charakterystyka wybranych modyfikacji budowy ściernicy

Tab. 5.1. Characteristics of selected modifications of the grinding wheel structure

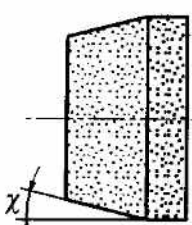
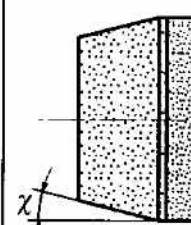
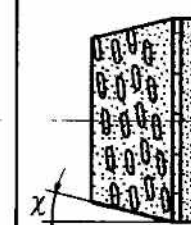
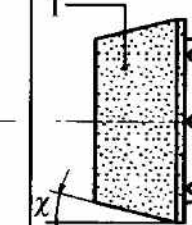
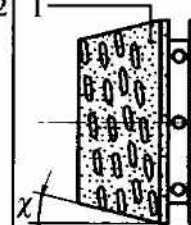
	Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie (modyfikacja A)	Ściernica z mikronieciągłościami czynnej powierzchni (modyfikacja B)	Ściernica z systemem wewnętrznego doprowadzenia PCS (modyfikacja C)
Schemat konstrukcji	<p>Cross-section of machining layer</p>		
Makrofotografia			
Cechy charakterystyczne		<p>Parametry chropowości CPS:      – stan początkowy:  <math>Smvr = 0,198 \text{ mm}^3/\text{mm}^2</math>  <math>Sds = 44 \text{ mm}^2</math>      – z mikronieciągłościami:  <math>Smvr = 0,428 \text{ mm}^3/\text{mm}^2</math>  <math>Sds = 22 \text{ mm}^2</math></p>	
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wzrost efektywności szlifowania</li> <li>– podział szlifowania z grubego i wykończeniowego na dwie strefy funkcjonalne ściernicy</li> <li>– nakrój stożkowy umożliwia równomierne rozłożenie nadadku obróbkowego na większej pow.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– bardziej efektywne docieranie CPS do strefy szlifowania</li> <li>– lepsze usuwanie produktów zużycia ściernicy i wiórów ze strefy szlifowania</li> <li>– możliwość kształtowania na konwencjonalnych ściernicach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie objętości PCS docierającego do strefy szlif.</li> <li>– zredukowanie wydatku PCS</li> <li>– możliwość regulowania wydatku PCS poprzez zmianę liczby i kształtu kanałów w przekładce</li> </ul>
Wady	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ściernica wytwarzana na specjalne zamówienie</li> <li>– dodatkowy precyzyjny zabieg obciągania konieczny do ukształtowania nakroju stożkowego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– dodatkowy precyzyjny zabieg obciągania konieczny do ukształtowania mikronieciągłości</li> <li>– wymaga możliwości precyzyjnej regulacji parametrów obciągania w szerokim zakresie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– niekonwencjonalna konstrukcja trzpienia szlifierskiego</li> <li>– ograniczony zakres średnic przedmiotów obrabianych</li> </ul>

### 5.2.2. Ściernice zastosowane w badaniach

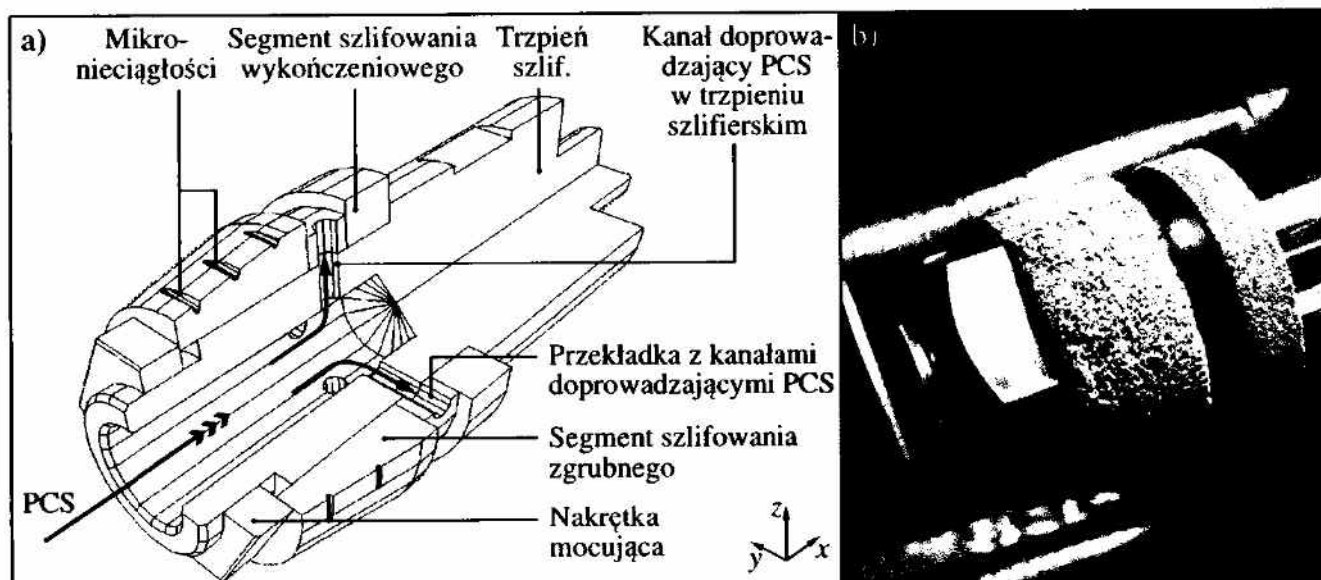
Do badań doświadczalnych przygotowano pięć ściernic z ziarnami mikrokryształicznego korundu spiekane go i spoiwem szklanokryształicznym [94, 97]. W strefie szlifowania zgrubnego ściernic umieszczono ziarna o numerze 46, natomiast w strefie szlifowania wykończeniowego ziarna o numerze 80. Ściernice opracowano w taki sposób, aby można było zbadać wpływ integracji kolejnych modyfikacji budowy ściernicy na proces szlifowania. Dlatego też w badaniach użyto ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie, ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z ukształtowanymi mikronieciągłościami CPS, ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z systemem wewnętrznego doprowadzenia PCS oraz ściernicy łączącej strefowe zróżnicowanie budowy z mikronieciągłościami ukształtowanymi w strefie szlifowania zgrubnego oraz z możliwością podania PCS przez trzpień szlifierski. Jako odniesienie do badań włączono również niezmodyfikowaną ściernicę referencyjną, która wykonana była w całości z ziaren o numerze 46. Opis, schemat konstrukcyjny oraz oznaczenie techniczne ściernic użytych w badaniach zamieszczono w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Ściernice zastosowane w badaniach doświadczalnych

Tab. 5.2. Grinding wheels used in experimental tests

Opis	Ściernica referencyjna	Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie (modyfikacja A)	Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie i z mikronieciągłościami CPS (modyfikacja A+B)	Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie i z systemem wewnętrznego doprowadzenia PCS (modyfikacja A+C)	Ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie z mikronieciągłościami CPS i systemem wew. doprowadzenia PCS (mod. A+B+C)
Schemat konstrukcji					
Oznaczenie	1-35×20×10-SG/F46 K7VDG 100%	1-35×20×10-SG/F46 K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%	1-35×20×10-SG/F46 K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%	1: 1-35×14×10- SG/F46K7VDG 2: 1-35×6×10- SG/F80I7VDG	1: 1-35×14×10- SG/F46K7VDG 2: 1-35×6×10- SG/F80I7VDG

Na szczególną uwagę zasługuje ostatnia z zaprezentowanych w tabeli 5.2 ściernic, w której zintegrowano trzy modyfikacje budowy opisane w punkcie 5.1. Ściernica ta łączy w jednym układzie technologicznym zbiór modyfikacji rozpatrywanych do tej pory oddzielnie. Na rysunku 5.1 przedstawiono jej widok oraz schemat konstrukcyjny z opisem najważniejszych elementów.



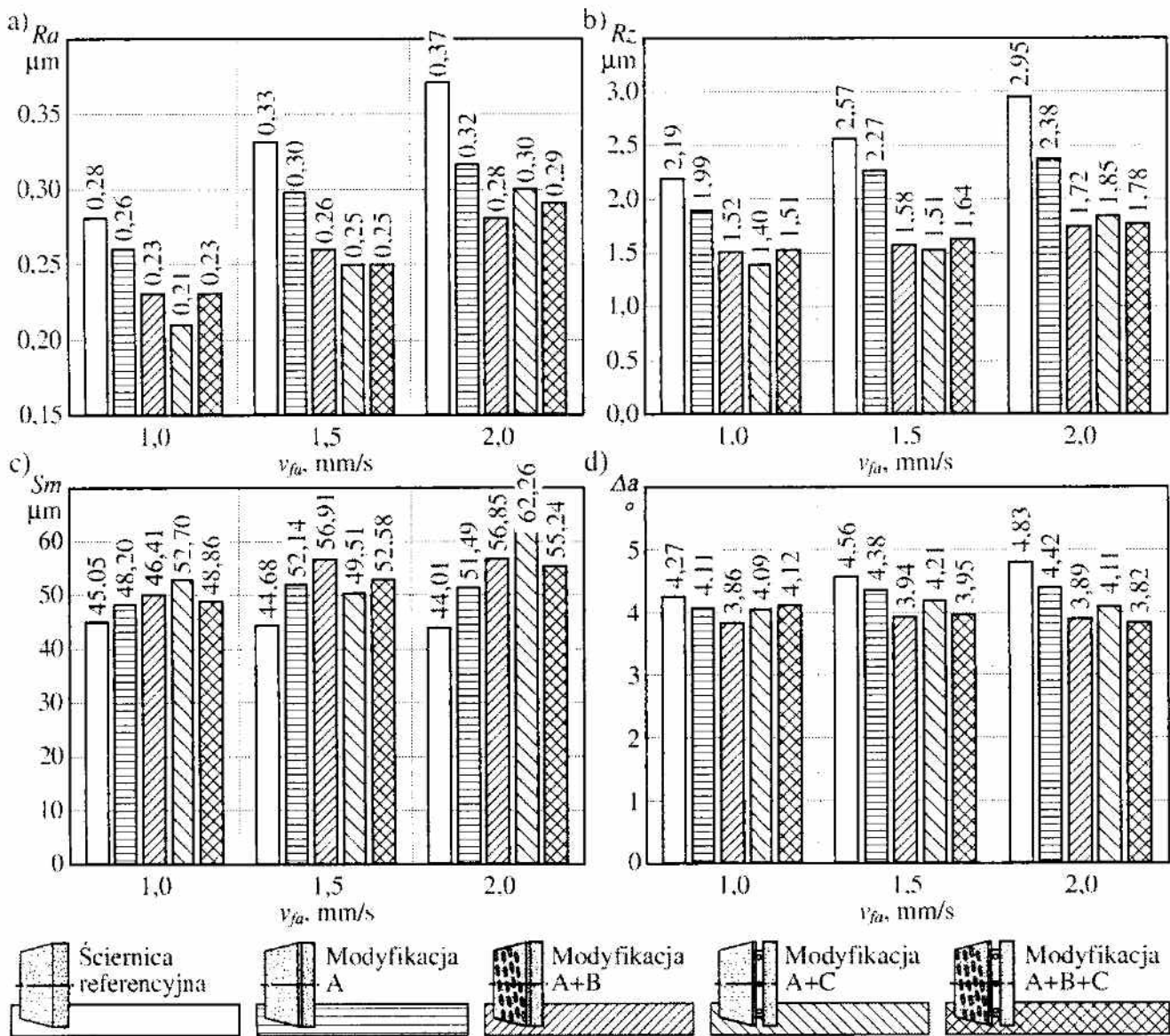
Rys. 5.1. Model 3D (a) oraz prototyp (b) ściernicy ze zintegrowanymi modyfikacjami budowy (strefowo zróżnicowaną budową, mikro-nieciągłościami PCS i systemem wewnętrznego doprowadzenia PCS)

Fig. 5.1. 3D model (a) and view of the prototype (b) of the grinding wheel with integrated structural modifications (zone-diversified structure, microdiscontinuities of active surface and internal cooling system)

### 5.2.3. Wyniki badań i ich analiza

W wyniku doświadczeń przeprowadzonych badanymi ściernicami określono zmiany chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$ , które zamieszczono na rysunku 5.2.

Uzyskane rezultaty wskazują, że przy wzrastającej wydajności ubytkowej szlifowania, w przypadku wszystkich badanych ściernic, pogarsza się chropowatość powierzchni przedmiotów obrabianych. Spowodowane jest to skróceniem czasu obróbki i zmniejszeniem liczby przeszlifowań materiału obrabianego przez drobnoziarnistą część ściernicy realizującą szlifowanie wykończeniowe i wyiskrzanie. Z porównania wartości parametrów  $Ra$  i  $Rz$  (rys. 5.2a-b) wyznaczonych po szlifowaniu pięcioma badanymi ściernicami wynika, że najwyższe wartości chropowatości kształtowała ściernica referencyjna. Szlifując ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie, uzyskano nieco niższe wartości chropowatości powierzchni obrabianej. Najkorzystniejsze rezultaty zarejestrowano natomiast w przypadku ściernic łączących w swojej budowie co najmniej dwie modyfikacje. Można z tego wnioskować, że integracja modyfikacji pozwala obniżyć chropowatość powierzchni przedmiotu po szlifowaniu wyrażoną parametrami wysokościowymi profilu chropowatości o około 25% dla  $Ra$  i około 40% w przypadku  $Rz$ .



Parametry szlifowania:  $v_s = 60$  m/s;  $v_w = 0,6$  m/s;  $a_e = 0,20$  mm;  $Q_{PCS} = 5,0$  l/min (chłodzenie zalewowe)  
 $Q_{PCS} = 1,0$  l/min (chłodzenie odśrodkowe);  $b = 12,6$  mm;  $\alpha = 0,91^\circ$ ; Przedmiot obr.: stal 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)

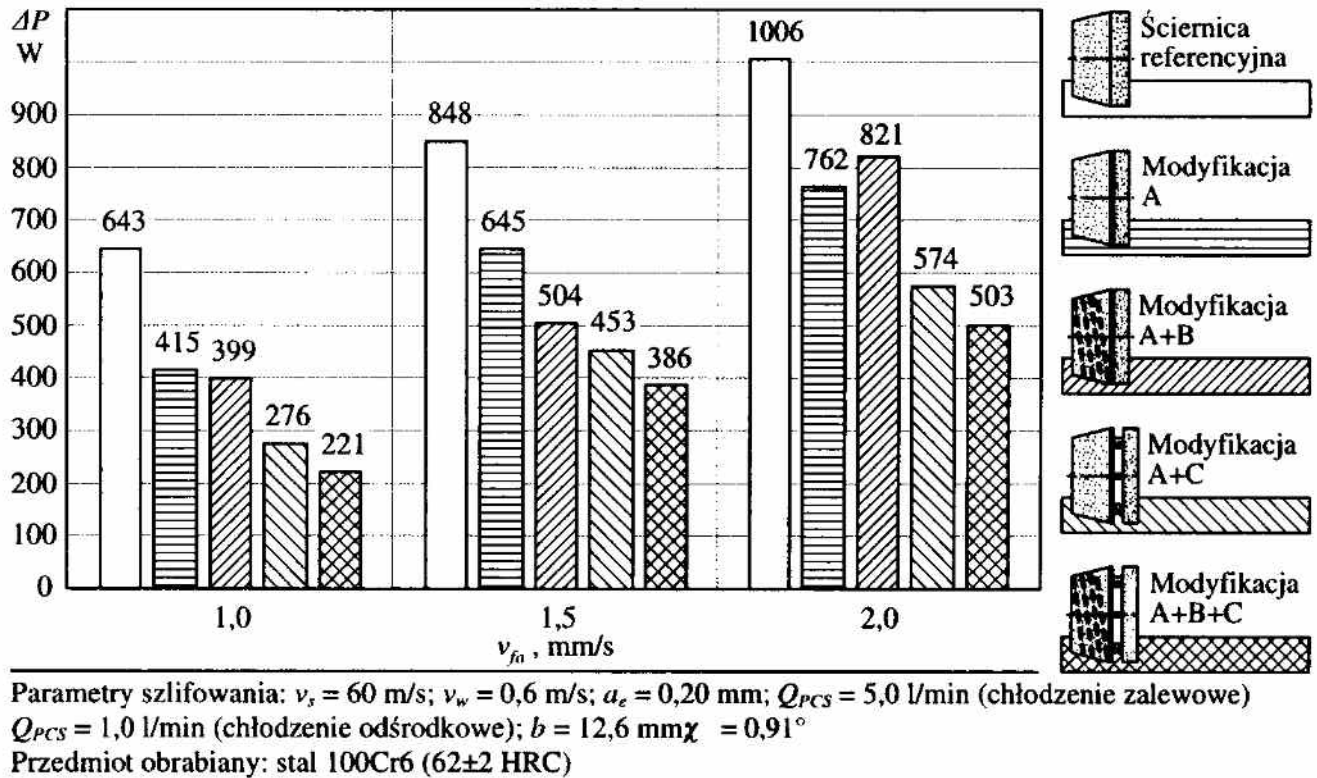
Rys. 5.2. Zmiany wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$ : a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ , b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ , c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ , d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta a$

Fig. 5.2. Changes in the values of selected roughness parameters of machined surface over axial table feed speed  $v_{fa}$ : a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$

W nieco mniejszym stopniu korzystny wpływ łączenia modyfikacji ujawnił się również w wartościach pozostałych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej ( $Sa$  i  $\Delta a$ ) przedstawionych na rysunku 5.2c-d.



Podobna tendencja widoczna jest przy porównaniu wartości przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  zarejestrowanych dla pięciu ściernic uwzględnionych w badaniach i zamieszczonych na rysunku 5.3.



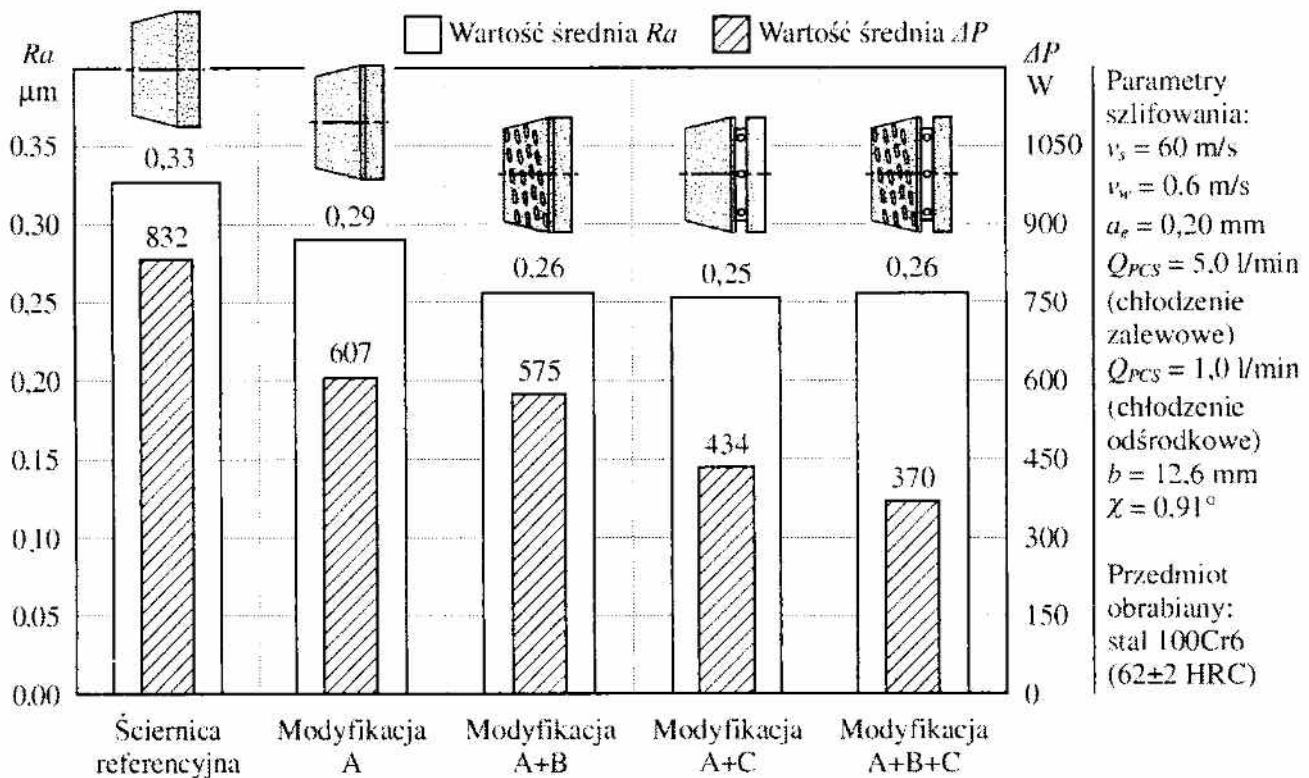
Rys. 5.3. Zmiany przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu  $v_{fa}$

Fig. 5.3. Increase of grinding power  $\Delta P$  changes over axial table feed speed  $v_{fa}$

Zastosowanie strefowo zróżnicowanej budowy (modyfikacja A) oraz połączenia strefowego zróżnicowania z mikronieciągłościami CPS (modyfikacja A+B) pozwoliło na zredukowanie przyrostu mocy szlifowania o niecałe 30%. Najniższe wartości parametru  $\Delta P$  zarejestrowano podczas obróbki ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie z układem chłodzenia wewnętrznego (modyfikacja A+C) oraz ściernicą łączącą trzy modyfikacje konstrukcji (A+B+C). W przypadku tych ściernic zauważyć można spadek poboru mocy szlifowania o około 50%.

W celu sumarycznego porównania wyników eksperymentów dla poszczególnych ściernic, uśredniono wartości badanych parametrów dla wszystkich punktów planu badań. Na rysunku 5.4 przedstawiono wyznaczone średnie wartości chropowatości powierzchni obrobionej wyrażonej parametrem  $Ra$  oraz przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$ .

Z zestawienia tego wyniku, że najkorzystniejszy wpływ na chropowatość powierzchni obrobionej ma jednoczesna integracja dwóch lub trzech modyfikacji budowy ściernicy.



Rys. 5.4. Średnie wartości chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego  $Ra$  i przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  dla badanych ściernic

Fig. 5.4. Average values of workpiece roughness  $Ra$  and increase of grinding power  $\Delta P$  for tested grinding wheels

Należy przypuszczać, że w przypadku tych ściernic obniżenie chropowatości powierzchni po szlifowaniu wynika z lepszego odprowadzania produktów szlifowania ze strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym oraz bardziej efektywnego docierania do niej PCS. Na takie zmiany wpływ mają mikronieciągłości CPS oraz system chłodzenia wewnętrzny. W efekcie, w strefie szlifowania zgrubnego obniżają się obciążenia cieplne ziaren, co wpływa na dłuższe zachowywanie wysokiej zdolności skrawnej wierzchołków aktywnych. Wzrost efektywności szlifowania zgrubnego powoduje, że w drobnoziarnistej strefie szlifowania wykończeniowego pozostaje mniejszy naddatek do wyiskrzenia. Stąd też uzyskiwana chropowatość powierzchni obrabianej jest niższa niż w przypadku zastosowania ściernicy z jedną modyfikacją – strefowym zróżnicowaniem budowy (modyfikacja A).

Porównując wartości średnie przyrostu mocy szlifowania, można zauważyć, że najniższe wartości uzyskano w przypadku ściernicy z trzema modyfikacjami. Połączenie modyfikacji A, B i C w jednej ściernicy pozwoliło, w przyjętych warunkach badawczych, na obniżenie wartości  $\Delta P$  o 56% w porównaniu ze ściernicą niemodyfikowaną. Na obniżenie wartości mocy szlifowania w głównym stopniu wpływa skuteczne doprowadzenie PCS od wewnątrz ściernicy do strefy szlifowania. W warunkach dobrego chłodzenia

i wyflukiwania wiórów materiału obrabianego ze strefy szlifowania ograniczone zostaje zużycie ściernie składników CPS i w efekcie maleje udział tarcia, powodując zmniejszenie mocy koniecznej do usunięcia materiału.

### 5.3. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych, mających na celu określenie możliwości uzyskania synergicznego wzmocnienia pozytywnego wpływu modyfikacji budowy ściernicy poprzez ich integrację, wynikają następujące wnioski:

- na przykładzie procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów wykazano, że zintegrowanie szeregu modyfikacji budowy ściernicy w jednym narzędziu ściernym pozwala na znaczącą poprawę wyników szlifowania;
- zastosowanie systemu chłodzenia odśrodkowego oraz ukształtowanie mikronieciągłości na czynnej powierzchni strefy szlifowania zgrubnego ściernicy pozwoliło obniżyć moc szlifowania w zakresie od 31% do 56%;
- z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że integracja modyfikacji budowy ściernicy wpływa korzystnie również na efekty szlifowania, obniżając chropowatość obrobionych powierzchni;
- w przypadku ściernic łączących w swojej budowie co najmniej dwie modyfikacje zarejestrowano spadek wartości chropowatości powierzchni przedmiotu po szlifowaniu o około 25%;
- najbardziej zaawansowanym z opisanych rozwiązań konstrukcyjnych była ściernica łącząca trzy modyfikacje: strefowe zróżnicowanie budowy i mikronieciągłości CPS wraz z systemem doprowadzenia PCS od wewnątrz ściernicy; zastosowanie takiego narzędzia pozwoliło na ponaddwukrotne zmniejszenie mocy szlifowania oraz zredukowanie chropowatości powierzchni obrobionej o około 20%, w porównaniu ze ściernicą niemodyfikowaną, co świadczy o wyraźnym korzystnym wpływie integracji modyfikacji budowy ściernicy na przebieg i wyniki rozpatrywanego procesu szlifowania.

## **6. Ocena efektywności szlifowania otworów modyfikowanymi ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego**

Efektywność szlifowania, rozumianą w kategoriach technologicznych i ekonomicznych, określa się jako relację uzyskanych efektów obróbki do nakładów poniesionych na ich osiągnięcie. Efekty realizacji procesów szlifowania najczęściej opisywane są za pomocą następujących parametrów pośrednich [68]:

- siła szlifowania;
- moc szlifowania;
- energochłonność właściwa szlifowania;
- temperatura szlifowania;
- drgania układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie;
- emisja akustyczna;
- wydajność szlifowania

oraz przy użyciu parametrów bezpośrednich, takich jak:

- chropowatość i falistość powierzchni po szlifowaniu;
- naprężenia i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotu obrobionego;
- kształt i wymiary przedmiotu obrobionego;
- makro- i mikrozużycie ściernicy;
- zalepianie CPS.

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

### **6.1. Metody oceny efektywności szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi**

Efektywność szlifowania można ocenić za pomocą kryteriów podzielonych na pięć grup. Są to wskaźniki jakościowe, wydajnościowe, kosztów szlifowania, przebiegu szlifowania i wskaźniki skojarzone, zwane również syntetycznymi [166]. W tabeli 6.1 przedstawiono podawane w literaturze wskaźniki stosowane do pośredniej ilościowej oceny efektywności szlifowania, z podziałem na pięć grup.

Tabela 6.1. Wskaźniki stosowane do pośredniej, ilościowej oceny zdolności skrawnej ściernicy [166]

Table 6.1. Indices applied to the intermediate, quantitative evaluation of the grinding wheel machinability [166]

Wskaźniki jakościowe	Wskaźniki wydajnościowe	Wskaźniki kosztów szlifowania	Wskaźniki przebiegu szlifowania	Wskaźniki skojarzone szlifowania
$WJ_1 = Ra$ $\mu m$	$WW_1 = Q_w$ $mm^3/s$	$WK_1 = K_{v,t}/Q_w +$ $+ K_v/(V_w/V_s) +$ $+ K_d/\Delta V_w$ $z/mm^3$	$WP_1 = F_p \cdot N$ $WP_2 = F_p/T$ , N/mm $WP_3 = F_p^*$ , N $WP_4 = P_c$ , kW $WP_5 = P_c/T$ , kW/mm $WP_6 = \Theta_p$ , K $WP_7 = a_d$ , $\mu m$ $WP_8 = F_p/A_D$ , N/mm <sup>2</sup> $WP_9 = F_p/A_{Dz}$ , N/mm <sup>2</sup> $WP_{10} = \lambda = \frac{e^{-10 \frac{Q_w \cdot F_p}{Q_w \cdot F_p}}}{t_2 - t_1} \cdot s^{-1}$	$WS_1 = G = V_w/V_c$ , mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> $WS_2 = V_w/V_w$ , mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> $WS_3 = V_w/V_s \cdot P_c$ , W <sup>-1</sup> $WS_4 = V_w/V_s \cdot P_c \cdot Ra$ , W <sup>-1</sup> · $\mu m^{-1}$ $WS_5 = V_w \cdot F_c/V_c$ , N $WS_6 = f/F_p$ , mm/s·N $WS_7 = Q_w/F_p$ , mm <sup>3</sup> /s·N $WS_8 = Q_w/P_c$ , mm <sup>3</sup> /s·W $WS_9 = V_w/F_p \cdot \lambda$ , mm <sup>3</sup> /N $WS_{10} = V_w/F_p \cdot \lambda \cdot \Theta$ , mm <sup>3</sup> /N·K $WS_{11} = V_w^2/V_c \cdot F_p$ , mm <sup>3</sup> /N $WS_{12} = 1/F_p \cdot Ra$ , N <sup>-1</sup> · $\mu m^{-2}$
* gdzie $\lambda$ to współczynnik charakteryzujący intensywność zmian zdolności skrawnej ściernicy w czasie szlifowania (wg Г. Б. Лурье)				

W literaturze spotkać można dwa kierunki prac dotyczące sposobów oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic i związanej z nią efektywności szlifowania. Pierwszy dotyczy szukania nowych, oryginalnych sposobów oceny zdolności skrawnej ściernic, m.in. poprzez:

- pomiar pola magnetycznego czynnej powierzchni ściernic, które w czasie pracy mają tendencję do zalepiania przy prędkościach obwodowych nie przekraczających 40 m/s [160];
- pomiar ciśnienia akustycznego szumów obrabiarki mierzonego w strefie szlifowania i zmian jakości warstwy wierzchniej przedmiotu obrobionego w wyniku zjawiska „chatteru” [325];
- ocenę stopnia ściernego zużycia CPS na podstawie fotometrycznego pomiaru średniego natężenia światła odbitego od CPS w kierunku składowych odbicia zwierciadlanego, skierowanego na nią w formie wiązki równoległej, na obszar wielokrotnie przekraczający wielkość ziarna ściernego [312];
- pomiar różnicy temperatury w określonych przekrojach strefy szlifowania [373, 374];
- określenie wartości czynników związanych z pracą tarcia w jej różnych formach (tarcia ślizgowe i tarcia związane z odkształceniami plastycz-

nymi oraz tarcia wiórów o spoiwo, a także spoiwa o materiał obrabiany) na podstawie parametrów stereometrycznych CPS [49, 199, 200, 202];

- pomiar intensywności zalepień CPS za pomocą specjalnego przyrządu rejestrującego częstotliwość impulsów prostokątnych zmieniającą się w funkcji masy metalu nalepionego na powierzchnię ściernicy [45, 47, 201].

Drugi kierunek wynika z dążenia do ustalenia ogólnie akceptowanego, rekomendowanego zbioru wskaźników (np. prace nad kompleksową metodą oceny właściwości użytkowych ściernic „KOWUS” [167]). Jednak dotychczasowe próby ujednoczenia sposobu oceny efektów szlifowania nie doprowadziły do wypracowania zbioru wskaźników, który byłby powszechnie uznany i stosowany w pracach badawczych [165].

Można przyjąć, że najbardziej uniwersalne i najczęściej stosowane wskaźniki oceny zdolności skrawnych ściernic, i ściśle z nią związanej efektywności szlifowania, stanowią te wielkości, które zostały znormalizowane. Spośród zbioru przedstawionego w tabeli 6.1 w normach zdefiniowano:

- $WJ_1 = Ra$ ,  $\mu\text{m}$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości (PN-87/M-04256/02);
- $WJ_3 = \mu HV$ ,  $\text{N/mm}^2$  mikrotwardość w skali Vickersa (PN-87/M-04250);
- $WW_1 = Q_w$ ,  $\text{mm}^3/\text{s}$  – wydajność ubytkową szlifowania (PN-92/M-01002/05);
- $WW_4 = v_{fr}$ ,  $\text{mm/s}$  – prędkość posuwu promieniowego stołu szlifierki (PN-92/M-01002/05);
- $WP_1 = F_n$ ,  $\text{N}$  – składowa normalna siły szlifowania (PN-92/M-01002/04);
- $WP_4 = P_c$ ,  $\text{kW}$  – moc szlifowania (PN-92/M-01002/04);
- $WS_1 = G = V_w / V_s$ ,  $\text{mm}^3/\text{mm}^3$  – wskaźnik szlifowania (PN-92/M-01002/05).

Przyjmując zaproponowaną klasyfikację kryteriów oceny [166], można założyć, że każda z kategorii powinna zostać wyrażona ilościowo jedną lub kilkoma wielkościami [219, 248, 258, 268, 270, 271, 347, 348]. Zrezygnowano jednak z uwzględnienia wskaźników związanych z kosztami szlifowania, z powodu utrudnionego szacowania poszczególnych ich składników, które odnoszą się do konkretnego stanowiska produkcyjnego i są aktualne tylko w ograniczonym przedziale czasu.

Z zestawienia znormalizowanych wskaźników wynika, że jakość powierzchni obrobionej oceniona może być za pomocą mikrotwardości i średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości. Zauważyć jednak należy, że w większości publikacji, przy ocenie jakości powierzchni przedmiotu obrobionego uzyskanej w rezultacie procesów szlifowania, operuje się wyłącznie wartością parametru  $Ra$ , traktując informacje dotyczące mikrotwardości jako drugoplanowe.

Ocena wydajności procesu może być dokonana na podstawie wartości wydajności ubytkowej szlifowania  $Q_w$ , lub w przypadku procesów szlifowania z posuwem promieniowym narzędzia ściernego poprzez prędkość tego ruchu  $v_{jr}$ . Natomiast przebieg procesu opisuje składowa normalna siły szlifowania  $F_n$  oraz moc szlifowania  $P_c$ . Na potrzeby porównania modyfikacji przedstawionych w rozdziale 4, uwzględniono również ubytek materiału  $V_w$  stanowiący miarę długości okresu trwałości ściernicy oraz wskaźniki opisujące stan czynnej powierzchni ściernicy, takie jak maksymalna odchyłka okrągłości  $\Delta$  i powierzchniowy udział zalepień na CPS.

Do grupy wskaźników syntetycznych uwzględnionych w ocenie efektywności szlifowania ściernicami modyfikowanymi włączono wskaźnik szlifowania  $G$  definiowany ilorazem ubytku materiału obrabianego  $V_w$  (w  $\text{mm}^3$ ) i zachodzącego w tym samym czasie zużycia objętościowego ściernicy  $V_s$  (w  $\text{mm}^3$ ) [321]:

$$G = \frac{V_w}{V_s}, \text{ mm}^3/\text{mm}^3, \quad (6.1)$$

oraz wskaźnik wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający  $SI_Q$  (3.28), opisany szerzej w podrozdziale 3.1.

Zdecydowano się również na włączenie do grupy kryteriów wydatku płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS}$ , jako wskaźnika określającego jeden z aspektów ekologicznych procesu szlifowania, wynikający z konieczności utylizacji zużytych płynów obróbkowych.

Ostateczny zbiór kryteriów, zastosowany do oceny efektywności procesów szlifowania ściernicami modyfikowanymi zawiera następujące wskaźniki z pięciu grup:

- jakościowe:  $Ra$ ;
- wydajnościowe:  $Q_w$ ;
- przebiegu szlifowania:  $\Delta P$ ,  $V_w$ ,  $\Delta$ , powierzchniowy udział zalepień na CPS;
- ekologiczne:  $Q_{PCS}$ ;
- oraz syntetyczne:  $G$ ,  $SI_Q$ .

## 6.2. Charakterystyka ściernic modyfikowanych i referencyjnych poddanych ocenie efektywności

Efektywność procesów szlifowania otworów ściernicami z innowacyjnymi modyfikacjami budowy, wyrażoną grupą dziewięciu wskaźników, odniesiono do rezultatów uzyskanych z zastosowaniem ściernic referencyjnych. W tabeli 6.2 zamieszczono charakterystykę sześciu ściernic modyfikowanych, wraz z opisem ściernic referencyjnych, do których odnoszono wyniki oceny efektywności danej modyfikacji.

Tabela 6.2. Charakterystyka ściernic modyfikowanych i referencyjnych poddanych ocenie efektywności

Table 6.2. Characteristic of the modified and reference grinding wheel which efficiency was assessed

Ściernica modyfikowana				
Kod modyfikacji	Nazwa modyfikacji i proces szlifowania, w której była badana	Szczegóły budowy i oznaczenie	Schemat konstrukcyjny lub obraz SEM	Ściernica referencyjna (opis i oznaczenie)
M1	<p>Strefowo zróżnicowana budowa (podrozdział 4.1)</p> <p>Szlifowanie jednoprzęciowe stali 100Cr6</p>	<p>Udział wysokości strefy szlifowania zgrubnego <math>T_1</math> i wykończeniowego <math>T_2</math>: <math>T_1/T_2 = 70\%/30\%</math></p> <p>Parametry nakroju stożkowego: <math>\chi = 0,91^\circ</math> <math>b = 12,6 \text{ mm}</math></p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%</p>		<p>Opis: ściernica bez strefowo zróżnicowanej budowy, z nakrojem stożkowym umożliwiającym szlifowanie jednoprzęciowe</p> <p>Parametry nakroju stożkowego: <math>\chi = 0,91^\circ</math> <math>b = 12,6 \text{ mm}</math></p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG100%</p>
M2	<p>Modyfikacja mikrostruktury spoiwa ceramicznego (podrozdział 4.2)</p> <p>Szlifowanie wgłębne z oścylacjami stali 100Cr6</p>	<p>Spoivo: szklanokrystaliczne odmiany C</p> <p>Struktura spoiwa: polimikrokrystaliczno-amorficzna</p> <p>Rodzaj fazy krystalicznej spoiwa: gahnit i willemit</p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×10×10-SG/F46G10VTO</p>		<p>Spoivo: szklane (S)</p> <p>Struktura spoiwa: amorficzna</p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×10×10-SG/F46G10V</p>
M3	<p>Mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy (podrozdział 4.3)</p> <p>Szlifowanie jednoprzęciowe stali 100Cr6</p>	<p>Parametry mikronieciągłości: <math>L_R = 6,43 \text{ mm}</math> <math>t_{cr} = 9,38 \text{ mm}</math> <math>t_{ax} = 0,23 \text{ mm}</math> <math>b_R = 1,72 \text{ mm}</math></p> <p>Względna powierzchnia mikronieciągłości na CPS: <math>A_R = 34,61\%</math></p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%</p>		<p>Opis: ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie bez mikronieciągłości CPS</p> <p>Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%</p>



Tabela 6.2. Charakterystyka ściernic modyfikowanych i referencyjnych poddanych ocenie efektywności – *ciąg dalszy*Table 6.2. Characteristic of the modified and reference grinding wheel which efficiency was assessed – *continued*

Ściernica modyfikowana				
Kod modyfikacji	Nazwa modyfikacji i proces szlifowania, w której była badana	Szczegóły budowy i oznaczenie	Schemat konstrukcyjny lub obraz SEM	Ściernica referencyjna (opis i oznaczenie)
M4	Ściernica składowana z systemem odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego (podrozdział 4.4)  Szlifowanie jednoprzeciowe stali 100Cr6	Opis: przekładka z ukształtowanymi czterema kanałami o średnicy $d_k = 3,0$ mm. doprowadzającymi PCS bezpośrednio do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym.  Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%		Opis: ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie bez systemu odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego  Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%
M5	Ściernica impregnowana (podrozdział 4.5)  Szlifowanie prostoliniowo-zwrotne stopu Titanium Grade 2®	Impregnat: grafit Metoda impregnacji: zanurzenie ściernicy w roztworze koloidalnym proszku grafitowego Masa przed impregnacją: 17,22 g Masa po impregnacji: 17,49 g Oznaczenie ściernicy: 1-35×10×10-SG/F46G10VTO		Opis: ściernica nieimpregnowana  Oznaczenie ściernicy: 1-35×10×10-SG/F46G10VTO
M6	Integracja modyfikacji (rozdział 5)  Szlifowanie jednoprzeciowe stali 100Cr6	Zintegrowana modyfikacja nr 1, 3 i 4 w jednej ściernicy: – strefowo zróżnicowana budowa – mikronieciągłości ukształtowane w strefie szlifowania zgrubnego CPS – system odśrodkowego doprowadzenia PCS Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG70% / SG/F80I7VDG30%		Opis: ściernica bez strefowo zróżnicowanej budowy, z nakrojem stożkowym umożliwiającym szlifowanie jednoprzeciowe Parametry nakroju stożkowego: $\chi = 0,91^\circ$ $b = 12,6$ mm Oznaczenie ściernicy: 1-35×20×10-SG/F46K7VDG100%

### 6.3. Wyniki oceny efektywności szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi

W tabeli 6.3 przedstawiono zestawienie wartości bezwzględnych oraz procentowego odniesienia wskaźników oceny efektywności wyznaczonych dla ściernic z modyfikacjami do wartości odpowiadających ściernicom referencyjnym. Wartości wskaźników oceny efektywności obliczono na podstawie wyników badań zamieszczonych w rozdziale 4 i 5. Liczba wyznaczonych wskaźników była różna w przypadku poszczególnych modyfikacji i została dobrana w taki sposób, aby uwzględnić najważniejsze cechy ocenianego rozwiązania.

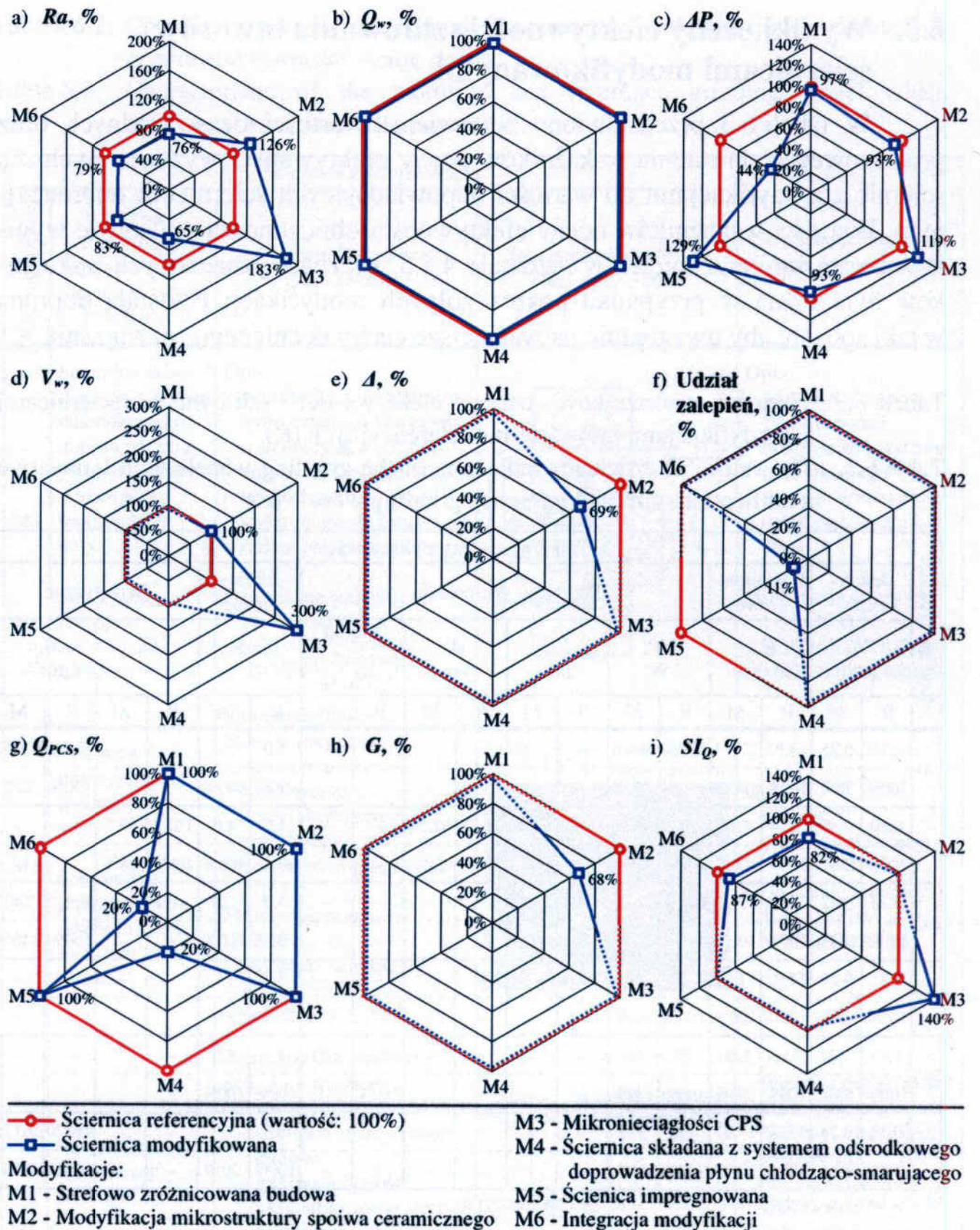
Tabela 6.3. Wartości wskaźników oceny efektywności szlifowania ściernicami z modyfikacjami (M) i ściernic referencyjnych (R)

Table 6.3. The values of efficiency indicators of the grinding wheels with innovative modifications (M) and reference grinding wheels (R)

Kod modyfikacji	Wskaźniki oceny efektywności																	
	Jakosciowe		Wydajnościowe		Przebiegu szlifowania								Ekologiczne		Syntetyczne			
	$R_a$ , $\mu\text{m}$		$Q_w$ , $\text{mm}^3/\text{s}$		$\Delta P$ , W		$V_w$ , $\text{mm}^3$		$\Delta$ , $\mu\text{m}$		Udział zalepień na CPS, %		$Q_{PCS}$ , l		$G$ , -		$SI_{Q_s}$ , $\mu\text{m}^3/\text{s}$	
	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M
M1	0.32	0.25	23,93	23,93	707,9	688,3	-	-	-	-	-	-	5,0	5,0	-	-	62236	50940
	100%	76%	100%	100%	100%	97%	-	-	-	-	-	-	100%	100%	-	-	100%	82%
M2	0.30	0.38	7.14	7.14	382,6	356,8	46400	46400	47,28	32,50	-	-	4,0	4,0	102,1	69,5	-	-
	100%	126%	100%	100%	100%	93%	100%	100%	100%	69%	-	-	100%	100%	100%	68%	-	-
M3	0.23	0.42	23,93	23,93	679,3	811,1	1364	4092	-	-	-	-	5,0	5,0	-	-	50940	71400
	100%	183%	100%	100%	100%	119%	100%	300%	-	-	-	-	100%	100%	-	-	100%	140%
M4	0.31	0.20	17,92	17,92	723	673	-	-	-	-	-	-	5,0	1,0	-	-	-	-
	100%	65%	100%	100%	100%	93%	-	-	-	-	-	-	100%	20%	-	-	-	-
M5	1,47	1,22	8,80	8,80	70	90	-	-	-	-	28,31	3,21	4,0	4,0	-	-	-	-
	100%	83%	100%	100%	100%	129%	-	-	-	-	100%	11%	100%	100%	-	-	-	-
M6	0.33	0.26	17,92	17,92	832	370	-	-	-	-	-	-	5,0	1,0	-	-	48970	56175
	100%	79%	100%	100%	100%	44%	-	-	-	-	-	-	100%	20%	-	-	100%	87%

M – ściernica modyfikowana | R – ściernica referencyjna

W celu zobrazowania wpływu danej modyfikacji budowy ściernicy na wytypowane wskaźniki oceny efektywności, sporządzono wykresy radarowe wartości procentowych, które przedstawiono na rysunku 6.1. Na wykresach tych fragmenty linii łączących punkty danych, dla których nie określono wartości danego wskaźnika efektywności, zaznaczono linią przerywaną.



Rys. 6.1. Wartości procentowe wskaźników oceny efektywności dla ściernic modyfikowanych względem ściernic referencyjnych: a)  $Ra$ ; b)  $Q_w$ ; c)  $\Delta P$ ; d)  $V_w$ ; e)  $\Delta$ ; f) powierzchniowy udział zalepień na CPS; g)  $Q_{PCS}$ ; h)  $G$ ; i)  $SI_Q$

Fig. 6.1. The percentages of efficiency indicators for modified grinding wheels in relation to reference grinding wheels: a)  $Ra$ ; b)  $Q_w$ ; c)  $\Delta P$ ; d)  $V_w$ ; e)  $\Delta$ ; f) surface share of the grinding wheel smears; g)  $Q_{PCS}$ ; h)  $G$ ; i)  $SI_Q$

Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 6.1 można wytypować te modyfikacje ściernicy, które w największym stopniu wpływają na dane kryterium oceny efektywności szlifowania otworów. Wprowadzenie strefowego zróżnicowania budowy ściernicy (M1), systemu odśrodkowego doprowadzenia PCS (M4), impregnowania ściernicy grafitem (M5) oraz integracji modyfikacji (M6) pozwala na ograniczenie chropowatości powierzchni obrobionej w zakresie od 21% do 35%. Natomiast modyfikacja mikrostruktury spoiwa (M2) i mikronieciągłości CPS (M3) powodują wzrost tego kryterium o 26% do 83% (rys. 6.1a).

Dążąc do jak najbardziej wiarygodnego określenia wpływu modyfikacji budowy ściernicy, szlifowanie ściernicami referencyjnymi prowadzono przy takich samych parametrach obróbkowych. W wyniku takiej metodyki badań doświadczalnych nie można było określić wpływu badanych modyfikacji na wydajność ubytkową szlifowania (rys. 6.1b).

Analizując zmiany mocy szlifowania, można zauważyć, że najbardziej znaczące zmniejszenie tego wskaźnika (o 66%) jest możliwe w przypadku integracji modyfikacji (M6 na rys. 6.1c). Około 20-30% wzrost wartości  $\Delta P$ , w porównaniu ze ściernicą referencyjną, zanotowano dla ściernicy z mikronieciągłościami (M3) i ściernicy impregnowanej grafitem (M5). W przypadku pozostałych modyfikacji budowy ściernicy (M1, M2 i M4) ich wpływ na ten parametr był nieznaczny (rys. 6.1c).

Wartości ubytku materiału obrabianego  $V_w$  (rys. 6.1d) pozwalają na ocenę okresu trwałości ściernicy, który został wyznaczony dla ściernic ze zmodyfikowanym spoiwem (M2) oraz z mikronieciągłościami CPS (M3). Zastosowanie tej drugiej modyfikacji pozwoliło na trzykrotne wydłużenie czasu pracy ściernicy w porównaniu ze ściernicą bez mikronieciągłości CPS (rys. 6.1d).

Zmiany błędów okrągłości ściernicy  $\Delta$  w okresie jej trwałości oraz zużycie objętościowe ściernicy  $V_s$ , konieczne do wyznaczenia wskaźnika szlifowania  $G$ , rejestrowane były tylko w przypadku szlifowania ściernicami ze zmodyfikowaną mikrostrukturą spoiwa. Wyniki oceny tych dwóch wskaźników ( $\Delta$  i  $G$ ) wykazały możliwość ponad 30% zmniejszenia błędów kształtu przy zastosowaniu modyfikacji spoiwa (rys. 6.1e) z jednoczesnym proporcjonalnym spadkiem wartości współczynnika  $G$  (rys. 6.1h).

Kolejny wskaźnik oceny efektywności ściernic modyfikowanych odnosił się do powierzchniowego udziału zalepień na CPS. Wskaźnik ten był najbardziej istotny w badaniach ściernic impregnowanych, stosowanych w procesach szlifowania materiałów trudno skrawalnych, przez co jego wartość wyznaczono tylko w tym przypadku. Wykazano zdecydowane (ponad 90%) zmniejszenie udziału zalepień CPS materiałem obrabianym dla ściernicy impregnowanej grafitem (M5 na rys. 6.1h).

Porównanie wartości wskaźnika ekologicznego  $Q_{PCS}$  dla badanych modyfikacji wykazało możliwość zdecydowanego (pięciokrotnego) zredukowania jego wartości przy zastosowaniu ściernic z systemem wewnętrznego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania – modyfikacja M4 i M6 na rysunku 6.1g.

W przypadku modyfikacji budowy ściernicy, dla których było możliwe określenie zmian wydajności ubytkowej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający  $SI_Q$ , wartości tego wskaźnika (rys. 6.1i) odpowiadały zmianom chropowatości powierzchni obrobionej wyrażoną parametrem  $Ra$  (rys. 6.1a).

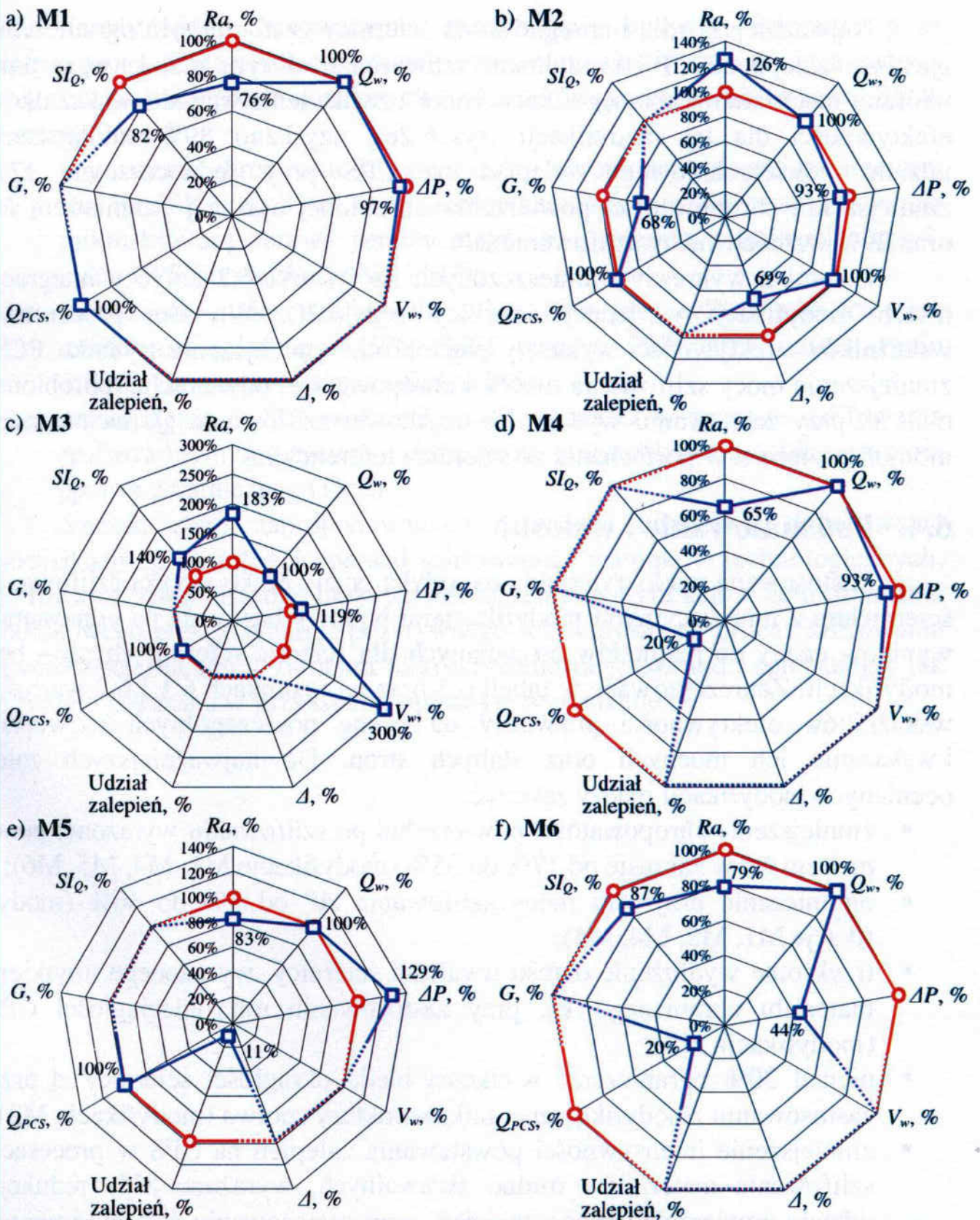
Na rysunku 6.2 przedstawiono wykresy zmian procentowych wartości poszczególnych wskaźników oceny efektywności szlifowania wyznaczonych dla sześciu rozpatrywanych modyfikacji budowy ściernicy, w odniesieniu do odpowiednich ściernic referencyjnych. Zestawienie to pozwala na ocenę korzyści i wad, przydatności oraz możliwych zastosowań danej modyfikacji.

Strefowe zróżnicowanie budowy ściernicy (M1) stosowanej w szlifowaniu jednoprzęściowym pozwala na 24% zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionej  $Ra$  i niewielkie zmniejszenie mocy szlifowania  $\Delta P$  oraz nie wpływa na wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$  ani wydatek PCS (rys. 6.2a).

Modyfikacja mikrostruktury spoiwa ceramicznego wpływa pozytywnie na błędy kształtu ściernicy  $\Delta$  i moc szlifowania  $\Delta P$ , neutralnie na wydajność ubytkową  $Q_w$ , okres trwałości  $V_w$  oraz wydatek PCS i negatywnie na chropowatość powierzchni obrobionej  $Ra$  i wskaźnik szlifowania  $G$  (rys. 6.2b). Oznacza to, że tego typu modyfikacje należy stosować w procesach, w których wymagana jest długa praca ściernicy z jak najmniejszymi błędami okrągłości, uwzględniając jednocześnie zwiększenie jej zużycia objętościowego i pogorszenie jakości powierzchni obrobionej w porównaniu ze ściernicą referencyjną.

Ukształtowanie mikronieciągłości na CPS spowodowało 83% wzrost chropowatości powierzchni obrobionej i 19% wzrost mocy szlifowania. Wartości tych wskaźników wyznaczone zostały jako średnia z okresu trwałości, ściernicy, który w przypadku ściernicy z mikronieciągłościami był trzykrotnie dłuższy (rys. 6.2c).

Zastosowanie systemu wewnętrznego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania nie wpłynęło na wydajność ubytkową szlifowania  $Q_w$  i jednocześnie korzystnie wpłynęło na chropowatość powierzchni obrobionej (parametr  $Ra$  mniejszy o 35%), moc szlifowania ( $\Delta P$  mniejsze o 7%) oraz wydatek PCS ( $Q_{PCS}$  mniejszy o 80%) w porównaniu ze ściernicą referencyjną (rys. 6.2d).



M1 - Strefowo zróżnicowana budowa; M2 - Modyfikacja mikrostruktury spoiwa; M3 - Mikronieciągłości CPS; M4 - Ściernica składana; M5 - Ściernica impregnowana; M6 - Integracja modyfikacji

—○— Ściernica referencyjna (100%)  
—□— Ściernica modyfikowana

Rys. 6.2. Wskaźniki efektywności ściernic modyfikowanych w porównaniu ze ściernicami referencyjnymi: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6  
Fig. 6.2. Efficiency indicators of modified grinding wheels in relation to reference grinding wheels: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6

Najważniejszą rolą impregnowania ściernicy grafitem było ograniczenie zjawiska zalepiania CPS produktami szlifowania, w tym przede wszystkim wiórami materiału obrabianego. Jak wynika z zestawienia wartości wskaźników efektywności dla tej modyfikacji (rys. 6.2e), uzyskano 89% zmniejszenie udziału powierzchniowego zalepień na CPS przy jednoczesnym 17% zmniejszeniu chropowatości powierzchni obrobionej opisaną parametrem  $Ra$  oraz 29% wzroście mocy szlifowania  $\Delta P$ .

Ostatni z wykresów zamieszczonych na rysunku 6.2 dotyczy integracji trzech modyfikacji w jednej ściernicy (rys. 6.2f). Wartości procentowe wskaźników efektywności wykazały pięciokrotne zmniejszenie wydatku PCS, zmniejszenie mocy szlifowania o 66% i chropowatości powierzchni obrobionej o 21%, przy zachowaniu wydajności ubytkowej szlifowania  $Q_w$  na niezmiennym poziomie, w porównaniu ze ściernicą referencyjną.

#### 6.4. Podsumowanie i wnioski

Zastosowana wielokryterialna metodyka oceny efektywności szlifowania ściernicami z innowacyjnymi modyfikacjami budowy bazowała na odniesieniu wyników oceny do rezultatów otrzymanych dla ściernic referencyjnych – bez modyfikacji. Zaprezentowane w tabeli 6.3 oraz na rysunkach 6.1 i 6.2 wartości wskaźników efektywności pozwoliły na ocenę poszczególnych rozwiązań i wskazanie ich mocnych oraz słabych stron. Do najważniejszych zalet ocenianych modyfikacji należy zaliczyć:

- zmniejszenie chropowatości powierzchni po szlifowaniu wyrażonej parametrem  $Ra$  w zakresie od 17% do 35% (modyfikacje M1, M4, M5, M6);
- ograniczenie przyrostu mocy szlifowania  $\Delta P$  od 3% do 66% (modyfikacje M1, M2, M4, M6);
- trzykrotne wydłużenie okresu trwałości ściernicy, wyrażonego ubytkiem materiału obrabianego  $V_w$ , przy zastosowaniu mikronieciągłości CPS (modyfikacja M3);
- niemal 30% ograniczenie wielkości błędu okrągłości ściernicy  $\Delta$  przy zastosowaniu zmodyfikowanej mikrostruktury spoiwa (modyfikacja M2);
- zmniejszenie intensywności powstawania zalepień na CPS w procesach szlifowania materiałów trudno skrawalnych, wyrażone 89% redukcją udziału powierzchniowego zalepień, przy zastosowaniu ściernic impregnowanych grafitem (modyfikacja M5);
- możliwość osiągnięcia korzystnego efektu ekologicznego poprzez pięciokrotne zmniejszenie wydatku płynu chłodząco-smarującego  $Q_{PCS}$ , przy zastosowaniu systemu wewnętrznego doprowadzenia PCS (modyfikacja M3 i M6).

Przedstawione innowacyjne modyfikacje budowy ściernic, poza korzystnymi aspektami ich stosowania, charakteryzują się również negatywnym wpływem na niektóre z ocenianych wskaźników procesu szlifowania. Są to w szczególności:

- pogorszenie chropowatości powierzchni obrobionej opisaną parametrem  $Ra$  (o 23% do 83%) przy stosowaniu ściernic ze zmodyfikowaną mikrostrukturą spoiwa ceramicznego oraz ściernic z mikronieciągłościami CPS (modyfikacje M2 i M3);
- zwiększenie mocy szlifowania  $\Delta P$  o 19% przy szlifowaniu ściernicą z mikronieciągłościami CPS (M3) oraz o 29% przy zastosowaniu ściernicy impregnowanej grafitem (M5);
- zmniejszenie o 32% wskaźnika szlifowania  $G$  w procesie szlifowania realizowanym z użyciem ściernicy ze zmodyfikowaną mikrostrukturą spoiwa ceramicznego (M2).

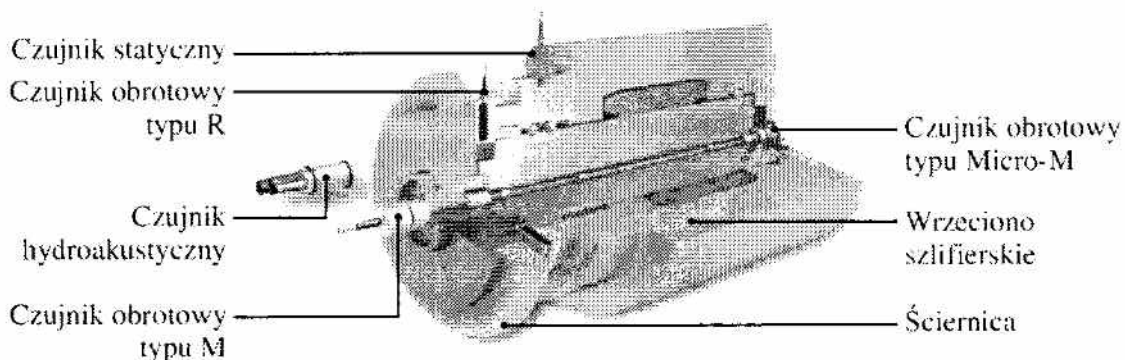
Szeroki zbiór zaproponowanych rozwiązań umożliwia dopasowanie modyfikacji do określonej operacji szlifowania i warunków technologicznych. Co również bardzo istotne, możliwe jest łączenie modyfikacji w celu uzyskania dodatkowego efektu synergii pozytywnego ich wpływu na proces szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego, jak to zostało pokazane w przykładzie opisanym w rozdziale 5.



## 7. Monitorowanie procesów szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi z zastosowaniem bezstykowego systemu emisji akustycznej

W warunkach produkcji seryjnej stosowanie ściernic z innowacyjnymi modyfikacjami w procesach szlifowania otworów wymaga monitorowania takiego procesu, głównie w celu wykrywania oznak zużycia składników CPS. W literaturze znaleźć można szereg metod kontroli procesów szlifowania, rozumianej jako badanie i ustalenie ewentualnych odstępstw od wzorca [3, 50, 107, 108, 142, 150, 382, 402, 403]. Jednak w przypadku procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych, do monitorowania należy stosować czujniki bezstykowe, dostarczające informacji o pojawieniu się określonego zjawiska (np. ładunku elektrycznego) lub zmianach różnych wielkości fizycznych (np. temperatury, mocy lub siły), bez potrzeby bezpośredniego kontaktu z materiałem obrabianym lub ściernicą [58, 161, 162, 390]. Czujniki tego typu produkowane są przez wiele firm. Szczególnie interesujące rozwiązania w tej dziedzinie proponują niemieckie firmy Nordmann GmbH & Co. oraz Dittel Messtechnik GmbH. Wśród wielu typów czujników, produkowanych przez te firmy, są również opatentowane czujniki emisji akustycznej (EA, emisja fal naprężeń – ang. *stress wave emission*) opisane szeroko w pracy [371]. W przypadku realizacji procesów szlifowania sygnał emisji akustycznej może służyć do monitorowania stanu warstwy wierzchniej materiału obrabianego oraz postępujących zmian stanu CPS [4, 176, 177, 187, 363, 367, 370, 400].

Emisję akustyczną można rejestrować z powierzchni elementów obrotowych (ściernica lub przedmiot obrabiany), stosując dwuczęściowe czujniki typu RSA (niem. *Rotierenden Schall-Aufnehmer*), które składają się z obrotowego przetworniko-nadajnika (mocowanego w osi obrotu) oraz z nieruchomego odbiornika. Sygnał przekazywany jest przez fale radiowe (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Przykładowe pozycje zamocowania czujników emisji akustycznej [54]

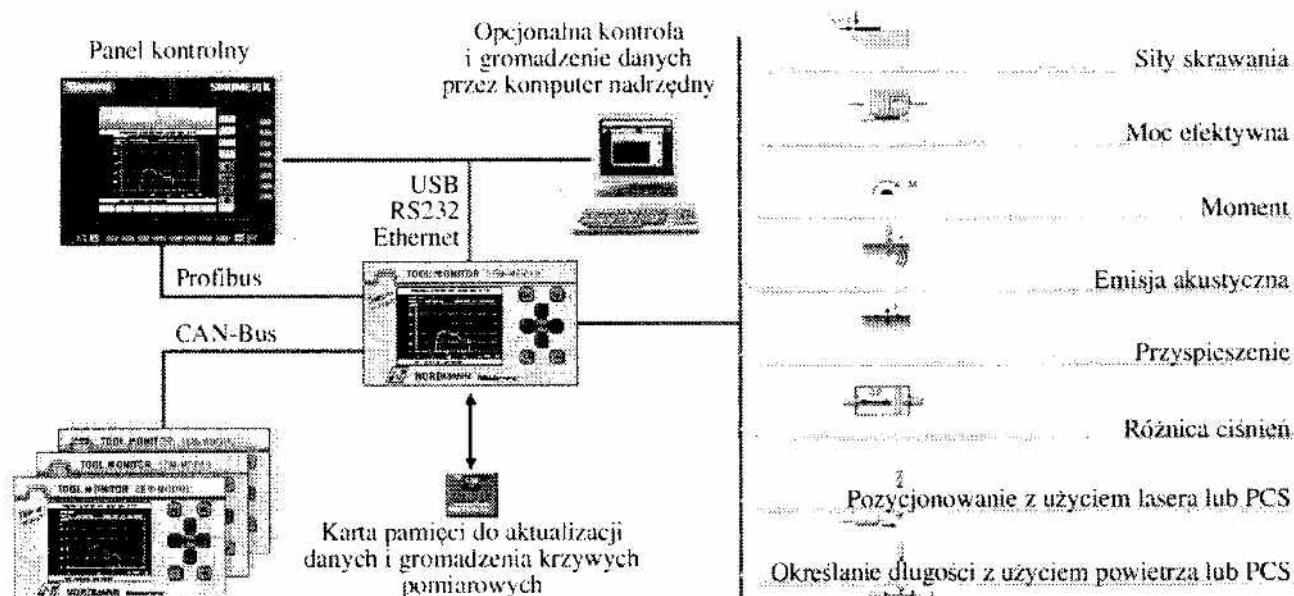
Fig. 7.1. Exemplary locations of the acoustic emission sensor mounting [54]

Wadą tego typu rozwiązania jest znaczne oddalenie odbiornika sygnałów od analizowanego źródła (strefy szlifowania) – impulsy EA są silnie zniekształcone i osłabione, ponieważ przechodzą przez kolejne ośrodki na drodze źródło – przetwornik.

Innym, korzystniejszym rozwiązaniem, zastosowanym w trakcie badań, jest użycie czujników hydroakustycznych typu SEH (niem. *Schall-Emissions-Hydrophon*), w których ośrodkiem przenoszenia fali sygnału akustycznego jest strumień płynu chłodząco-smarującego. Strumień chłodziwa może być skierowany dowolnie – na narzędzie lub przedmiot obrabiany, przez otwór o średnicy  $\phi = 5$  mm. Jest to czujnik nowej generacji stosowany do monitorowania stanu zarówno narzędzi ściernych, jak i skrawających.

### 7.1. Bezstykowy system monitorowania procesu szlifowania z użyciem sygnału emisji akustycznej

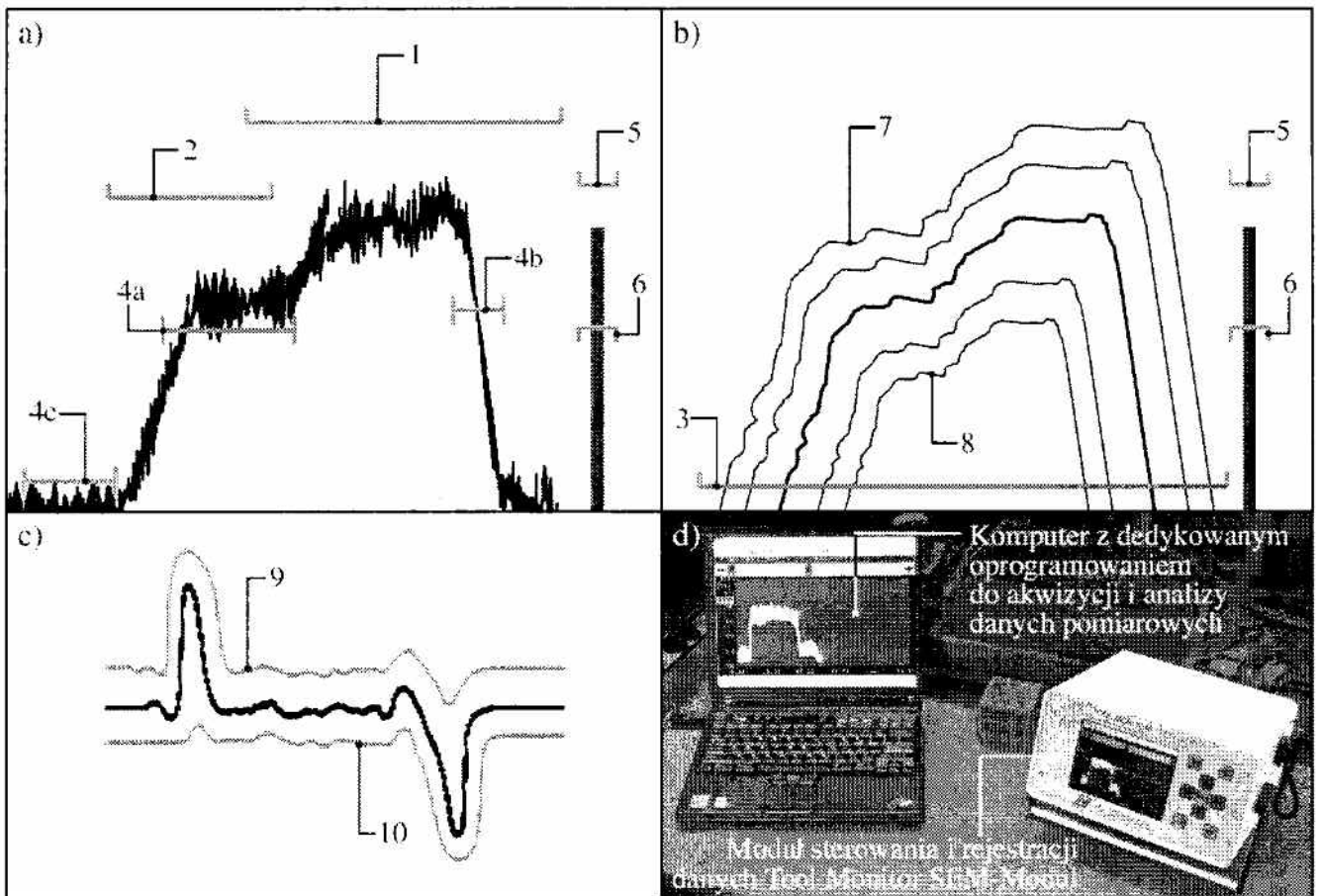
Czujnik hydroakustyczny jest jednym z ośmiu sensorów wchodzących w skład zintegrowanego systemu monitorowania i nadzorowania procesów obróbki, opracowanego przez firmę Nordmann GmbH & Co., w którym zastosowane zostały sensory pomiarowe wykorzystujące różne zjawiska fizyczne. Na rysunku 7.2 przedstawiona została struktura oraz najważniejsze elementy i magistrale danych zintegrowanego systemu monitorowania i nadzorowania procesów obróbki firmy Nordmann GmbH & Co.



Rys. 7.2. Struktura zintegrowanego systemu monitorowania i nadzorowania procesów obróbki firmy Nordmann GmbH & Co. [289]

Fig. 7.2. The structure of an integrated system of monitoring and control of the machining processes by Nordmann GmbH & Co. [289]

Monitorowanie i nadzór procesu obróbki ścierniej w zaprezentowanym systemie pracującym z użyciem czujnika SEH, realizowane są poprzez wyznaczenie limitów w postaci krzywych granicznych dla każdego obserwowanego zadania. Z zarejestrowanego sygnału wyznaczana jest w sposób doświadczalny wartość średnia jego amplitudy, która przyjmowana jest jako reprezentatywna dla danego stanu zużycia. Przekroczenie przez rejestrowany sygnał wcześniej ustalonych granic (analiza graniczna) powinno wywołać określoną reakcję układu monitorująco-sterującego. W przypadku długotrwałego procesu obróbki, przebiegającego bez obniżania zdolności skrawnej ściernicy, można na podstawie analizy granicznej oryginalnej i wygładzonej krzywej EA wyznaczyć warunki pracy narzędzia ściernego [289]. Na rysunku 7.3 pokazano przykład zarejestrowanego oraz wygładzonego sygnału EA, a także jego części dynamicznej z zaznaczeniem charakterystycznych linii granicznych wykorzystywanych do analizy warunków pracy ściernicy z użyciem oprogramowania modułu Tool Monitor SEM-Modul.



Rys. 7.3. Przykład zarejestrowanego (a), wygładzonego (b) i części dynamicznej sygnału EA (c) z charakterystycznymi liniami granicznymi do analizy warunków pracy ściernicy z użyciem modułu Tool Monitor SEM-Modul (d)

Fig. 7.3. An example of registered (a), smoothed (b) and dynamic part of the acoustic emission signal (c) with characteristic boundary lines for the analysis of the grinding wheel machining conditions using the Tool Monitor SEM-Modul (d)

Wyznaczone dla danych warunków technologicznych doświadczalne linie graniczne można interpretować następująco [289, 318]:

- 1 – granica ponad krzywą, której przekroczenie jest interpretowane jako nieprzewidziane zdarzenie, np. rozerwanie lub uszkodzenie ściernicy;
- 2 – granica ponad krzywą, której przekroczenie oznacza zbyt szybki kontakt ściernicy z powierzchnią przedmiotu obrabianego;
- 3 – granica wyznaczająca zakończenie procesu szlifowania;
- 4a i 4b – granice minimalne wyznaczające początek obróbki i wyiskrzania;
- 4c – granica prawidłowego akustycznego działania płynu chłodzącego;
- 5 – granica dopuszczalnej wartości średniej amplitudy sygnału umożliwiająca rozpoznanie dopuszczalnego zużycia ściernicy;
- 6 – granica minimalnej wartości średniej amplitudy sygnału, której przekroczenie oznacza zbyt duże promieniowe zużycie ściernicy lub nieprawidłowe przenoszenie sygnału EA;
- 7 i 8 – górne i dolne granice konturowe, precyzujące granice 1 i 2.

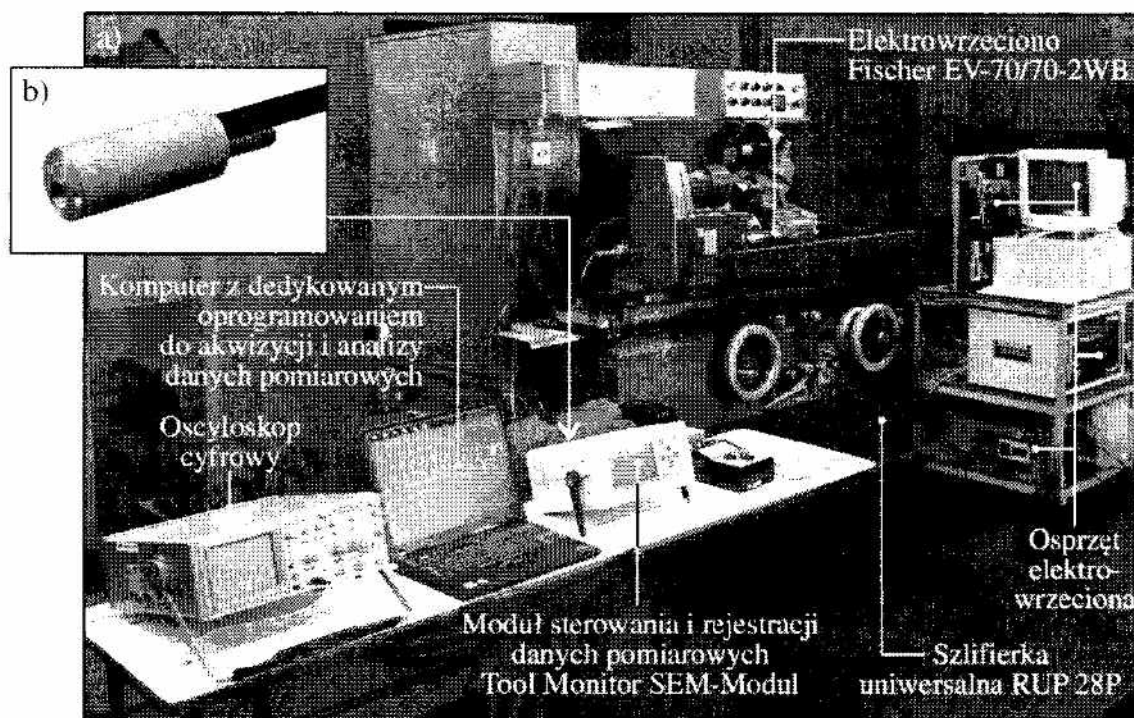
Analiza krzywych pomiarowych dla części dynamicznej sygnału EA umożliwia poszerzoną ocenę warunków pracy i zużycia narzędzia ściernego (rys. 7.3c). W tym przypadku możliwe jest określenie błędów okrągłości i falistości (granica 9), a także lokalnych wykruszeń (granica 10), dla których krzywa pomiarowa gwałtownie opada.

## 7.2. Akwizycja sygnału emisji akustycznej z użyciem czujnika hydroakustycznego

W celu dokonania oceny procesu jednoprzejściowego szlifowania otworów z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej pobranego ze strefy obróbki, przeprowadzono badania doświadczalne, w których zastosowano bezstykowy czujnik emisji akustycznej typu SEH. Próbom eksperymentalnym poddano ściernicę o twardości G i strukturze 10 zbudowaną z ziaren mikrokryształicznego korundu spiekane o numerze ziarna 46 i oznaczeniu technicznym 1-35×20×10-SG/F46G10VTO. Ściernica ta charakteryzowała się specjalnie zmodyfikowaną strukturą spoiwa szklanokrystalicznego (odmiana B) z fazą piroksenową o średnim wymiarze ziaren krystalitów  $\sim 1 \mu\text{m}$  oraz udziałem objętościowym spoiwa wynoszącym  $V_{sp} = 11\%$  (szerszy opis w podrozdziale 4.2.1). Na czynnej powierzchni ściernicy ukształtowano nakrój stożkowy o szerokości  $b = 16 \text{ mm}$  i kącie  $\chi = 0,72^\circ$ , dopasowany do wielkości usuwanego naddatku obróbkowego, wynoszącego  $a_e = 0,20 \text{ mm}$ . Obróbce poddano pierścienie ze stali łożyskowej 100Cr6 o twardości  $62 \pm 2 \text{ HRC}$ .

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w szlifierkę uniwersalną RUP-28P (opisanym w podrozdziale 4.1.2) oraz elementy

toru pomiarowego sygnału emisji akustycznej wchodzące w skład systemu monitorowania firmy Nordmann GmbH & Co. (rys. 7.4). Najważniejszymi elementami układu monitorującego były: jednostka monitorująca SEM (niem. *Schall-Emissions-Module*), przetwornik sygnału SEP (niem. *Schall-Emissions-Prozessor*) oraz sensor hydroakustyczny typu SEH (niem. *Schall-Emissions-Hydrophon*).

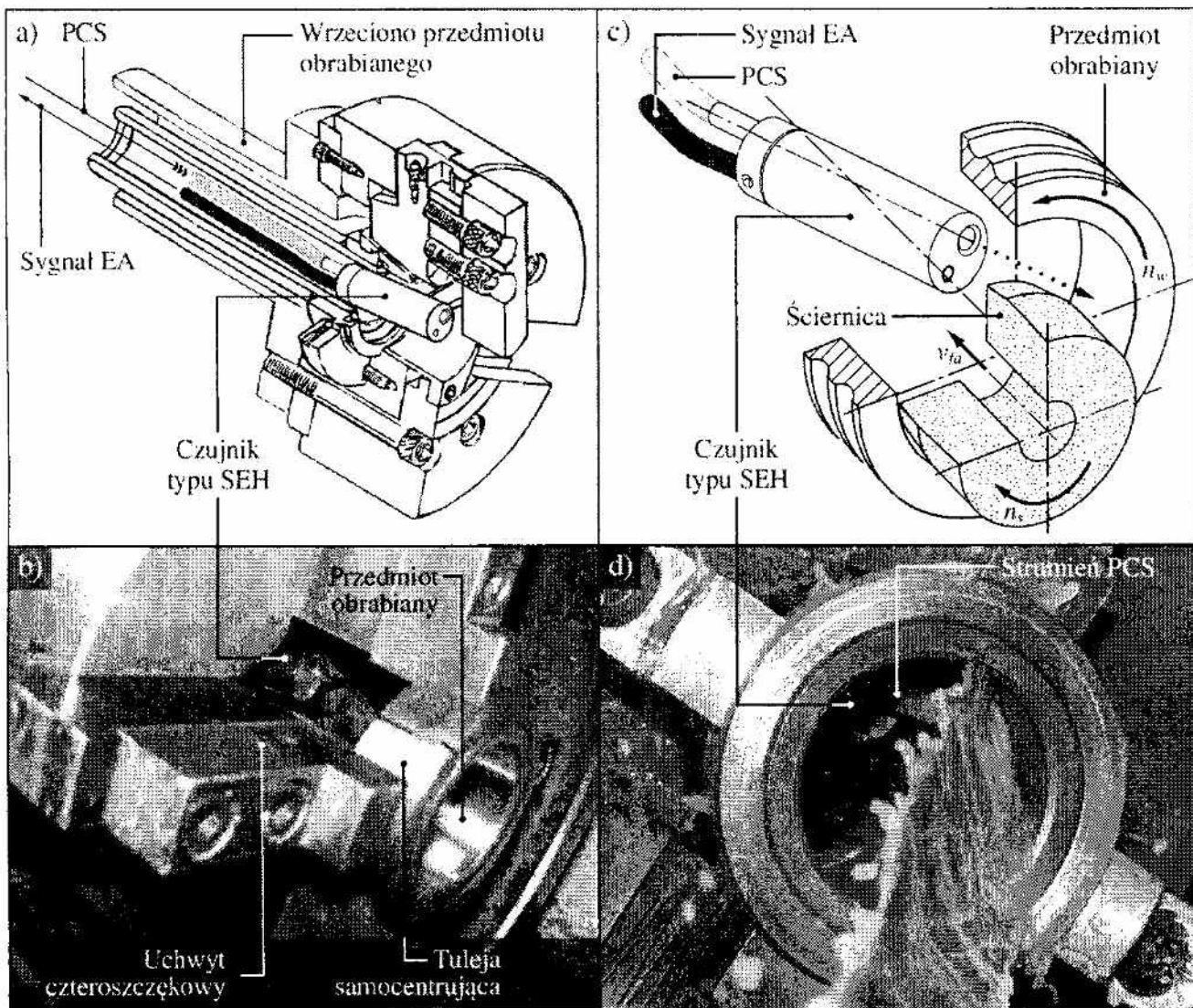


Rys. 7.4. Stanowisko badawcze do monitorowania procesu szlifowania ściernicami modyfikowanymi z użyciem sygnału emisji akustycznej: a) widok ogólny; b) czujnik emisji akustycznej typu SEH firmy Nordmann GmbH & Co.

Fig. 7.4. Experimental position for monitoring of the grinding process with modified grinding wheels using acoustic emission signal: a) overall view; b) acoustic emission sensor type SEH by Nordmann GmbH & Co.

Proces szlifowania prowadzono z następującymi parametrami: prędkość obwodowa ściernicy  $v_s = 60$  m/s, prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego  $v_w = 0,75$  m/s, prędkość posuwu osiowego  $v_{fa} = 2,0$  mm/s, styk roboczy  $a_e = 0,20$  mm. Wydatek płynu chłodząco-smarującego, będącego jednocześnie ośrodkiem przenoszenia impulsów EA, ustalono na poziomie  $Q_{PCS} = 3,0$  l/min, co zapewniło ciągły kontakt strumienia PCS z wewnętrzną powierzchnią walcową obrabianego przedmiotu (rys. 7.5d).

Czujnik EA umieszczono jak najbliżej strefy szlifowania, prowadząc go przez wrzeciono przedmiotu obrabianego (rys. 7.5a-b). Sensor umieszczony został w uchwycie czteroszczękowym i tak skierowany (rys. 7.5c), aby strumień płynu trafiał bezpośrednio w materiał obrabiany, naprzeciwko strefy szlifowania (rys. 7.5d). Przy tak skierowanym strumieniu PCS rejestrowany był sygnał EA o relatywnie największej mocy.



Rys. 7.5. Sposób zamocowania czujnika typu SEH w pobliże strefy szlifowania: a) schemat prowadzenia czujnika wewnątrz wrzeciona przedmiotu obrabianego; b) widok strefy obróbki; c) sposób skierowania strumienia PCS; d) widok strumienia PCS padającego na wewnętrzną powierzchnię walcową przedmiotu obrabianego

Fig. 7.5. The way of mounting of the SEH sensor near the grinding zone: a) scheme of sensor conducting inside the workpiece spindle; b) view of the machining zone; c) the way of conducting of the coolant flux; d) view of the coolant flux incident on the internal cylindrical surface of the workpiece

W trakcie prób rejestrowano moc wrzeciona ściernicy na biegu jałowym oraz moc maksymalną w danym przejściu roboczym, a także sygnał emisji akustycznej w postaci cyfrowej w pamięci modułu SEM. W celu sprawdzenia wpływu zużycia ściernicy na chropowatość powierzchni przedmiotów po obróbce rejestrowano profile chropowatości z użyciem profilometru stykowego Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH (opis w podrozdziale 3.2.2).

Trwałość ściernicy określono jako sumę objętości usuniętego materiału od chwili rozpoczęcia szlifowania do chwili, w której uznano ją za zużytą ze

względu na przyjęte eksperymentalnie kryterium – wzrost rejestrowanego natężenia prądu elektrowrzeciona ściernicy powyżej  $I = 8 \text{ A}$  ( $P = 1700 \text{ W}$ ).

### 7.3. Analiza sygnału emisji akustycznej metodą śledzenia zmian zachodzących w obrazie

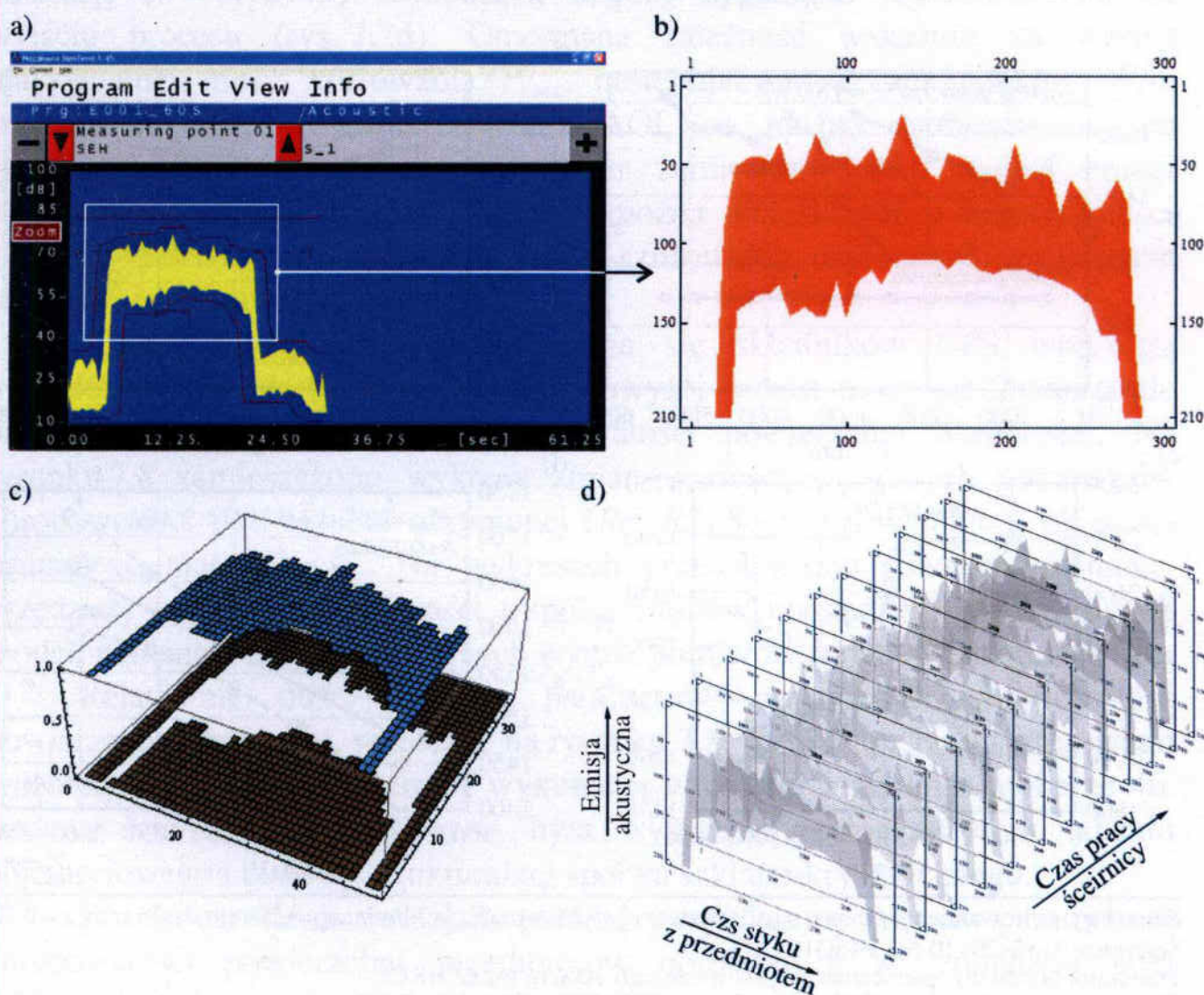
Działanie systemu monitorowania firmy Nordmann polega na pobraniu przez jednostkę monitorującą (Tool Monitor SEM-Modul) informacji o sygnale EA z procesora SEP, zapamiętując i wyświetlając jedynie wartość maksymalną i minimalną z częstotliwością 1 kHz. Dane te zapisywane są z rozdzielczością 12 bitów (gdzie 0 odpowiada 0 V, a 4096 – 10 V) w pamięci urządzenia i mogą być poddane wstępnemu przetwarzaniu w celu wyznaczenia wartości granicznych dla pojedynczego pomiaru lub całej serii pomiarów.

Takie rozwiązanie, jak i zastosowane parametry pracy modułu SEM, pozwalają z łatwością określić kolejne fazy obróbki czy też gwałtowne zmiany głębokości szlifowania. Jednakże wstępne próby eksperymentalne wykazały, że zastosowany system nie wskazuje ani na przekroczenie przez rejestrowany sygnał wcześniej ustalonych granic, ani na znaczącą zmianę średniej wartości amplitudy, pomimo obniżania zdolności skrawnej ściernicy (wykrywane przez wzrost mocy szlifowania). W trakcie badań zaobserwowano, że kolejno rejestrowane pomiary sygnału EA różnią się znacząco pod względem kształtu (geometrii). Fakt ten był przesłanką do zaproponowania metody innej niż analiza graniczna – niekonwencjonalnej dla opisywanego układu pomiarowego, ale dobrze znanej i wykorzystywanej na przykład w przemysłowych systemach wizyjnej kontroli jakości – metody komputerowej analizy wyników badań opartej na śledzeniu zmian zachodzących w obrazie.

Proponowane rozwiązanie opiera się na wyznaczeniu wybranych cech obrazu, przy ograniczeniu wyłącznie do obszaru zainteresowania (ang. *area of interest* – AOI) z całego pola widzenia (np. kamery). Do tego celu, w projekcie systemu wizyjnego wyodrębniono podsystem akwizycji, przetwarzania i analizy obrazu oraz zastosowano odpowiednio: próbkowanie, klasyfikację wg miar podobieństwa ze wzorcem i statystyczne cechy punktowe obszaru zainteresowania w dziedzinie przestrzennej [369].

W pierwszym etapie zadaniem systemu było pobranie obrazu oraz odszukanie określonego wzorca – krzywej reprezentującej sygnał EA. Po poprawnej lokalizacji wzorca, następowało wyodrębnienie obszaru zainteresowania (AOI). Następnie wykonywane było jego przekształcenie punktowe – segmentacja. W opisywanej metodzie zastosowano binaryzację (progowanie) z podwójnym ograniczeniem. Jej wynik stanowi macierz zero-jedynkowa, reprezentująca wyłącznie strukturę zarejestrowanego sygnału EA.

Ostatnim etapem było wyznaczenie pola powierzchni obszaru  $S$  zajmowanego przez jednolity (reprezentowany przez konkretny kolor, wartość) zbiór elementów w analizowanym obszarze. Procedurę należało powtarzać, charakteryzując sygnał w kolejnych chwilach czasu pracy ściernicy, a jej wynik, czyli wartość  $S(AOI)$ , zastosować do oceny zużycia ściernicy. Wybrane etapy wyznaczania powierzchni zajmowanej przez sygnał EA na ekranie jednostki Tool Monitor SEM-Modul przedstawiono na rysunku 7.6.



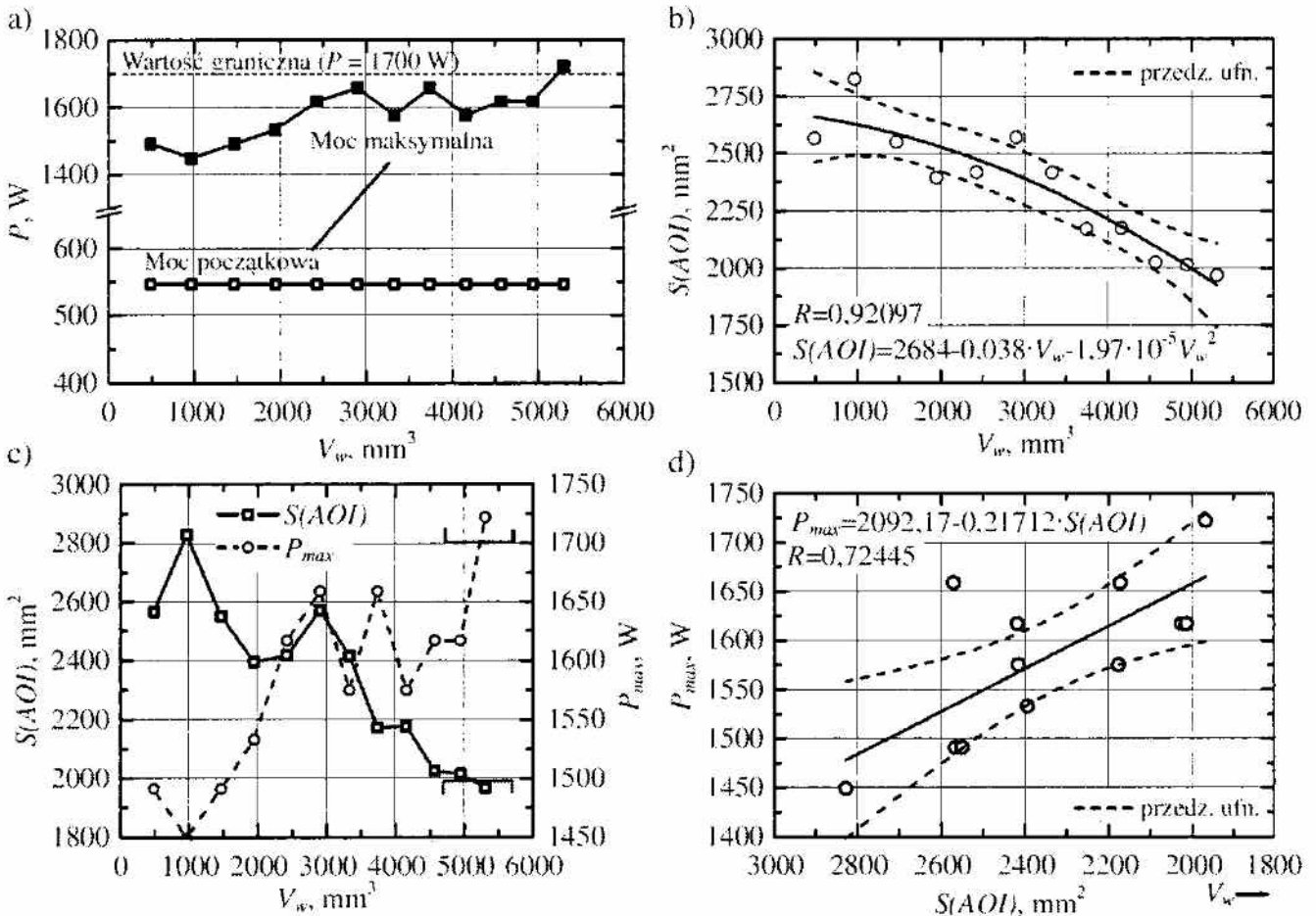
Rys. 7.6. Etapy wyznaczania powierzchni ograniczonej przez sygnał emisji akustycznej na ekranie jednostki Tool Monitor SEM-Modul: a) zarejestrowany obraz; b) wyznaczenie obszaru zainteresowania (AOI); c) binaryzacja oraz zliczenie obszaru  $S$  zajmowanego przez AOI; d) powtórzenie algorytmu dla kolejnych punktów pomiarowych w czasie

Fig. 7.6. Stages of determining the surface limited by the acoustic emission signal on the screen of the unit Tool Monitor SEM-Modul: a) the registered image; b) the designation of an area of interest (AOI); c) binarization and count the area  $S$  occupied by the AOI; d) repeating the algorithm for successive points in time



## 7.4. Wyniki monitorowania i ich analiza

Na podstawie zarejestrowanych wartości mocy  $P$  wrzeczona ściernicy oraz sygnału emisji akustycznej ze strefy obróbki, wyznaczono zależności ich zmian w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ , które w formie wykresów przedstawiono na rysunku 7.7a-b oraz określono korelację występującą między maksymalną wartością mocy  $P_{max}$  i polem powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$  – zamieszczoną na rysunku 7.7c-d.



Parametry szlifowania:  $v_s=60$  m/s;  $v_{fu}=2,0$  mm/s;  $v_w=0,75$  m/s;  $Q_{PC3}=3$  l/min;  $a_c=0,20$  mm;  $b=16$  mm;  $\chi=0,72^\circ$   
 Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46G10VTO  
 Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)  
 Płyn chłodząco-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS

Rys. 7.7. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych: a) zmiany mocy szlifowania  $P$  w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ ; b) zmiany pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$ ; c) porównanie zmienności między mocą maksymalną  $P_{max}$  i polem powierzchni obszaru zainteresowania AOI; d) korelacja między rozpatrywanymi wielkościami

Fig. 7.7. Selected results of experimental investigations: a) change of the grinding power  $P$  as a function of the material removal  $V_w$ ; b) changes in the area of interest  $S(AOI)$ ; c) comparison of variation between the maximum power  $P_{max}$  and the area of interest AOI; d) the correlation between values under consideration

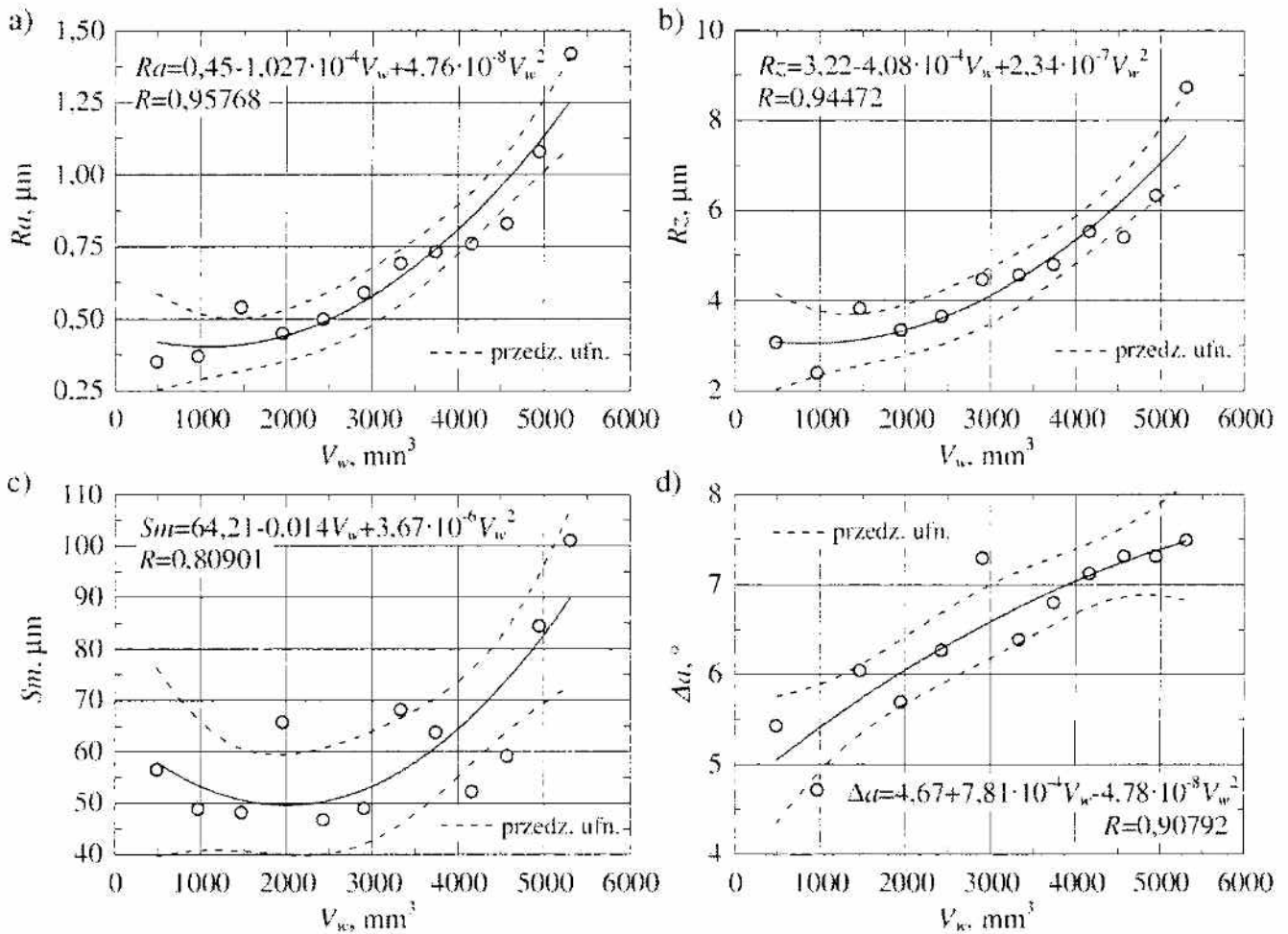
Otrzymane rezultaty badań wskazują jednoznacznie, że w wyniku postępującego zużywania się czynnej powierzchni ściernicy pole powierzchni zajmowane przez sygnał EA maleje, natomiast praca wykonana w jednostce czasu przez ściernicę ulega stopniowemu wzrostowi, aby dla  $V_w = 5300 \text{ mm}^3$ , przekroczyć wartość graniczną przyjętego kryterium zakończenia okresu trwałości (rys. 7.7c).

Przeprowadzona analiza statystyczna ujawniła względnie wysoką korelację ( $R = 0,72445$ ) zachodzącą między sygnałami rejestrowanymi na wyjściu procesu (rys. 7.7d). Otrzymana zależność wskazuje na wzrost maksymalnej mocy szlifowania  $P_{max}$ , następujący wraz ze spadkiem pola powierzchni obszaru zainteresowania AOI, co można zaobserwować na rys. 7.7c-d. Tym samym, znając obszar zajmowany przez sygnał emisji akustycznej (lub zmiany tego obszaru), można wnioskować o intensywności i rodzaju zjawisk dominujących w strefie szlifowania, czyli przebiegu procesu (efektywności usuwania materiału).

Zmiany wynikające ze zużywania się składników CPS wpływają w sposób istotny nie tylko na opisany powyżej wzrost mocy szlifowania, ale przede wszystkim na zmianę chropowatości powierzchni obrobionej. Na rysunku 7.8 zamieszczono wykresy zmian wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $S_m$  i  $\Delta a$ ) w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ . Na wykresach przedstawiono również równania, przedziały ufności oraz wartości współczynników korelacji  $R$  wyznaczonych modeli matematycznych opisujących wyniki pomiarów funkcją wielomianową.

Relatywnie duże wartości parametrów opisujących chropowatość powierzchni obrobionej, widoczne na rysunku 7.8, wynikają z braku strefowego zróżnicowania budowy ściernicy wykonanej w całości z ziaren o numerze 46. Badana ściernica modyfikowana była wyłącznie pod względem udziału objętościowego i budowy strukturalnej spoiwa szklano-krystalicznego.

W celu określenia związków pomiędzy wynikami pomiarów parametrów chropowatości powierzchni przedmiotów obrobionych ze zmianami pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$  przeprowadzono analizę korelacji wielorakiej. Wyniki obliczeń wskazują na istnienie ścisłych związków korelacyjnych pomiędzy rejestrowanym parametrem sygnału EA a parametrami chropowatości, szczególnie parametrami wysokościowymi  $R_a$  i  $R_z$ . Świadczą o tym wysokie wartości współczynników korelacji wielorakiej ( $R = 0,90095$  dla  $R_a$  i  $R = 0,88497$  dla  $R_z$ ), określone dla wyznaczonych równań.

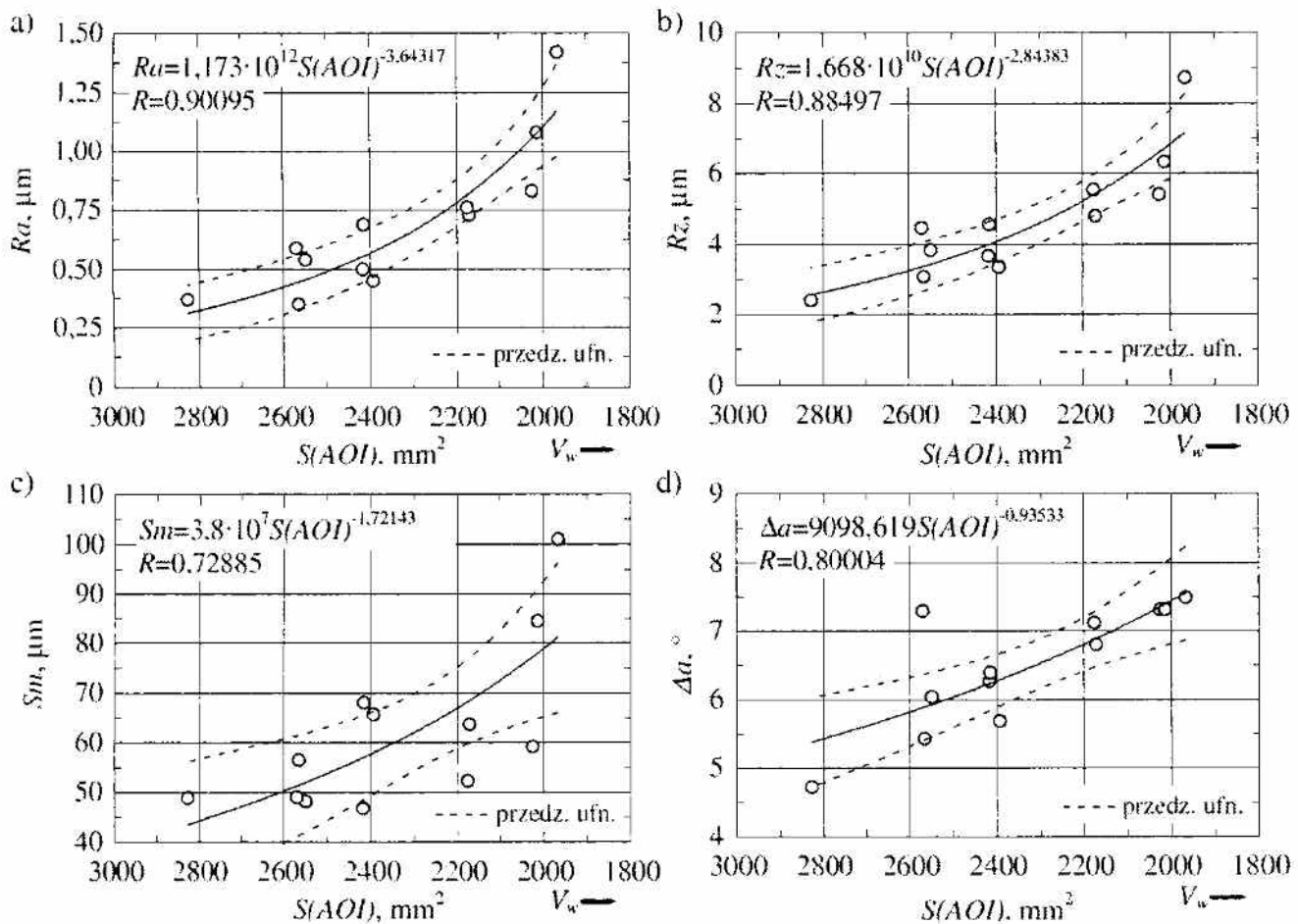


Parametry szlifowania:  $v_s=60$  m/s;  $v_{fa}=2,0$  mm/s;  $v_w=0,75$  m/s;  $Q_{PCS}=3$  l/min;  $a_e=0,20$  mm;  $b=16$  mm;  $\chi=0,72^\circ$   
 Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46G10VTO  
 Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 (62±2 HRC)  
 Płyn chłodziwo-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS

Rys. 7.8. Zmiany wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej w funkcji objętości usuniętego materiału  $V_w$ : a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ , b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ , c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ , d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta a$

Fig. 7.8. Changes in the values of roughness parameters of machined surface over material removal  $V_w$ : a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta a$

Na rysunku 7.9 przedstawiono wykresy zmian wybranych parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej w funkcji pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$  wraz z równaniami modeli matematycznych opisujących funkcją wielomianową wyniki badań i wartościami współczynników korelacji wielorakiej  $R$ .



Parametry szlifowania:  $v_s=60$  m/s;  $v_{fa}=2,0$  mm/s;  $v_w=0,75$  m/s;  $Q_{PC5}=3$  l/min;  $a_e=0,20$  mm;  $b=16$  mm;  $\chi=0,72^\circ$   
 Ściernica: 1-35×20×10-SG/F46G10VTO  
 Przedmiot obrabiany: pierścienie łożyskowe ze stali 100Cr6 ( $62 \pm 2$  HRC)  
 Płyn chłodziwo-smarujący: 5% wodny roztwór oleju Castrol Synthilo RHS

Rys. 7.9. Zmiany wartości parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej w funkcji pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$ : a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $Ra$ ; b) wysokość profilu chropowatości według 10 punktów  $Rz$ ; c) średni odstęp profilu chropowatości  $Sm$ ; d) średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości  $\Delta\alpha$

Fig. 7.9. Changes in the values of roughness parameters of machined surface over the area of interest  $S(AOI)$ : a) arithmetic mean deviation of the workpiece profile  $Ra$ ; b) maximum height of the profile within a sampling length  $Rz$ ; c) mean width of profile elements, within a sampling length  $Sm$ ; d) arithmetic mean slope of the profile  $\Delta\alpha$

Zastosowany typ oraz udział objętościowy spoiwa miały bezpośredni wpływ na formę zużywania się ściernicy. W wyniku powstania płaszczyzn zużycia na wierzchołkach ziaren aktywnych, a także zmniejszenia liczby mikro-wierzchołków kształtujących powierzchnię obrabianą, nastąpił wzrost udziału odkształceń plastycznych i bruzdowanie w strefie obróbki. Wywołało to przyrost mocy szlifowania i zwiększenie chropowatości powierzchni. Jednocześnie zmieniał się udział źródeł impulsów emisji akustycznej i nastąpiła

przewaga impulsów o zdecydowanie niższym potencjale energetycznym, co objawiało się zmniejszeniem wartości pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$ .

## 7.5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszym rozdziale opisano metodę monitorowania procesu szlifowania z użyciem sygnału EA, na przykładzie jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicą z modyfikowanym spoiwem szklanokrystalicznym. Przeprowadzone analizy wyników badań, w których zastosowano czujnik hydroakustyczny typu SEH w sprzężeniu z jednostką monitorującą SEM oraz zaproponowaną wizyjną metodą oceny cech sygnału, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- zaproponowana metoda pozwala na wykrywanie oznak zużycia składników CPS w trakcie procesu i ocenę ich wpływu na moc szlifowania oraz parametry chropowatości powierzchni obrobionej;
- przedstawione wyniki analizy korelacji wielorakiej wskazują, że zmiany pola powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$  są w największym stopniu skorelowane ze zmianami parametru  $Ra$  ( $R = 0,90095$ ) oraz odpowiadają zmianom pozostałych ocenianych parametrów chropowatości ( $Rz$ ,  $Sm$ ,  $\Delta a$ ) z dokładnością na poziomie  $R \approx 0,73-0,88$ ;
- przeprowadzona analiza wykazała również względnie wysoką korelację ( $R = 0,72445$ ) zachodzącą między polem powierzchni obszaru zainteresowania  $S(AOI)$  a mocą szlifowania  $\Delta P$ ;
- przedstawiony sposób oceny stanu ściernicy daje znacznie więcej informacji w porównaniu z analizą graniczną, będącą podstawowym narzędziem diagnostycznym w systemie monitorowania firmy Nordmann;
- opisana metodyka analizy cech sygnału EA metodą wizyjną stanowi uzupełnienie systemu monitorowania firmy Nordmann, przy czym zaproponowany sposób postępowania jest łatwy do zaimplementowania w warunkach produkcyjnych, ponieważ odbywa się na poziomie programowym opisanego systemu, nie ingerując w jego wyposażenie sprzętowe.

## Podsumowanie

Zamieszczone w niniejszej pracy wyniki analiz i doświadczeń prowadzonych z użyciem ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego wykazały, że stosowanie opracowanych modyfikacji budowy ściernic w znaczącym stopniu wpływa na warunki procesu szlifowania otworów. Strefowe zróżnicowanie budowy umożliwiło skuteczniejsze wygładzenie i wyiskrzenie powierzchni obrabianej przez drobnoziarnistą strefę walcową ściernicy. Modyfikacja mikrostruktury spoiwa ceramicznego wpłynęła korzystnie na proces zużywania się ściernicy, zapewniając równomierne odnawianie jej zdolności skrawnej, na skutek mikrowykruszania fragmentów ziaren ściernych i spoiwa. Mikronieciągłości CPS wpływają na skuteczniejsze odprowadzenie ciepła, produktów zużycia i wiórów poza strefę szlifowania, przy jednoczesnym wzroście efektywności chłodzenia. W rezultacie możliwe jest zmniejszenie obciążeń cieplno-mechanicznych ziaren aktywnych i w konsekwencji znaczące zmniejszenie zużycia ściernego i wytrzymałościowego składników ściernicy. Budowa składana ściernicy, w połączeniu z systemem doprowadzenia PCS do strefy szlifowania, w znaczącym stopniu wpłynęła na ograniczenie zjawiska zalepiania CPS produktami szlifowania i zwiększenie skuteczności chłodzenia i smarowania strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Natomiast impregnacja ściernic pierwiastkami niemetalicznymi (siarką oraz alotropowymi odmianami węgla), skutecznie obniża adhezję produktów szlifowania, w tym głównie wiórów materiału obrabianego, do czynnej powierzchni ściernicy.

W zależności od charakteru modyfikacji możliwe jest znaczące zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionej, zredukowanie udziału zalepień na CPS, zmniejszenie błędów kształtu ściernicy, ograniczenie wydatku PCS lub kilkakrotne wydłużenie okresu trwałości ściernicy w porównaniu z rezultatami szlifowania uzyskanymi ściernicą niemodyfikowaną. Integracja trzech z rozpatrywanych modyfikacji pozwoliła na uzyskanie efektu synergicznego wzmocnienia ich pozytywnego oddziaływania, przyczyniając się do jednoczesnego ograniczenia chropowatości powierzchni obrobionej o 21%, ponaddwukrotnego zmniejszenia mocy szlifowania i pięciokrotnego ograniczenia wydatku PCS.

Uzyskane wyniki prac badawczych potwierdziły, że możliwe jest wpływanie na intensywność i wzajemny udział zjawisk elementarnych, wywołujących proces zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego, poprzez modyfikowanie budowy ściernicy, w celu podniesienia stopnia wykorzystania potencjału skrawnego tego ścierniwa. Większość z opracowanych modyfikacji wpływała na zmniejszenie obciążenia cieplnego obrabianej

powierzchni, uwzględniając zdefiniowane na wstępie problemy wynikające z kinematyki procesu szlifowania otworów oraz specyficznego procesu zużycia ziaren mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$ . Oznacza to, że cel naukowy niniejszej pracy został osiągnięty.

Dodatkowym efektem przeprowadzonych badań było opracowanie pięciu metod badawczych:

- analitycznej metody oceny obciążenia ziaren aktywnych;
- metody badania zjawisk zużycia CPS w zabiegu szlifowania wgłębnego;
- metody oceny stanu CPS z użyciem skaterometrii laserowej wspomaganej technikami przetwarzania obrazu;
- metody oceny stanu CPS na podstawie komputerowej analizy obrazów mikroskopowych SEM;
- metody pomiaru temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym z użyciem termowizji w podczerwieni.

pozwalających na ocenę warunków procesu szlifowania oraz na ocenę stopnia zalepiania CPS. Metody te, poszerzające zakres dostępnych technik analitycznych i badawczych, pozwalają na szerszą i bardziej kompleksową ocenę zjawisk zachodzących w trakcie szlifowania.

Uwzględniając wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych ściernicami modyfikowanymi, przedstawiono również przykład możliwości monitorowania i kontroli procesów szlifowania otworów z zastosowaniem bezstykowego czujnika emisji akustycznej. Opracowana w tym zakresie metoda komputerowej analizy wyników badań, oparta na śledzeniu zmian zachodzących w obrazie, zapewniła wykrywanie oznak zużycia składników CPS w trakcie procesu i ocenę ich wpływu na moc szlifowania oraz parametry chropowatości powierzchni obrobionej.

Autor ma nadzieję, że zaprezentowane w niniejszej monografii przemyslenia i analizy przyczynią się do szerszego zastosowania ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego w procesach szlifowania, odznaczających się długą strefą styku ściernicy z materiałem obrabianym. W przekonaniu autora, jest to możliwe poprzez pełniejsze wykorzystanie potencjału skrawnego tego ścierniwa wynikające z uwzględnienia wiedzy o dominujących zjawiskach zużycia ziaren ściernych i spoiwa. Jak wykazały zaprezentowane wyniki prac badawczych, modyfikowanie budowy ściernicy stanowi skuteczną i bardzo uniwersalną metodę zwiększenia efektywności szlifowania otworów ściernicami z ziarnami mikrokrystalicznego  $Al_2O_3$  i ze spoiwem ceramicznym.

## Podziękowania

Autor pragnie złożyć serdeczne podziękowania pracownikom Politechniki Koszalińskiej za ich pomoc i wsparcie w trakcie realizacji poszczególnych etapów prac badawczych ujętych w niniejszej monografii, a w szczególności:

- Pani dr hab. inż. prof. ndzw. **Danieli Herman** z Zakładu Podstaw Nauki o Materiałach i Ceramiki Technicznej Instytutu Technologii i Edukacji za cenne konsultacje i współpracę przy badaniach eksploatacyjnych ściernic ze spoiwem modyfikowanym;
- Panu dr. hab. inż. prof. ndzw. **Waleremu Sienickiemu** z Zakładu Chemii Stosowanej Wydziału Mechanicznego za współpracę przy badaniach wpływu impregnowania ściernic na wyniki szlifowania materiałów trudno skrawalnych;
- Panu dr. inż. **Wojciechowi Kapłonkowi** z Zakładu Metrologii i Jakości Wydziału Mechanicznego za pomoc w ocenie stanu czynnych powierzchni ściernic z użyciem metody skaterometrycznej;
- Panu dr. inż. **Pawłowi Sutowskiemu** z Katedry Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego za pomoc w badaniach monitorowania procesów szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi z zastosowaniem bezstykowego systemu emisji akustycznej;
- Panu mgr. inż. **Tomaszowi Okupskiemu** z Zakładu Podstaw Nauki o Materiałach i Ceramiki Technicznej Instytutu Technologii i Edukacji za współpracę przy badaniach eksploatacyjnych ściernic ze spoiwem modyfikowanym;
- Panu mgr. inż. **Adamowi Szpakowiczowi** z Instytutu Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych za optyczne pomiary mikrotopografii czynnych powierzchni ściernic;
- Panu mgr. inż. **Michałowi Wojtewiczowi** z Zakładu Chemii Stosowanej Wydziału Mechanicznego za impregnację ściernic siarką oraz alotropowymi odmianami węgla;
- Pani **Bogusławie Piec** z Katedry Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego za pomoc organizacyjną w realizacji prac badawczych;
- Panu **Andrzejowi Nowickiemu** z Zespołu Laboratoriów I Wydziału Mechanicznego za pomoc w realizacji badań doświadczalnych procesu szlifowania;
- Panu **Krzysztofowi Maciejewskiemu** z Zakładu Metrologii i Jakości Wydziału Mechanicznego za stykowe pomiary powierzchni przedmiotów obrobionych;



- Panu **Ryszardowi Gritzmanowi** z Centralnego Laboratorium Instytutu Technologii i Edukacji za rejestrację obrazów mikroskopowych SEM oraz analiz EDS.

Szczególne podziękowania Autor pragnie złożyć na ręce Pana prof. dr. hab. inż. **Jarosława Plichty** z Katedry Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, który swoimi cennymi radami w znaczący sposób przyczynił się do powstania niniejszej pracy.

Część badań prezentowanych w niniejszej pracy zrealizowanych zostało w ramach projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Były to następujące projekty badawcze:

- Projekt Badawczy Własny nr 4 T07D 036 29 pt. *Narzędzia ścierne z tlenku glinu o funkcjonalnym gradiencie strukturalnym w zastosowaniach do jednoprzęściowego szlifowania powierzchni wewnętrznych walcowych*, zrealizowany w latach 2006-2008;
- Projekt Badawczy Własny nr N N503 214837 pt. *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno obrabialnych z zastosowaniem innowacyjnych ściernic, systemów diagnostyki i regeneracji ich czynnych powierzchni oraz zintegrowanych systemów sterowania*, zrealizowany w latach 2009-2011;
- Czesko-Polski projekt nr MEB 051021 (CR) i 8071/2010 (RP) pt. *Measurement and analysis of surfaces topography created by progressive technologies and cold rolling sheet from point of view of classical materials and nanomaterials and their mechanism of establishment*, zrealizowany w latach 2010-2011.

## Literatura

1. 3M Cubitron™ abrasive grain. Materiały firmy 3M, 2006.
2. Ahrens O., Binder J., Böhm C., Brinksmeier E.: *Development of temperature and force sensors for in-process monitoring of grinding*. Proceedings of the 9th International Fair and Congress for Sensors, Transducers and Systems 18.-20. Mai 1999; Nurnberg, Vol. II.
3. Aguiar P. R., Serni P. J. A., Dotto F. R. L., Bianchi E. C.: *In-process grinding monitoring through acoustic emission*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 28(2006)1, pp. 118-124.
4. Akbari J., Saito Y., Hanaoka T., Higuchi S., Enomoto S.: *Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics*. Journal of Materials Processing Technology. 62(1996)4, pp. 403-407.
5. Alberts M., Kalaitzidou K., Melkote S.: *An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49(2009)12-13, pp. 966-970.
6. Antoniewicz J.: *Własności dielektryków. Tablice i wykresy*. WNT, Warszawa, 1991.
7. Backus R.: *Uphill struggle*. Industrial Minerals, (2007)12, pp. 32-38.
8. Bange D.W.: *Sol-gel abrasive makes headway*. Tooling & Production, 63(1998)12, pp. 82-84.
9. Barbieri L., Leonelli C., Manfredini T.: *Technological and product requirements for fast firing glass-ceramic glazes*. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 17(1996)1, pp. 11-12.
10. Bass F.G., Fuks I.M.: *The scattering of waves by a statistically rough surface*. Nauka, Moscow, 1972.
11. Baumann S., Maier H. R., Engelhorn R., Klocke F.: *Sol-Gel-Korunde für die Schleifbearbeitung. Teil 1*. Keramische Zitschrift, 55(2003)7, s. 496-499.
12. Baumann S., Maier H. R., Engelhorn R., Klocke F.: *Sol-Gel-Korunde für die Schleifbearbeitung. Teil 2*. Keramische Zitschrift, 55(2003)8, s. 606-609.
13. BBC Research: *Abrasive products: materials, applications and markets*, March 2001.
14. Beckmann P., Spizzichino A.: *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Pergamon Press, Oxford, 1963.
15. Benes J.: *All about abrasives*. American Machinist 05/10/2007. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.americanmachinist.com/304/Issue/Article/False/66353/Issue> [odczyt: 02.02.2012].
16. Bennett J.M., Mattsson L.: *Introduction to surface roughness and scattering*. Optical Society of America, Washington, D. C., 1989.
17. Bentley S. A., Goh N. P., Aspinwall D. K.: *Reciprocating surface grinding of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 118(2001), pp. 22-28.
18. Bhushan B.: *Modern tribology handbook*. CRC Press LLC, New York, 2001.
19. Bianchi E.C., da Silva E.J., Vargas V.L., Magagnin T.C., Monici R.D., Filho O.V., de Aguiar P.R.: *The grinding wheel performance in the transverse cylindrical grinding of an eutetic alloy*. Materials Research, 5(2002)4, pp. 433-438.

20. Bjuggren M., Krummenacher L., Mattsson L.: *Characterization of engineering surfaces by infrared scattering*. Optical Engineering, 36(1997), pp. 874-882.
21. Bloomstein T.M., Hardy D.E., Gomez L., Mordechai R.: *Angle-resolved scattering measurements of polished surfaces and optical coatings at 157 nm*. Proceedings of SPIE, 5040(2003), pp. 742-752.
22. Blurcjan D.R.: *Sbornyj abrazivnyj instrument dlja intensivnogo vnutrennego shlifovanija*. STIN, (2006)10, s. 19-21.
23. Blurcjan D.R.: *Vlijanie rezhima rezanija na proizvoditel'nost' vnutrennego shlifovanija sbornymi krugami s radial'no-podvizhnymi segmentami*. STIN, (2007)3, s. 26-29.
24. Böhm C.: *Entwicklung und Erprobung sensorintegrierter Schleifwerkzeuge*. Dissertation, Universitat Bremen, 2002.
25. Bonner, A., Filed October 2003, *Method of roll grinding*, World Patent 03/086702 A1.
26. Bonner, A., Filed October 2003, *Abrasive articles with novel structures and methods for grinding*, World Patent 03/086703 A1.
27. Borkowski J.: *Zużycie i trwałość ściernic*. PWN, Warszawa, 1990.
28. Brinksmeier E., Glwierzew A.: *Chip formation mechanisms in grinding at low speeds*. Annals of the CIRP, 52(2003), pp. 253-258.
29. Brinksmeier E., Heinzl C., Böhm C., Ahrens O.: *Development of sensoric microsystems for monitoring of grinding process*. IX. Intern. Produktionstechnisches Kolloquium, Berlin, 29-30 Oct. 1998.
30. Brinksmeier E., Heinzl C., Meyer L.: *Development and application of a wheel based process monitoring system in grinding*. Annals of the CIRP, 54(2005)1, pp. 301-304.
31. Brinksmeier E., Heinzl C., Wittmann M.: *Friction, cooling and lubrication in grinding*. Annals of the CIRP, 48(1999)2, pp. 581-598.
32. Bukowiecki M., Nadołny K., Plichta J.: *Innowacyjna metoda chłodzenia wewnętrznego w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Podstawy i technika obróbki ściernej, pod redakcją K.E. Oczosia i Jana Burka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 271-278.
33. Burchell T.D.: *Carbon materials for advanced technologies*. Amsterdam; New York, Pergamon, 1999.
34. Burochkin Ju.P.: *Shlifoval'nyj instrument*. Stanki i Instrument, (1992)4, s. 29-30.
35. Callister Jr. W.D.: *Materials science and engineering, an introduction*. Fifth ed., Wiley, New York, 2000.
36. Cannon R.M., Rhodes W.H., Heuer A.H.: *Plastic deformation of fine-grained alumina ( $Al_2O_3$ ): I, Interface-controlled diffusional creep*. Journal of the American Ceramic Society, 63(1980)1-2, pp. 46-53.
37. Careri D.: *Mole vetrificate in CBN ad alta porosita*. Machine, 53(1998)1-2, p. 34-35.
38. Caron J., Lafait J., Andraud C.: *Scalar Kirchhoff's model for light scattering from dielectric random rough surfaces*. Optics Communications, 207(2002), pp. 17-28.
39. Chirkov G.V.: *Characteristics of the grinding wheel impregnation processes*. Russian Engineering Research, 27(2007)6, pp. 387-389.

40. Choi H. Z., Lee S. W., Jeong H. D.: *A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel*. Journal of Materials Processing Technology, 111(2001)1-3, pp. 265-268.
41. Church E.L., Jenkinson H.A., Zavada J.M.: *Relationship between surface scattering and micropographic features*. Optical Engineering, 18(1979), pp. 125-136.
42. Cottringer T. E., Van de Merve R. H., Bauer R.: *Abrasive material and method for preparing the same*. U.S. Patent No. 4623364, 1986.
43. Cook J.: *Ceramic aluminium oxide improves grinding productivity*. Canadian Machinery and Metalworking, 87(1992)1-2, pp. 13-14.
44. Davisa T.D., DiCorleto J., Sheldon D., Vecchiarelli J., Erkey C.: *A route to highly porous grinding wheels by selective extraction of pore inducers with dense carbon dioxide*. The Journal of Supercritical Fluids, 30(2004)3, pp. 349-358.
45. Dąbrowski L., Marciniak M.: *Ocena efektywności szlifowania na podstawie zalepiania ściernicy*. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, s. 153-162.
46. Dąbrowski L., Marciniak M.: *Efektywność technologii ściernych i erozyjnych*. Mechanik 84(2011)12, s. 1017-1018.
47. Dąbrowski L., Marciniak M., Małek A., Szajnert W.: *Wpływ kinematyki szlifowania na zalepianie ściernicy*. Mechanik 74(2001)7, s. 477-481.
48. Dąbrowski L., Marciniak M., Nowicki B., Pracki M.: *Niekonwencjonalne procesy obróbki ściernej*. Materiały XXV Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław, 2002, s. 33-54.
49. Dąbrowski L., Marciniak M., Oczos K.E.: *Cutting surface of the grinding wheel as a component of tribological system*. Archive of Civil and Mechanical Engineering, 2(2002)1, pp. 47-58
50. De Sampaio Alves M. C., Bianchi E. C., De Aguiar P. R.: *Grinding of hardened steels using optimized cooling*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 16(2008)1, pp. 195-202.
51. *Der schnelle Punkt. Quickpoint spart Mehrmaschinen-Bedienung*. Maschine und Werkzeug, 97(1995)3, s. 60.
52. Ding J., Xu L.: *Light scattering characteristics of small ice circular cylinders in visible, 1.38  $\mu\text{m}$ , and some infrared wavelengths*. Optical Engineering, 41(2002), pp. 2252-2266.
53. Ding W. F., Xu J. H., Chen Z. Z., Su H. H., Fu Y. C.: *Grain wear of brazed polycrystalline CBN abrasive tools during constant-force grinding Ti-6Al-4V alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 52(2011), pp. 969-976.
54. Dittel Messtechnik GmbH: *Product overview*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: [http://www.dittel.com/pdf/E\\_ProductOverview\\_09.pdf](http://www.dittel.com/pdf/E_ProductOverview_09.pdf) [odczyt: 11.10.2011]
55. Dobrzański L.A.: *Leksykon materiałoznawstwa. Praktyczne zestawienie norm polskich, zagranicznych i międzynarodowych*. Tom IV. Wydawnictwo Verlag Dashöfer, 2005.
56. Donachie M.J., Donachie S.J.: *Superalloys: a technical guide*. ASM International, Materials Park, 2002.

57. Doral Fused Materials Pty Ltd: *White fused alumina application*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.afm.com.au/view/products/#white> [odczyt: 14.01.2012].
58. Dornfeld D.A., Lee Y., Chang A.: *Monitoring of ultraprecision machining processes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21(2003)8, pp. 571-578.
59. Duwell E.J.: *Friction and wear of single-crystal sapphire sliding on steel*. Journal of Applied Physics, 33(1962)9, pp. 2691-2699.
60. Egerton R.F.: *Physical principles of electron microscopy – an introduction to TEM, SEM and AEM*. Springer, 2005.
61. *Eine für alles. Zeitsparende Schleifbearbeitung*. Maschine und Werkzeug, 96(1995)9, s. 91.
62. Elsner J.W.: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa 1987.
63. Evans AG.: *Science of ceramic machining and surface finishing II*. Washington (DC). US Government Printing Office, 1979. pp. 1-14.
64. FEPA-Standard 42-1:2006 *Grains of fused aluminium oxide, silicon carbide and other abrasive materials for bonded abrasives and for general applications. Macrogrits F 4 to F 220*.
65. Frick W.: *Glatter Rundschliff*. Maschinenmarkt, 110(2004)13, s. 34-S37.
66. Gallagher T.P.: *Process for impregnating porous bodies with a solid fusible substance*. US Patent No. 3341355, Patented 12.09.1967.
67. Garnier M., Matas F., Murgatroyd M., Yan D.: *Superabrasives market analysis*. University of Michigan Business School, 2003.
68. Gołąbczak A.: *Metody kształtowania właściwości użytkowych ściernic*. Politechnika Łódzka, Monografie, Łódź, 2004.
69. Gołąbczak A.: *Wybrane problemy kształtowania właściwości użytkowych ściernic*. Materiały XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, s. 89-98.
70. Gołąbczak A., Koziarski T.: *Badania zdolności skrawnych ściernic z regularnego azotku boru*. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, s. 349-356.
71. Gołąbczak A., Koziarski T.: *New possibilities of estimation of cutting ability of superhard grinding wheels*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 26(2002)2, s. 77-85.
72. Gołąbczak A., Koziarski T.: *Dwuparametrowa metoda oceny zdolności skrawnych ściernic z regularnego azotku boru*. Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 2003, s. 101-108.
73. Gołąbczak A., Koziarski T.: *Metrological characteristic and results of testing a measuring equipment for evaluation of cutting properties of superhard wheels*. Archive of Civil and Mechanical Engineering, 2(2003)2, s. 33-44.
74. Gołąbczak A., Koziarski T.: *Assessment method of cutting ability of CBN grinding wheels*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45(2005), pp. 1256-1260.
75. Gołąbczak A., Koziarski A., Rutkiewicz T.: *Ocena czynnej powierzchni ściernicy w warunkach przemysłowych*. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów, 2000, s. 249-256.

76. Graf W.: *Keramisch gebundene CBN- und Diamantschleifscheiben besonderer Art. Machine*, 45(1991)12, s. 46-49.
77. Graham W., Whiston M. G.: *Some observations of through-wheel coolant application in grinding*. International Journal of Machine Tool Design and Research, 18(1978), pp. 9-18.
78. Grier Abrasive Co., Inc. (USA): *Wheel selection*. [Dok. elektr.] <http://www.grierabrasive.com/gennote.htm> [odczyt: 02.11.2011]
79. *Grinding – the state of the art*. Machining and Production Engineering, 155(1997), pp. 39-48.
80. *Grinding wheel and abrasives basics*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: [http://www.georgiagrindingwheel.com/grindingwheels\\_basics.htm](http://www.georgiagrindingwheel.com/grindingwheels_basics.htm) [odczyt: 20.01.2012].
81. Gusev V.G.: *Formirovanie poverkhnostej vrashhenija v processe diskretnogo shlifovanija sbornymi abrazivnymi krugami*. Vestnik Mashinostroenija, (1993)10, s. 20-27.
82. Hamdi H., Dursapt M., Zahouani H.: *Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms*. Wear, 254(2003), pp. 1294-1298.
83. Hariharan P.: *Basics of interferometry* (2nd Edition). Academic Press, London, 2005.
84. Harmann M.L.: *Abrasive article*. US Patent No. 1615271, Patented 25.01.1927
85. Harvey J.E., Krywonos A., Vernold C.L.: *Modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles*. Optical Engineering, 46(2007), 078002.
86. Harvey J.E., Vernold C.L.: *Modifying the Harvey-Shack surface scatter theory*. Proceedings of SPIE, 3426(1998), pp. 326-332.
87. Hausberger P.: *Leistungssteigerung von SiC und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schleifwerkzeugen durch neue Korn- und Bindungssysteme. Schleiftechnik im Wettbewerb*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1997, s. 1-1-1-13.
88. Hegener G.: *Technologische Grundlagen des Hochleistungs-Außenrund-Formschleifens*. Dissertation, RWTH Aachen University, 1998.
89. Hegener G.: *In einem Zug geschliffen. Wellenförmige Werkstücke flexibel und mit hoher Leistung schleiftechnisch bearbeiten*. Maschinenmarkt, 106(2000)16, s. 38-43.
90. Helletsberger H., Noichl J.: *Einsatzbereiche von Schleifstoffen. Grenzwerte und Wirtschaftlichkeit von Korund, Sinterkorund und CBN*. Technische Rundschau, 85(1993)13, s. 24-28.
91. Hennes N.: *Das dynamische Verhalten von Außenrund-Längsschleifprozessen*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1997, s. 6-1-6-11.
92. Herman D.: *Narzędzia ściernie ze spoiwem szklanokrystalicznym*. Materiały XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin, 1993, s. 43-49.
93. Herman D.: *Budowa i właściwości ceramicznych narzędzi ściernych z udziałem krzemianowych spoiw szklanych i szklanokrystalicznych*. Monografia Wydziału Mechanicznego Nr 54, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin, 1995.
94. Herman D.: *Glass and glass-ceramic binder obtained from waste material for binding alundum abrasive grains into grinding wheels*. Ceramics International, 24(1998)7, pp. 515-520.

95. Herman D.: *Podstawy wytwarzania i zastosowań nowych spoiw ceramicznych w narzędziach ściernych z tlenku glinu*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 94, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2003.
96. Herman D.: *Spiekanie polikrystalicznego azotku boru z udziałem krzemianowej fazy ciekłej amorficznej i szklanokrystalicznej*. Materiały Ceramiczne, 61(2009)2, s. 80-86.
97. Herman D., Markul J.: *Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44(2004), pp. 511-522.
98. Herman D., Plichta J., Karpiński T.: *Effect of glass-crystalline and amorphous binder application to abrasive tools made of microcrystalline alumina grains type SG*. Wear, 209(1997), pp. 213-218.
99. Herman D., Plichta J., Nadolny K.: *New ceramic abrasive tools for rough and finishing grinding in one pass*. First Manufacturing Engineering Society International Conference, Calatayud, Spain, 19-25.09.2005, pp. 68.
100. Herman D., Plichta J., Nadolny K.: *New ceramic abrasive tools for rough and finishing grinding in one pass*. Material Science Forum, 526(2006), pp. 163-168.
101. Herman D., Plichta J., Nadolny K.: *Ceramiczne narzędzie ścierne do jednoprzęściowego szlifowania powierzchni walcowych i sposób jego wytwarzania*. Patent Nr 204902 z dnia 10.09.2009.
102. Herman D., Walkowiak W., Okupski T., Nadolny K.: *Sposób wytwarzania ceramicznych narzędzi ściernych*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 393462 z 29.12.2010 r.
103. Hertzsch A., Kröger K., Truckenbrodt H.: *Microtopographic analysis of turned surfaces by model-based scatterometry*. Precision Engineering, 26(2002), pp. 306-313.
104. Heuer W.: *Gesintertes Aluminiumoxid – ein neuer Schleifstoff zum Innenrundscheifen*. Wirtschaftliche Alternative. Industrie Anzeiger, 112(1990)69, s. 44-46.
105. Heuer A.H., Tighe N.J., Cannon R.M.: *Plastic deformation of fine-grained alumina ( $Al_2O_3$ ): II, Basal slip and nonaccommodated grain-boundary sliding*. Journal of the American Ceramic Society, 63(1980)1-2, pp. 53-61.
106. Holland T.: *Don't be scared off higher-tech grinding*. Metalworking Production, 138(1994)12, pp. 48.
107. Hundt W., Leuenberger D., Rehsteiner F., Gygax P.: *An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique*. Annals of the CIRP, 43(1994)1, pp. 295-298.
108. Hwang T. W., Whitenton E. P., Hsu N. N., Blessing G. V., Evans C. J.: *Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride*. Ultrasonics, 38(2000)1-8, pp. 614-619.
109. Ichida Y.: *Mechanical properties and grinding performance of ultrafine-crystalline cBN abrasive grains*. Diamond and Related Materials, 17(2008), pp. 1791-1795.
110. Irani R.A., Bauer R.J., Warkentin A.: *A review of cutting fluid application in the grinding process*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45(2005)15, pp. 1696-1705.

111. ISO 3002-5:1989 – *Basic quantities in cutting and grinding. Part 5: Basic terminology for grinding processes using grinding wheels.*
112. ISO 8486-1:1996 *Bonded abrasives – Determination and designation of grain size distribution -Part 1: Macrogrits F4 to F220.*
113. ISO 683-17:1999 *Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels – Part 17: Ball and roller bearing steels.*
114. ISO 8486-2:2007 *Bonded abrasives – Determination and designation of grain size distribution – Part 2: Microgrits F230 to F2000.*
115. Jackson L.P.: *Filled abrasive article and filler for the same.* US Patent No. 2333480, Patented 2.11.1943.
116. Jackson M. J., Davim J. P.: *Machining with abrasives*, Springer, New York, 2010.
117. Jackson M. J., Mills B.: *Microscale wear of vitrified abrasive materials.* Journal of Material Science, 39(2004), pp. 2131-2143.
118. Jacobson R.D., Wilson S.R., Al-Jumaily G.A., McNeil J.R., et al.: *Microstructure characterisation by angle-resolved scatter and comparison to measurements made by other techniques.* Applied Optics, 31(1992), pp. 1426-1435.
119. Jones H.H.: *Composition for impregnating grinding wheels.* US Patent No. 2240302, Patented 29.04.1941.
120. Joseph W.: 3M Company, Filed 2002, *Agglomerate production by firing spray dried mixture of abrasive particles and a solution formed of oxide and water*, World Patent 200238338.
121. Jones R.: *Getting to grips with grinding.* Metalworking Production, 140(1996)9, pp. 31, 34.
122. Joto Abrasives Pvt. Ltd. (Germany): *Treatment.* [Dok. elektr.] <http://www.jotoabrasives.com/Products/Html%20Pages/ProductsMfrsTreatment.htm> [odczyt: 02.11.2011]
123. Junker E.: *Verfahren und Vorrichtung zum Hochgeschwindigkeits-Profilschleifen von rotations-symmetrischen Werkstücken.* Europäisches Patent, Nr. 0176654, 1985.
124. Kacalak W.: *Kierunki prac nad metodami intensyfikacji procesów szlifowania materiałów trudnoobrabialnych.* Materiały XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin, 1993, s. 297-300.
125. Kacalak W., Lewkowicz R., Ściegienka R.: *Właściwości makroagregatowych ściernic diamentowych i efekty ich stosowania w szlifowaniu ceramiki.* Materiały XX Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Poznań-Błażejewko, 1997, s. 269-272.
126. Kane T. M.: *Global markets and applications of superabrasive materials.* [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://superabrasives.org/members/membersonly/marketstudies/2009GlobalMarketsandApplicationsofSuperabrasiveMaterials.pdf> [odczyt: 14.01.2012].
127. Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: *Laser scatterometry used for assessment of microfinished shafts.* Proceedings of the IV. Int. Congress on Precision Machining ICPM 2007 (S. Adamczak and K. Stępień Eds.), Publications Kielce University of Technology, Kielce, 2007, s. 291-296.



128. Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: *Assessment of surface roughness in movement by image stacking*. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces (P. Pawlus, L. Blunt, B-G. Rosen, T. Thomas, M. Wieczorowski and H. Zahouani Eds.), Publications Rzeszów University of Technology, Rzeszów, 2009, pp. 295-299.
129. Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: *Laser scatterometry and image analysis used for the assessment of surface roughness of microfinished cylindrical elements made of plastics*. Measurement Automation and Monitoring, 56(2010), pp. 330-333.
130. Kapłonek W., Nadolny K.: *Zastosowanie skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu do oceny czynnej powierzchni ściernic z mikrokrystalicznego korundu spiekane SG*. Podstawy i technika obróbki ścierniej, pod redakcją A. Gołabczaka i B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź, 2010, s. 153-164.
131. Kapłonek W., Nadolny K.: *Medição da dispersão da luz do laser usada para impedir empastamento no rebolo*. Máquinas e Metais, 47(2011)544, p. 104-117.
132. Kapłonek W., Nadolny K.: *Skaterometryczna ocena ściernic po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych materiałów trudno obrabialnych*. Obróbka ścierna. Współczesne problemy, pod redakcją A. Barylskiego, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2011, s. 39-52.
133. Kapłonek W., Nadolny K.: *Assessment of the grinding wheel active surface condition using SEM and image analysis techniques*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (in press).
134. Kapłonek W., Łukianowicz Cz., Nadolny K.: *Methodology of the Assessment of the Abrasive Tool's Active Surface using Laser Scatterometry*. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 36(2012)1, pp.49-66.
135. Kapłonek W., Nadolny K.: *The diagnostics of abrasive tools after internal cylindrical grinding of hard-to-cut materials by means of a laser technique using imaging and analysis of scattered light*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, DOI 10.1007/s13369-012-0374-3.
136. Kapłonek W., Nadolny K., Sutowski P.: *Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu*. Obróbka ścierna. Współczesne problemy, pod redakcją A. Barylskiego, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2011, s. 29-38.
137. Karpiński T., Herman D., Plichta J.: *Efekt zastosowania spoiw szklanokrystalicznych i amorficznych w narzędziach ściernych z ziaren mikrokrystalicznego tlenku glinu typu SG*. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Wrocławskiej, seria "Konferencje", 59(1995)24, s. 235-240.
138. Karpiński T., Markul J., Krzos J.: *Ściernice hybrydowe*. Materiały XXII Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Gdańsk, 1999, s. 167-172.
139. Karpiński T., Sieniawski J.: *Ecological methods of cooling in grinding processes*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2(2002)1-2, pp. 73-81.
140. Karpiński T., Sieniawski J.: *Ściernica walcowa i forma do jej wytwarzania*. Patent nr: 203295 z dnia 02.06.2003.

141. Karpiński T., Sieniawski J.: *Badania efektywności metody chłodzenia strefowego w szlifowaniu płaszczyzn*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 25(2005)2, s. 21-29.
142. Karpuschewski B., Wehmeier M., Inasaki I.: *Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors*. Annals of the CIRP, 49(2000)1, pp. 235-240.
143. Kazimierski Z.: *Podstawy mechaniki płynów i metody komputerowej symulacji przepływów*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2004.
144. Kerekes L., Julean D., Lemeni L.: *Sandwich grinding wheel – a solution for improving grinding process performances*. Materiały XX Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Poznań, 1997, s. 133-136.
145. Kerlin T.W.: *Practical thermocouple thermometry*. Instrument Society of America, Research Triangle Park 1999.
146. Kharcbeker K., Starkov V.K., Ovchinnikov D.S.: *Vysokoskorostnoe shlifovanie zakalennykh stalej bez okhlazhdenija*. Vestnik Mashinostroenija, (2002)9, s. 43-50.
147. Khudobin L.V., Psigin Ju.V.: *Tekhnologicheskie vozmozhnosti sbornykh kombinirovannykh shlifovalnykh krugov*. STIN, (1995)9, s. 14-19.
148. Khudobin L.V., Psigin Ju.V., Macenko P.K.: *Sherokhovatost' poverkhnosti posle shlifowanija sbornym kombinirovannym krugom*. Vestnik Mashinostroenija, (1996)6, s. 32-35.
149. Kim J.-D., Kang Y.-H., Jin D.-X., Lee Y.-S.: *Development of discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 37(1997)11, pp. 1611-1624.
150. Kim H. Y., Kim S. R., Ahn J. H., Kim S. H.: *Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission*. Journal of Materials Processing Technology, 111(2001)1-3, pp. 273-278.
151. Kitajima M., Unno K., Takehara H., Kono T., Soma S.: *Segmented grinding wheel and manufacturing method therefor*. US Patent Application No. US 2010/0261420 A1.
152. Klocke F.: *Neue Technologien Marktvorsprung durch Technologievorsprung*. In: Krause F.-L., Uhlmann E.: *Innovative Produktionstechnik*, Hanser, Munchen, 1998, s. 426-436.
153. Klocke F.: *Mikrokristallines Aluminiumoxid macht CBN Konkurrenz. Wirtschaftlich mit hohem Zerspanungsvolumen*. Industrie Anzeiger, 122(2000)19, s. 49-50.
154. Klocke F.: *Manufacturing processes 2: grinding, honing, lapping*. Springer-Verlag, Berlin, 2009.
155. Klocke F., Beck T.: *Gut geschmiert statt schlecht gekühlt. Kühlschmierstoffreduzierung beim CBN-Hochgeschwindigkeitsschleifen*. Werkstattstechnik, 88(1998)9-10, s. 400-404.
156. Klocke F., Bücker C.: *Quickpoint-Schleifen: Baustein einer flexiblen Produktion. Komplettbearbeiten in nur einer Aufspannung*. Industrie Anzeiger, 118(1996)43-44, s. 48-49.

157. Klocke F., Engelhorn R., Mayer J., Weirich Th.: *Micro-analysis of the contact zone of tribologically loaded second-phase reinforced sol-gel-abrasives*. CIRP Annals, 51(2002)1, pp. 245-250.
158. Klocke F., Hegener G.: *Schnell, gut und flexibel: Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen*. IDR, 33(1999)2, s. 153-160.
159. Klocke F., Hegener G., Deacu L.: *Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen. Innovatives Fertigungsverfahren vereint hohe Flexibilität und Produktivität*. ZWF, 91(1996)4, s. 164-167.
160. König W., Lauer-Schmalt H.: *Loading of the grinding wheel phenomenon and measurement*. Annals of the CIRP, 27(1978)1, pp. 217-220.
161. König W., Altintas Y., Memis F.: *Direct adaptive control of plunge grinding process using acoustic emission (AE) sensor*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 35(1995)10, pp. 1445-1457.
162. Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewy W. (red): *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. Monografie Polskiej Akademii Nauk. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2002.
163. Korn D.: *Reducing fastener grinding costs using advanced abrasives*. Modern Machine Shop, 11/11/2011.
164. Koval'nogov V.N., Mikhajlin S.M.: *Teplofizicheskijj analiz kak osnova proektirovanija kompozicionnykh shlifoval'nykh krugov*. Mashinostroenie (Iz.VUZ), (2006)3, s. 53-64.
165. Koziarski A., Bogolebski J., Fiks W., Urbaniak M.: *Kompleksowa metoda oceny właściwości użytkowych ściernic – część I. Opis metody*. Materiały VII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk, 1984, s. 75-87.
166. Koziarski A., Bogolebski J., Kaczmarek J.: *Ocena skrawności ściernicy*. Materiały V MKNT Postępy w teorii i technice obróbki materiałów. KBM PAN, IOS, SIMP, Kraków, 1979, s. 52-54.
167. Koziarski A., Kaczmarek J.: *Ocena skrawności ściernicy w wybranych odmianach szlifowania*. Postępy Maszyn i Urządzeń, (1984)4, s. 75-91.
168. Krauss G.: *Steels: processing, structure, and performance*. ASM International, 2005.
169. Kremen Z.I.: *A new generation of high-porous vitrified cBN wheels*. Industrial Diamond Review, (2003)4, pp. 53-56.
170. Kronberg M.L.: *Plastic deformation of single crystals of sapphire: Basal slip and twinning*. Acta Metallurgica, 5(1957)9, pp. 507-524.
171. Krzos J.: *Nowoczesne spoiwo ściernic ceramicznych*. Narzędzia elektronarzędzia, 39(2004)5, s. 74-78.
172. Krzos J.: *Wpływ budowy strukturalnej spoiwa ceramicznego na właściwości eksploatacyjne ściernic z mikrokryształicznymi ziarnami regularnego azotku boru w procesie szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych*. Rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009.
173. Kudła L.: *SG – nowy gatunek materiału ściernego*. Mechanik, 65(1992)8-9, s. 272.
174. Kurushin D.A.: *Sherokhovatost' poverkhnostejj shlifovannykh sbornym kompozicionnym krugom s povyshennoj okružhnoj skorost'ju*. STIN, (2007)7, s. 34-36.

175. Kwak J.-S., Ha M.-K.: *Force modeling and machining characteristics of the intermittent grinding wheels*. Journal of Mechanical Science and Technology, 15(2001)3, pp. 351-356.
176. Kwak J.-S., Ha M.-K.: *Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals*. Journal of Materials Processing Technology, 147(2004)1, pp. 65-71.
177. Kwak J.-S., Song J.-B.: *Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41(2001)6, pp. 899-913.
178. Leach R.K. (Ed.): *Optical methods for areal surface texture measurement*. Springer, Berlin, 2011.
179. Lee K.W., Wong P.K., Zhang J.H.: *Study on the grinding of advanced ceramics with slotted diamond wheels*. Journal of Materials Processing Technology, 100(2000)1-3, pp. 230-235.
180. Li Zi-Cheng, Li Zhi-Hong, Zhang Ai-Ju, Zhu Yu-Mei: *Synthesis processes of nano alumina abrasive*. Key Engineering Materials, 368-372 (2008), pp. 691-693.
181. Li Zi-Cheng, Li Zhi-Hong, Zhang Ai-Ju, Zhu Yu-Mei: *Two-step sintering behavior of sol-gel derived nanocrystalline corundum abrasive with MgO-CaO-SiO<sub>2</sub> additions*. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 48(2008), pp. 283-288.
182. Li Zi-Cheng, Li Zhi-Hong, Zhang Ai-Ju, Zhu Yu-Mei: *Influence of thermal treatment conditions on two-dimensional crystal growth of nanocrystal corundum abrasives*. Materials Research Bulletin 44(2009), pp. 762-767.
183. Li Zi-Cheng, Li Zhi-Hong, Zhang Ai-Ju, Zhu Yu-Mei: *Synergistic effect of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> co-doped seed on phase transformation, microstructure, and mechanical properties of nanocrystalline alumina abrasive*. Journal of Alloys and Compounds, 476(2009), pp. 276-281.
184. Li Zi-Cheng, Li Zhi-Hong, Zhang Ai-Ju, Zhu Yu-Mei: *Synthesis and two-step sintering behavior of sol-gel derived nanocrystalline corundum abrasives*. Journal of the European Ceramic Society, 29(2009), pp. 1337-1345.
185. Li Zi-Cheng, Zhang Ai-Ju, Li Zhi-Hong, Zhu Yu-Mei, Liu Liang-Jun, Xiang Huiqiang: *A novel low temperature synthesis technique of sol-gel derived nanocrystalline alumina abrasive*. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 57(2011), pp. 24-30.
186. Lierath F.: *Neue hochporöse Schleifkörperstrukturen durch Hohlkugelfkorund*. Otto-Von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung.
187. Liu Q., Chen X., Gindy N.: *Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(2006)3-4, pp. 284-292.
188. Ludewig T.: *Auswahlkriterien für SiC- und Korundschleifkorntypen beim Schleifen von Stählen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1994.
189. Luo S.Y., Liao Y.S., Chou C.C., Chen J.P.: *Analysis of the wear of a resin-bonded diamond wheel in the grinding of tungsten carbide*. Journal of Materials Processing Technology, 69(1997)1-3, pp. 289-296.

190. Lütjens P.: *Hard turning or grinding – which is the more economical alternative?* IDR. 61(2001)1, pp. 22-26.
191. Lütjens P., Mushardt H.: *Grinding out hardened parts.* American Mechanist, 148(2004)3, pp. 52-59.
192. Łukianowicz Cz.: *Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła.* Monografia Wydziału Mechanicznego Nr 85, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
193. Łukianowicz Cz., Karpiński T.: *Scatterometry of ground surfaces.* Measurement Science Review, 3(2003), pp. 21-24.
194. Makuch S., Kacalak W.: *Nowe koncepcje narzędzi wygładzających przeznaczonych do uzyskania określonych efektów obróbki.* Materiały XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, s. 307-312.
195. Makuch S., Kacalak W.: *Efekty wygładzania z zastosowaniem ściernic elastycznych o nieciągłej powierzchni czynnej.* Podstawy i technika obróbki ścierniej, pod redakcją Kazimierza E. Oczosia i Jana Burka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2007, s. 195-202.
196. Makuch S., Kacalak W., Cincio R.: *Metoda precyzyjnego wygładzania z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi ściernych.* Elektronika, (2004)8-9, s. 178-181.
197. Malkin S., Guo C.: *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives.* Industrial Press Inc., New York, 2008.
198. Mang T., Dresel W.: *Lubricants and Lubrication.* Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
199. Marciniak M.: *Praca tarcia jako kryterium oceny efektywności szlifowania.* Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 1995, nr 59, seria Konferencje, z. 24, s. 111-120.
200. Marciniak M.: *Proces szlifowania w ujęciu fenomenologicznym.* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
201. Marciniak M., Dąbrowski L., Zawora J.: *Doświadczalna ocena intensywności zalepiania metalem czynnej powierzchni ściernicy.* Materiały XXI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Warszawa-Miedzeszyn, 1998, s. 97-101.
202. Marciniak M., Oczos K.E.: *Tribologiczne aspekty pracy 3-D czynnej powierzchni ściernicy (CPS).* Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, s. 173-180.
203. Marinescu I. D., Hitchiner M., Uhlmann E., Rowe W. B., Inasaki I.: *Handbook of Machining with Grinding Wheels.* CRC Press, Boca Raton, 2007.
204. Marinescu I. D., Rowe W. B., Dimitrov B., Inasaki I.: *Tribology of abrasive machining processes.* William Andrew, Inc., Norwich, 2004.
205. Martens R., Maier R., Bettingen A.: *Innen-kuhlung beim CBN-Schleifen.* VDI-Z, 140(1998)1-2, s. 42-44.
206. Matsuo T.: *Recent researches on high efficiency and heavy duty grinding.* International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 27(1993)4, pp. 303-306.
207. Matsumoto T., Inasaki I., Ogawa K.: *Monitoring of grinding process with a sensor integrated CBN wheel.* Proceedings 5th International Grinding Conference, Cincinnati, SME, 1993.

208. Mayer J., Engelhorn R., Bot R., Weirich Th., Herwartz C., Klocke F.: *Wear characteristics of second-phase-reinforced sol-gel corundum abrasives*. Acta Materialia. 54(2006)13, pp. 3605-3615.
209. Memis H.: *Untersuchungen über die Flüssigkeitsdurchlässigkeit von keramisch gebundenen Schleifscheiben und den Einfluss der Zuführungsart des Kühlmittels auf den Schleifvorgang*. Dissertation, TH Braunschweig, 1950.
210. Meyer L., Heinzl C., Brinksmeier E.: *Monitoring of grinding processes using a sensor equipped grinding wheel*. Production Engineering, 11(2004)1, pp. 41-44.
211. Meister M., Meister T.: *Diamant, CBN und Sinterkorund – moderne Schleifmittel: Herausforderungen für die Zukunft*. Schweiz. Maschinenmarkt, (1995)17, s. 38-43.
212. Merkel P.: *Zwischen Korund und CBN. Viel mehr Schneiden pro Schleifkorn*. Industrie Anzeiger, 113(1991)7, s. 10-12.
213. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J.: *Temperature measurement*. John Wiley and Sons, Chichester, 2001.
214. Miller P.F., et al.: *Confocal laser scanning microscopy*. Alphascript Publishing, Amsterdam, 2010.
215. Morozow W., Liance E., Karpiński T., Krzos J.: *Topographic model of active surface of grinding wheel with mixed grains and microbubbles*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2(2002)2, pp. 45-51.
216. Mushardt H.: *Modern machines and technologies for cylindrical and surface grinding*. Materiały XX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Poznań-Błażejewko, 1997, s. 317-330.
217. Nadolny K.: *Modifications of axial internal cylindrical grinding process*. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 33, Modern Techniques and Technologies, Koszalin, 2003, pp. 237-246.
218. Nadolny K.: *Wpływ wartości kąta nakroju stożkowego ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie na rezultaty procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Obróbka ścierna w technikach wytwarzania, pod redakcją L. Dąbrowskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, s. 78-83.
219. Nadolny K.: *Badania efektywności procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, 2006.
220. Nadolny K.: *Kształtowanie właściwości skrawnych ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie do jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Mechanik, 80(2007)2, s. 99-105.
221. Nadolny K.: *Klasyfikacja procesów szlifowania jednoprzęściowego*. Mechanik, 81(2008)5-6, s. 450-455.
222. Nadolny K.: *Jednoprzęściowe procesy szlifowania*. Rozdział 1 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
223. Nadolny K.: *Przyrząd do kształtowania nakroju stożkowego na powierzchni ściernic w zakresie małych wartości kątowych*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 388765 z 10.08.2009 r.

224. Nadolny K.: *Aplikacja internetowa do doboru parametrów jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Współczesne problemy obróbki ścierniej, pod redakcją J. Plichty, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 167, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, s. 407-414.
225. Nadolny K.: *Synergiczne modyfikacje ściernic do procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Współczesne problemy obróbki ścierniej, pod redakcją J. Plichty, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 167, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, s. 203-214.
226. Nadolny K.: *Oszacowanie dokładności kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56(2010)5, s. 499-502.
227. Nadolny K.: *Pomiar zarysu osiowego czynnej powierzchni ściernicy z nakrojem stożkowym metodą pneumatyczną*. *Podstawy i technika obróbki ścierniej*, pod redakcją A. Gołąbczaka i B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź, 2010, s. 145-152.
228. Nadolny K.: *Analiza zużycia czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego w procesie szlifowania wglębnego walcowych powierzchni wewnętrznych*. *Obróbka ścierna*. Współczesne problemy, pod redakcją A. Barylskiego, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2011, s. 69-80.
229. Nadolny K.: *Durability of  $Al_2O_3$  grinding wheels with zone-diversified structure in single-pass internal cylindrical grinding*. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35(2011)3, pp. 39-53.
230. Nadolny K.: *Microdiscontinuities of the grinding wheel and their effects on its durability during internal cylindrical grinding*. *Machining Science and Technology* (in press).
231. Nadolny K.: *The method of comparative assessment of the grinding wheel cutting ability in plunge grinding process*. *Central European Journal of Engineering*, 2(2012)3, pp. 399-409.
232. Nadolny K., Bałasz B.: *Modeling of zonal diversified structure grinding wheels surface*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 5(2005)4, pp. 77-84.
233. Nadolny K., Bałasz B.: *Modelowanie i symulacja procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych*. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 26(2006)2, s. 67-76.
234. Nadolny K., Bałasz B., Plichta J.: *Wykorzystanie symulacji komputerowej do projektowania składanych narzędzi ściernych*. *Wybrane Problemy Obróbki Ścierniej*, pod redakcją Cz. Niżankowskiego, Bochnia, 2008, s. 385-394.
235. Nadolny K., Herman D., Plichta J.: *Nowa generacja ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie z ziarnami korundu spiekanego (SG) do realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych*. *Obróbka ścierna w technikach wytwarzania*, pod redakcją L. Dąbrowskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, s. 83-89.
236. Nadolny K., Herman D., Plichta J.: *New generation of zonal diversified structure grinding wheels with microcrystalline aluminium oxide grains (SG) for single-pass*

- internal grinding process*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 30(2006)1, pp. 5-12.
237. Nadolny K., Kapłonek W.: *Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu*. Pomiar Automatyka Kontrola, 56(2010)5, s. 491-494.
238. Nadolny K., Kapłonek W.: *Web application used for multi-criterion optimized selection of most important parameters of single-pass internal cylindrical grinding process*. Measurement Automation and Monitoring, 57(2011)5, pp. 528-530.
239. Nadolny K., Kapłonek W.: *Design of a device for precision shaping of the grinding wheel macro- and microgeometry*. Journal of Central South University of Technology, 19(2012)1, pp. 135-143.
240. Nadolny K., Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: *Laserowe pomiary topografii powierzchni narzędzi ściernych z zastosowaniem systemu pomiarowego CLI 2000*. Materiały Konferencyjne IX Szkoły-Konferencji „Metrologia Wspomagana Komputerowo”, Instytut Systemów Elektronicznych, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2011, s. 88.
241. Nadolny K., Kapłonek W., Łukianowicz Cz., Valiček J.: *Laserowe pomiary topografii powierzchni narzędzi ściernych z zastosowaniem systemu pomiarowego CLI 2000*. Przegląd Elektrotechniczny, 87(2011)9a, s. 24-27.
242. Nadolny K., Kapłonek W., Valiček J.: *Pneumatic method used for fast non-contact measurements of axial contour of grinding wheel active surface*. Measurement Automation and Monitoring, 57(2011)9, pp. 1071-1074.
243. Nadolny K., Kapłonek W., Wojtewicz M., Sienicki W.: *Ocena wpływu nasiarowania ściernicy na jej zdolność skrawną w procesie szlifowania otworów ze stopu Titanium Grade 2<sup>®</sup>*. Obróbka ścierna. Współczesne problemy, pod redakcją A. Barylskiego, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2011, s. 53-68.
244. Nadolny K., Okupski T.: *Wpływ udziału objętościowego i mikrostruktury spoiwa szklanokrystalicznego na efektywność jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w inconelu 600*. Podstawy i technika obróbki ścierniej, pod redakcją A. Gołabczaka i B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź, 2010, s. 279-288.
245. Nadolny K., Plichta J.: *Badania procesu szlifowania otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej charakterystyce*. Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 2003, s. 153-158.
246. Nadolny K., Plichta J.: *Możliwości wykorzystania strefowo zróżnicowanych narzędzi ściernych z ziaren  $Al_2O_3$  oraz SG w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 36. XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, s. 319-324.
247. Nadolny K., Plichta J.: *Jednoprzęściowy proces szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 25(2005)2, s. 31-40.



248. Nadolny K., Plichta J.: *Ocena efektywności jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Materiały XXIX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk-Jurata, 2006, s. 181-184.
249. Nadolny K., Plichta J.: *Comparative method of thermovision temperature measurement in single-pass internal cylindrical grinding*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 6(2006)4, pp. 65-72.
250. Nadolny K., Plichta J.: *Kierunki rozwoju jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 27(2007)2, s. 15-24.
251. Nadolny K., Plichta J.: *Koncepcja inteligentnego systemu narzędziowego do realizacji jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Podstawy i technika obróbki ściernej, pod redakcją Kazimierza E. Oczosia i Jana Burka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2007, s. 203-208.
252. Nadolny K., Plichta J.: *Possibilities of development in the single-pass internal cylindrical grinding*. Proceedings of the 19<sup>th</sup> Int. Conference on Systems Engineering (ICSENG), Las Vegas, USA, 2008, pp. 230-235.
253. Nadolny K., Plichta J.: *Koncepcja inteligentnego systemu obróbki składanymi narzędziami ściernymi*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 28(2008)2, s. 37-42.
254. Nadolny K., Plichta J.: *Wpływ mikronieciągłości CPS na efektywność jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Wybrane Problemy Obróbki Ściernej, pod redakcją Cz. Niżankowskiego, Bochnia, 2008, s. 109-118.
255. Nadolny K., Plichta J.: *Jednoprzęściowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 158. Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
256. Nadolny K., Plichta J.: *Realizacja procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Rozdział 6 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
257. Nadolny K., Plichta J.: *Okres trwałości ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie*. Rozdział 7 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
258. Nadolny K., Plichta J.: *Efektywność procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Rozdział 8 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
259. Nadolny K., Plichta J.: *Kierunki rozwoju jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Rozdział 12 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158. Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
260. Nadolny K., Plichta J.: *Przyrząd do kształtowania makro- i mikrogeometrii powierzchni ściernicy*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 388766 z 10.08.2009 r.

261. Nadolny K., Plichta J.: *Mikronieciągłości czynnej powierzchni jako metoda wydłużenia okresu trwałości ściernic*. Mechanik, 82(2009)8-9, s. 701-706.
262. Nadolny K., Plichta J.: *Analiza warunków pracy ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy metodą szlifowania wgłębnego*. Podstawy i technika obróbki ściernej, pod redakcją A. Gołębaczaka i B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź, 2010, s. 165-176.
263. Nadolny K., Plichta J.: *Sposób badania zdolności skrawnej ściernicy*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 395409 z 22.06.2011 r.
264. Nadolny K., Plichta J.: *Narzędzie ścierne składane z chłodzeniem odśrodkowym i ściernica do tego narzędzia*. Patent Nr 209013 z dnia 23.02.2011.
265. Nadolny K., Plichta J.: *Narzędzie ścierne składane z chłodzeniem odśrodkowym i element tego narzędzia*. Patent Nr 209014 z dnia 23.02.2011.
266. Nadolny K., Plichta B., Bałasz B.: *Application of computer modeling and simulation for designing of grinding wheels with zone-diversified structure*. Management and Production Engineering Review, 1(2010)4, pp. 38-45.
267. Nadolny K., Plichta J., Bukowiecki M.: *Możliwości poprawy warunków procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów*. Rozdział 9 w Monografii Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
268. Nadolny K., Plichta J., Herman D., Słowiński B.: *Single-pass grinding – an effective manufacturing method for finishing*. Proceedings of the 19<sup>th</sup> Int. Conference on Systems Engineering (August 19-21, 2008, Las Vegas, USA), University of Nevada Las Vegas, 2008, pp. 236-241.
269. Nadolny K., Plichta S., Plichta J.: *Model powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 27(2007)2, s. 25-32.
270. Nadolny K., Słowiński B.: *Retificação de desbaste e acabamento em passe único*. Máquinas e Metais, 45(2009)520, p. 8-9.
271. Nadolny K., Słowiński B.: *Potential for increasing the effectiveness of automated production systems due to application of single-pass grinding*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 34(2010)2, pp. 19-30.
272. Nadolny K., Słowiński B.: *The effects of wear upon the axial profile of a grinding wheel in the construction of innovative grinding wheels for internal cylindrical grinding*. Advances in Tribology, Volume 2011, Article ID 516202, 11 pages, doi:10.1155/2011/516202.
273. Nagarajan V.S., Jahnmaier S.: *The relationship between microstructure and wear of mica containing glass-ceramics*. Wear, 200(1996)1-2, pp. 176-185.
274. Nagy P.B., Adler L.: *Surface wave inspection of porous ceramics and rocks*. In: Thompson D.O., Chimenti D.E.: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Plenum Press, New York, 1993.
275. Nakajima T., Okamura K., Uno Y.: *Traverse grinding techniques for improving both productivity and surface finish*. International Grinding Conference, Fontana, Wisconsin, SME, Mr 84-534, Aug. 27-29, 1984.

276. Nakayama M., Kudo K., Hirose T., Iino M.: *Experimental study of grinding fluids for abrasive-belt grinding of stainless steel*. Tribology International, 20(1987)3, pp. 133-143.
277. Narbut N., Stafford T., Tartaglione J.: *Grinding with segments*. Cutting tool engineering. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=101> [odczyt: 20.01.2012].
278. Nguyen T., Zhang L.C.: *The coolant penetration in grinding with segmented wheels – part 1: mechanism and comparison with conventional wheels*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45(2005)12-13, pp. 1412-1420.
279. Nguyen T., Zhang L.C.: *The coolant penetration in grinding with a segmented wheel – Part 2: Quantitative analysis*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(2006)2, pp. 114-121.
280. Nguyen T., Zhang L.C.: *Performance of a new segmented grinding wheel system*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49(2009)3-4, pp. 291-296.
281. Niżankowski Cz.: *Badania fizykomechanicznych właściwości ścierniwa typu Cubitron 3M*. Materiały XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin 1993, s. 17-22.
282. Niżankowski Cz.: *Właściwości skrawne ściernic z korundu spiekanego*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996.
283. Niżankowski Cz.: *Submikrokryształiczny korund spiekany – stan obecny i tendencje rozwojowe*. Materiały XXII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk 1999, s. 215-220.
284. Niżankowski Cz.: *Manufacturing sintered corundum abrasives*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2(2002)2, pp. 53-64.
285. Niżankowski Cz., Matras A.: *Wpływ gatunku ścierniwa na dokładność watek stalowych po szlifowaniu ściernicowym*. Inżynieria Maszyn, 15(2010)3, s. 55-68.
286. Niżankowski Cz., Niżankowski T.: *Konstrukcje i technologie ściernic najnowszej generacji*. Zbiór Referatów VI Naukowych Warsztatów Profesorskich – Technologia Maszyn 2000, s. 87-93.
287. Niżankowski Cz., Przybylski L.: *Materiały i narzędzia ściernic – trendy rozwoju w XXI wieku*. Materiały XXV Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław – Duszniki Zdrój, 2002, s. 17-32.
288. Noichl H.: *CBN grinding of Nickel alloys in the aerospace industry*. Proceedings of the Intertech 2000 (July 17-21, 2000, Vancouver, Canada), 2000.
289. Nordmann GmbH & Co. KG: *Presentation*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.toolmonitoring.com/pdf/Nord-mann-Presentation.pdf> [odczyt: 11.10.2011]
290. Norton Company (USA): *The Norton full line of stock abrasive products*. [Dok. elektr.] <http://hpmvideo.saint-gobain.com/wsi-ab-sga-na/eMagCatalogs/NortonIndustrial/2011/pdf/NortonIndustrial-Catalog7362-2011.pdf> [odczyt: 02.11.2011]
291. Nuslušan M.: *Grinding of Ni-based alloys with grinding wheels of high porosity*. Advances in Production Engineering & Management, 4(2009)1-2, pp. 29-36.
292. Oczóś K.E.: *Obrabiarki do obróbki ściernic i erozyjnej na 9. Wystawie Obrabiarek EMO '91 w Paryżu*. Mechanik, 64(1991)11, s. 375-394.

293. Oczos K.E.: *Narzędzia i obrabiarki do obróbki ścierniej na 10. Wystawie Obrabiarek EMO '93 w Hanowerze*. Mechanik, 67(1994)1, s. 15-20 i 40.
294. Oczos K.E.: *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1996.
295. Oczos K.E.: *Charakterystyka trendów rozwojowych szlifowania ściernicowego*. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Rzeszów-Myczkowce, 2000, s. 13-62.
296. Oczos K.E.: *Materiały, narzędzia i obrabiarki do obróbki ścierniej na EMO 2001 w Hanowerze*. Mechanik, 75(2002)2, s. 69-76.
297. Oczos K.E.: *Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. II. Szlifowanie*. Mechanik, 75(2002)10, s. 627-637.
298. Oczos K.E.: *Doskonalenie techniki szlifowania. Część II*. Mechanik, 78(2005)10, s. 745-750.
299. Oczos K.E., Habrat W.: *Ściernice supertwarde – właściwości, zastosowanie i perspektywy rozwoju*. Mechanik, 80(2007)8-9, s. 595-607.
300. Oczos K.E., Porzycki J.: *Szlifowanie – podstawy i technika*. WNT, Warszawa, 1986.
301. Oczos K.E., Weiss E.: *Technika szlifowania na 12. Światowych Targach Obróbki Metali EMO '97 w Hanowerze*. Mechanik, 70(1997)12, s. 563-573.
302. *Offensive gegen das Hartdrehen. HSP-Schleifen erobert Märkte zurück*. Maschine und Werkzeug., 101(2000)6, s. 26-28.
303. Ogilvy J.A.: *Theory of wave scattering from random rough surfaces*. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, New York, 1991.
304. Okupski T., Herman D., Nadolny K., Walkowiak W.: *Wpływ fazy spinelowej na wybrane właściwości cieplne tworzyw szklanokrystalicznych z układu ZAS*. Materiały Ceramiczne, 64(2012)1, s. 71-77.
305. Okupski T., Herman D., Walkowiak W.: *Otrzymywanie tworzywa szkło-krystalicznego z fazą  $ZnAl_2O_4$  w wyniku eliminacji struktur piroksenowych*. Materiały Ceramiczne, 63(2011)2, s. 379-385.
306. Okupski T., Walkowiak W., Herman D.: *Nowe tworzywa odporne na ścieranie*. XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica, Wydawnictwo AGH, Kraków 2008, s. 270-273.
307. Orlhac X., Jeevanantham M., Krause R., Wu M.: *Abrasive tools having a permeable structure*. US Patent No. 7722691, Patented: 25.05.2010.
308. Pathare S., Gao R., Varghese B., Guo C., Malkin S.: *A DSP based telemetric data acquisition system for in-process monitoring of grinding operation*. IEEE Instrumentation and Measurement Conference, St. Paul, MN, 1998, pp. 191-196.
309. Petit J., Boher P., Leroux T., Barritault P., et al.: *Improved CD and overlay metrology using an optical Fourier transform instrument*. Proceedings of SPIE, 5752(2005), pp. 420-428.
310. Pierson H.O.: *Handbook of carbon, graphite, diamond, and fullerenes: properties, processing, and applications*. William Andrew, Park Ridge, 1993.
311. Placko D.: *Metrology in industry: the key for quality*. London: ISTE Ltd., 2006.

312. Plichta J.: *Ocena trwałości ściernicy metodą fotometrycznego pomiaru stopnia ściernego zużycia jej powierzchni roboczej*. Materiały VII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk, 1984.
313. Plichta J.: *Podstawy szlifowania ściernicami z mikrokrystalicznym ziarnem regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 58, Koszalin, 1996.
314. Plichta J.: *Kierunki rozwoju procesów szlifowania*. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji, 1997, s. 159-162.
315. Plichta J., Bil T.: *Sposób obciążania ściernicy obciążaczem jednoziarnistym*. Patent Nr. 155182, 1992.
316. Plichta J., Nadolny K.: *Budowa i zastosowanie hybrydowych, segmentowych narzędzi ściernych*. Współczesne problemy obróbki ściernej, pod redakcją J. Plichty, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 167. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, s. 87-96.
317. Plichta J., Nadolny K.: *Sposób pomiaru temperatury w procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 387787 z 14.04.2009 r.
318. Plichta J., Nadolny K., Sutowski P., Musiał W.: *Możliwości monitorowania jednoprzęściowego szlifowania otworów za pomocą sygnału emisji akustycznej (EA)*. Podstawy i technika obróbki ściernej, pod redakcją Kazimierza E. Oczosia i Jana Burka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 291-300.
319. Plichta J., Plichta S.: *Metody kształtowania mikronieciągłości na czynnych powierzchniach ściernic*. Materiały XV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów 1992, s. 65-72.
320. Plichta S., Plichta J.: *Wpływ mikronieciągłości czynnych powierzchni ściernic na ich właściwości eksploatacyjne*. Materiały XV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów 1992, s. 73-79.
321. PN-92/M-01002/05 – *Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej. Terminologia podstawowa w procesach szlifowania ściernicami*.
322. Poljanchikov Ju.N., Glebov V.V., Kozhevnikova A.A.: *Sbornyyj abrazivnyjj krug bez svjazki*. STIN, (2003)9, s. 38-39.
323. *Project Altos*. Materiały firmy Norton, 1999.
324. *Project Optimos – Grind in the Fast Line*. Materiały firmy Norton, 1999.
325. Przybylski L.: *Powierzchnia robocza ściernicy kształtowana jednoziarnistym obciążaczem diamentowym*. Monografia nr 3. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1979.
326. Puzyreski R., Sawicki J.: *Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
327. Qu W., Wang K., Miller M. H., Huang Y., Chandra A.: *Using vibration-assisted grinding to reduce subsurface damage*. Precision Engineering, 24(2000), pp. 329-337.
328. *Quickpoint – everything in one clamping*. Materiały informacyjne firmy Erwin Junker Maschinenfabrik GmbH, 1994.
329. Ragheb H., Hancock E.R.: *The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surface analysis*. Pattern Recognition, 40(2007), pp. 2004-2020.

330. Rao B.C., Raj B.: *Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques*. Sadhana (Academy Proceedings in Engineering Sciences), 28(2003), pp. 739-761.
331. Raytek ThermoView Ti30 User's Manual.
332. Retaei S. M., Suto T., Waida T., Noguchi H.: *Creep feed grinding of advanced ceramics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 206(1992), pp. 93-99.
333. Rice S.O.: *Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces*. In: Kline M. Ed., Theory of electromagnetic waves. Wiley-Interscience, New York, 1951.
334. Rowe W. B.: *Principles of modern grinding technology*. William Andrew, Burlington, 2009.
335. Salje E., Riefenstahl J.: *Kuhlmittelzufuhr durch die Schleifscheibe beim Innenrundscheifen*. Industrie-Anzeiger, 104(1982)53, s. 39-40.
336. Salmon S.C.: *The effects of hard lubricant coatings on the performance of electro-plated superabrasive grinding wheels*. Key Engineering Materials 238-239(2003), pp. 283-288.
337. *Sapphire Blue<sup>®</sup> Ceramic Grain*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.hermesabrasives.com/info/sapphireblue.html> [odczyt: 14.01.2012].
338. *Schleifen oder was? Welche Vorteile haben moderne Schleifverfahren?* Maschine und Werkzeug, 102(2001)1-2, s. 14-16.
339. Schultz A.: *Stabilitätsbetrachtung von Schleifprozessen Interaktion von Maschine und Prozess*. 1st European Conference on Grinding. 3. Schleiftechnisches Kolloquium, Aachen, 6-7 November 2003, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 2003, s. 3-1-3-21.
340. Schulz H., Versch A., Fiedler U.: *Process monitoring with mechatronic toolholders*. Production Engineering, 7(2001)2.
341. Shaji S., Radhakrishnan V.: *An investigation on surface grinding using graphite as lubricant*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42(2002), pp. 733-740.
342. Shaji S., Radhakrishnan V.: *Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method*. Journal of Materials Processing Technology, 141(2003)1, pp. 51-59.
343. Shaji S., Radhakrishnan V.: *Application of solid lubricants in grinding: investigations on graphite sandwiched grinding wheels*. Machining Science and Technology, 7(2003)1, pp. 137-155.
344. Sienicki W., Wojtewicz M., Nadolny K.: *Sposób modyfikacji ceramicznych narzędzi ściernych przez impregnację*. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 395441 z 27.06.2011 r.
345. Silliman J.D.: *Cutting and grinding fluids: selection and application*. SME, Dearborn, 1992.
346. Słowiński B., Nadolny K.: *Effective manufacturing method for automated inside diameter grinding*. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 1(2007)4, pp. 472-480.
347. Słowiński B., Nadolny K.: *System approach to the intensification potential for machine-production processes*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 34(2010)1, pp. 45-57.

348. Słowiński B., Nadolny K.: *Metodologia para análise do potencial de otimização de processos*. Máquinas e Metais, 46(2010)536, p. 124-145.
349. Smallman R. E., Bishop R. J.: *Modern physical metallurgy and materials engineering: science, process, applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
350. Smirnov V.A.: *Wear dynamics of discontinuous grinding wheels with elastically damping elements*. Russian Engineering Research 28(2008)11, pp. 1132-1134.
351. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann, Woburn, 2001.
352. Staniewicz-Brudnik B., Majewska-Albin K., Markul J.: *Ściernice ceramiczne z CBN domieszkowane submikrokrystalicznym korundem spiekany*. Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 2003, s. 109-116.
353. Staniewicz-Brudnik B., Nadolny K., Plichta J., Słowik J.: *Badania ściernic z CBN domieszkowanych korundem sferycznym w procesie szlifowania Inconelu*. Przegląd Mechaniczny, (2007)12, s. 28-31.
354. Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K.: *Ściernice wielkoporowe z regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym domieszkowanym korundem sferycznym*. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 36, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, s. 75-82.
355. Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K.: *Badania eksploatacyjne ściernic z regularnego azotku boru domieszkowanych korundem sferycznym*. Obróbka ścierna w technikach wytwarzania, pod redakcją L. Dąbrowskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, s. 72-78.
356. Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K.: *The effect of porous glass-ceramic materials*. Optica Applicata, (2005)4, pp. 810-819.
357. Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K., Pluta J.: *Badanie efektywności szlifowania ściernicami CBN o podwyższonej porowatości z mikroziarnami korundu sferycznego*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 26(2006)2, s. 77-83.
358. Staniewicz-Brudnik B., Procyk B., Majewska-Albin K., Środa M.: *Średniotopliwe spoiwa ceramiczne do narzędzi z regularnego azotku boru domieszkowanych submikrokrystalicznym korundem spiekany*. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, s. 89-96.
359. Stark C.: *Leistungsvermögen und Potentiale verschleißfester Schleifmittel auf Unterlage*. Schleiftechnik im Wettbewerb. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1997, s. 4-1-4-13.
360. Starkov V.K.: *Vysokoporistyjj abrazivnyjj instrument novogo pokolenija*. Vestnik Mashinostroenija, (2002)4, s. 56-62.
361. Starkov V.K.: *Termodinamika vysokoskorostnogo shlifovanija bez primenenija smazочно-okhlazhdajushhikh sredstv*. Vestnik Mashinostroenija, (2002)9, s. 50-55.
362. Steijn R.P.: *On the wear of sapphire*. Journal of Applied Physics, 32(1961)10, pp. 1951-1959.
363. Stephenson D. J., Sun X., Zervos C.: *A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(2006)10, pp. 1053-1063.

364. Stover J.C.: *Optical scattering: Measurement and analysis*. McGraw-Hill, Inc., New York, 1990.
365. Sun Y.: *Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces*. Journal of the Optical Society of America A, 24(2007), pp. 724-744.
366. Super Abrasives (India): *Range of products – internal grinding wheels*. [Dok. elektr.] <http://www.superabrasivesindia.com/internal.htm> [odczyt: 02.11.2011]
367. Susič E., Grabec I.: *Characterization of the grinding process by acoustic emission*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40 (2000)2, pp. 225-238.
368. Suto T., Waida T., Noguchi H., Inoue H.: *High performance creep feed grinding of difficult to machine materials with new-type wheels*. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 24(1990)1, pp. 39-44.
369. Sutowski P., Nadolny K.: *Zastosowanie sygnału emisji akustycznej do oceny przebiegu procesu szlifowania otworów*. Podstawy i technika obróbki ścierniej, pod redakcją A. Gołabczaka i B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź 2010, s. 269-278.
370. Sutowski P., Plichta J.: *An investigation of the grinding wheel wear with the use of root-mean-square value of acoustic emission*. Archive of Civil and Mechanical Engineering, 6(2006)1, pp. 87-98.
371. Sutowski P., Plichta S.: *Zastosowania metody pomiaru emisji akustycznej w ocenie procesów obróbkowych*. Przegląd Mechaniczny, Warszawa (2006)2, s. 20-25.
372. Systec Segments (USA): *Sulfur treatments*. [Dok. elektr.] <http://www.systecsegments.com/faq3.htm#15>. Sulfur Treatments (5-23-06) [odczyt: 02.11.2011]
373. Tawakoli T.: *Hochleistungs-Flaschscheifen. Technologie Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz*. VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
374. Tawakoli T.: *Hochleistungsschleifen (HEDG) von Inconel und anderen Werkstoffen*. VDI-Z., 134(1992)1, s. 48-57.
375. Tawakoli T.: *T-Tool: Ein neues hochabrasives Werkzeugsystem zum Schleifen und Abrichten*. Jahrbuch, Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 58. Ausgabe, 1996, s. 274-280.
376. Taya C.J., Wanga S.H., Quana C., Nga C.K.: *Surface roughness measurement of semiconductor wafers using a modified total integrated scattering model*. Optik, 113(2007), pp. 317-321.
377. Teicher U., Ghosh A., Chattopadhyay A. B., Künanz K.: *On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(2006), pp. 620-622.
378. The dimension of efficiency. Materialy firmy Tyrolit GmbH, 2002.
379. Tian G.Y., Lu R.-S.: *Hybrid vision system for online measurement of surface roughness*. Journal of the Optical Society of America A, 26(2006), pp. 3072-3079.
380. Tiena C.-L., Yanga H.-M., Liu M.-C.: *The measurement of surface roughness of optical thin films based on fast Fourier transform*. Thin Solid Films, 517(2009), pp. 5110-5115.
381. Tönshoff H.K., Friemuth T., Becker J.C.: *Process monitoring in grinding*. Annals of the CIRP, 51(2002)2, pp. 551-571.
382. Tönshoff H. K., Jung M., Männel S., Rietz W.: *Using acoustic emission signals for monitoring of production processes*. Ultrasonics, 37(2000)10, pp. 681-686.



383. Tönshoff H.K., Karpuschewski B., Mandrysch T., Inasaki I.: *Grinding process achievements and consequences on machine tools challenges and opportunities*. Annals of the CIRP, 47(1998)2, pp. 651-668.
384. Troskolański A.T.: *Hydromechanika*. WNT, Warszawa, 1969.
385. Tso P.-L.: *Study on the grinding of Inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology, 55(1995), pp. 421-426.
386. Ueltz H. F. G.: *Abrasive grain*. U.S. Patent No. 3079243, 1963.
387. Uhlmann E.: *Entwicklungsstand von Hochleistungswerkzeugen mit mikrokristalliner Aluminiumoxidkörnung*. Vortrag zum 8. Int. Braun-schweiger Feinbearbeitungskolloquium, 24th-26th April 1996.
388. U.S. Geological Survey: *Mineral commodity summaries, Abrasives (manufactured)*, January 2012.
389. Varghese B.: *Development of a sensor integrated 'intelligent' grinding wheel for in-process monitoring of ceramic grinding*. PhD Thesis, University of Massachusetts, Amherst, 1999.
390. Varghese B., Pathare S., Gao R., Guo C., Malkin S.: *Development of a sensor-integrated "intelligent" grinding wheel for in-process monitoring*. Annals of the CIRP, 49(2000)1, pp. 231-234.
391. Varghese B., Pathare S., Gao R., Malkin S.: *In-process monitoring of truing using a sensor integrated diamond grinding wheel*. Technical Paper. SME, 2002, pp. 1-8.
392. Vernold C.L.: *Surface scatter phenomena: A linear, shift-invariant process*. In: Stover C.J. Ed.: *Scatter from optical components*. Proceedings of SPIE, 1165(1989), pp. 87-99.
393. Vernold C.L., Harvey J.E.: *Comparison of Harvey-Shack scatter theory with experimental measurements*. Proceedings of SPIE, 3141(1997), pp. 128-138.
394. Wakuda M., Inasaki I., Ogawa K., Takahara M.: *Monitoring of the grinding process with an AE sensor integrated CBN wheel*. Journal of Advanced Automation Technology, 5(1993)4, pp. 179-184.
395. Walkowiak W.: *Seminarium Instytutu Mechatroniki Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej*. Koszalin, 22.06.2010.
396. Walkowiak W., Herman D.: *Odporność na zużycie ściernic tworzyw szklanokryształicznych w relacji ze spiekany tlenkiem glinu*. Podstawy i technika obróbki ścierniej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2007, s. 63-70.
397. Walkowiak W., Herman D., Okupski T.: *Relacja pomiędzy odpornością na kruche pękanie spoiw szklanokryształicznych a mechaniczną wytrzymałością statyczną narzędzi ściernych*. Wybrane problemy obróbki ścierniej (red. Cz. Nizankowski), Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, s. 23-32.
398. Wamecke G., Rosenberger U., Milberg J.: *Basics of process parameter selection in grinding of advanced ceramics*. Annals of the CIRP, 44(1995), pp. 283-286.
399. Wang J., Scott W., Zhang L.: *Abrasive technology: current development and applications I*. World Scientific Publishing Co., Singapore, 1999.
400. Wang Z., Willett P., DeAguiar P. R., Webster J.: *Neural network detection of grinding burn from acoustic emission*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41(2001)2, pp. 283-309.

401. Webster J., Brinksmeier E., Heinzl C., Wittmann M., Thoens K.: *Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding*. Annals of the CIRP, 51(2002)1, pp. 235-240.
402. Webster J., Dong W. P., Lindsay R.: *Raw acoustic emission signal analysis of grinding process*. Annals of the CIRP, 45(1996)1, pp. 335-340.
403. Webster J., Marinescu I., Bennett R., Lindsay R.: *Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding*. Annals of the CIRP, 43(1994)1, pp. 299-304.
404. Webster J., Tricard M.: *Innovations in abrasive products for precision grinding*. Annals of the CIRP, 53(2004)2, pp. 597-617.
405. Weck M., Hennes N., Schultz A.: *Dynamic behaviour of cylindrical traverse grinding process*. Annals of the CIRP, 50(2001)1, pp. 213-216.
406. Weinert K., Finke M.: *Innenrund-längsschleifen von Futterteilen – bohrungen in einem überschleiff fertig schleifen*. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, s. 37-44.
407. Weinert K., Finke M., Kötter D.: *Wirtschaftliche Alternative zum Hartdrehen. Innenrund-Schälsschleifen steigert Flexibilität beim Schleifen von Futterteilen*. Maschinenmarkt, 109(2003)48, s. 44-47.
408. Whitehouse D.J.: *Handbook of surface and nanometrology* (2<sup>nd</sup> edition). CRC Press, Boca Raton, 2010.
409. *Wirtschaftlich Schleifen mit SpheroWin*. [Dok. elektr.] Tryb dostępu: <http://www.rappold-winterthur.de/pages/aktuell.php?id=12> [odczyt: 02.02.2012].
410. Wojtewicz M., Sienicki W., Nadolny K.: *Ściernice impregnowane siarką do szlifowania otworów w materiałach trudnoobrabialnych*. Materiały VII Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego oraz III Ogólnopolskiej Konferencji Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych pod redakcją M. Fligla i L. Kukielki, Koszalin, 2010, s. 217-224.
411. Wojtewicz M., Sienicki W., Nadolny K.: *Możliwości modyfikacji narzędzi ściernych poprzez wprowadzenie pierwiastków niemetalicznych w procesie impregnacji*. Materiały VIII Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego oraz IV Ogólnopolskiej Konferencji Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych pod redakcją M. Fligla i L. Kukielki, Koszalin, 2011, s. 339-350.
412. Woźniak K.: *Chemiczne podstawy obróbki ścierniej*. Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 17, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1984.
413. Wu M., Carman L.A., Aspensjö L.: *High speed grinding wheel*. US Patent No. 6047278, Patented 13.07.2000.
414. Wu Q., Merchant F., Castleman K. R.: *Microscope image processing*. Academic Press, Burlington, 2008.
415. Wünsche U., Holl S.-E.: *Leistungsfähiges Schleifen von Wälzlagerringen*. VDI-Z, 2000, nr specjalny IV, s. 49-53.
416. Xingas A.: *Next generation grinding*. American Mechanist, 143(1999)9, pp. 58-64.
417. Xu X., Malkin S.: *Comparison of methods to measure grinding temperatures*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123(2001)2, pp. 191-195.

418. Xu L-M, Xu K-Z, Chai Y-D: *Identification of grinding wheel wear signature by a wavelet packet decomposition method*. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 15(2010), pp. 323-328.
419. Xu X., Yu Y., Huang H.: *Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys*. Wear, 255(2003), s. 1421-1426.
420. Yang X., Liu C.R.: *Machining titanium and its alloys*. Machining Science and Technology., 3(1999)1, pp. 107-139.
421. Yekta Eftekhari B., Alizadeh P., Rezazadeh L.: *Synthesis of glass-ceramic glazes in the ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> system*. Journal of the European Ceramic Society 27(2007), pp. 2311-2315.
422. Żebrowski H.: *Obróbka ścierna – kierunki rozwoju*. Materiały Konferencji Obrabiarkowej KO '96, Warszawa, 1996, s. 123-148.

# **PODSTAWY BUDOWY I EKSPLOATACJI MODYFIKOWANYCH ŚCIERNIC Z ZIARNAMI MIKROKRystalicznego KORUNDU SPIEKANEGO W PROCESACH SZLIFOWANIA OTWORÓW**

## **Streszczenie**

W pracy, w sposób kompleksowy przedstawiono zagadnienia związane z budową, badaniami i eksploatacją ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym, które zostały zmodyfikowane w celu zwiększenia efektywności procesów szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Opisano w niej najważniejsze problemy występujące w tych procesach, elementarne zjawiska towarzyszące eksploatacji ściernic z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekanego i spoiwem ceramicznym oraz scharakteryzowano znane modyfikacje budowy ściernicy wpływające na efektywność szlifowania. Na podstawie tej wiedzy zaproponowano pięć oryginalnych modyfikacji budowy ściernic małogabarytowych: strefowe zróżnicowanie budowy, modyfikację mikrostruktury spoiwa ceramicznego, modyfikację geometrii CPS poprzez kształtowanie jej mikronieciągłości, budowę składaną z systemem odśrodkowego doprowadzenia PCS oraz impregnację ściernicy pierwiastkami niemetalicznymi (siarką i alotropowymi odmianami węgla). Opracowano również rozwiązanie, w którym zintegrowano trzy z wymienionych modyfikacji w jednej ściernicy. Przedstawiono wyniki kompleksowych badań doświadczalnych przeprowadzonych z zastosowaniem ściernic modyfikowanych w procesach szlifowania jednoprzęściowego, prostoliniowo-zwrotnego oraz wgłębnego z oscylacjami walcowych powierzchni wewnętrznych w stali 100Cr6 oraz stopie Titanium Grade 2<sup>®</sup>. Dokonano oceny efektywności tych procesów, prowadzonych z użyciem ściernic modyfikowanych w porównaniu ze ściernicami referencyjnymi – bez modyfikacji. Wykazano, że możliwe jest skuteczne wpływanie na intensywność i wzajemny udział zjawisk elementarnych, wywołujących proces zużycia ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego, poprzez modyfikowanie budowy ściernicy w celu zwiększenia stopnia wykorzystania potencjału skrawnego tego ścierniwa. W końcowej części pracy przedstawiono możliwości monitorowania procesów szlifowania otworów ściernicami modyfikowanymi z zastosowaniem bezstykowego systemu emisji akustycznej, umożliwiającego nadzorowanie procesu w produkcji seryjnej, w celu zachowania wysokiej jakości przedmiotu obrobionego i powtarzalności wyników obróbki.

# **BASIS OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF THE MODIFIED GRINDING WHEELS WITH MICROCRYSTALLINE SINTERED CORUNDUM GRAINS IN THE INTERNAL CYLINDRICAL GRINDING PROCESSES**

## **Abstract**

The work presents in a comprehensive manner issues related to construction, investigation and operation of the grinding wheels with microcrystalline sintered corundum grains and vitrified bond, which have been modified to increase the efficiency of internal cylindrical grinding processes. In this work were described the most important problems encountered in these processes, elemental phenomena of operation of the grinding wheels with sol-gel alumina and vitrified bond and were characterized known modifications of the grinding wheel construction affects grinding efficiency. Based on this knowledge, five original modifications of the small-size grinding wheels structure have been proposed: zone-diversified structure, modification of microstructure of the vitrified bond, modification the grinding wheel active surface geometry by shaping its microdiscontinuities, sandwich structure with internal cooling liquid supply system and impregnation of the grinding wheel by non-metallic elements (sulfur and allotropic forms of carbon). There was also described that construction that integrates three of the modifications in a single grinding wheel. The results of comprehensive experimental investigations conducted with the modified grinding wheels in the traverse, reciprocating and plunge internal cylindrical grinding of the 100Cr6 steel and Titanium Grade 2<sup>®</sup> alloy. An evaluation of the effectiveness of the processes carried out with modified grinding wheels compared to the reference wheels – without modifications. It was proved, that it is possible to effectively influence the intensity and reciprocal participation of the elementary phenomena that cause wear process of microcrystalline sol-gel alumina, by modifying construction of the grinding wheel in order to increase the utilization degree of the abrasive potential of this grains. The final part present the possibility of monitoring the internal cylindrical grinding processes conducted with modified grinding wheels using a non-contact acoustic emission system, enabling monitoring the process in mass production, in order to maintain the high quality of the grinded surface and repeatability of machining results.