

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI

mgr inż. Krzysztof Nadolny

BADANIA EFEKTYWNOŚCI PROCESU
JEDNOPRZEJŚCIOWEGO SZLIFOWANIA OTWORÓW
ŚCIERNICAMI O STREFOWO ZRÓŻNICOWANEJ BUDOWIE

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Jarosław Plichta

Profesor Politechniki Koszalińskiej

Koszalin 2006

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych symboli i akronimów	4
1. WPROWADZENIE	8
2. ANALIZA LITERATURY	10
2.1 Procesy szlifowania jednoprzęściowego i narzędzia do ich realizacji	10
2.1.1 Szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (CPCG/Peelgrinding/HSP).....	14
2.1.2 CPCG ze zredukowanym stykiem ściernicy (Quickpoint)	18
2.1.3 Szlifowanie wzdłużne otworów w jednym przejściu.....	21
2.1.4 Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym (CFG).....	23
2.1.5 Szlifowanie wzdłużne wałków ściernicami z materiałów konwencjonalnych	26
2.2 Ocena efektywności procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów	31
2.3 Wnioski z analizy literatury.....	37
3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	40
4. MODEL SYMULACYJNY PROCESU JEDNOPRZEJŚCIOWEGO SZLIFOWANIA OTWORÓW.....	42
4.1 Struktura modelu	44
4.1.1 Modelowanie topografii ziaren ściernych.....	44
4.1.2 Modelowanie topografii CPS	46
4.1.3 Model kinematyczny	48
4.1.4 Model kształtowania topografii powierzchni	50
4.2 Symulacja procesu szlifowania jednoprzęściowego otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie	51
4.2.1 Cel, zakres i warunki symulacji.....	53
4.2.2 Wyniki symulacji.....	53
4.3 Wnioski.....	56
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE.....	58
5.1 Cel i zakres badań.....	59
5.2 Metodyka badań	61
5.2.1 Badania rozpoznawcze	62
5.2.2 Badania właściwe	66
5.3 Stanowisko badawcze.....	70
5.4 Przyrząd do kształtowania makrogeometrii CPS.....	71
5.5 Narzędzia ściernicze.....	74
5.6 Parametry i warunki badań	80
5.7 Stanowiska pomiarowe.....	85
5.7.1 Stanowisko do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni	85
5.7.2 Stanowiska do pomiaru mikrotopografii powierzchni.....	88

5.7.3	Stanowisko do pomiaru błędów kształtu elementów obrotowych.....	90
5.7.4	Stanowisko do pomiaru temperatury w strefie szlifowania	92
5.8	Wyniki badań rozpoznawczych i ich analiza.....	94
5.8.1	Prędkość obwodowa narzędzia ściernego v_s	94
5.8.2	Prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego v_w	97
5.8.3	Styk roboczy a_e	101
5.8.4	Prędkość posuwu osiowego stołu v_{fa}	103
5.8.5	Kąt nakroju stożkowego χ	106
5.8.6	Parametry kształtowania CPS.....	110
5.8.7	Temperatura Θ_p	117
5.8.8	Zużycie narzędzi ściernych	120
5.8.9	Ocena efektywności szlifowania	130
5.9	Wnioski z badań rozpoznawczych.....	133
5.10	Wyniki badań właściwych i ich analiza.....	138
5.10.1	Wpływ zmiany styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego v_{fa}	138
5.10.2	Zużycie narzędzi ściernych	150
5.10.3	Ocena efektywności szlifowania	154
5.11	Wnioski z badań właściwych.....	158
6.	WNIOSKI KOŃCOWE	162
6.1	Wnioski poznawcze	162
6.2	Wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy	165
6.3	Wnioski dotyczące dalszych badań	165
	Bibliografia	169

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW

Symbole

a_d	– amplituda drgań [μm]
a_e	– styk roboczy [mm]
$a_{e\ cat}$	– całkowity styk roboczy [mm]
$a_{e\ ef}$	– efektywny styk roboczy [mm]
a_{ed}	– styk roboczy obciążania [mm]
a_f	– styk posuwowy [mm]
a_z	– zagłębienie ziarna w materiał obrabiany [μm]
A_D	– przekrój poprzeczny warstwy skrawanej [mm^2]
A_{Dz}	– przekrój poprzeczny warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem [μm^2]
A_w	– pole powierzchni przeszlifowanej [mm^2]
A_{wy}	– pole powierzchni wypływek [mm^2]
b	– szerokość nakroju stożkowego ściernicy [mm]
b_d	– czynna szerokość ostrza obciążacza [mm]
b_k	– szerokość kontaktu modelu ziarna ściernego z modelem materiału obrabianego [μm]
b_w	– szerokość przedmiotu obrabianego [mm]
d_w	– średnica przedmiotu obrabianego [mm]
D	– średnica zewnętrzna ściernicy [mm]
Dec_{sk}	– decyzja dotycząca typu kontaktu modelu ziarna ściernego z modelem materiału obrabianego
D_{eq}	– równoważna średnica ściernicy [mm]
E_s	– efektywność szlifowania [$\text{mm}^3/\text{W}\cdot\text{s}$]
f_d	– posuw obciążania [mm/obr.]
f_r	– posuw promieniowy stołu [mm]
F_p, F_n	– składowa normalna siły szlifowania, siła nacisku ściernicy na PO [N]
F_p^*	– składowa normalna siły szlifowania mierzona przy pierwszym przejściu wyiskrzającym [N]
F_{pz}	– składowa normalna siły szlifowania przypadająca na jedno ziarno ściernicy [N]
F_t	– siła styczna szlifowania [N]
G	– wskaźnik szlifowania
$h_{cu\ eq\ ef}$	– efektywna równoważna grubość przekroju poprzecznego warstwy skrawanej [mm]
h_k	– głębokość kontaktu modelu ziarna ściernego z modelem materiału obrabianego [μm]
H	– średnica otworu ściernicy [mm]
H_{sr}	– średnia wartość głębokości nierówności wzorca zmierzona z profilogramu [μm]
H_w	– głębokość nierówności atestowanego wzorca kontrolnego [μm]
i_d	– liczba przejść obciążających
i_{ks}	– numer etapu symulacji
j	– liczba wykonanych przedmiotów [szt./s]
k_d	– wskaźnik pokrycia przy obciążaniu

K	– syntetyczny wskaźnik zdolności skrawnej narzędzia ściernego [$\text{mm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$]
K_c	– koszty całkowite szlifowania [zł]
K_d	– koszty jednego cyklu diamentowania [zł]
K_{lc}	– krytyczny współczynnik intensywności naprężeń [GPa]
K_{ob}	– koszty stałe związane z obsługą szlifierki [zł]
K_s	– koszty wytworzenia ściernicy odniesione do jej objętości użytecznej [$\text{zł}/\text{mm}^3$]
K_{st}	– koszty stałe [zł]
K_{zm}	– koszty zmienne [zł]
l	– długość odcinka elementarnego przy pomiarze profilu chropowatości powierzchni [mm]
l_g	– długość geometrycznego styku ściernicy i przedmiotu obrabianego [mm]
l_k	– długość kinematycznego styku ściernicy i przedmiotu obrabianego [mm]
l_n	– długość odcinka pomiarowego przy pomiarze profilu chropowatości powierzchni [mm]
L_{gsk}	– elementarny odcinek drogi przedmiotu w strefie szlifowania [μm]
L_{fask}	– elementarny odcinek drogi ściernicy w strefie szlifowania wynikający z posuwu osiowego [μm]
n_d	– prędkość obrotowa obciągacza [obr./min]
n_s	– prędkość obrotowa ściernicy [obr./min]
n_{sd}	– prędkość obrotowa ściernicy przy obciąganiu [obr./min]
n_w	– prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr./min]
N_{kin}	– liczba ostrzy kinematyczna [szt.]
N_a	– liczba ziaren aktywnych [szt.]
P	– moc prądu wrzeczona ściernicy [W]
P_c	– moc szlifowania [W]
P'_{sc}	– właściwa moc szlifowania [$\text{W}\cdot\text{s}/\text{mm}^2$]
P_{sk}	– prawdopodobieństwo skrawania danym ziarnem w procesie symulacji
$P+V$	– maksymalna odchyłka okrągłości (Δ) [μm]
q	– stosunek prędkości v_s/v_w
Q_{CCS}	– wydatek cieczy chłodząco-smarującej [l]
Q_d	– masa kryształu diamentu obciągacza [kr]
Q_w	– wydajność ubytkowa szlifowania [mm^3/s]
Q'_w	– właściwa wydajność ubytkowa szlifowania [$\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$]
$Q'_{w\text{ef}}$	– efektywna właściwa wydajność ubytkowa szlifowania [mm^3/s]
r	– promień krzywizny wierzchołka ostrza odwzorowującego profilometru [μm]
rms	– średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego [μm]
r_z	– promień zarysu strefy szlifowania zgrubnego ściernicy [mm]
R_a	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości [μm]
R_m	– maksymalna wysokość profilu chropowatości [μm]
R_z	– wysokość profilu chropowatości wg 10 punktów [μm]
S	– średni odstęp miejscowych wzniesień profilu chropowatości [μm]
S_a	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni [μm]

S_{ci}	– wskaźnik gromadzenia środka smarnego w rdzeniu
S_{ds}	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni [mm^{-2}]
S_m	– średni odstęp profilu chropowatości [μm]
S_{vi}	– wskaźnik gromadzenia środka smarnego we wgłębieniach
S_z	– dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni [μm]
$S_{\Delta q}$	– średnie kwadratowe pochylenie powierzchni
t	– czas szlifowania [min]
t_p	– udział nośny profilu chropowatości
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 szlifowaniu powierzchni walcowych z posuwem osiowym (liczba przeszlifowań)
v_c	– prędkość skrawania [m/s]
v_{fa}	– prędkość posuwu osiowego stołu [m/s]
v_{fad}	– prędkość posuwu osiowego przy obciążaniu [mm/s]
v_{ft}	– prędkość posuwu stycznego stołu [m/s]
v_{fr}	– prędkość posuwu promieniowego stołu [m/s]
v_s	– prędkość obwodowa ściernicy [m/s]
v_{sd}	– prędkość obwodowa ściernicy przy obciążaniu [m/s]
v_w	– prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego [m/s]
V	– prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego profilometru [mm/s]
V_s	– zużycie objętościowe ściernicy [mm^3]
V_w	– ubytek materiału [mm^3]
V_x	– powiększenie poziome profilu
V_y	– powiększenie pionowe profilu
X_{ss}	– położenie przekroju w strefie szlifowania
Z_{ij}	– numer ziarna na modelu czynnej powierzchni ściernicy
α_k	– kąt nachylenia osi ściernicy do osi przedmiotu obrabianego [$^\circ$]
χ	– kąt stożkowej strefy szlifowania zgrubnego ściernicy [$^\circ$]
δ_v	– błąd powiększenia pionowego profilogramu [%]
Δ	– maksymalna odchyłka okrągłości ($P+V$) [μm]
Δ_a	– średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości
Δ_k	– odchyłka kształtu [μm]
ΔP	– przyrost mocy prądu elektrownicy ściernicy [W]
ΔV_w	– ubytek materiału zeszlifowanego w okresie trwałości ściernicy [mm^3]
ε	– emisyjność obiektu
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
θ	– temperatura szlifowania [$^\circ\text{C}$]
θ_p	– temperatura kontaktowa w strefie szlifowania [$^\circ\text{C}$]

Akronimy

- AFC – *Abbott-Firestone Curve* – krzywa nośności Abbota-Firestone’a
- CBN – *Cubic Boron Nitride* – regularny azotek boru
- CD-CFG – *Continuous Dressing Creep Feed Grinding* – CFG z ciągłym obciążaniem
- CFG – *Creep Feed Grinding* – szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym
- CNC – *Computer Numeric Control* – komputerowe sterowanie numeryczne
- CPCG – *Continuous Path Controlled Grinding* – szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy
- CPS – czynna powierzchnia ściernicy
- DCG – *Deep Cut Grinding* – szlifowanie głębokie
- EA – emisja akustyczna
- MMOB – model matematyczny obiektu badań
- HEG – *High Efficiency Grinding* – szlifowanie wysokowydajne
- HEDG – *High Efficiency Deep Grinding* – głębokie szlifowanie wysokowydajne
- HRC – twardość wg Rockwella w skali C
- HSG – *High Speed Grinding* – szlifowanie szybkościowe (z dużą prędkością obwodową ściernicy)
- HSP – *High Speed Peelgrinding* – szybkościowe szlifowanie wzdłużno-kształtowe
- OUPN – obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie
- PO – przedmiot obrabiany
- PSD – *Power Spectrum Density* – gęstość widmowa mocy
- SCGC – *Symmetrical Curve of Geometrical Contact* – symetryczna krzywa geometrycznego styku
- SE – system ekspertowy
- SFG – *Speed Feed Grinding* – szlifowanie z dużą prędkością posuwu
- SG – *Seeded Gel* – mikrokrystaliczny korund spiekany wytwarzany metodą zarodkowania w żelu
- SGP – struktura geometryczna powierzchni
- SSN – sztuczna sieć neuronowa
- WJ – wskaźnik jakościowy oceny efektywności szlifowania
- WP – wskaźnik przebiegu procesu służący do oceny efektywności szlifowania
- WS – wskaźnik syntetyczny oceny efektywności szlifowania
- WW – wskaźnik wydajnościowy oceny efektywności szlifowania
- WWPO – warstwa wierzchnia przedmiotu obrabianego

1 WPROWADZENIE

W nowoczesnych procesach wytwarzania występuje ciągła tendencja do wzrostu dokładności wymiarów, kształtu i jakości warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych oraz dążenie do ograniczenia kosztów poprzez zwiększenie wydajności i skrócenie czasu obróbki. Możliwości podniesienia wydajności operacji poprzez wzrost wartości parametrów obróbki są jednak ograniczone. Dotyczy to zwłaszcza procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych (otworów), w którym zwiększanie wartości parametrów obróbki jest ograniczone sztywnością dynamiczną wrzecion narzędziowych szlifierek oraz wytrzymałością narzędzi ściernych.

Wobec tego poszukuje się różnego rodzaju modyfikacji, które pozwolą ominąć ww. ograniczenia. Wśród wielu innowacyjnych rozwiązań, duże nadzieje wiąże się z jednoprzęściowymi procesami szlifowania, w których cały naddatek obróbkowy usuwany jest w jednym przejściu narzędzia ściernego. Szczególnie korzystne w tym kontekście wydaje się szlifowanie ściernicami z nakrojem stożkowym ukształtowanym w ich części atakującej. Umożliwia ono rozdzielenie funkcji szlifowania zgrubnego i wykończeniowego na dwie strefy. Dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu nakroju stożkowego w stosunku do grubości naddatku obróbkowego uzyskuje się bardzo szeroką strefę szlifowania zgrubnego, co zapewnia znaczne zwiększenie wydajności obróbki w porównaniu z konwencjonalnym procesem szlifowania.

Dotychczas w procesach tego typu wykorzystywane były drogie supertwarde narzędzia ściernie z regularnego azotku boru (CBN), wymagające specjalizowanych szlifierek o dużej sztywności oraz dużych prędkości szlifowania ($v_s > 60$ m/s). Ponieważ ogólne koszty realizacji takiego procesu są relatywnie wysokie, oczekuje się opracowania nowych konstrukcji ściernic ze znacznie tańszych ziaren, które można by z powodzeniem stosować w konwencjonalnych szlifierkach do otworów.

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania innowacyjnych narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie, w których ziarna korundu zostają odpowiednio dobrane, pod względem wymiarów i rodzaju, do warunków pracy w strefie skrawania i wygładzania. Poszukiwano również najkorzystniejszego udziału obu tych stref w całkowitej wysokości narzędzia ściernego. W tym celu opracowano model symulacyjny jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów, umożliwiający opis warunków pracy ziaren aktywnych w strefie skrawania i wygładzania, a także opis mechanizmu kształtowania topografii powierzchni obrabianej dla zadanej struktury geometrycznej czynnej powierzchni narzędzia ściernego. Wyniki badań symulacyjnych posłużyły do określenia zakresu zmienności parametrów opisujących budowę ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie. Narzędzia te zostały wykonane w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej, a technologia ich wytwarzania podlega ochronie patentowej.

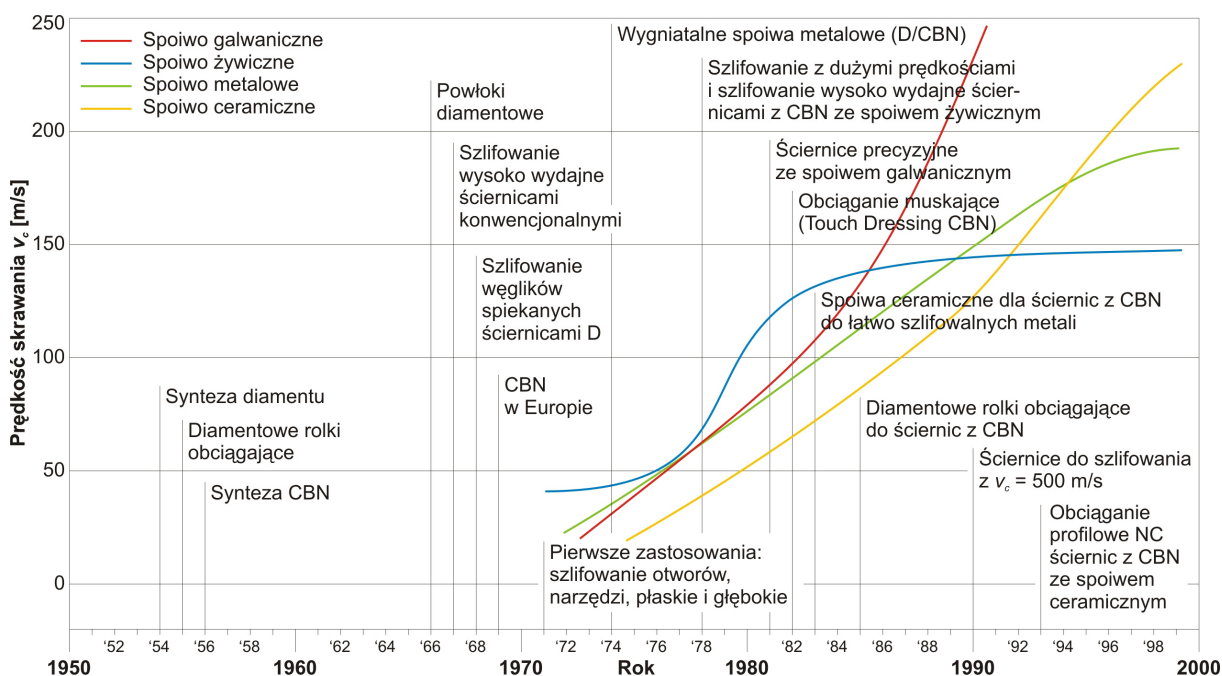
Na podstawie badań doświadczalnych ustalono warunki i parametry procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów zapewniające wysoką efektywność oraz jakość powierzchni obrabianej. Wyniki tych badań odniesiono do narzędzi konwencjonalnych stosowanych w warunkach przemysłowych w produkcji pierścieni łożysk tocznych. Określono również okres trwałości badanych ściernic, a także opracowano metodykę procesu obciążania wraz z konstrukcją specjalnego przyrządu umożliwiającego precyzyjne kształtowanie nakroju stożkowego na części atakującej ściernicy.

Wyniki przeprowadzonych symulacji oraz badań doświadczalnych były przedmiotem konsultacji z przedstawicielami przemysłu łożyskowego i stanowią podstawę do wdrożenia nowych rozwiązań w warunkach produkcyjnych. Pozwoliły one również wytyczyć kierunki kolejnych prac zmierzających do rozszerzenia potencjalnych zastosowań metody jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie oraz dalszego wzrostu wydajności ubytkowej procesu przy zapewnieniu wysokiej jakości obrabianych powierzchni.

2 ANALIZA LITERATURY

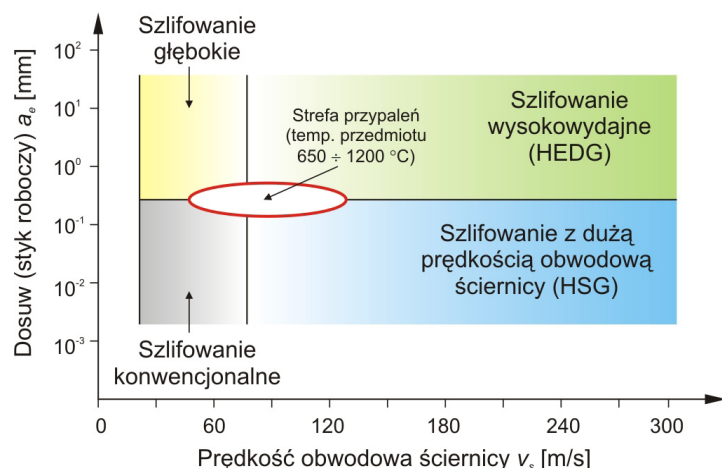
2.1 Procesy szlifowania jednoprzęściowego i narzędzia do ich realizacji

Procesy szlifowania jednoprzęściowego stanowią jeden z najnowszych trendów rozwojowych obróbki ścierniej. Ich istota polega na usuwaniu całego nadmiaru obróbkowego w jednym przejściu narzędzia ściernego, przy jednoczesnym zachowaniu żądanej jakości warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (WWPO). Rozwój procesów jednoprzęściowych związany był z upowszechnieniem ściernic z materiałów supertwardych, takich jak diament (D), czy regularny azotek boru (*Cubic Boron Nitride* – CBN), oraz stosowaniem podwyższonych i wysokich prędkości szlifowania. Historyczne ujęcie rozwoju technologii szlifowania z użyciem supertwardych materiałów ściernych przedstawiono na rys. 2-1.



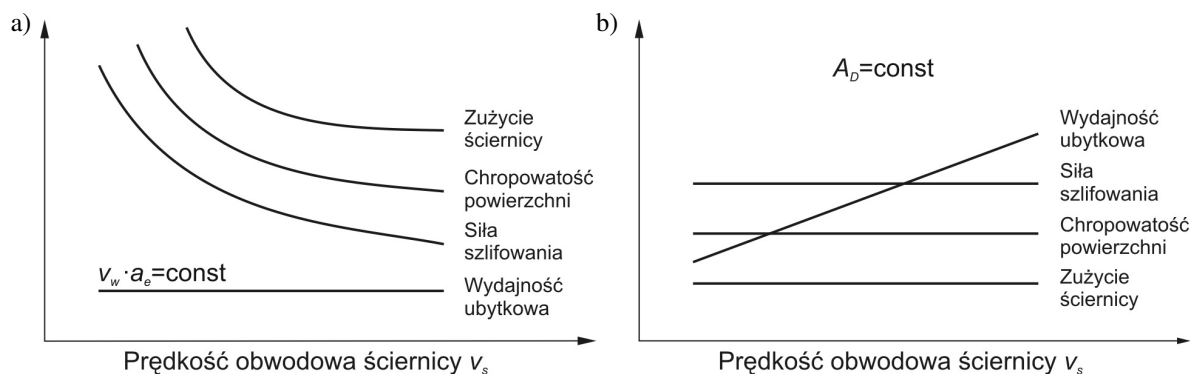
Rys. 2-1. Rozwój technologii szlifowania z użyciem supertwardych materiałów ściernych (D – diament, CBN – regularny azotek boru) [OCZ02]

Obecnie stosowane procesy jednoprzęściowe, ze względu na uzyskiwane w nich właściwe wydajności ubytkowe, można zaliczyć do procesów szlifowania wysoko wydajnego (*High Efficiency Grinding* – HEG), przy stosowaniu zwiększonych głębokości szlifowania, nazywanego również wysoko wydajnym szlifowaniem głębokim (*High Efficiency Deep Grinding* – HEDG). Proces ten rozwinął się z połączenia szlifowania z dużymi prędkościami i szlifowania głębokiego. Jego umiejscowienie w odniesieniu do parametrów procesu przedstawiono na rys. 2-2. Podział ten jest aktualny dla materiałów dobrze szlifowalnych, korzystnych warunków chłodzenia i smarowania oraz ściernic z CBN.



Rys. 2-2. Przybliżone rozgraniczenie metod szlifowania w odniesieniu do dosuwu (styku roboczego) a_e i prędkości obwodowej ściernicy v_s [WER97]

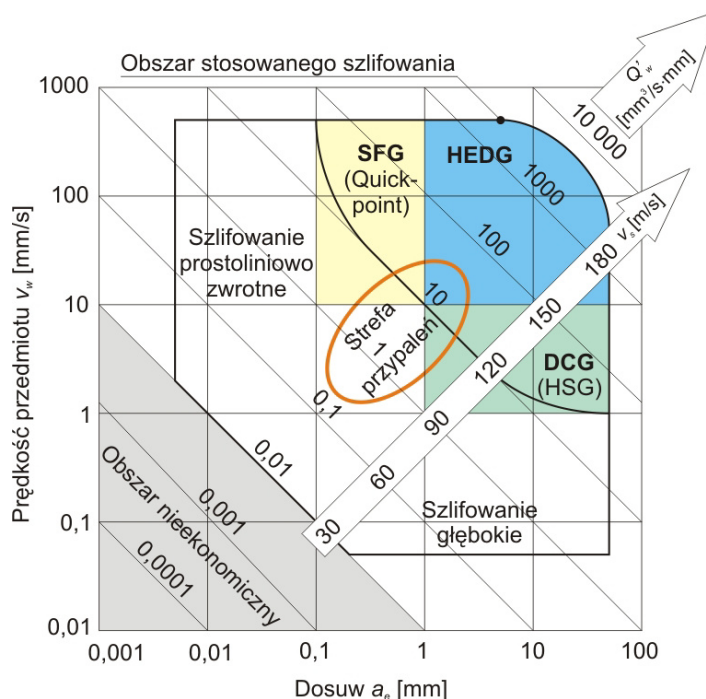
Poprzez modyfikację parametrów szlifowania konwencjonalnego wyodrębniono metody szlifowania głębokiego oraz szlifowania z dużą prędkością obwodową ściernicy (HSG). W metodzie szlifowania głębokiego najistotniejszym parametrem jest wysoka wydajność obróbki, uzyskiwana poprzez stosowanie dużych wartości dosuwu (styku roboczego) i niewielkich prędkości przedmiotu (prędkości posuwu stycznego lub osiowego) oraz małej do średniej prędkości obrotowej narzędzia ściernego. W przypadku szlifowania szybkościowego (HSG) najistotniejszą modyfikacją jest znaczne zwiększenie prędkości szlifowania, dzięki czemu można osiągać poprawę jakości obrabianej powierzchni przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia ściernicy lub wzrost wydajności przy zachowaniu wymaganej jakości (rys. 2-3) [OCZ00, KLO97].



Rys. 2-3. Efekty szlifowania z dużą prędkością obwodową ściernicy (HSG) w przypadku: a) stałej wydajności ubytkowej (v_w – prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego, a_e – styk roboczy); b) stałego przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_D [KLO97]

Z połączenia obu tych odmian rozwinęło się w latach osiemdziesiątych szlifowanie wysoko wydajne (HEDG – *High Efficiency Deep Grinding*). W metodzie tej stosuje się znaczne prędkości szlifowania (dochodzące do 200 m/s i powyżej) oraz duże wartości dosuwów (0,5 ÷ ~25 mm) [MAS93, OCZ97, OCZ00, OCZ05, TAW92, OPT92, WER94]. Dzięki temu możliwe staje się uzyskanie wydajności ubytkowej rzędu 50 ÷ 300 mm³/s·mm, a w skrajnych przypadkach nawet do 2000 mm³/s·mm. Można zatem szlifowanie wysoko wydajne rozumieć jako szlifowanie głębokie z dużą prędkością obwodową ściernicy (prędkością szlifowania) [OCZ97, OCZ00, OCZ05].

Na rys. 2-4 przedstawiony został podział metod szlifowania w odniesieniu do styku roboczego a_e , prędkości przedmiotu v_w , prędkości szlifowania v_s , a także właściwych wydajności ubytkowych szlifowania Q'_w dla materiałów dobrze szlifowalnych oraz zoptymalizowanych warunków poszczególnych procesów.



Rys. 2-4. Rozgraniczenie szlifowania wysoko wydajnego (HEDG) odniesione do właściwych wydajności ubytkowych Q'_w (ważne dla dobrze szlifowalnych materiałów i zoptymalizowanych warunków procesu szlifowania): HEDG – *High Efficiency Deep Grinding*, DCG – *Deep Cut Grinding*, HSG – *High Speed Grinding*, SFG – *Speed Feed Grinding*, v_s – prędkość szlifowania [WER97]

Na przedstawionym schemacie wyróżnić można cztery obszary operacyjne, szczególnie istotne z punktu widzenia praktyki szlifowania.

Pierwszy obszar, obejmujący małe wartości dosuwu oraz małą prędkość przedmiotu, nie pozwala na uzyskiwanie właściwej wydajności ubytkowej na odpowiednio wysokim poziomie ($Q'_w < 0,01 \text{ mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$), przez co proces szlifowania nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego.

Drugi obszar to zestawienie małych wartości dosuwu z dużą prędkością przedmiotu, w którym występuje konwencjonalne szlifowanie prostoliniowo-zwrotne płaszczyzn i zewnętrzne szlifowanie walcowe z dużą prędkością obwodową przedmiotu. Poprzez rozszerzenie opisywanego pola w kierunku średnich wartości dosuwu można osiągnąć obszar podwyższonych wartości wydajności ubytkowych (zakres $50\div 150 \text{ mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$), definiowany jako *Speed Feed Grinding* (SFG). Ta odmiana procesu szlifowania w istocie jest zmodyfikowanym procesem HEDG. Przy dużej prędkości przedmiotu (v_w wynosi $10\div 200 \text{ mm/s}$) dosuw przyjmuje wartości średnie do małych (a_e w granicach $0,1\div 1,0 \text{ mm}$). Tego rodzaju warunki można realizować podczas osiowego zewnętrznego szlifowania walcowego wzdłużnego w jednym przejściu ściernicami z CBN. Procesy tego typu określane są jako szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (*Continuous Path Controlled Grinding* – CPCG) lub jako szlifowanie wzdłużno-kształtowe (złuszczające) – *Peelgrinding*. Jedną z ich odmian tego procesu jest metoda „Quickpoint”, w której szlifowanie realizowane

jest ze zredukowanym stykiem ściernicy. Na granicy tego obszaru ($a_e=0,1$ mm) znajdują się również jednoprzęściowe procesy osiowego zewnętrznego szlifowania walcowego wzdłużnego ściernicami z materiałów konwencjonalnych. Narzędzia takie charakteryzują się specjalnie ukształtowaną makrogeometrią czynnej powierzchni ściernicy (CPS) lub budową warstwową.

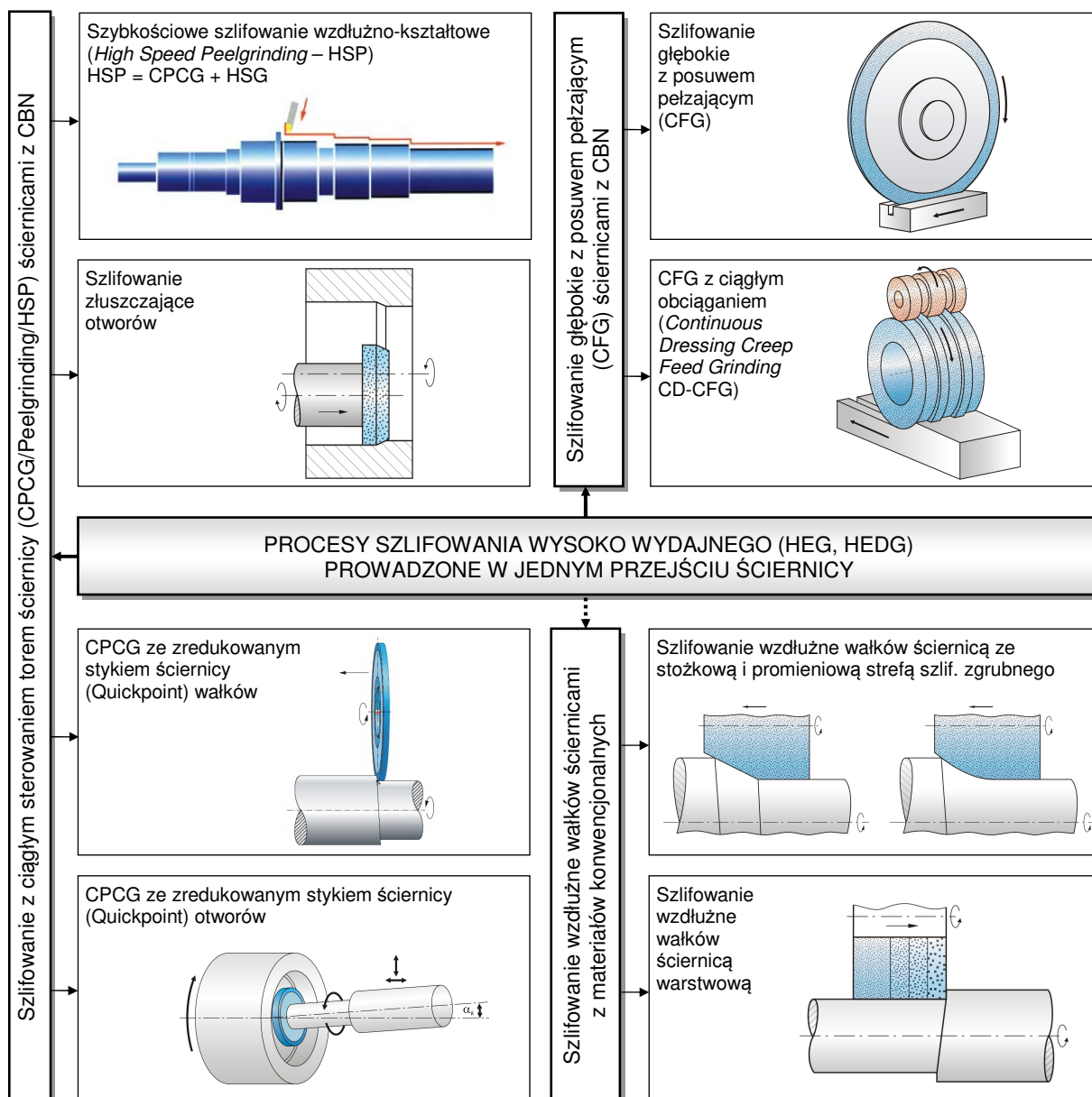
Trzeci obszar to kombinacja dużego dosuwu i małej prędkości przedmiotu, czyli konwencjonalne szlifowanie głębokie oraz zewnętrzne szlifowanie walcowe z małą prędkością obwodową przedmiotu. W kierunku średnich prędkości przedmiotu znajduje się pole podwyższonych właściwych wydajności ubytkowych ($50\div 150$ mm³/s·mm), które definiowane jest nazwą *Deep Cut Grinding* (DCG), względnie *High Speed Grinding* (HSG). Szlifowanie takie również stanowi odmianę HEDG, ponieważ jest to szlifowanie wysoko wydajne, w którym duże wartości dosuwu (a_e wynosi $1\div 25$ mm) idą w parze z małą do średniej prędkością przedmiotu (v_w w granicach $1\div 10$ mm/s). Realizowane w tym obszarze procesy jednoprzęściowe, określane są często jako szlifowanie z posuwem pełzającym (*Creep Feed Grinding* – CFG).

Ostatnia z czterech wyróżnionych stref to połączenie dużych wartości dosuwu z dużymi prędkościami przedmiotu. Tutaj znajduje się właściwy proces szlifowania wysoko wydajnego (HEDG). W obszarze tym uzyskiwane są i stosowane w praktyce bardzo duże wartości właściwych wydajności ubytkowych szlifowania ($Q'_w=150\div 2000$ mm³/s·mm).

Z opisanego schematu wynika, że przy realizacji większej wydajności ubytkowej należy w praktyce również zawsze stosować większe prędkości szlifowania (prędkości obwodowe ściernicy).

Na uwagę zasługuje także umiejscowiona w zakresie średnich wartości dosuwu, prędkości przedmiotu i prędkości szlifowania, strefa przypaleń. W polu tym występuje podwyższona temperatura przedmiotu ($650\div 1200$ °C) powodująca defekty powierzchni przedmiotu obrabianego. Strefę tę można ominąć np. poprzez podwyższenie prędkości obwodowej narzędzia ściernego. Powyżej $v_s \approx 140$ m/s skrajnie wysoka prędkość tworzenia wióra oraz jednocześnie duża prędkość posuwu pozwalają na pozostanie wytwarzanego ciepła w głównej mierze w wiórze, przez co nie przenika ono do przedmiotu szlifowanego [OCZ97, OCZ00, WER97].

Zestawienie najważniejszych wysoko wydajnych procesów szlifowania prowadzonych w jednym przejściu ściernicy przedstawiono na rys. 2-5.

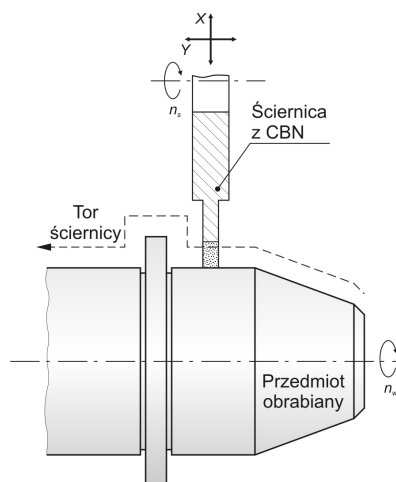


Rys. 2-5. Zestawienie najważniejszych wysoko wydajnych procesów szlifowania (HEG, HEDG) prowadzonych w jednym przejściu ściernicy (linią przerywaną połączono te procesy, które umiejscowione są na granicy obszaru szlifowania wysoko wydajnego)

2.1.1 Szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (CPCG/Peelgrinding/HSP)

Szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy – CPCG (*Continuous Path Controlled Grinding*) nazywane również szlifowaniem wzdłużno-kształtowym (złączającym), wałków (*peelgrinding*) lub wzdłużnym szlifowaniem kształtowym (*traverse contour grinding*), charakteryzuje się dużą elastycznością, przez co stanowi alternatywę dla toczenia na twardo [FRI04, HEG00, KLO99, LUE04, LÜT01, MUS97, OCZ00, OCZ05, OFF00, SCH01, XIN99]. W przypadku, gdy proces ten jest realizowany z dużą prędkością obwodową ściernicy, określany jest jako CPCG-HSG lub HSP (*High Speed Peelgrinding*).

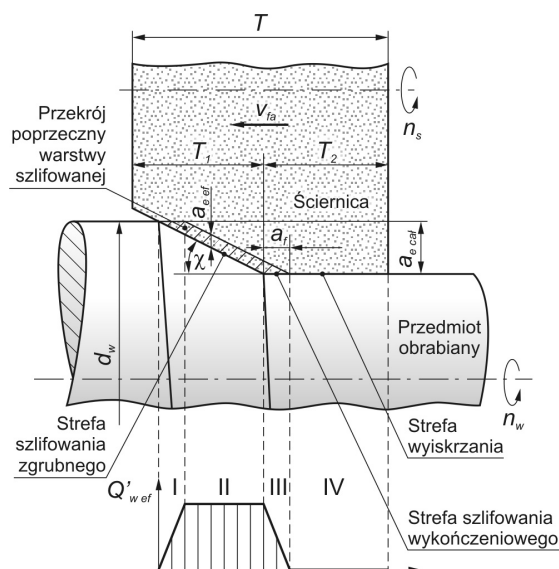
W metodzie HSP kontur przedmiotu kształtowany jest za pomocą sterowanego numerycznie szlifowania wzdłużno-kształtowego wałków z użyciem wąskiej ściernicy z CBN wirującej z dużą prędkością obwodową v_s , dochodzącą do 200 m/s (rys. 2-6).



Rys. 2-6. Istota procesu szlifowania z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (CPCG) [KLO96A, KLO99]

Całkowity naddatek obróbkowy, rzędu kilku dziesiątych milimetra (np. $0,2 \div 0,5$ mm), zostaje usunięty w jednym przejściu ściernicy. Dzięki temu w jednym zamocowaniu przedmiotu można przeprowadzić kompletną obróbkę zewnętrzną przedmiotu, przy czym szlifowanie zgrubne i wykończeniowe, realizowane są równocześnie. Dodatkową zaletą opisywanego procesu, w porównaniu do obwodowego szlifowania węgłnego ściernicą profilową, jest zwiększenie elastyczności procesu, zmniejszenie sił szlifowania oraz ograniczenie obciążenia cieplnego poprzez zredukowanie powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym [OCZ00, OCZ05].

W procesie CPCG stosuje się wąskie narzędzia ściernic z CBN, najczęściej o wysokości rzędu kilku milimetrów i średnicy $300 \div 400$ mm, z walcową lub stożkowo-walcową powierzchnią czynną, które usuwają cały naddatek obróbkowy w jednym przejściu. Ściernice ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego charakteryzują się podziałem na dwie podstawowe strefy: obszar szlifowania zgrubnego o szerokości 2 do 5 mm oraz strefę obróbki wykończeniowej i wyiskrzania szerokości 2 mm [HEG00, LUE04, LÜT01, OCZ05, SCH01]. Stożkowa strefa szlifowania zgrubnego pozwala na rozłożenie całkowitego naddatku obróbkowego $a_{e\ cat}$ na długości nakroju stożkowego uformowanego na CPS. Ze zmian $a_{e\ ef}$ wynikają cztery obszary zmiennego obciążenia ściernicy (rys. 2-7).



Rys. 2-7. Zarys wąskiej ściernicy z CBN i parametry procesu CPCG; T_1 – wysokość stożkowej strefy szlifowania zgrubnego; T_2 – wysokość walcowej strefy szlifowania wykończeniowego [KLO99]

Stożkowa strefa szlifowania zgrubnego (obszar I i II) przejmuje główną pracę usuwania nadmiaru obróbkowego. W obszarze III zachodzi szlifowanie wykończeniowe, w trakcie którego poza usuwaniem materiału przedmiotu wywierany jest wpływ na wytwarzaną kolejnymi przeszlifowaniami jakość obrabianej powierzchni. W obszarze IV właściwie nie następuje już zeszlifowanie materiału, lecz zostają wyiskrzone wierzchołki nierówności powierzchni przedmiotu w celu osiągnięcia granicznych wartości chropowatości $R_z < 3 \mu\text{m}$ [HEG00, XIN99].

Wydajność ubytkowa szlifowania Q_w jest niezależna od geometrii strefy szlifowania zgrubnego i można ją wyznaczyć z następującej zależności [KLO96A, KLO99, OCZ00]:

$$Q_w = \Pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot a_{e\text{cal}} \quad [\text{mm}^3/\text{s}], \quad (2.1)$$

gdzie: d_w – średnica przedmiotu obrabianego;
 n_w – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego;
 a_f – styk posuwowy.

W przypadku wyznaczania efektywnej właściwej wydajności ubytkowej szlifowania $Q'_{w\text{ef}}$, która występuje w strefie szlifowania zgrubnego, konieczna jest znajomość geometrii ściernicy:

$$Q'_{w\text{ef}} = \Pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_f \cdot \text{tg } \chi \quad [\text{mm}^3/\text{s}], \quad (2.2)$$

gdzie: χ – kąt strefy szlifowania zgrubnego.

Efektywną równoważną grubość przekroju poprzecznego warstwy skrawanej $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$ wyznacza się z ilorazu $Q'_{w\text{ef}}$ i prędkości obwodowej ściernicy v_s :

$$h_{cu\text{eq}\text{ef}} = \frac{Q'_{w\text{ef}}}{v_s} \quad [\text{mm}]. \quad (2.3)$$

Innym sposobem obliczenia wartości $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$ jest wyznaczenie związku styku posuwowego a_f , stosunku prędkości $q = v_s/v_w$ i kąta strefy szlifowania zgrubnego χ , z następującego wzoru:

$$h_{cu\text{eq}\text{ef}} = \frac{a_f}{|q|} \text{tg } \chi \quad [\text{mm}]. \quad (2.4)$$

Efektywna równoważna grubość przekroju poprzecznego warstwy skrawanej pozwala na scharakteryzowanie obciążenia CPS, niezależnie od wartości jego prędkości obwodowej v_s . Stanowi ona w szerokim zakresie v_s bardzo przydatny parametr do opracowywania i programowania procesu obróbkowego, w tym doboru odpowiedniego kąta strefy szlifowania zgrubnego.

Liczba przeszlifowań U określa jak często dowolne miejsce powierzchni przedmiotu zostaje przeszlifowane przez ściernicę. Podczas obróbki narzędziami ściernymi ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego do generowania powierzchni przedmiotu uwzględnia się jedynie ziarna usytuowane na walcowym obszarze ściernicy. Wynikający z tego wzór na liczbę przeszlifowań U przedstawia się następująco:

$$U = \frac{T_2}{a_f}. \quad (2.5)$$

Wzrost efektywnej właściwej wydajności ubytkowej $Q'_{w\text{ef}}$, przy stałej średnicy przedmiotu d_w i styku roboczym a_e , może nastąpić tylko poprzez zwiększenie prędkości posuwu v_{fa} , zgodnie z poniższą zależnością:

$$v_{fa} = v_f \cdot n_w \quad [\text{m/s}]. \quad (2.6)$$

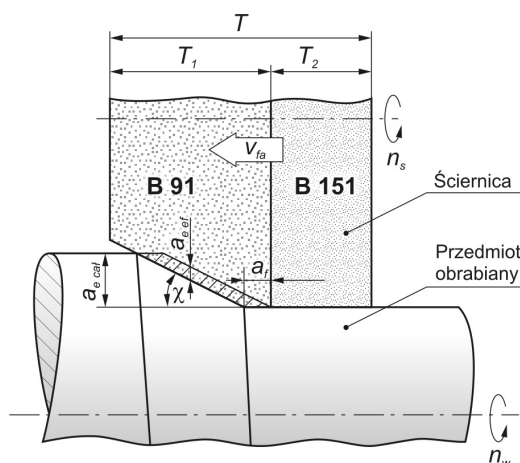
Podkreślić należy, że zwiększenie Q_w i v_s działa przeciwstawnie na siły szlifowania. Z jednej strony, przy stałej v_s siła szlifowania rośnie ze wzrostem Q_w , z drugiej zaś, przy stałej Q_w siła szlifowania maleje ze wzrostem v_s .

W strefie szlifowania zgrubnego $Q'_{w\text{ef}}$ zmniejsza się ze wzrostem czasu szlifowania, który jest równoznaczny wzrostowi przeszlifowanej powierzchni A_w , co wynika z rozszerzania się tej strefy na skutek zużycia. W quasi-stacjonarnej fazie procesu wartość $Q'_{w\text{ef}}$ zbliża się do charakterystycznej wartości końcowej, która zależy od prędkości v_s . Wynika z tego, że ze wzrostem v_s zwiększa się również poziom wartości końcowej właściwej wydajności ubytkowej $Q'_{w\text{ef}}$.

Natomiast wartości efektywnej równoważnej grubości wióra $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$ nie zależą od v_s . Przy stałym styku posuwowym a_f i stosunku prędkości q , $\text{tg}\chi$ zachowuje się proporcjonalnie wobec $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$, co wynika z zależności (2.4).

W procesie HSP stosowane są prędkości szlifowania do 180 m/s, a nawet powyżej 200 m/s [HEG00, LUE04, LÜT01, SCH01]. Ponieważ przy $v_s > 200$ m/s warunki tarcia podczas powstawania wióra mogą się zmieniać, może także dochodzić do wpływu v_s na $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$, która tworzy się w quasi-stacjonarnej fazie procesu HSP. Pomimo tego ograniczenia efektywna równoważna grubość wióra $h_{cu\text{eq}\text{ef}}$ stanowi w szerokim, ważnym produkcyjnie zakresie v_s , bardzo przydatny parametr do opracowywania i programowania procesu obróbkowego, w tym doboru odpowiedniego kąta strefy szlifowania zgrubnego.

Podwyższenie jakości powierzchni uzyskiwanych w procesie CPCG jest możliwe poprzez zastosowanie ściernicy zbudowanej z dwóch stref różniących się wielkością ziaren (rys. 2-8) [KLO96A].

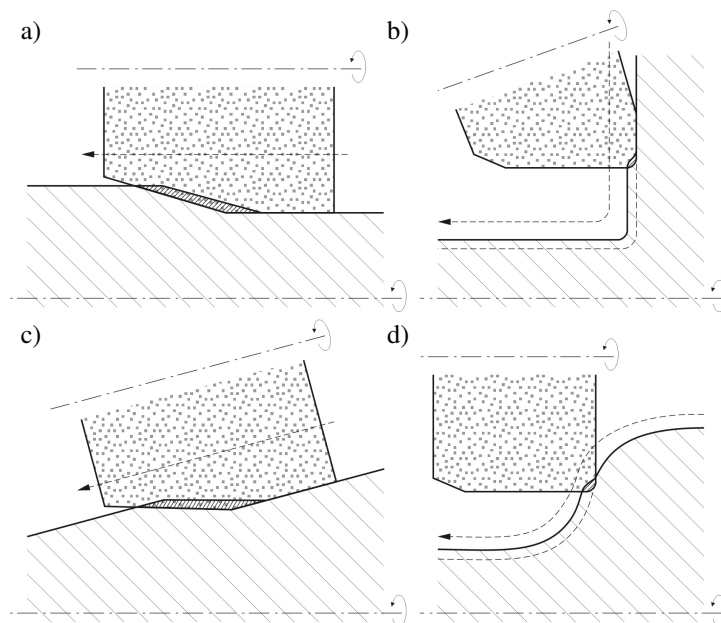


Rys. 2-8. Schemat procesu CPCG prowadzonego z wykorzystaniem ściernicy zbudowanej z dwóch warstw o różnej wielkości ziaren CBN [KLO96A]

Przedstawione rozwiązanie zakłada stosowanie ściernicy o całkowitej wysokości $T=5$ mm, która 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 drobnym ziarnem B 151 (ok. 40% T) [KLO96A].

Szybkościowe szlifowanie wzdłużno-kształtowe wykorzystywane jest do obróbki wałków przekładni, silników i wirników, wałów rozrządu i wałów wykorbionych, wrzecion, zębików pomp, piast kół samochodów osobowych, czopów osi, przesuwek, części chwytowych narzędzi, okrągłych stempli, iglic dysz czy zaworów.

Elastyczność geometryczna metody HSP w istotnym stopniu zależy zarówno od geometrii ściernicy, jak też od układu osi ściernicy i przedmiotu obrabianego (rys. 2-9) [HEG00].



Rys. 2-9. Możliwości kształtowania geometrii przedmiotów w zależności od sposobu ukształtowania czynnej powierzchni ściernicy i układu osi ściernicy /przedmiot: a) szlifowanie powierzchni walcowych; b) szlifowanie płaskich osadzeń; c) szlifowanie powierzchni stożkowych; d) szlifowanie powierzchni wypukłych i wklęsłych [HEG00]

Powierzchnie walcowe (rys. 2-9a) o różnych średnicach i długościach można w procesie HSP szlifować jedną ściernicą o osi usytuowanej zarówno równoległe do osi przedmiotu, jak też do niej nachylonej (metoda Quickpoint – opis w punkcie 2.1.2). Podczas obróbki płaskich osadzeń (rys. 2-9b) oś narzędzia ściernego pochyla się o kąt $15\div 30^\circ$ w stosunku do jej prostego usytuowania, przy którym powstaje niebezpieczeństwo cieplnego uszkodzenia warstwy wierzchniej przedmiotu. Szlifowanie powierzchni stożkowych (rys. 2-9c) można w prosty sposób realizować ściernicą usytuowaną prostopadłe do tworzącej stożka. Natomiast szlifowanie powierzchni wypukłych i wklęsłych metodą HSP (rys. 2-9d), odbywa się z użyciem ściernicy z zaokrąglonym narożem.

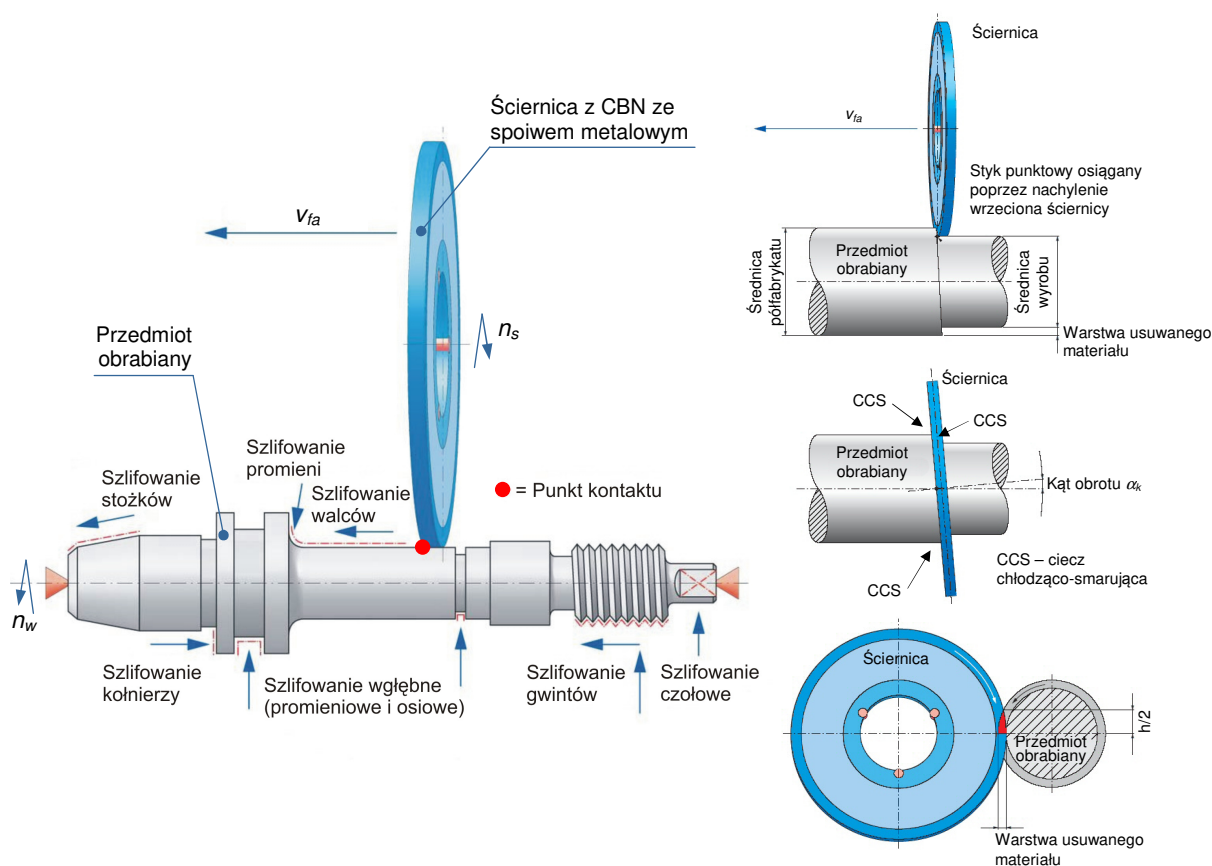
Szeroki obszar zastosowań procesu HSP sprawia, że bezpośrednio rywalizuje on ze szlifowaniem wgłębnym, szlifowaniem wgłębnym ukośnym zespołem ściernic i szlifowaniem bezkłowym. Podstawową zaletą HSP, w odniesieniu do konkurencyjnych metod szlifowania, jest jego duża elastyczność geometryczna. Może również stanowić wydajną alternatywę do toczenia na twardo (obróbka zahartowanych stali do nawęglania i stali łożyskowych).

2.1.2 CPCG ze zredukowanym stykiem ściernicy (Quickpoint)

Metodę pod nazwą Quickpoint opracowała firma Erwin Junker Maschinenfabrik GmbH i opatentowała w 1985 roku [JUN85]. Jest to w istocie szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy (CPCG) ze zredukowanym stykiem ściernicy z przedmiotem obrabianym.

Dzięki zastosowaniu supertwardych materiałów ściernych (diamentu lub CBN) możliwe jest zmniejszenie średnic i wysokości (4 do 6 mm [GRI97, KLO96, EIN95]) narzędzi ściernych w porównaniu do ściernic konwencjonalnych. Modyfikacja taka wpływa korzystnie na proces szlifowania, pozwalając zmniejszyć koszty narzędzia, a przede wszystkim zredukować długość drogi styku ściernicy z obrabianym przedmiotem, a co za tym idzie, umożliwi obniżenie tarcia i obciążenia cieplnego szlifowanej powierzchni [OCZ00, TÖN98]. Cały nadatek obróbkowy w tej metodzie usuwany jest przez jedną lub dwie naprzeciwległe ściernice w jednym przejściu, przy największym możliwym posuwie [DER95, EIN95, OCZ91]. Obróbka prowadzona jest z wysoką prędkością obwodową narzędzia ściernego, dochodzącą do 140 m/s [KLO96, QUI04].

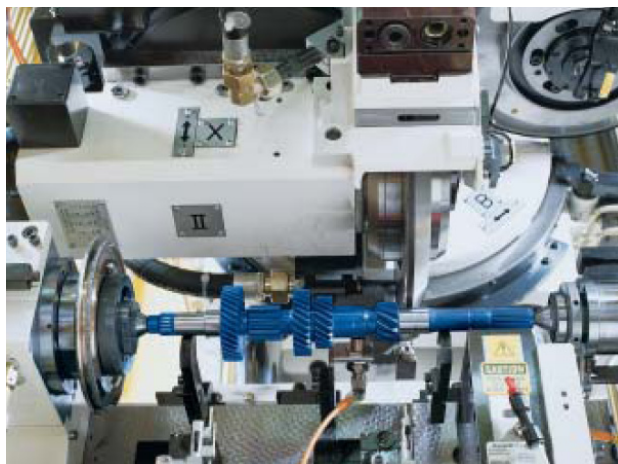
Istota metody Quickpoint polega na zmniejszeniu powierzchni styku między narzędziem a przedmiotem szlifowanym do tzw. „punktu”, od którego wzięła się nazwa metody, poprzez odchylenie osi ściernicy względem osi szlifowanego przedmiotu o kąt $\alpha_k = 0,5^\circ$ (rys. 2-10) [MÜC00, OCZ00].



Rys. 2-10. Istota metody Quickpoint firmy Junker (szlifowanie ze zredukowanym stykiem ściernicy z przedmiotem) [QUI04, OCZ00, TÖN98]

Przebieg procesu charakteryzuje się zużyciem narzędzia skoncentrowanym jedynie na wąskim pasku czynnej powierzchni ściernicy wynikającym z redukcji powierzchni styku, wskutek czego niezbędne jest stosowanie narzędzi ściernych o dużej odporności na zużycie. Natomiast zaletą zmniejszonego styku jest łatwiejsze dostarczanie cieczy chłodząco-smarujących (CCS) w strefę obróbki niż ma to miejsce w szlifowaniu konwencjonalnym. Korzystniejsze warunki procesu wpływają na wyraźną poprawę jakości warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego [OCZ00, TÖN98] i pozwalają uzyskać chropowatość powierzchni wyrażoną parametrem R_z nawet poniżej 2 μm [KLO96].

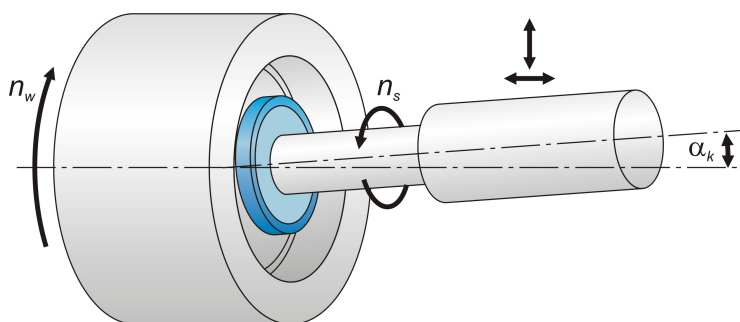
W metodzie Quickpoint możliwe jest również szlifowanie z osią narzędzia ustawioną równoległą do osi przedmiotu obrabianego (kąt nachylenia ściernicy $\alpha_k=0^\circ$) – rys. 2-11. W konsekwencji pozwala to na przeprowadzenie kompletnego procesu szlifowania przedmiotu w jednym zamocowaniu, włączając w to kształtowanie kołnierzy, podcięć, gwintów, powierzchni wypukłych i wklęsłych czy krawędzi wielokrotnych (rys. 2-10) [KLO96, EIN95, OCZ00, TÖN98].



Rys. 2-11. Widok przestrzeni roboczej szlifierki firmy Junker do realizacji procesu Quickpoint [QUI04]

Zalety metody Quickpoint pozwalają na przedłużenie czasu pracy ściernicy nawet do roku, produkcję około 200 000 elementów pomiędzy operacjami obciągania, wysoką wydajność usuwania materiału, szlifowanie wszystkich konturów przedmiotu obrabianego w jednym zamocowaniu z relatywnie małymi siłami skrawania [WOR94].

Na 10. Wystawie Obrabiarek EMO '93 w Hanowerze firma Junker Maschinenfabrik GmbH zaprezentowała rozwiązanie rozszerzające zastosowanie metody Quickpoint o wewnętrzne szlifowanie walcowe (rys. 2-12).

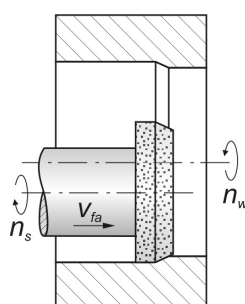


Rys. 2-12. Szlifowanie wewnętrznych powierzchni walcowych metodą Quickpoint [OCZ94]

Podobnie jak w przypadku opisywanej wyżej metody Quickpoint stosowanej do szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych, w procesie tym zachodzi możliwość zmiany kąta nachylenia osi ściernicy do osi szlifowanego przedmiotu. Podstawową zaletą w tak zmodyfikowanej metodzie szlifowania otworów jest możliwość usunięcia całego nadatku obróbkowego w jednym przejściu z jednoczesnym zachowaniem wysokiej dokładności i jakości powierzchni [OCZ94]. Możliwe jest to poprzez intensyfikację procesu usuwania materiału na zmniejszonej powierzchni styku narzędzia z przedmiotem obrabianym przez zastosowanie supertwardych narzędzi ściernych przy jednoczesnym podniesieniu wydajności chłodzenia strefy obróbki, do której łatwiej dociera ciecz chłodząco-smarująca.

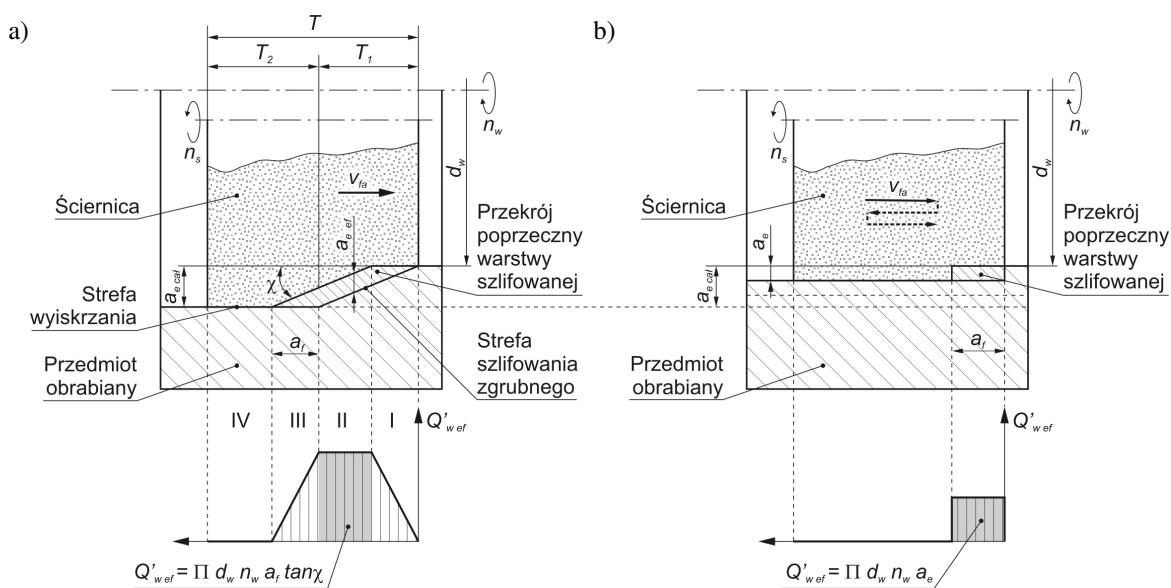
2.1.3 Szlifowanie wzdłużne otworów w jednym przejściu

Proces szlifowania wzdłużnego otworów w jednym przejściu, zwany szlifowaniem złuszcającym (*peelgrinding*) lub głębokim szlifowaniem wzdłużnym otworów (*internal deep traverse grinding*), efektywnie zastępuje szlifowanie wgłębne lub szlifowanie postępowo-zwrotne wykonywane ściernicami o znacznie szerszych powierzchniach czynnych. Zastosowanie w opisywanym procesie wąskich ściernic z CBN (całkowita wysokość $T < 6$ mm), charakteryzujących się stożkową strefą szlifowania zgrubnego, umożliwia usunięcie całego nadkładu obróbkowego rzędu $a_{e\text{ cat}} = 0,15$ mm w jednym przejściu narzędzia (rys. 2-13). Jednocześnie uzyskuje się zmniejszenie sił szlifowania, a co za tym idzie, tendencji do kształtowania otworu stożkowego. Dodatkowo zwiększa się elastyczność w porównaniu do konwencjonalnego szlifowania otworów, przy zachowaniu wysokiej niezawodności procesu i wysokiej jakości przedmiotu obrobionego [OCZ02, OCZ05, WEI01, WEI03].



Rys. 2-13. Schemat szlifowania wzdłużnego otworów w jednym przejściu, wąską ściernicą z CBN [WEI01, WEI03]

Osiowe szlifowanie otworów ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego przebiega analogicznie do opisanego wyżej szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych ściernicami z nakrojem stożkowym (punkt 2.1.1). Wartość styku roboczego a_e zmienia się wzdłuż wysokości ściernicy. W celu określenia wydajności ubytkowej w poszczególnych strefach ściernicy należy uwzględnić efektywny styk roboczy $a_{e\text{ ef}}$, z którego wynikają cztery obszary zmiennego obciążenia ściernicy przedstawione graficznie na rys. 2-14.



Rys. 2-14. Porównanie obciążenia ściernicy przy realizacji jednoprejęściowego szlifowania otworów narzędziem ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego (a) i konwencjonalnego szlifowania wieloprejęściowego (b) [OCZ02, WEI01, WEI03]

W obszarze II (strefa szlifowania zgrubnego) występuje stałe obciążenie, które można scharakteryzować efektywną właściwą wydajnością ubytkową obliczaną zgodnie ze wzorem:

$$Q'_{wef} = \Pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_{ef} \quad [\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}], \quad (2.7)$$

gdzie:

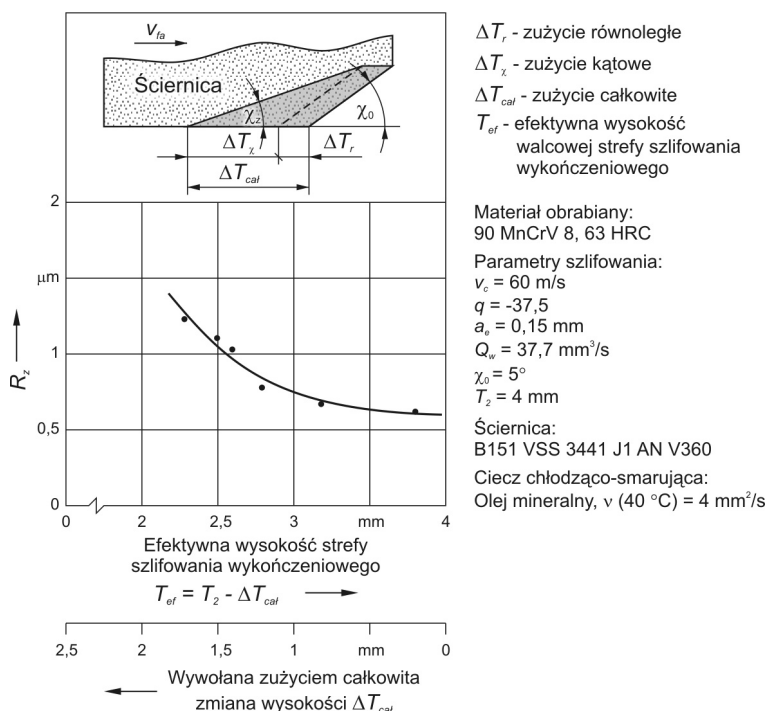
$$a_{ef} = a_f \cdot \text{tg}\chi \quad [\text{mm}]. \quad (2.8)$$

Obszar III to spadek obciążenia ściernicy analogiczny do jego wzrostu w obszarze I, jednak z tą różnicą, że realizowane jest w nim poza procesem zdejmowania naddatku obróbkowego także szlifowanie wykończeniowe. W obszarze IV następuje wyiskrzanie, ponieważ teoretycznie nie zachodzi w nim proces usuwania materiału. Jednak ze względu na spowodowane siłami szlifowania odkształcenie sprężyste pomiędzy przedmiotem obrabianym a wrzecionem narzędzia ściernego, także i w tym przedziale może występować ubytek obrabianego materiału. O ile zadaniem pierwszych trzech stref (szlifowanie zgrubne) jest przede wszystkim usunięcie z przedmiotu obrabianego określonej warstwy materiału, to w przypadku strefy IV (szlifowanie wykończeniowe i wyiskrzanie) głównym celem jest uzyskanie bardzo wysokiej jakości powierzchni oraz ewentualna minimalizacja odchyłek okrągłości poprzez wielokrotne przeszlifowanie powierzchni przedmiotu [OCZ02, OCZ05, WEI01, WEI03].

Decydujące znaczenie dla przebiegu procesu szlifowania zgrubnego ma kąt χ , który uzależniony jest od szeregu parametrów, takich jak: wybieg ściernicy, wielkości 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 przesuwają się w obszar szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania, co powoduje jego skracanie.

Zastosowanie podwyższonej prędkości szlifowania $v_s=60\div 80$ m/s oraz odpowiednio ukształtowanej makrogeometrii CPS podzielonej na strefę stożkową o kącie $\chi=5^\circ$ i długą na $2\div 4$ mm walcową strefą szlifowania wykończeniowego pozwala na uzyskiwanie wydajności ubytkowej rzędu $Q_w=24\div 37,7$ mm³/s. Jednocześnie odpowiednio długa strefa wyiskrzania zapewnia osiągnięcie chropowatości powierzchni obrobionej nawet na poziomie $R_z < 1$ μm (rys. 2-15) [WEI03].

Całkowite zużycie ściernicy w tym procesie ΔT_{cat} jest sumą zużycia równoległego ΔT_r i zużycia kąтового ΔT_χ (rys. 2-15). Zużycie równoległe rejestrowane jest jako przesunięcie strefy szlifowania zgrubnego w kierunku walcowej części ściernicy przy stałym kącie χ_0 . Zużycie kątowe powoduje utworzenie kąta χ_z o mniejszej wartości powodujące zmniejszenie obciążenia stożkowej strefy szlifowania zgrubnego. W rezultacie skróceniu ulega wysokość efektywnej strefy szlifowania wykończeniowego T_{ef} . Wyjściowa wysokość tej strefy T_2 zostaje zmniejszona o ΔT_{cat} , redukując stosunek wysokości ściernicy do posuwu wzdłużnego stołu. Oznacza to, że powierzchnia otworu jest z mniejszą częstotliwością szlifowana strefą walcową ściernicy, co prowadzi do pogorszenia chropowatości szlifowanej powierzchni [OCZ05, WEI03].

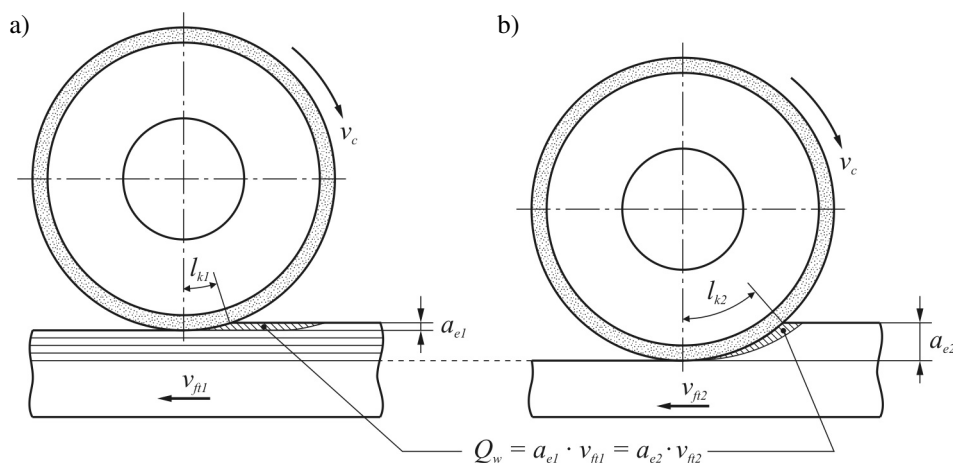


Rys. 2-15. Wpływ efektywnej wysokości walcowej strefy szlifowania wykończeniowego T_{ef} na chropowatość powierzchni obrobionej opisaną parametrem R_z [WEI03]

Opisywana geometria narzędzia ściernego pozwala na podwyższenie wydajności ubytkowej poprzez zwiększenie prędkości posuwu osiowego v_{fa} . Mimo że prowadzi to do zwiększenia obciążenia strefy szlifowania zgrubnego i, co za tym idzie, skrócenia strefy szlifowania wykończeniowego, możliwe jest osiągnięcie dobrej jakości powierzchni dzięki wielokrotnemu przeszlifowaniu powierzchni przedmiotu przez obszary III i IV. W rezultacie przy wydajności obróbki porównywalnej z toczeniem na twardo osiągnana jest wyraźnie lepsza jakość powierzchni [OCZ02, OCZ05, WEI01, WEI03].

2.1.4 Szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym (CFG)

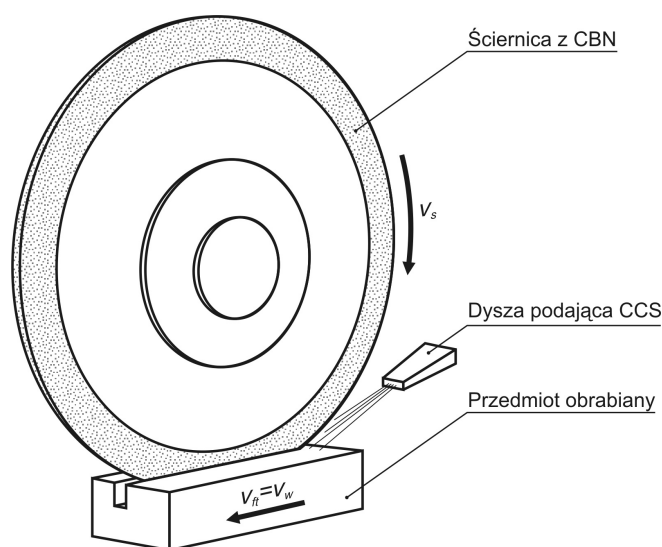
Alternatywę dla konwencjonalnego szlifowania prostoliniowo-zwrotnego (rys. 2-16a) stanowi szlifowanie głębokie (*Deep Cut Grinding* – DCG), określane również jako szlifowanie z posuwem pełzającym (*Creep Feed Grinding* – CFG) [HUG98, NOA93, OCZ96, OCZ00, OCZ05, WER97] – rys. 2-16b.



Rys. 2-16. Odmianny szlifowania powierzchni płaskich: a) szlifowanie prostoliniowo-zwrotne; b) szlifowanie głębokie [OCZ96]

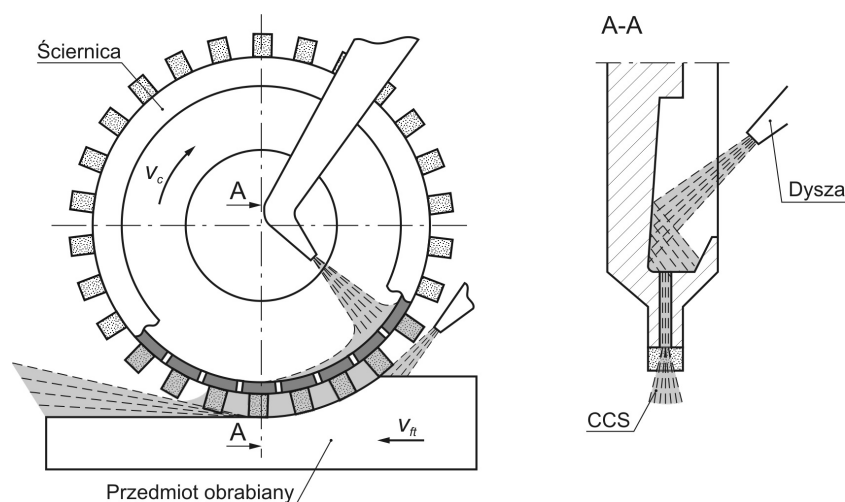
Szlifowanie takie charakteryzuje się dużymi wartościami styku roboczego (w zakresie od 1 do ponad 25 mm) i niewielkimi prędkościami przedmiotu (posuwu stycznego lub osiowego) przy małej do średniej prędkości obwodowej ściernicy. Takie parametry umożliwiają usunięcie w jednym przejściu tej samej objętości materiału jak w przypadku procesu prostoliniowo-zwrotnego. W przypadku szlifowania głębokiego, długość kinematycznego styku l_{k2} , a co się z tym wiąże, powierzchnia styku, jest znacznie większa niż w innych odmianach procesu szlifowania. W efekcie określona objętość materiału obrabianego rozkłada się na większą liczbę wierzchołków aktywnych, dzięki czemu pojedyncze wierzchołki skrawające, w porównaniu ze szlifowaniem prostoliniowo-zwrotnym, usuwają wióry o istotnie mniejszym przekroju i objętości.

Wydajność ubytkowa szlifowania z posuwem pełzającym jest często porównywalna lub wyższa od osiągniętej frezowaniem, a przy tym uzyskiwana przy niższych kosztach i lepszej jakości powierzchni. W procesach CFG wykorzystuje się ściernice wielkoporowe zbudowane z materiałów konwencjonalnych oraz CBN na bazie spoiwa ceramicznego. Duże przestrzenie międzyziarnowe odgrywają decydującą rolę przy przenoszeniu cieczy chłodząco-smarującej z drobnymi wiórami wzdłuż długiego łuku styku narzędzia z materiałem obrabianym. Za pomocą procesów CFG przeprowadza się wybrane operacje obróbkowe w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Można je również szeroko stosować do kształtowania części z większości stali węglowych, narzędziowych i nierdzewnych, jak też do wytwarzania przedmiotów ze stopów aluminium, niklu, magnezu i tytanu (rys. 2-17) [EXC95, GUO04, HMC05, MAT93, OCZ05, SAL93, SAL04, SUN01].



Rys. 2-17. Schemat kinematyki procesu szlifowania kształtowego rowków z posuwem pełzającym (przedmiot obrabiany z superstopu niklu pod nazwą Nimonic 80A): CCS – ciecz chłodząco-smarująca [SUN01]

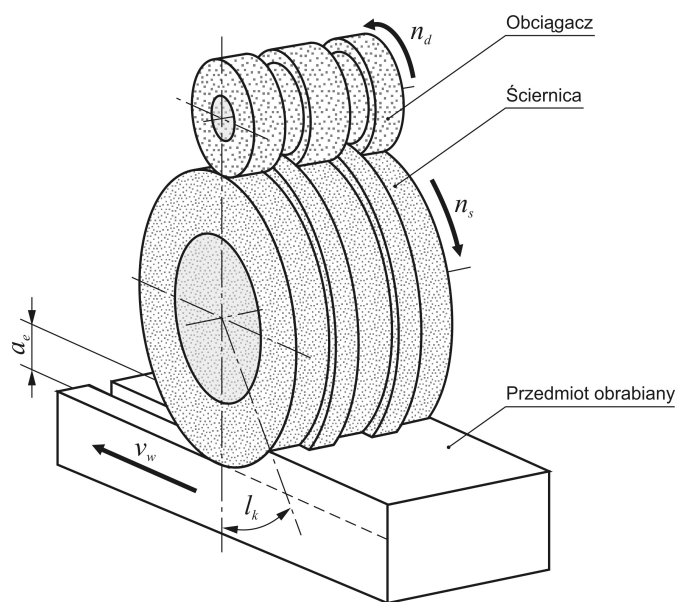
W procesie szlifowania z posuwem pełzającym bardzo istotną rolę odgrywa rodzaj i sposób doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej (CCS). Nawet do 90% powstającego w tym procesie ciepła może zostać wydalone na drodze konwekcji poza strefę obróbki za pośrednictwem CCS [JIN03, WAN97]. W celu zapewnienia dopływu cieczy na całej długości styku ściernicy z materiałem obrabianym, w pracy [SUT90, ZHA95] zaproponowano jej dodatkowe doprowadzenie pod wpływem siły odśrodkowej na czynną powierzchnię ściernicy poprzez dużą liczbę kanałków specjalnie ukształtowanego narzędzia (rys. 2-18).



Rys. 2-18. Budowa ściernicy do realizacji procesu CFG ze stycznym i wewnętrznym doprowadzeniem cieczy chłodząco-smarującej (CCS) w strefę obróbki [SUT90, ZHA95]

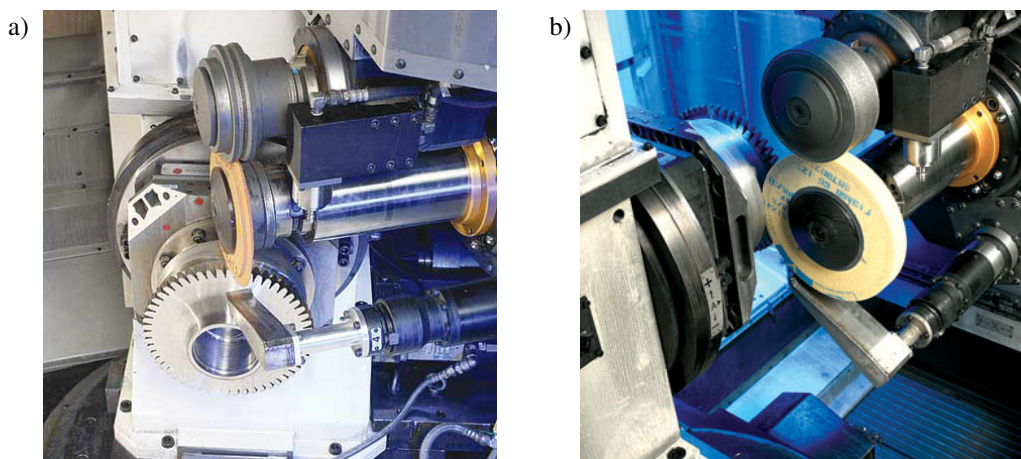
Zastosowanie ściernicy z CBN, charakteryzującej się nieciągłą topografią CPS i wewnętrznym doprowadzeniem CCS, pozwoliło uniknąć zjawiska zalepiania narzędzia ściernego oraz umożliwiło wzrost wydajności szlifowania materiałów metalowych [ZHA95].

Efekty szlifowania głębokiego zależą w znacznej mierze od stanu topografii CPS. Zachowanie stałych sił szlifowania oraz jakości powierzchni obrabianej jest zapewniane przez ciągłe obciążanie narzędzia ściernego (rys. 2-19 i 2-20) [EXC95, HMC05, OCZ05, SAL04].



Rys. 2-19. Schemat procesu szlifowania głębokiego z ciągłym obciążaniem (*Continuous Dressing Creep Feed Grinding – CD-CFG*) [EXC95]

Taka odmiana procesu CFG jest szczególnie przydatna przy obróbce wielu materiałów trudnoobrabialnych oraz do szlifowania bardzo długich przedmiotów (m.in. do oprzyrządowania pras krawędziowych i ostrzy dłut do drewna, stosów ostrzy pił i ostrzy nożyc, falistych rolek do papieru), ponieważ ściernica wykazuje taką samą zdolność skrawną w ciągu całego procesu, który nie jest przerywany kolejnymi cyklami obciążania. W porównaniu z procesem z konwencjonalnym obciążaniem, wydajność ubytkowa może zostać zwiększona nawet 10-krotnie [SAL04].



Rys. 2-20. Przykłady procesów szlifowania głębokiego z ciągłym obciążaniem (CD-CFG) realizowanych na centrach obróbkowych firmy Makino Inc.: a) szlifowanie uzębienia koła zębatego; b) szlifowanie zewnętrznej powierzchni walcowej [HMC05, SAL04]

Inną odmianę CFG stanowi proces VIPER (*Very Impressive Performance Extreme Removal*). Został on wdrożony przez przemysł lotniczy w (firma Rolls-Royce) we współpracy z firmą Tyrolit. Opiera się on na zastosowaniu ściernic o porowatej strukturze oraz wysokociśnieniowym sposobie podawania cieczy chłodziwo-smarującej. Dzięki temu proces VIPER zapewnia zdolność usuwania materiałów porównywalną lub nawet większą niż przy realizacji CD-CFG, bez znaczących ubytków ściernicy spowodowanych procesem zużycia [HMC05, OCZ05, SAL04].

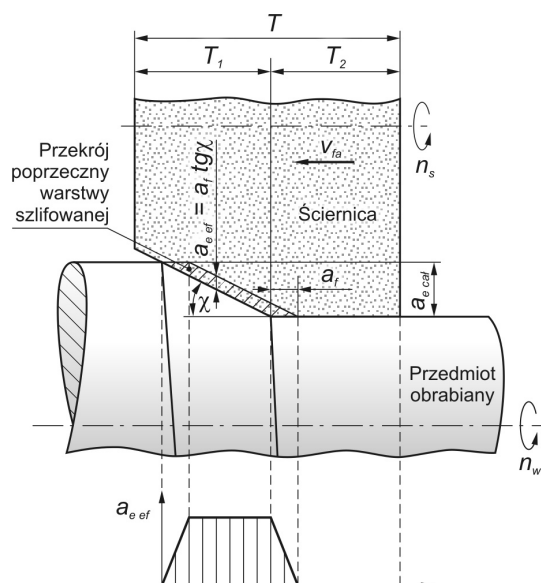
Opisane procesy szlifowania głębokiego z posuwem pełzającym konkurują z frezowaniem i przeciąganiem, a ponadto w odniesieniu do materiałów ceramicznych i tworzyw wzmocnianych wiskersami, stanowią jedyną skuteczną metodę ich obróbki [EXC95, OCZ05].

2.1.5 Szlifowanie wzdłużne wałków ściernicami z materiałów konwencjonalnych

Jeden z ważniejszych kierunków badań nad możliwościami intensyfikacji procesów szlifowania narzędziami ściernymi zbudowanymi z konwencjonalnych materiałów ściernych dotyczy opracowania ściernic o specjalnie ukształtowanej makrogeometrii czynnej powierzchni, pozwalających na pełne wykorzystanie ich właściwości eksploatacyjnych oraz prowadzenie procesu obróbkowego w jednym przejściu [KAC93, NAD03, NIŻ02, NAK84, PLI97]. Innym sposobem zapewniającym zastąpienie wieloprzejściowego szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych bardziej wydajną obróbką jednoprzejściową jest zastosowanie ściernicy warstwowej charakteryzującej się zróżnicowaniem wielkości ziaren wzdłuż jej czynnej powierzchni [NAK84].

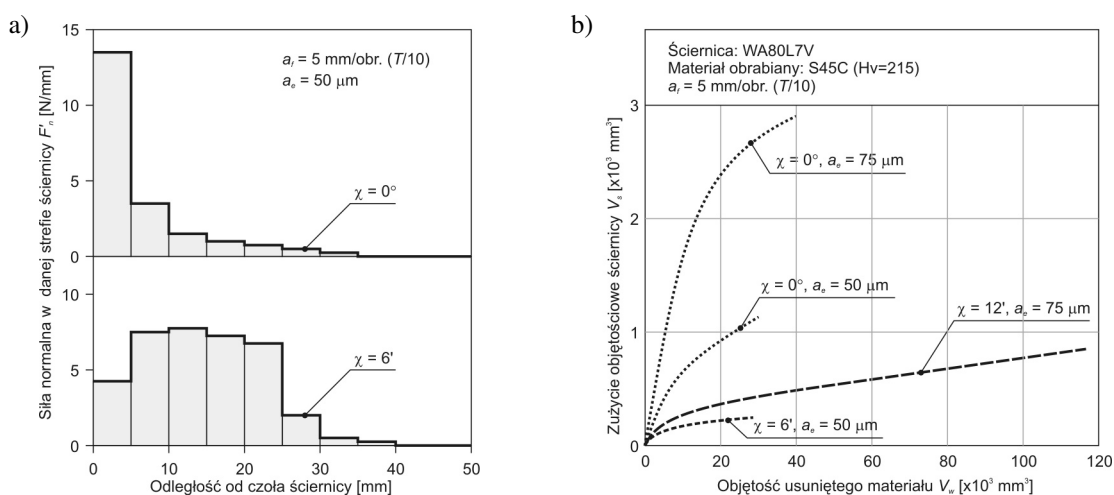
Szlifowanie ściernicą ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego

Poprzez zastosowanie w procesie osiowego szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych ściernicy z nakrojem stożkowym (rys. 2-21) wykonanym jednoziarnistym obciążaczem diamentowym możliwe było rozdzielanie funkcji szlifowania zgrubnego i wykończeniowego. W pierwszej dąży się do uzyskania wysokiego ubytku materiału (wysokość T_1 i kąt strefy szlifowania zgrubnego χ dobiera się tak, by objąć cały naddatek na obróbkę), w drugiej zaś do zapewnienia odpowiednio wysokiej jakości powierzchni szlifowanej (wysokość T_2). Całkowita wysokość takich narzędzi ściernych wynosi $T=50$ mm [NAK84].



Rys. 2-21. Schemat szlifowania ściernicą ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego [NAK84]

Ukształtowanie strefy stożkowej pozwala na zmianę rozkładu siły normalnej na czynnej powierzchni ściernicy (rys. 2-22a).



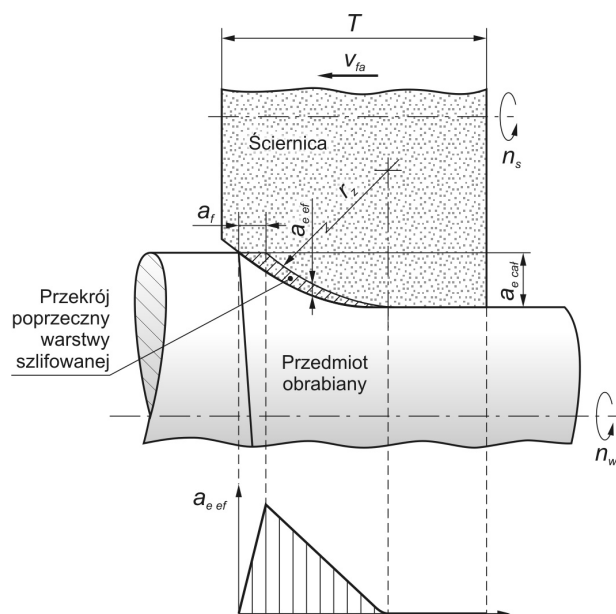
Rys. 2-22. Porównanie zarejestrowanej składowej normalnej siły szlifowania F'_n w danej strefie narzędzia (a) i zużycia objętościowego V_s (b) podczas szlifowania ściernicą konwencjonalną ($\chi=0^\circ$) oraz narzędziami z nakrojem stożkowym ($\chi=6'$, $12'$) [NAK84]

Podczas szlifowania narzędziem ściernym ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego o kącie $\chi=6'$ zarejestrowano mniejsze wartości sił rozłożone równomiernie na CPS w porównaniu do skupionej siły zmierzonej podczas obróbki ściernicą konwencjonalną ($\chi=0^\circ$).

Na rys. 2-22b przedstawiono zmiany zużycia objętościowego ściernicy V_s w funkcji objętości usuniętego materiału V_w dla narzędzia konwencjonalnego ($\chi=0^\circ$) oraz ściernic ze stożkową strefą szlifowania zgrubnego o kącie $\chi=6'$ i $12'$, przy wartościach styku roboczego $a_e=50$ i $75 \mu\text{m}$. Wynika z niego, że równomierne rozłożenie nadładku obróbkowego na CPS pozwala na wyraźne zwiększenie trwałości narzędzia ściernego.

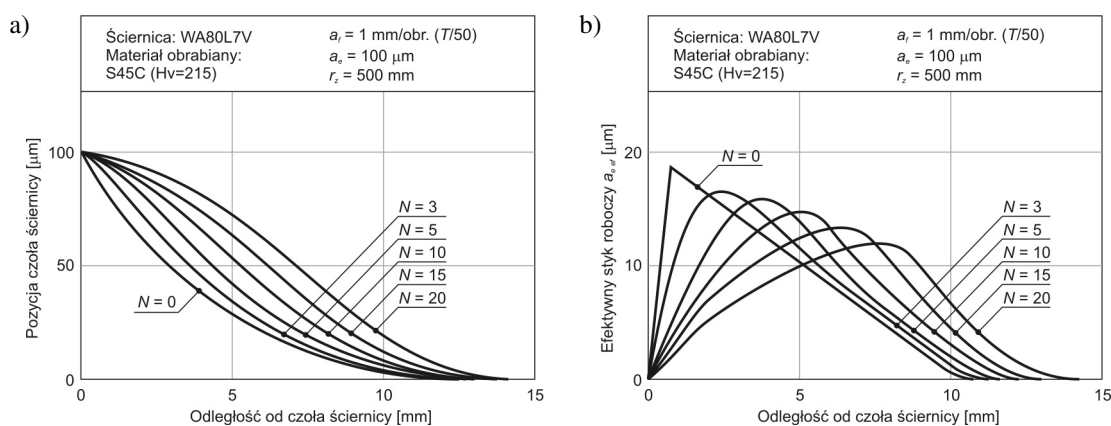
Szlifowanie ściernicą z promieniową strefą szlifowania zgrubnego

Innym sposobem rozłożenia obciążenia wzdłuż czynnej powierzchni ściernicy jest ukształtowanie na niej, przy pomocy jednoziarnistego obciążacza diamentowego, promieniowego zarysu strefy szlifowania zgrubnego. W takim przypadku efektywna grubość warstwy skrawanej wyraźnie rośnie w części atakującej o szerokości a_f , malejąc liniowo w dalszej części zarysu aż do zera na granicy ze strefą walcową (rys. 2-23).



Rys. 2-23. Schemat szlifowania ściernicą z promieniową strefą szlifowania zgrubnego (r_z – promień zarysu) [NAK84]

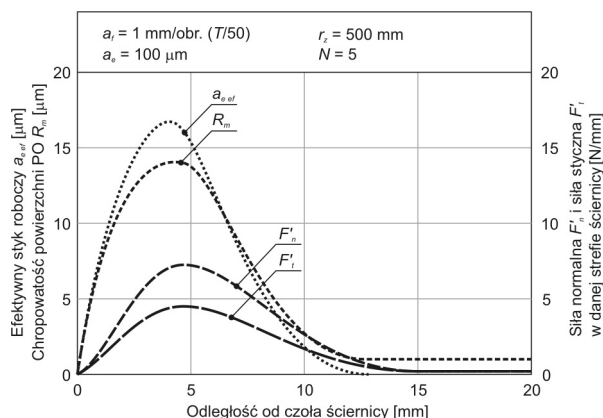
Na skutek zużycia wywołanego realizacją kolejnych przejść roboczych N , pierwotny zarys strefy szlifowania zgrubnego, której promień wynosił $r_z=500$ mm, przesuwa się w głąb ściernicy, powodując zmiany rozkładu efektywnego styku roboczego na CPS (rys. 2-24).



Rys. 2-24. Zmiany pierwotnego kształtu promieniowego zarysu ściernicy (a) oraz efektywnego styku roboczego $a_{e\,ef}$ (b) wywołane zużyciem narzędzia w kolejnych przejściach ($N=0\div 20$) [NAK84]

Zmiana kształtu zarysu powoduje, że tangens krzywej zarysu czynnej powierzchni ściernicy maleje stopniowo do zera w obszarze przejścia w strefę walcową, jednak promieniowy kształt obszaru szlifowania zgrubnego nie zanika (rys. 2-24a). Na wykresie przedstawiającym zmiany rozkładu efektywnego styku roboczego na CPS (rys. 2-24b) można zaobserwować, że maksymalna wartość $a_{e\,ef}$ przesuwa się, wraz ze wzrostem liczby przejść, w kierunku strefy szlifowania wykończeniowego.

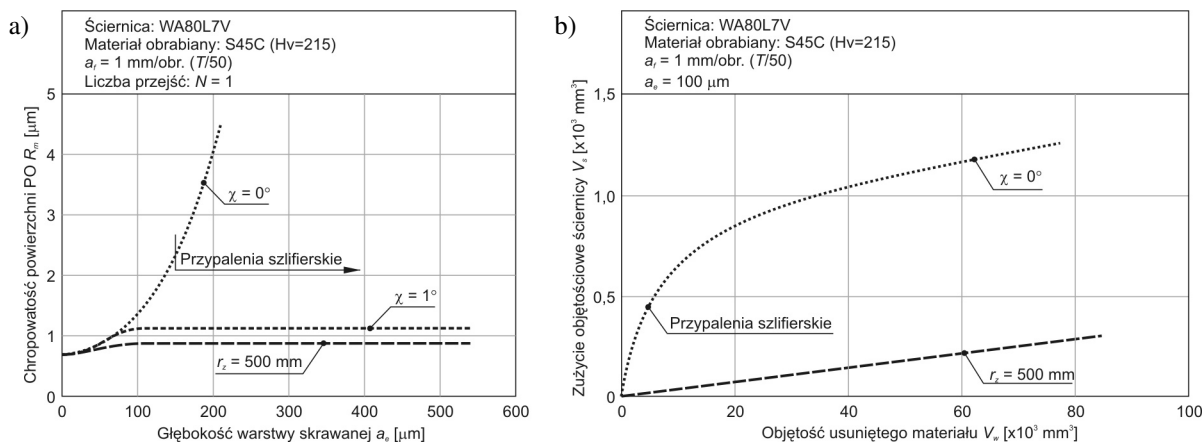
Wywołane zużyciem zmiany rozkładu efektywnego styku roboczego na CPS mają bezpośredni wpływ na rozkłady sił szlifowania oraz maksymalnej wysokości profilu chropowatości powierzchni obrobionej R_m (rys. 2-25).



Rys. 2-25. Rozkład siły normalnej F'_n i stycznej F'_t , szlifowania, chropowatości powierzchni obrobionej R_m i efektywnej grubości warstwy skrawanej a_{ef} w całym zakresie promieniowej strefy szlifowania z grubego po $N=5$ przejściach [NAK84]

Widać również, że w walcowym obszarze szlifowania wykończeniowego siły nie maleją do zera, co świadczy o istnieniu resztkowego nadadtku oraz o wyiskrzaniu powierzchni przez tą strefę CPS.

Na rys 2-26a przedstawiono porównanie chropowatości uzyskiwanych z zastosowaniem ściernicy ze stożkową ($\chi=1^\circ$) i promieniową ($r_z=500 \text{ mm}$) strefą szlifowania z grubego oraz konwencjonalnego narzędzia ściernego z kątem $\chi=0^\circ$.



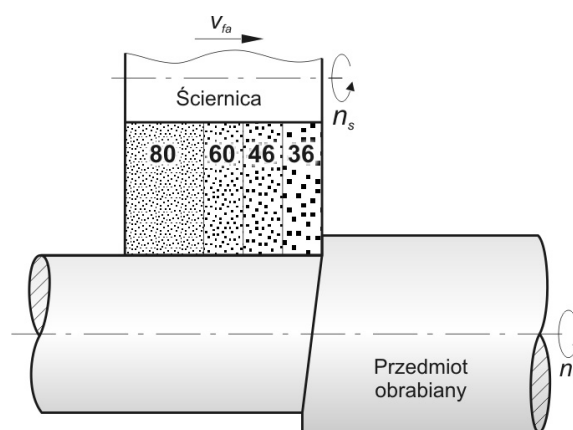
Rys. 2-26. Maksymalna wysokość profilu chropowatości powierzchni obrobionej R_m (a) i zużycie objętościowe ściernicy V_s (b) zmierzone podczas obróbki ściernicą konwencjonalną ($\chi=0^\circ$), narzędziem z nakrojem stożkowym ($\chi=1^\circ$) oraz ściernicą z promieniową strefą szlifowania z grubego ($r_z=500 \text{ mm}$) [NAK84]

Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem głębokości szlifowania a_e jakość powierzchni szlifowanej ściernicą konwencjonalną ulega wyraźnemu pogorszeniu. Przy większych wartościach styku roboczego zaobserwowano również mikropęknięcia wywołane przypaleniami szlifierskimi. Chropowatość powierzchni obrobionej ściernicą z nakrojem stożkowym, po początkowym niewielkim wzroście, utrzymywała się na stałym niskim poziomie. Jednak najkorzystniejsze wartości parametru R_m uzyskano z zastosowaniem ściernicy z promieniową strefą szlifowania z grubego.

Na rys 2-26b przedstawiono wyniki pomiarów zużycia objętościowego ściernicy konwencjonalnej i narzędzia z ukształtowanym zarysem promieniowym w funkcji objętości zeszlifowanego materiału. Porównanie wskazuje na zdecydowanie mniejsze zużycie ściernicy ze specjalnie ukształtowaną strefą szlifowania zgrubnego. Wynika z tego, że rozłożenie warstwy skrawanej na większej powierzchni narzędzia ściernego wpływa korzystnie na jego trwałość, pozwalając prowadzić proces obróbkowy z większą wydajnością i przy zmniejszeniu chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego, w porównaniu do rezultatów szlifowania ściernicą konwencjonalną.

Szlifowanie ściernicą warstwową

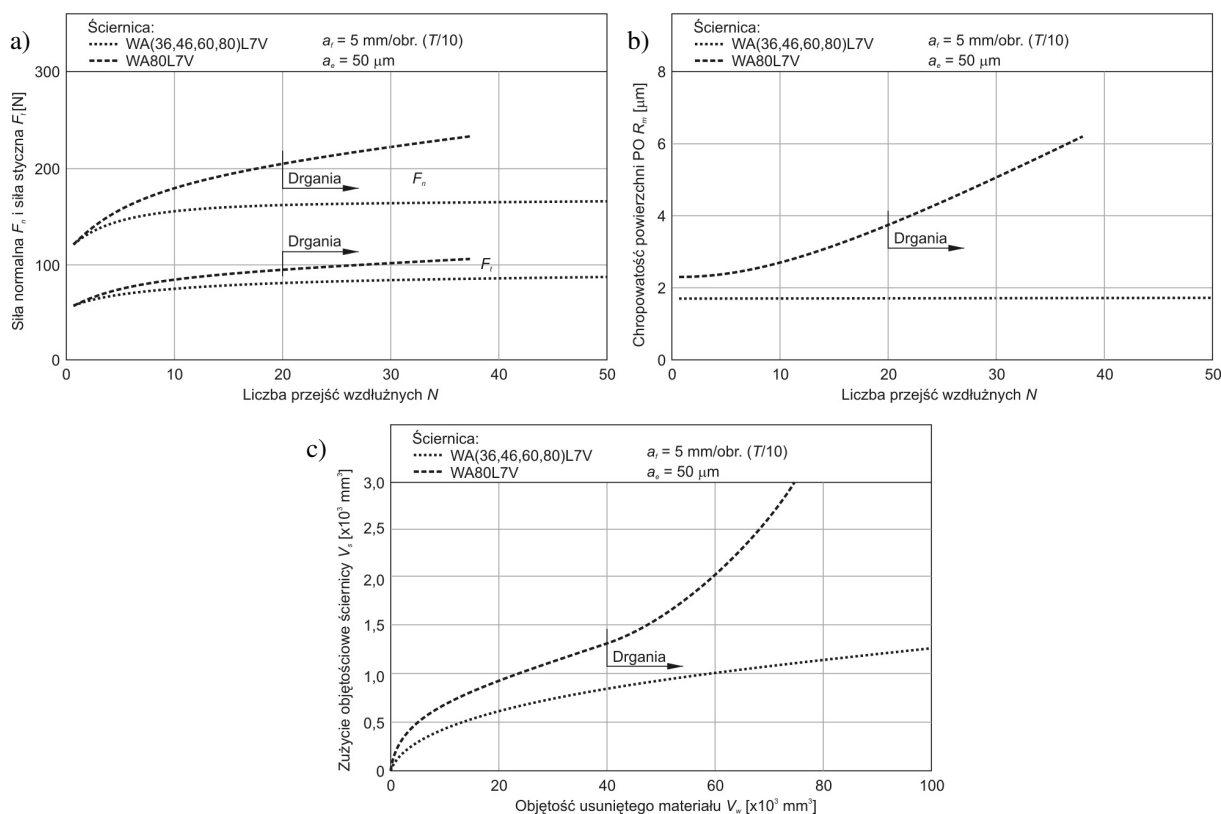
W konwencjonalnym szlifowaniu osiowym tylko czołowa część czynnej powierzchni ściernicy uczestniczy w intensywnej obróbce, natomiast pozostała realizuje obróbkę wykończeniową. W rezultacie kolejne odcinki ściernicy, mimo ustalonego styku roboczego, usuwają coraz mniejsze warstwy naddatku. Aby zapobiec takiemu zjawisku, opracowano narzędzie ściernie charakteryzujące się zróżnicowaniem wielkości ziaren wzdłuż CPS (rys. 2-27) [DĄB02, NAK84].



Rys. 2-27. Schemat procesu osiowego szlifowania ściernicą warstwową WA (36, 46, 60, 80) L7V [NAK84]

W ściernicy takiej ziarna o większych wymiarach umiejscowiono w warstwie pierwszej w kierunku posuwu wzdłużnego, by kolejno zmniejszać ich wielkość w następnych warstwach. Wysokość pierwszych trzech sekcji w kierunku posuwu osiowego, była taka sama i wynosiła 10 mm, natomiast ostatnia warstwa, z ziarnami o najmniejszej wielkości, odznaczała się dwa razy większą wysokością (20 mm). Taka budowa narzędzia ściernego pozwala na bardziej wydajne usuwanie naddatku obróbkowego przez duże ziarna, zapobiegając jednocześnie zalepianiu czynnej powierzchni ściernicy materiałem obrabianym, dzięki odpowiednio zwiększonym odległościom międzyziarnowym. Kolejne warstwy ściernicy usuwają pozostawiony naddatek sprawniej i ze zmniejszonym zużyciem, zapewniając jednocześnie uzyskanie założonej chropowatości przedmiotu obrabianego.

Wyniki badań potwierdzają duże znaczenie budowy czynnej powierzchni ściernicy w procesie usuwania materiału (rys. 2-28).



Rys. 2-28. Porównanie sił szlifowania (a), chropowatości powierzchni PO (b) oraz zużycia objętościowego (c) ściernicy konwencjonalnej – WA80L7V i warstwowej – WA(36,46,60,80)L7V [NAK84]

Siły szlifowania (normalna F_n i styczna F_t) przy szlifowaniu ściernicą wielowarstwową pozostają na prawie stałym poziomie w długim okresie szlifowania. Natomiast konwencjonalne narzędzie ściernie traci właściwości skrawne już po 20 przejściach, powodując drgania układu obróbkowego (rys. 2-28a). Porównanie osiągniętych chropowatości powierzchni po szlifowaniu wskazuje, że końcowa sekcja ściernicy warstwowej jest odporna na zużycie, zapewniając żądaną chropowatość powierzchni w długich okresach pracy, w odróżnieniu do narzędzia konwencjonalnego, które na skutek stopniowej utraty zdolności skrawnych generuje powierzchnię o znacznie mniejszej gładkości (rys. 2-28b). Przewagę ściernicy warstwowej ujawniają również zarejestrowane zmiany zużycia objętościowego V_s w funkcji objętości usuniętego materiału V_w (rys. 2-28c). Narzędzie ściernie o budowie warstwowej charakteryzuje się krótkim okresem zużycia nieliniowego występującym w początkowym okresie szlifowania, po którym następuje długi okres liniowego zużycia o małej intensywności, gwarantujący stałe warunki procesu. Ściernica konwencjonalna w całym zbadanym zakresie odznaczała się bardziej intensywnym zużyciem prowadzącym do powstawania drgań układu OUPN.

2.2 Ocena efektywności procesu jednopreżściowego szlifowania otworów

Efektywność szlifowania należy rozpatrywać w aspekcie ekonomicznym, przez co można ją zdefiniować jako relację uzyskanych efektów obróbki do nakładów poniesionych na ich osiągnięcie [DUB03].

Efekty realizacji procesów szlifowania najczęściej opisywane są za pomocą następujących parametrów pośrednich [GOŁ04]:

- siła szlifowania;
- moc szlifowania;

- energochłonność właściwa szlifowania;
 - temperatura szlifowania;
 - drgania układu OUPN;
 - emisja akustyczna;
 - wydajność szlifowania
- oraz przy użyciu parametrów bezpośrednich, takich jak:
- chropowatość i falistość powierzchni po szlifowaniu;
 - naprężenia i mikrotwardość WWPO;
 - kształt i wymiary przedmiotu obrobionego;
 - makro- i mikrozużycie ściernicy
 - zalepianie CPS.

Należy zauważyć, że niektóre z parametrów pośrednich, poza oceną ilościową efektów procesu, zawierają również ich koszty, np. nakłady energetyczne lub czas szlifowania.

Efektywność szlifowania, jako kryterium oceny tego procesu pod względem technologicznym i ekonomicznym, wyrażona może być również poprzez wskaźniki ujmujące jednocześnie kilka z ww. parametrów oraz bezpośrednio uwzględniające koszty. Wskaźniki takie, zwane skojarzonymi lub syntetycznymi, stanowią zarazem ilościową ocenę właściwości (zdolności) skrawnych ściernicy, rozumianej jako zdolność do oddzielenia w określonych warunkach szlifowania odpowiedniej ilości materiału obrabianego w jednostce czasu, z zachowaniem wymaganych cech jakościowych powierzchni obrobionej i przy możliwie najmniejszych nakładach [BOR74]. W pracy [KAC78] zaproponowano stosowanie, w odniesieniu do omawianych kryteriów, pojęcia „wskaźników właściwości eksploatacyjnych ściernic”.

Wskaźniki skojarzone powinny spełniać warunek jednoznaczności oceny [KAC85, KAC85A]. Wynikiem oceny powinna być wartość określonej wielkości fizycznej lub umownej charakteryzująca właściwości eksploatacyjne narzędzia ściernego. Przydatność zastosowania ściernicy rozpatrywana jest w aspekcie możliwości spełnienia określonych wymagań i uzyskania zamierzonych wyników obróbki. Zróznicowanie zastosowań i wymagań skłania do określania odpowiadających im różnych kryteriów. Powinny być one budowane w taki sposób, aby lepszej zdolności skrawnej odpowiadała większa wartość wskaźnika. Wynika z tego, że w przypadku, gdy wskaźnik ma postać ilorazu funkcji różnych wielkości, w liczniku powinny występować wielkości, których duże wartości uznaje się za korzystne dla przebiegu i wyników obróbki, a w mianowniku wartości, których duże wielkości są niekorzystne.

Szczegółową analizę zmian sposobu oceny właściwości użytkowych ściernic, od lat dwudziestych ubiegłego wieku, przeprowadził w swojej pracy C. Niżankowski [NIŻ96].

Zestawienie najważniejszych wskaźników oraz ich podział na jakościowe, wydajnościowe, kosztów szlifowania, przebiegu szlifowania i skojarzone, przedstawiono w pracy [KOZ79] – tab. 2-I.

Tablica 2-I. Wskaźniki stosowane do pośredniej, ilościowej oceny zdolności skrawnej ściernicy [KOZ79]

Wskaźniki jakościowe	Wskaźniki wydajnościowe	Wskaźniki kosztów szlifowania	Wskaźniki przebiegu szlifowania	Wskaźniki skojarzone (syntetyczne) szlifowania
$WJ_1 = R_a$ [μm] $WJ_2 = \sigma$ [N/mm^2] $WJ_3 = \mu HV$ [N/mm^2] $WJ_4 = \Delta_k$ [μm]	$WW_1 = Q_w$ [mm^3/s] $WW_2 = Q_w/T$ [$\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$] $WW_3 = j$ [szt./s] $WW_4 = v_{fr}$ [mm/s] $WW_5 = v_p/T$ [mm/s·mm]	$WK_1 = K_{obl}/Q_w + K_d/(V_w/V_s) + K_d/\Delta V_w$ [zł/mm ³] $WK_2 = f(K_{sts}, K_{zm})$ [zł/s]	$WP_1 = F_p$ [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] $WP_7 = a_d$ [μm] $WP_8 = F_p/A_D$ [N/mm ²] $WP_9 = F_p/A_{Dc}$ [N/mm ²] $WP_{10} = \lambda = \frac{e^{-\ln \frac{Q_w'/F_p'}{Q_w/F_p}}}{t_2 - t_1}$ [s ⁻¹]	$WS_1 = G = V_w/V_s$ [mm ³ /mm ³] $WS_2 = V_w/V_w$ [mm ³ /mm ³] $WS_3 = V_w/V_s \cdot P_c$ [W ⁻¹] $WS_4 = V_w/V_s \cdot P_c \cdot R_a$ [W ⁻¹ · μm ⁻¹] $WS_5 = V_w \cdot F_c/V_s$ [N] $WS_6 = f_p/F_p$ [mm/s·N] $WS_7 = Q_w/F_p$ [mm ³ /s·N] $WS_8 = Q_w/P_c$ [mm ³ /s·W] $WS_9 = V_w/F_p \cdot \lambda$ [mm ³ /N] $WS_{10} = V_w/F_p \cdot \lambda \cdot \Theta$ [mm ³ /N·K] $WS_{11} = V_w^2/V_s \cdot F_p$ [mm ³ /N] $WS_{12} = 1/F_p \cdot R_a$ [N ⁻¹ · μm^2]

* gdzie λ to współczynnik charakteryzujący intensywność zmian zdolności skrawnej ściernicy w czasie szlifowania (wg Г. Б. Лурье)

Wg pracy [KOZ84] w literaturze kierunkowej można spotkać łącznie blisko sto wskaźników syntetycznych i żaden z nich nie uzyskał powszechnej akceptacji jako uniwersalne kryterium oceny właściwości skrawnych ściernicy. Zaproponowano zatem koncepcję posługiwania się rekomendowanym zbiorem niewiązanych wskaźników (tab. 2-II) pozwalających na wielostronną ilościową ocenę zdolności skrawnej ściernicy, a uwzględniając zmiany wartości tych wskaźników w czasie szlifowania, również jej potencjału skrawnego [KOZ84, KOZ84A].

Tablica 2-II. Zbiór wskaźników ilościowej, wielostronnej oceny zdolności skrawnej ściernicy [KOZ84A]

Nazwa wskaźnika	Wzór	Jednostki miary
Energia właściwa szlifowania równoważna właściwej mocy czynnej szlifowania	$E = P'_{sc} = \frac{P_c}{Q_w}$	$\frac{P_c}{Q_w}$ [W] $\frac{Q_w}{E} = P'_{sc}$ [J/mm ³]
Temperatura powierzchni przedmiotu szlifowanego lub mierzona w strefie kontaktu ściernicy z materiałem szlifowanym	$\Theta = \Theta_p$	[K]
Wydajność względna szlifowania (wskaźnik szlifowania)	$G = \frac{V_w}{V_s}$	$\frac{V_w}{V_s}$ [mm ³] V_s [mm ³] G [-]
Chropowatość powierzchni po szlifowaniu	$R = R_a$	[μm]

W wyniku prac nad kompleksową metodą oceny właściwości użytkowych ściernic „KOWUS” stworzono oryginalny wskaźnik W_{ts} zdefiniowany w oparciu o zbiór parametrów wyjściowych procesu szlifowania [KOZ84A]:

$$W_{ts} = \frac{a_d \cdot P_c}{V_s \cdot R_a} \quad [\text{W}/\text{mm}^3], \quad (2.9)$$

gdzie: a_d – amplituda drgań [μm];
 P_c – moc szlifowania [W];
 V_s – zużycie objętościowe ściernicy [mm³];
 R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości [μm].

Zmiany wartości uwzględnionych w nim parametrów odzwierciedlają zmiany zachodzące w procesie szlifowania na skutek zużywania się ściernicy. Budowa wskaźnika W_{ts} czyni go szczególnie czułym na zmiany zachodzące na CPS.

W literaturze spotkać można również wiele innych oryginalnych sposobów oceny właściwości eksploatacyjnych 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 [KÖN78];
- pomiar ciśnienia akustycznego szumów obrabiarki mierzonego w strefie szlifowania i zmian jakości WWPO w wyniku zjawiska „chatteru” [PRZ79];
- 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 [PLI84];
- pomiar różnicy temperatury w określonych przekrojach strefy szlifowania [TAW90, TAW92];
- określenie wartości czynników związanych z pracą tarcia w jej różnych formach (tarcia ślizgowe i tarcia związane z odkształceniami plastycznymi oraz tarcia wiórów o spoiwo, a także spoiwa o materiał obrabiany) na podstawie parametrów stereometrycznych CPS [MAR95];
- pomiar intensywności zalepień CPS za pomocą specjalnego przyrządu rejestrującego częstotliwość impulsów prostokątnych zmieniającej się w funkcji masy metalu nalepionego na powierzchnię ściernicy [DĄB01].

Powyższe przykłady dowodzą różnorodności zaproponowanych dotąd metod oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic. Przeprowadzone próby ujednoczenia sposobu ich oceny nie doprowadziły jednak do wypracowania zbioru kryteriów, które byłyby powszechnie uznane i stosowane w pracach badawczych. Można zatem 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 tab. 2-I w normach zdefiniowano:

- $WJ_1 = R_a$ [μm] – PN-87/M-04256/02;
- $WJ_3 = \mu HV$ [N/mm^2] – PN-87/M-04250;
- $WW_1 = Q_w$ [mm^3/s] – PN-92/M-01002/05;
- $WW_4 = v_{fr}$ [mm/s] – PN-92/M-01002/05;
- $WP_1 = F_p$ [N] – PN-92/M-01002/04;
- $WP_4 = P_c$ [kW] – PN-92/M-01002/04;
- $WS_1 = G = V_w/V_s$ [mm^3/mm^3] – PN-92/M-01002/05.

Przyjmując zaproponowaną klasyfikację kryteriów oceny [KOZ79], można założyć, że każda z kategorii powinna zostać wyrażona ilościowo jedną lub kilkoma wielkościami.

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 PO uzyskanej w rezultacie procesów szlifowania, operuje się

wyłącznie wartością parametru R_a , 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_{fr} . Natomiast przebieg procesu opisuje składowa normalna siły szlifowania F_p oraz moc szlifowania P_c .

Normy nie obejmują jednak kryteriów syntetycznych. Wyjątek stanowi wskaźnik szlifowania G definiowany ilorazem ubytku materiału obrabianego V_w (w mm^3) i zachodzącego w tym samym czasie zużycia objętościowego ściernicy V_s (w mm^3) [PN92]:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad [\text{mm}^3/\text{mm}^3]. \quad (2.10)$$

W celu przeprowadzenia kompleksowej oceny wskazane jest rozszerzenie zestawu wskaźników skojarzonych do dwóch lub trzech zbudowanych w taki sposób, aby uwzględnić jednocześnie kilka rejestrowanych wyników obróbki.

Z punktu widzenia praktyki przemysłowej szczególnie istotnym dopełnieniem zbioru kryteriów oceny procesu szlifowania są koszty realizacji obróbki. Uniwersalny wskaźnik uwzględniający całkowity koszt szlifowania K_c , na jednostkę objętości materiału obrabianego przedstawiono w pracy [SNO74]:

$$\frac{K_c}{V_w} = \frac{K_{ob}}{Q_w} + \frac{K_s}{G} + \frac{K_d}{\Delta V_w} \quad [\text{zł}/\text{mm}^3], \quad (2.11)$$

gdzie: K_{ob} – koszty stałe związane z obsługą szlifierki [zł];
 K_s – koszty wytworzenia ściernicy odniesione do jej objętości użytecznej [zł/ mm^3];
 K_d – koszty jednego cyklu diamentowania [zł];
 ΔV_w – ubytek materiału zeszlifowanego w okresie trwałości ściernicy [mm^3].

Odnosząc opisany wyżej wybór kryteriów do warunków procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów, wytypowano grupę ośmiu wskaźników pozwalających, zdaniem autora pracy, na wielostronną ocenę ilościową efektywności tego procesu.

Poza wskaźnikami wybranymi z ww. znormalizowanych wielkości (R_a , Q_w , P_c i G) i wskaźnikiem kosztów szlifowania K_c/V_w , w skład zbioru kryteriów oceny włączono również zdefiniowaną w pracy [YOO98] efektywność szlifowania E_s . To kryterium syntetyczne opisane zostało zależnością wskaźnika szlifowania G do właściwej mocy szlifowania P'_{sc} :

$$E_s = \frac{G}{P'_{sc}} \quad [\text{mm}^3/\text{W}\cdot\text{s}] \quad (2.12)$$

Jednocześnie do wskaźników przebiegu szlifowania włączono właściwą moc czynną szlifowania P'_{sc} , która stanowi moc szlifowania P_c odniesioną do wydajności ubytkowej szlifowania Q_w , wyrażonej ubytkiem materiału obrabianego w jednostce czasu [OCZ86, OCZ00, PN92A]:

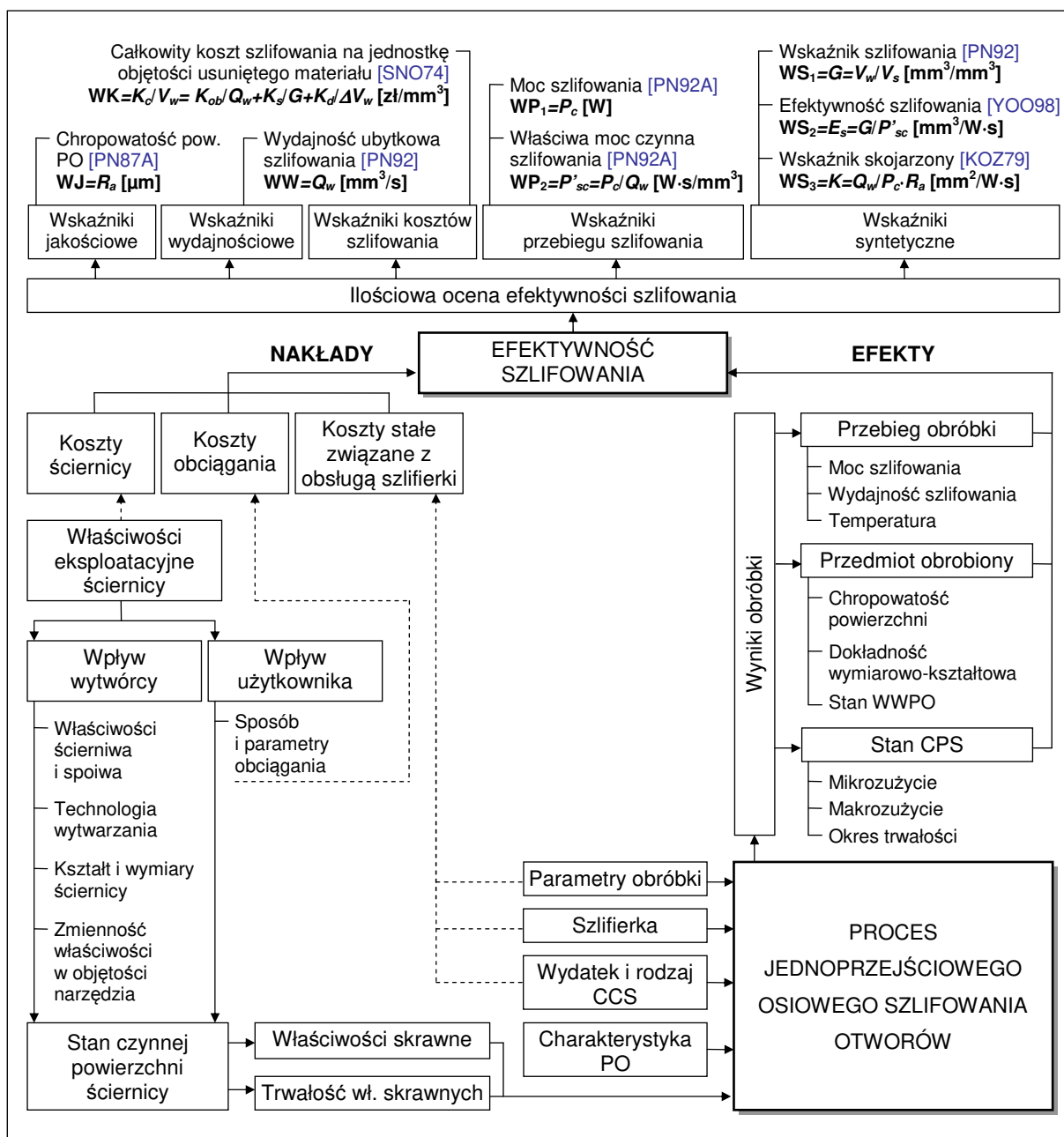
$$P'_{sc} = \frac{P_c}{Q_w} \quad [\text{W}\cdot\text{s}/\text{mm}^3]. \quad (2.13)$$

Trzeci wskaźnik syntetyczny został stworzony w oparciu o WS_8 z tab. 2-I, z tą różnicą, że uwzględniono w nim również chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego wyrażoną parametrem R_a :

$$K = \frac{Q_w}{P_c \cdot R_a} \quad [\text{mm}^2/\text{W} \cdot \text{s}]. \quad (2.14)$$

Konstrukcja wskaźnika K pozwala na kompleksowe ujęcie wydajności ubytkowej z zarejestrowanymi mocami i chropowatością powierzchni po szlifowaniu, przez co umożliwia porównanie wydajności z nakładami energetycznymi i uzyskaną jakością WWPO.

Schemat ideowo prezentujący koncepcję oceny efektywności jednoprzęściowego szlifowania otworów z uwzględnieniem podziału na pięć podstawowych grup wskaźników przedstawiono na rys. 2-29.



Rys. 2-29. Schemat przedstawiający nakłady i rezultaty jednoprzęściowego szlifowania otworów oraz ilościową ocenę efektywności tego procesu

2.3 Wnioski z analizy literatury

Analiza opisanych w literaturze metod wysoko wydajnej obróbki w jednym przejściu ściernicy pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków dotyczących procesu szlifowania otworów:

- 1) Zwiększenie wydajności ubytkowej procesu szlifowania otworów, przy zachowaniu odpowiedniej jakości WWPO, można osiągnąć poprzez usuwanie całego naddatku obróbkowego w jednym przejściu ściernicy (*peelgrinding*, Quickpoint).
- 2) Procesy tego typu realizowane są na nowoczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie, zapewniających odpowiednią sztywność oraz umożliwiającą uzyskiwanie wysokich prędkości obwodowych narzędzia ściernego dochodzących do 200 m/s.
- 3) Metoda Quickpoint, polegająca na zredukowaniu powierzchni styku ściernicy z materiałem obrabianym, możliwa jest do zrealizowania jedynie na specjalnie do tego celu opracowanych szlifiarkach produkowanych przez firmę Junker, zapewniających możliwość odchylenia wrzeciona narzędzia o niewielki kąt względem osi wrzeciona przedmiotu obrabianego.
- 4) Opisane w literaturze rozwiązania bazują na zastosowaniu odpornych na zużycie, drogich narzędzi ściernych z ziaren regularnego azotku boru, charakteryzujących się wysokością rzędu kilku milimetrów oraz walcową lub stożkowo-walcową powierzchnią czynną.
- 5) Wprowadzenie nakroju stożkowego na CPS pozwala na rozłożenie całkowitego naddatku obróbkowego na powierzchni strefy stożkowej ściernicy oraz uzyskanie zadanej chropowatości WWPO poprzez wielokrotne przeszlifowanie walcową częścią narzędzia.
- 6) Dodatkowe podniesienie jakości WWPO w tego typu procesach możliwe jest poprzez zastosowanie odmiennej wielkości ziaren w strefie szlifowania zgrubnego i wykończeniowego ściernicy z CBN.
- 7) Odpowiednie ukształtowanie zarysu czynnej powierzchni, pozwalające na funkcjonalne rozdzielenie strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego ściernicy, umożliwia realizację procesu jednoprzęściowego osiowego szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych ściernicami wykonanymi z tanih, konwencjonalnych materiałów ściernych:
 - Zmiany parametrów geometrycznych zarysu umożliwiają sterowanie efektywną grubością warstwy skrawanej w poszczególnych strefach narzędzia ściernego.
 - Wszystkie opisane ściernice zbudowane z materiałów konwencjonalnych charakteryzowały się znaczną wysokością ($T=50$ mm), dzięki której możliwe było rozdzielenie stref obróbki zgrubnej i wykończeniowej, a w konsekwencji usuwanie naddatku obróbkowego wielkości dochodzącej do $a_e=0,5$ mm w jednym przejściu narzędzia.
 - Technika taka pozwala na zwiększenie wydajności ubytkowej procesu osiowego szlifowania walcowych powierzchni zewnętrznych poprzez skrócenie czasu obróbki w porównaniu ze szlifowaniem prostoliniowo-zwrotnym oraz

jednocześnie zapewnia osiągnięcie wymaganej chropowatości powierzchni obrobionej.

- Zastosowanie ściernicy z promieniową strefą szlifowania zgrubnego pozwala na osiągnięcie nieco niższej chropowatości powierzchni PO w porównaniu do rezultatów obróbki narzędziem z nakrojem stożkowym. Jednak technika wykonania zarysu promieniowego ściernicy o promieniu np. $r_z=500$ mm za pomocą jednoziarnistego obciągacza diamentowego wymaga precyzyjnego sterowania torem obciągacza, możliwego do zrealizowania na obrabiarkach NC, lub CNC. Ukształtowanie nakroju stożkowego nawet o niewielkim kącie ($\chi=6' \div 1^\circ$) jest możliwe do wykonania również na konwencjonalnej szlifierce.
- 8) Innym rozwiązaniem umożliwiającym realizację procesu szlifowania wzdłużnego wałków w jednym przejściu ściernicami z materiałów konwencjonalnych jest wprowadzenie ich budowy warstwowej:
- Zastosowanie ściernicy o budowie warstwowej w procesie jednoprzęściowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni zewnętrznych pozwala na bardziej intensywne usuwanie nadmiaru obróbkowego przez duże ziarna i zapobiega zalepianiu CPS materiałem obrabianym dzięki zwiększonym przestrzeniom międzyziarnowym.
 - Kolejne warstwy ściernicy usuwają pozostawiony naddatek sprawniej i ze zmniejszonym zużyciem, zapewniając uzyskanie założonej chropowatości przedmiotu obrobionego.
 - Odpowiednia budowa ściernicy (całkowita wysokość, wielkości ziaren w poszczególnych warstwach oraz ich udział procentowy) pozwala utrzymać siły szlifowania na prawie stałym poziomie w długim okresie czasu pracy narzędzia przy ograniczonym jego zużyciu i jednoczesnym zapewnieniu stałej, niskiej chropowatości WWPO.
- 9) Opisane w literaturze rozwiązania pozwalające na realizację procesu jednoprzęściowego szlifowania wałków (szlifowanie ściernicą o odpowiednio ukształtowanym zarysie czynnej powierzchni oraz ściernicą o budowie warstwowej) mogą stanowić bazę do opracowania metody jednoprzęściowego szlifowania otworów narzędziami z konwencjonalnych materiałów ściernych.

Analiza materiałów źródłowych dotyczących metod oceny efektów realizacji procesu szlifowania oraz sposobów ilościowego wyrażenia właściwości eksploatacyjnych ściernic pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Efektywność szlifowania, rozumianą w kategoriach technologicznych i ekonomicznych jako relację efektów do nakładów, można ocenić za pomocą kryteriów podzielonych na pięć grup. Są to:
- wskaźniki jakościowe;
 - wskaźniki wydajnościowe;
 - wskaźniki kosztów szlifowania;
 - wskaźniki przebiegu szlifowania;
 - wskaźniki skojarzone (syntetyczne).

- 2) W literaturze spotkać można dwa kierunki prac dotyczące sposobów oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic:
 - szukanie nowych, oryginalnych sposobów oceny zdolności skrawnej narzędzi ściernych;
 - dążenie do ustalenia ogólnie akceptowanego, rekomendowanego zbioru wskaźników.
- 3) Dotychczasowe próby ujednoczenia sposobu oceny efektów szlifowania nie doprowadziły do wypracowania zbioru wskaźników, który byłby powszechnie uznany i stosowany w pracach badawczych.
- 4) Na potrzeby niniejszej pracy wytypowano grupę podstawowych wskaźników (R_a , Q_w , P_c , P'_{sc} i G), przy czym jako kryterium wyboru przyjęto znormalizowanie danego parametru. Zbiór ten uzupełniono o wskaźnik kosztów szlifowania K_c/V_w oraz dwa kryteria syntetyczne: E_s i K , które w sposób kompleksowy ujmują podstawowe wielkości wyjściowe procesu jednoprzejściowego szlifowania otworów, takie jak: V_s , V_w , P_c , Q_w i R_a .

3

CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Cel pracy

Z analizy literatury dotyczącej jednoprzęściowego szlifowania wałków oraz otworów wynika, że procesy takie realizowane są z wykorzystaniem specjalnych narzędzi ściernych o walcowej lub walcowo-stożkowej powierzchni czynnej. Ściernice te charakteryzują się małą wysokością, rzędu kilku mm, i zbudowane są z ziaren regularnego azotku boru (CBN) – ścierniwa, które poza udokumentowanymi zaletami odznacza się bardzo wysoką ceną. Przyjmuje się, że orientacyjna relacja kosztów ziaren elektrokorundu do korundu spiekanego i do CBN wynosi: 1:10:100. Stosowanie ziaren tego typu wymaga również odmiennych technik obciążania oraz stawia większe wymagania szlifierkom co do sztywności i prędkości obrotowych wrzecion ściernicy niż powszechnie stosowane korundowe materiały ściernicze.

W literaturze opisano także modyfikacje pozwalające na obróbkę jednoprzęściową walcowych powierzchni zewnętrznych ściernicami z materiałów konwencjonalnych. Zastosowanie odpowiednio ukształtowanego konturu CPS lub budowy warstwowej ściernicy o wysokości rzędu 50 mm zapewnia uzyskanie założonego rezultatu obróbkowego w jednym przejściu przy skróceniu czasu szlifowania.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie podstaw teoretycznych i doświadczalnych jednoprzęściowego procesu obwodowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych narzędziami ściernymi wykonanymi z ziaren elektrokorundu szlachetnego i mikrokrystalicznego korundu spiekanego SG. Ściernice te powinny charakteryzować się zarówno strefowo zróżnicowaną budową, jak i nakrojem stożkowym o odpowiednio dobranych parametrach geometrycznych, ukształtowanym w części atakującej CPS. Zastosowanie w jednoprzęściowym szlifowaniu otworów narzędzi zbudowanych z tanich ziaren ściernych na bazie korundu ma na celu umożliwienie jak najłatwiejszego wdrożenia tego procesu w przemyśle, na konwencjonalnych szlifierkach i przy standardowych parametrach obróbki.

Teza pracy

Na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki w zakresie dotyczącym rozpatrywanych zagadnień oraz rozważań własnych sformułowano tezę pracy.

W znanych dotychczas sposobach jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych narzędziami z walcową lub stożkowo-walcową powierzchnią czynną stosuje się supertwarde ściernice z ziaren regularnego azotku boru.

Należy oczekiwać, że zastosowanie specjalnych ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, charakteryzujących się nakrojem stożkowym o odpowiednim kącie ukształtowanym na części atakującej, zbudowanych z ziaren korundu różnego typu, gatunku i wielkości, umożliwi realizację procesu szlifowania otworów w jednym przejściu, zapewniając większą efektywność obróbki w porównaniu z konwencjonalnym szlifowaniem wieloprzęściowym.

Zakres pracy

W celu udowodnienia tezy przyjęto następujący zakres pracy:

- Przeprowadzenie analizy stanu wiedzy i techniki w zakresie badanych problemów.
- Opracowanie założeń do jednoprzęściowego procesu obwodowego szlifowania osiowych walcowych powierzchni wewnętrznych narzędziami ściernymi o strefowo zróżnicowanej budowie.
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie z wykorzystaniem metody modelowania i symulacji wpływu geometrycznych cech czynnej powierzchni narzędzia ściernego na kształtowanie powierzchni przedmiotu obrabianego.
- Wykorzystanie wyników symulacji do skonstruowania narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie.
- Zaprojektowanie i wykonanie przyrządu do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy.
- Przeprowadzenie badań doświadczalnych mających na celu:
 - określenie najkorzystniejszej budowy strefowo zróżnicowanego narzędzia ściernego ze względu na efekty procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych;
 - wyznaczenie najkorzystniejszych, ze względu na efektywność procesu i jakość powierzchni szlifowanej, warunków i parametrów szlifowania;
 - wyznaczenie okresu trwałości badanych narzędzi ściernych;
 - określenie efektywności realizacji jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie;
 - odniesienie wyników realizacji badanego procesu z zastosowaniem strefowo zróżnicowanych narzędzi ściernych do efektów szlifowania ściernicami w całości wykonanymi z ziaren jednej wielkości.
- Przeprowadzenie analizy wyników badań.
- Opracowanie wniosków końcowych i wniosków do dalszych badań.

4 MODEL SYMULACYJNY PROCESU JEDNOPRZEJŚCIOWEGO SZLIFOWANIA OTWORÓW

Modelowanie, jako narzędzie do określania wpływu poszczególnych składników procesu szlifowania na jego wynik, wymaga opracowania wielu elementarnych modeli składowych. Do najważniejszych zaliczyć należy model ziarna ściernego, model topografii ściernicy i jej zużycia, model kształtowania chropowatości powierzchni, model kinematyczny obróbki oraz model drgań. W literaturze znaleźć można wiele przykładów opracowania modeli cząstkowych, z których możliwe jest wyprowadzenie modeli uogólnionych, jednak różnice w założeniach i sposobie opisu uniemożliwiają stworzenie opisu kompleksowego.

Metody symulacji procesu szlifowania zestawione w tablicy 4-I różnią się stopniem złożoności modeli cząstkowych oraz zakresem badanych obszarów procesu szlifowania. Metody te dotyczą specyficznych problemów związanych z rozpatrywaną odmianą procesu szlifowania, przez co nie pozwalają na wyprowadzenie uogólnionych wniosków. Nie można również ich przenieść na inne procesy szlifowania.

Tablica 4-I. Opis metod symulacji procesu szlifowania [BAŁ03]

Autor	Rok	Opis metody	Badane obszary procesu szlifowania
Yosikawa H. Peklenik J. [YOS68, YOS70]	1968	Symulacja metodą Monte Carlo, w której losowo wyznaczano położenia wierzchołków profili topografii ściernicy, które następnie wykorzystane były w obliczeniach symulacyjnych kontaktu z jednym profilem materiału obrabianego, polegających na wyznaczeniu różnicy wysokości profili ściernicy i materiału obrabianego.	Metoda pozwalała na wyznaczanie rozkładów przekrojów wióra i średniej szerokości warstwy skrawanej. Możliwe było badanie wpływu warunków kinematycznych procesu oraz zmian profilu ściernicy w wyniku zużycia na aktywność ostrzy skrawających.
Pandit S.M. Sathyanarayanan G. [PAN82, PAN84, SAT85]	1982	Symulacja szlifowania obwodowego płaszczyzn z wykorzystaniem modelu topografii ściernicy opisanego poprzez złożenia dwóch sinusoid reprezentujących ziarna i ostrza skrawające. W modelu uwzględniono ugięcia ziaren.	Wyznaczono zależności funkcjonalne pozwalające przewidywać chropowatość obrabianej powierzchni na podstawie wyznaczonych charakterystyk profilu ściernicy. Możliwe było także wyznaczenie aktywnych ostrzy skrawających
König W. Steffens K. [KÖN82, STE83]	1982	Symulacja szlifowania obwodowego płaszczyzn, w której model ściernicy powstaje w wyniku pomiarów profili ściernicy oraz identyfikacji położenia ziaren na tych profilach. W obliczeniach uwzględniona jest kinematyka procesu, dla kolejnych faz pracy poszczególnych ostrzy skrawających wyznaczano kinematyczną grubość wióra.	Wyznaczano chropowatość obrabianej powierzchni, grubość wióra, aktywność ostrzy skrawających oraz wpływ warunków kinematycznych na poszczególne parametry. Obliczano także siły skrawania, rozkłady ciepła i temperatury w układzie zamkniętym procesu.
Borkowski J. Markul J. [BOR79, BOR82, MAR88]	1982	Symulacja procesu szlifowania ze specjalnym modelem narzędzia ściernego, na powierzchni którego w zorientowany sposób rozmieszczano regularnie ziarna monokrystalicznego węgla krzemu.	Wykazano, że poprzez zorientowane ułożenie ziaren ściernych można wpływać na wydajność szlifowania oraz zużywanie się ziaren ściernych.
Kruszyński B. Meldner B. [KRU95, MEL89]	1989	Symulacja szlifowania kół zębatach metodą Niles'a. Wykorzystując warunki kinematyczne procesu oraz podstawowe zależności opisujące siły i rozkłady temperatury, opracowano algorytm wyznaczania sił szlifowania i rozkładów temperatury na powierzchni obrabianych zębów.	Metoda pozwala na obliczanie sił i mocy szlifowania oraz na wyznaczenie rozkładów cieplnych na powierzchni szlifowanych zębów.

Chiu N. Malkin S. [CHI93]	1993	Symulacja szlifowania wałków, w której obliczenia dokonywane są z wykorzystaniem modeli cząstkowych poszczególnych elementów procesu szlifowania. Dane wejściowe do procesu symulacji przedstawione są w postaci liczb charakteryzujących makrogeometrię ściernicy i warunki kinematyczne oraz parametry statystyczne powierzchni ściernicy.	Możliwość obliczeń sił skrawania, mocy, objętości usuwanego materiału, temperatury, defektów cieplnych powierzchni, chropowatości powierzchni obrabianej oraz okrągłości.
Inasaki I. [INA96]	1996	Metoda symulacji obwodowego szlifowania płaszczyzn oparta o pomiary topografii ściernicy i identyfikację potencjalnych ostrzy skrawających. Dla każdego ostrza w trakcie symulacji wyznaczane są parametry kontaktu z materiałem obrabianym.	Metoda umożliwia wyznaczenie sił i mocy szlifowania, aktywności ostrzy skrawających, przewidywania chropowatości powierzchni obrabianej w oparciu o pomiary ściernicy oraz analizy wpływu warunków kinematycznych na siły szlifowania.
Chen X. Rowe B. [CHE96, CHE96A, CHE96B, CHE98]	1996	Metoda symulacji z wykorzystaniem modelu ściernicy złożonego z losowo rozmieszczonych w objętości ściernicy kulistych ziaren. Obliczeń symulacyjnych dokonano dla każdego kontaktu ziarna z materiałem obrabianym. Na potrzeby symulacji opracowano modele obciążania ściernicy i jej zużycia, elastycznych ugięć ziaren oraz powstawania wypływek.	Metoda umożliwiła badanie zmian chropowatości powierzchni obrabianej w trakcie trwania procesu, wyznaczanie sił i mocy szlifowania oraz wpływu procesu obciążania na efekty końcowe szlifowania.
Warnecke G. Zitt U. [WAR98]	1998	Symulacja obwodowego szlifowania z wykorzystaniem numerycznego modelu stereometrii ściernicy złożonego z losowo rozmieszczonych ziaren ściernych w kształcie ośmiościanu foremnego. Obliczenia polegały na wyznaczeniu dla każdego kontaktu przekroju warstwy skrawanej oraz grubości wióra. Opracowano także model przepływu ciepła z wykorzystaniem metody elementów skończonych.	W badaniach symulacyjnych wyznaczano siły i moc szlifowania, rozkłady temperatury w przedmiocie obrabianym oraz wpływ zmian temperatury na dokładność wymiarową przedmiotu.
Cooper W. Lavine A. [COO00]	2000	Metoda symulacji w oparciu o kinematykę procesu szlifowania i model topografii ściernicy zbudowany z modeli ziaren w kształcie ściętego stożka. W trakcie symulacji rejestrowane były parametry kontaktu ziarna z przedmiotem obrabianym.	Algorytm symulacji pozwalał na wyznaczenie aktywności ziaren, średniej warstwy skrawanej na jedno ziarno, długości kontaktu ziarna z materiałem, maksymalnej głębokości skrawania.
Karpiński T. Kochaniewicz P. [KOC00]	2001	Proces symulacji obwodowego szlifowania osiowego, wewnętrznych powierzchni walcowych modelami ściernic z mikro- i monokrystalicznym ziarnem CBN wraz ze szczegółową analizą mikrogeometrii powierzchni szlifowanej przedmiotu obrabianego.	W badaniach wyznaczono wpływ parametrów procesu na powstałe zarysy profilu chropowatości przedmiotu obrabianego po szlifowaniu, oceniono parametry chropowatości oraz ilości ziaren, które brały czynny udział w procesie szlifowania.

Spójny system modelowania i symulacji wpływu geometrycznych cech czynnej powierzchni ściernicy na kształtowanie powierzchni przedmiotu obrabianego przedstawił w swojej pracy B. Bałasz [BAŁ03]. Opracowany model charakteryzuje się otwartą strukturą pozwalającą na tworzenie symulacji dotyczących różnych odmian procesu szlifowania z wykorzystaniem różnych narzędzi ściernych. Stworzony model procesu szlifowania obwodowego płaszczyzn umożliwia analizę chwilowego obciążenia czynnych wierzchołków skrawających, chwilowe przekroje warstw skrawanych mające wpływ na mechanizmy tępienia i samoostrzenia się ziaren, i w efekcie pozwala na wyznaczenie chwilowych sił szlifowania, obciążenia poszczególnych ziaren, stanu i zużycia oraz wykruszania się ziaren.

Opisywany system pozwala na modelowanie różnego rodzaju ściernic o zadanej koncentracji i geometrii, zbudowanych z różnych typów ziaren ściernych i osadzonych w różnych spoiwach. Stwarza również możliwość dostosowania modelu symulacyjnego do

procesu osiowego szlifowania obwodowego otworów poprzez modyfikację modelu kinematycznego. Wymienione cechy stanowią o przewadze tej metody nad innymi sposobami symulacji procesu szlifowania. Uniwersalność tego narzędzia pozwoliła na jego wykorzystanie do zamodelowania i symulacji jednoprzęściowego procesu obwodowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych nowymi narzędziami ściernymi.

4.1 Struktura modelu

Podczas tworzenia modelu symulacyjnego jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów opracowano następujące modele cząstkowe:

- model topografii ziaren ściernych;
- model topografii ściernicy;
- model kinematyki procesu;
- model usuwania materiału i powstawania wypływek;
- model kształtowania topografii powierzchni przedmiotu obrabianego.

4.1.1 Modelowanie topografii ziaren ściernych

W zastosowanej metodzie symulacji przyjęto założenie, że dla procesu szlifowania istotne są obrysy ziaren wystające ponad powierzchnię ściernicy oraz ich kształt powyżej poziomu spoiwa, gdyż jedynie te fragmenty ziarna mają kontakt z materiałem obrabianym.

Powierzchnia ziarna opisana jest funkcją, której składniki determinują kształt ziarna $f_{kszaltu}(x,y)$ oraz mikrotopografię (zakłócenia kształtu) $f_{mp}(x,y)$. Składowe funkcje łączone są addytywnie lub multiplikatywnie (4.1):

$$Z_k(x, y) = k_{kszaltu}(x, y) + f_{mp}(x, y). \quad (4.1)$$

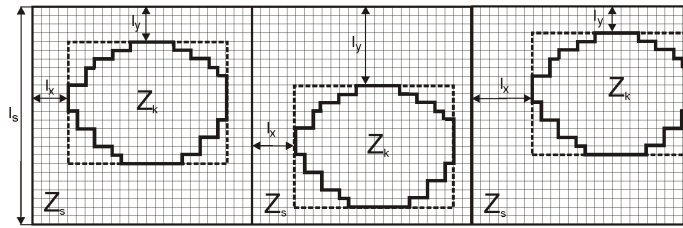
Numeryczny zapis otrzymanego kształtu ziarna dokonywany jest przy użyciu macierzy liczb rzeczywistych Z_k (4.2), której wymiar określany jest na podstawie założeń dotyczących wielkości modelowanego ziarna. Wraz ze wzrostem wielkości wymiarów ziarna wzrasta wymiar macierzy:

$$Z_k(x, y) = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

gdzie:

$$z_{ij}(x_i, y_j) = f_{kszaltu}(x_i, y_j) + f_{mp}(x_i, y_j). \quad (4.3)$$

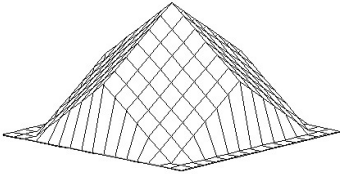
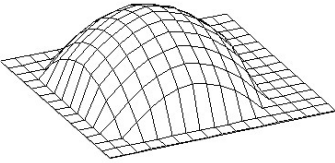
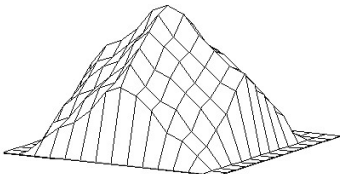
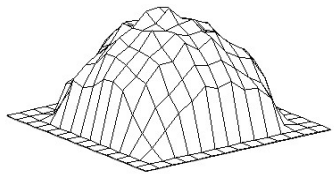
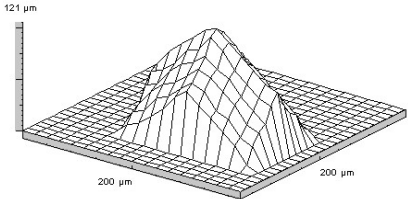
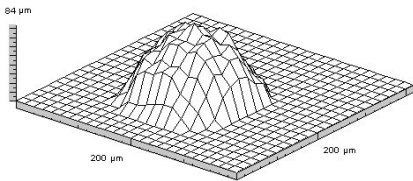
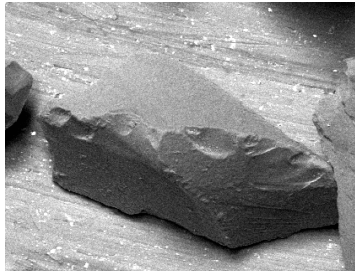
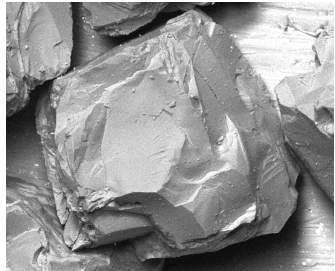
Otrzymane modele powierzchni ziarna dołączone są do modelu elementarnego pasma $[x_s, y_s]$ powierzchni ściernicy (rys. 4-1). Szerokość tego pasma, położonego wzdłuż tworzącej ściernicy, wpływa na cechy modelowej ściernicy. Położenie ziarna na powierzchni ściernicy ma charakter losowy. W celu zapewnienia właściwego rozkładu rozmieszczenia ziaren na powierzchni ściernicy, w modelu uwzględnia się wartości wskaźników determinujących pozycję ziarna l_x, l_y zgodnie z rozkładem liczb losowych, charakteryzujących rozmieszczenie ziaren na powierzchni ściernicy rzeczywistej.



Rys. 4-1. Schemat rozmieszczenia ziarna na powierzchni bazowej [BAŁ03]

Zastosowana metoda modelowania ziarna ściernego umożliwia generowanie modeli różnego rodzaju ziaren ściernych z różnych materiałów. Jest to możliwe dzięki właściwemu doborowi funkcji kształtu ziarna oraz jej współczynników. W tabelicy 4-II przedstawiono etapy tworzenia modeli ziaren ściernych elektrokorundu szlachetnego i SG.

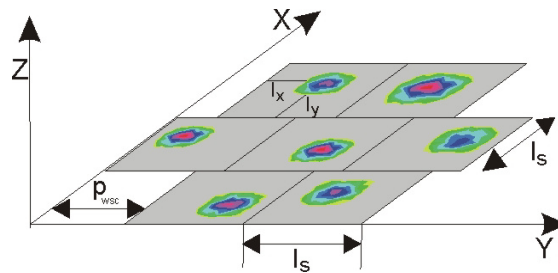
Tablica 4-II. Etapy tworzenia modeli ziaren elektrokorundu szlachetnego i SG

	SG	Elektrokorund
Funkcja kształtu	$f_{kształtu}(x,y) = ((x + y) / w_k) - \text{Max}((x + y) / w_k)$ 	$f_{kształtu}(x,y) = ((x^2 + y^2) / w_k + a x + by) - \text{Max}((x^2 + y^2) / w_k + a x + by)$ 
	↓	↓
+ funkcja mikrotopografii	$f_{mp}(x,y) = \text{Random}(\text{Real}, \{a_i; b_i\})$ 	$f_{mp}(x,y) = \text{Random}(\text{Real}, \{a_i; b_i\})$ 
	↓	↓
+ funkcja położenia ziarna	$f_{położenia}(x,y) = \text{Random}(\text{Integer}, \{0; l_{max}\})$ 	$f_{położenia}(x,y) = \text{Random}(\text{Integer}, \{0; l_{max}\})$ 
Ziarno rzeczywiste		

Modele ziaren ściernych powstały w oparciu o pomiary wymiarów gabarytowych i kątów wierzchołkowych ziaren rzeczywistych oraz z uwzględnieniem obrazów uzyskanych za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (załącznik Z.4).

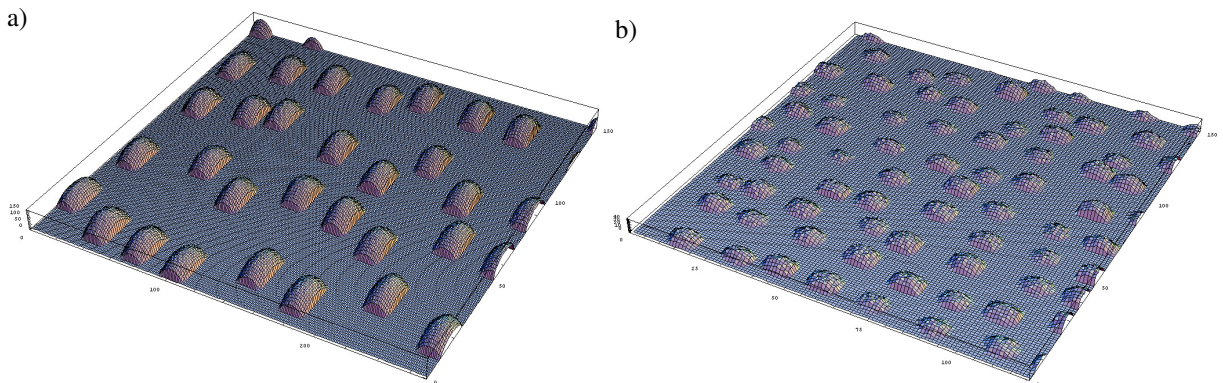
4.1.2 Modelowanie topografii CPS

Modelowana powierzchnia ściernicy powstaje w wyniku złożenia komórek bazowych zawierających pasma elementarne powierzchni ściernicy oznaczane jako w_{sc} , które składają się z kolumn sąsiadujących ze sobą ziaren elementarnych. Ich liczba wyznaczana jest na podstawie wymiarów ściernicy. W celu zwiększenia losowego charakteru rozmieszczenia ziaren na powierzchni ściernicy, każdy wiersz ziaren dodatkowo przesuwany jest o losową wartość p_{wsc} w stosunku do sąsiadujących wierszy (rys.4-2).



Rys. 4-2. Rozmieszczenie ziaren na powierzchni ściernicy [BAŁ03]

Otrzymany model powierzchni ściernicy zapisywany jest w postaci tablicy liczb rzeczywistych o wymiarze wynikającym z parametrów ściernicy. W efekcie możliwe jest wygenerowanie czynnej powierzchni ściernicy o założonej mikrogeometrii odpowiadającej strefom szlifowania zgrubnego (rys. 4-3a) i wykończeniowego (rys. 4-3b).



Rys. 4-3. Model powierzchni strefy szlifowania zgrubnego (a) i wykończeniowego (b) ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie [NAD04A]

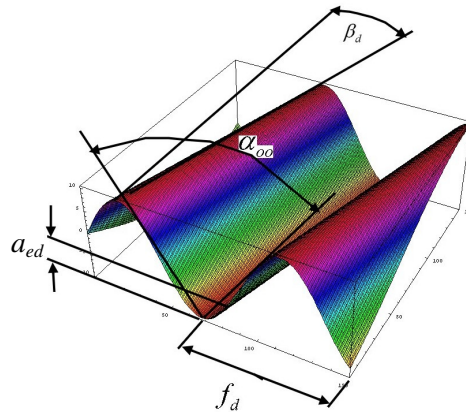
Przestrzeń między ziarnami ściernicy wypełniana jest następnie przez spoiwo i pory. Na potrzeby modelu CPS założono, że topografia spoiwa stanowić będzie odwzorowanie powierzchni fragmentu ściernicy rzeczywistej, uzyskane w wyniku pomiaru z użyciem profilometru. W kolejnym kroku spoiwo rozmieszczane jest wokół ziaren znajdujących się na czynnej powierzchni ściernicy wg poniższej zależności:

$$S_c(x, y) = \begin{cases} S_p(x, y) & \text{gdy } S_c(x, y) < S_p(x, y) \\ S_c(x, y) & \text{gdy } S_c(x, y) > S_p(x, y) \end{cases}, \quad (4.4)$$

gdzie: S_c – maksymalna wysokość wierzchołków profilu;
 S_p – maksymalna wysokość powierzchni spoiwa.

Wynika z niej, że dla każdego punktu topografii ściernicy modelowej, którego wartość rzędnej jest mniejsza od wartości rzędnej punktu topografii spoiwa, jego wartość jest zastępowana wartością rzędnej spoiwa.

W końcowym etapie model topografii czynnej powierzchni ściernicy uzupełniany jest o ślady zabiegu obciągania wykonanego jednoziarnistym obciągaczem diamentowym, poruszającym się z posuwem v_{fad} po linii śrubowej o skoku f_d i pracującym na głębokości a_{ed} .



Rys. 4-4. Model powierzchni uzyskanej w wyniku ruchu obciągacza [BAŁ03]

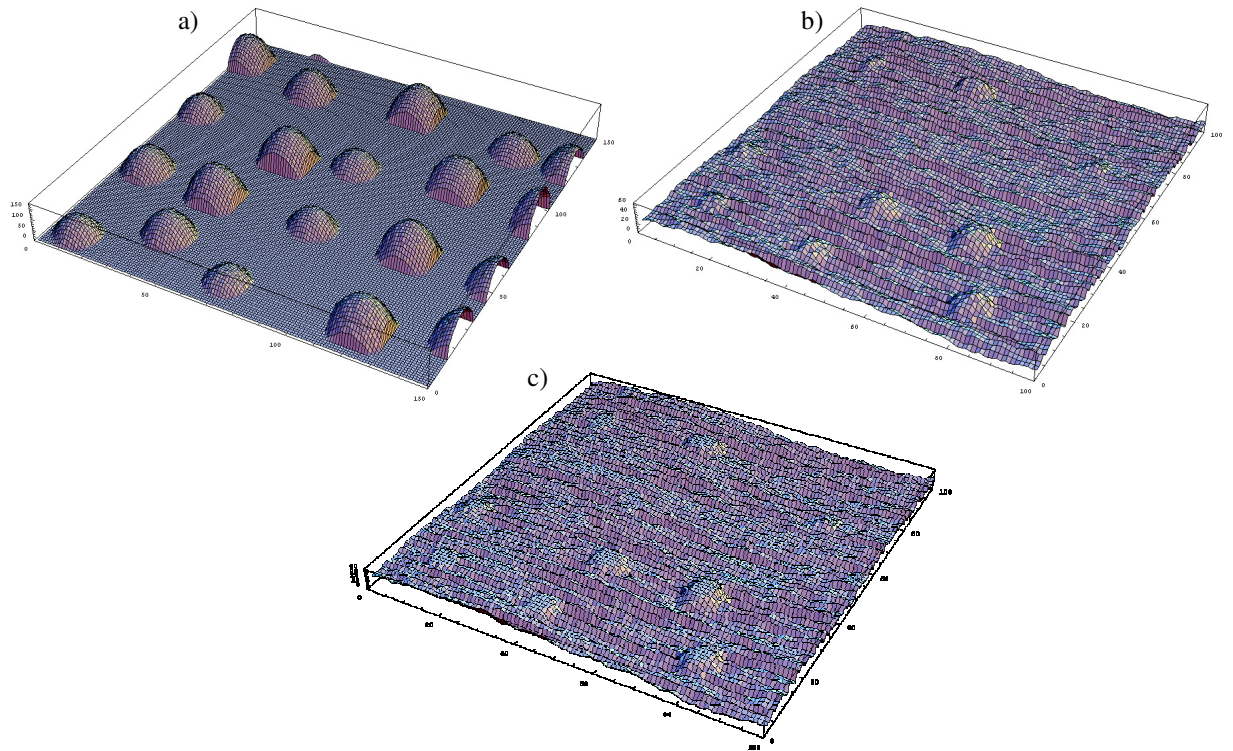
Model procesu obciągania ściernicy opiera się na wyznaczeniu powierzchni odzwierciedlającej rezultat uzyskany po przejściu ostrza obciągacza na powierzchni ściernicy (rys. 4-4). Funkcja opisująca trajektorię ruchu obciągacza ma następującą postać:

$$f_o(x, y) = B_d \cdot \sin(C_d(x - A_d y)), \quad (4.5)$$

gdzie: A_d , B_d , C_d – współczynniki regulujące kształt powierzchni.

Współczynniki A_d , B_d , i C_d uwzględniają takie parametry, jak: kąt pochylenia linii śrubowej β_d oraz kąt linii obciągania α_{oo} , dzięki czemu pozwalają na uzyskanie oczekiwanego kształtu powierzchni tworzonej podczas obciągania.

Dodanie do modelu CPS geometrycznych zmian związanych z zabiegiem obciągania następuje poprzez ustalenie wzajemnego położenia zarysu obciągacza i topografii ściernicy modelowej, zgodnego z zadaną głębokością obciągania a_{ed} . Następnie wyznacza się wysokości punktów na powierzchni ściernicy modelowej, położonych powyżej powierzchni pracy obciągacza, poprzez zmniejszenie ich wysokości do wartości punktów powierzchni obciągania. W rezultacie następuje usuwanie spoiwa oraz modyfikacja kształtu ziaren (rys. 4-5).

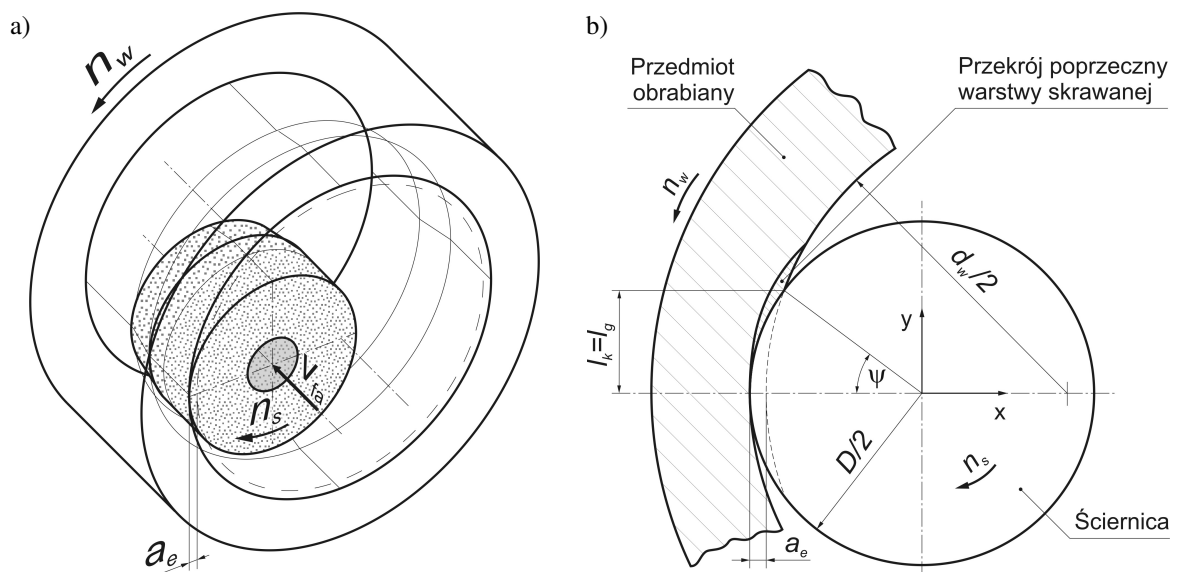


Rys. 4-5. Kolejne etapy modyfikacji modelu topografii czynnej powierzchni ściernicy: a) model podstawowy; b) model ze spoiwem; c) model po dodaniu efektu obciążania

Geometria strefy szlifowania zgrubnego uwzględnia również wartości parametrów nakroju stożkowego (kąt χ i szerokość b) modelowanego narzędzia ściernego.

4.1.3 Model kinematyczny

W modelu kinematyki procesu jednoprzęciowego obwodowego szlifowania osiowego otworów opisane zostały zależności pomiędzy przemieszczeniami ziaren ściernicy w stosunku do przedmiotu obrabianego w kartezjańskim układzie współrzędnych (rys. 4-6).



Rys. 4-6. Schemat kinematyki procesu jednoprzęciowego osiowego szlifowania otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie: a) schemat ogólny procesu; b) wielkości geometryczne

Przyjęto następujące założenia dotyczące modelu kinematycznego:

- ze względu na zakres badań związanych z mikroskrawaniem przy niewielkich zagłębieniach ziaren w materiał obrabiany a_z oraz małym stosunku prędkości $q=v_s/v_w$, geometryczna długość styku l_g wyznaczana jest z zależności:

$$l_g = \sqrt{a_e \cdot D_{eq}}, \quad (4.6)$$

gdzie równoważna średnica ściernicy D_{eq} obliczana jest następująco:

$$D_{eq} = \frac{D \cdot d_w}{d_w - D}; \quad (4.7)$$

- kinematyczną długość styku przyjęto jako równą długości geometrycznej: $l_k=l_g$;
- prędkość obwodowa ściernicy v_s i przedmiotu obrabianego v_w , a także prędkość posuwu osiowego v_{fa} , są niezmiennie w trakcie trwania procesu;
- tor ruchu osi ściernicy względem osi przedmiotu jest równoległy;
- drgania promieniowe ściernicy względem przedmiotu szlifowania są pomijalnie małe w porównaniu z grubościami a_z warstw skrawanych;
- założono, że ściernica i przedmiot obrabiany są elementami idealnie sztywnymi, tzn., że odkształcenia sprężyste przedmiotu w strefie szlifowania są pomijalnie małe w stosunku do grubości warstw skrawanych;
- pominięto modelowanie form zużycia ziaren zachodzącego w trakcie realizacji procesu obróbkowego;
- początkowe zarysy przedmiotu obrabianego (zbiory danych opisujące mikrogeometrię powierzchni obrabianego przedmiotu) pochodzą z pomiarów rzeczywistego przedmiotu przed obróbką.

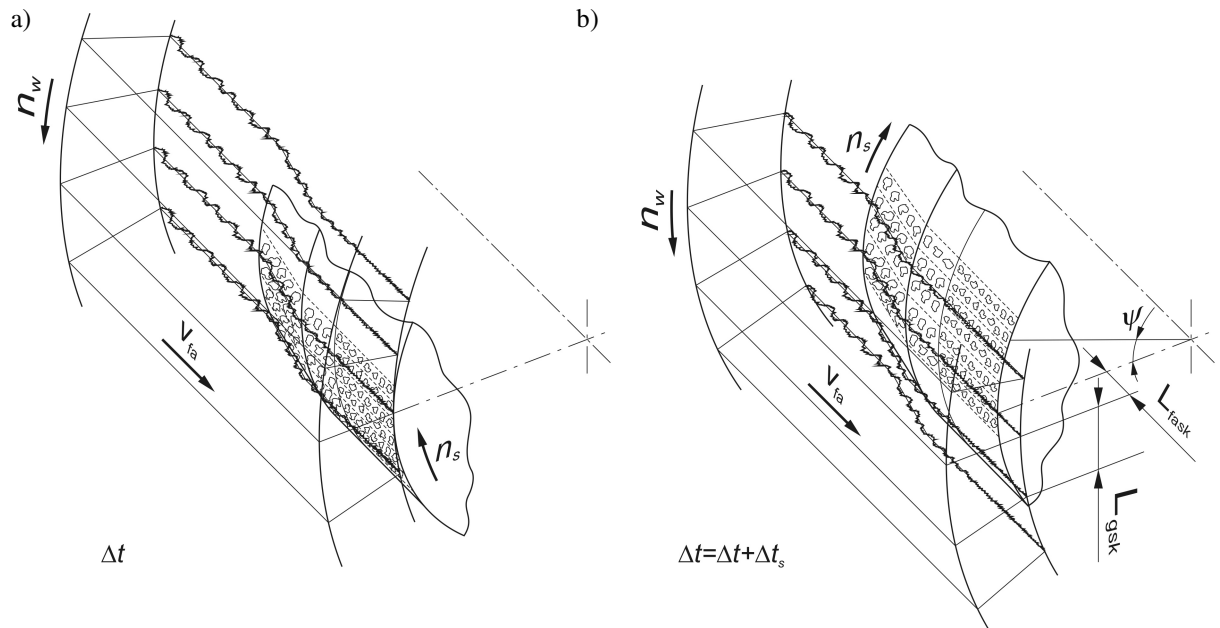
Podstawę opisu kinematyki stanowi równanie toru ruchu pojedynczego ziarna na drodze skrawania w strefie szlifowania, które w przypadku badanego procesu przyjmuje następującą postać:

$$x = \left(\frac{1}{D_{eq} \cdot \left(1 + \frac{1}{q}\right)^2} - \frac{1}{d_w} \right) \cdot y^2. \quad (4.8)$$

Obliczenia symulacyjne dokonywane są w dyskretnych odstępach czasu Δt . Symulacja upływu czasu rzeczywistego dokonuje się na podstawie stałej wartości przyrostu czasu Δt_s , którego wielkość określa jest z uwzględnieniem parametrów geometrycznych i kinematycznych procesu. Jest to czas potrzebny na przemieszczenie się profilu przedmiotu poruszającego z prędkością posuwu osiowego v_{fa} na drodze skrawania o odcinek drogi L_{gsk} :

$$\Delta t_s = \frac{L_{gsk}}{v_{fa}}. \quad (4.9)$$

W trakcie przemieszczania się profilu przedmiotu na drodze L_{gsk} , następuje obrót ściernicy o kąt ψ oraz przemieszczenie się wierszy ziaren ściernicy wchodzących w kontakt z materiałem o odcinek L_{fask} (rys. 4-7).



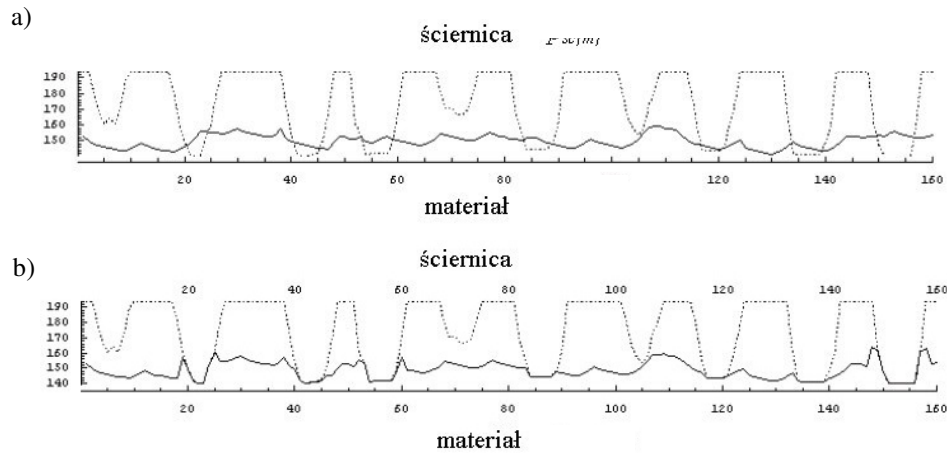
Rys. 4-7. Schemat przedstawiający sposób dyskretyzacji symulacji procesu jednoprzęściowego obwodowego szlifowania osiowego otworów: a) symulacja w chwili Δt ; b) kolejny krok dla $\Delta t = \Delta t + \Delta t_s$

4.1.4 Model kształtowania topografii powierzchni

W opisywanej metodzie kształtowanie powierzchni przedmiotu obrabianego następuje w wyniku kontaktu profilu poprzecznego przedmiotu z profilami ściernicy na drodze szlifowania. Profile ściernicy przemieszczają się wzdłuż strefy szlifowania przez kolejne punkty z prędkością posuwu wzdłużnego v_{fa} . Proces kształtowania rozpoczyna się od ustalenia położenia początkowego profilu przedmiotu i ściernicy w najwyższym punkcie wynikającym z zadanej głębokości skrawania a_e . Z warunków kinematycznych wyznaczana jest liczba pasm ziaren ściernicy, które będą miały kontakt z przekrojem przedmiotu w danej jednostce czasu Δt . W kolejnym kroku (przyrost czasu Δt) następuje przemieszczenie się przedmiotu, wyznaczenie kolejnych pasm ściernicy i następnie określenie ich położenia wynikającego z trajektorii ruchu ziarna.

Modyfikacja zarysu przedmiotu obrabianego wywołana usuwaniem i przemieszczaniem materiału wyznaczana jest jako różnica wartości rzędnych profilu przedmiotu i ściernicy w danym punkcie. Ponieważ znane jest położenie każdego ziarna na powierzchni ściernicy, a tym samym znany jest jego kształt, przed każdym kontaktem danego przekroju przedmiotu i ziarna ściernego wyznaczone zostają parametry kontaktu mające wpływ na typ kontaktu. W przypadku spełnienia warunków skrawania, wyznaczane są wielkości wpływów dla danego kontaktu.

Przykładowy kontakt profilu przedmiotu obrabianego z jednym zarysem ściernicy w trakcie trwania procesu symulacji przedstawiono na (rys. 4-8).



Rys. 4-8. Sposób kształtowania powierzchni przedmiotu obrabianego w procesie symulacji: a) zarys ściernicy i PO przed kontaktem; b) zarysy po kontakcie [BAŁ03]

W trakcie realizacji procesu symulacji, rejestrowane są parametry kontaktów dla każdego ziarna w postaci wektora liczbowego o następującej postaci:

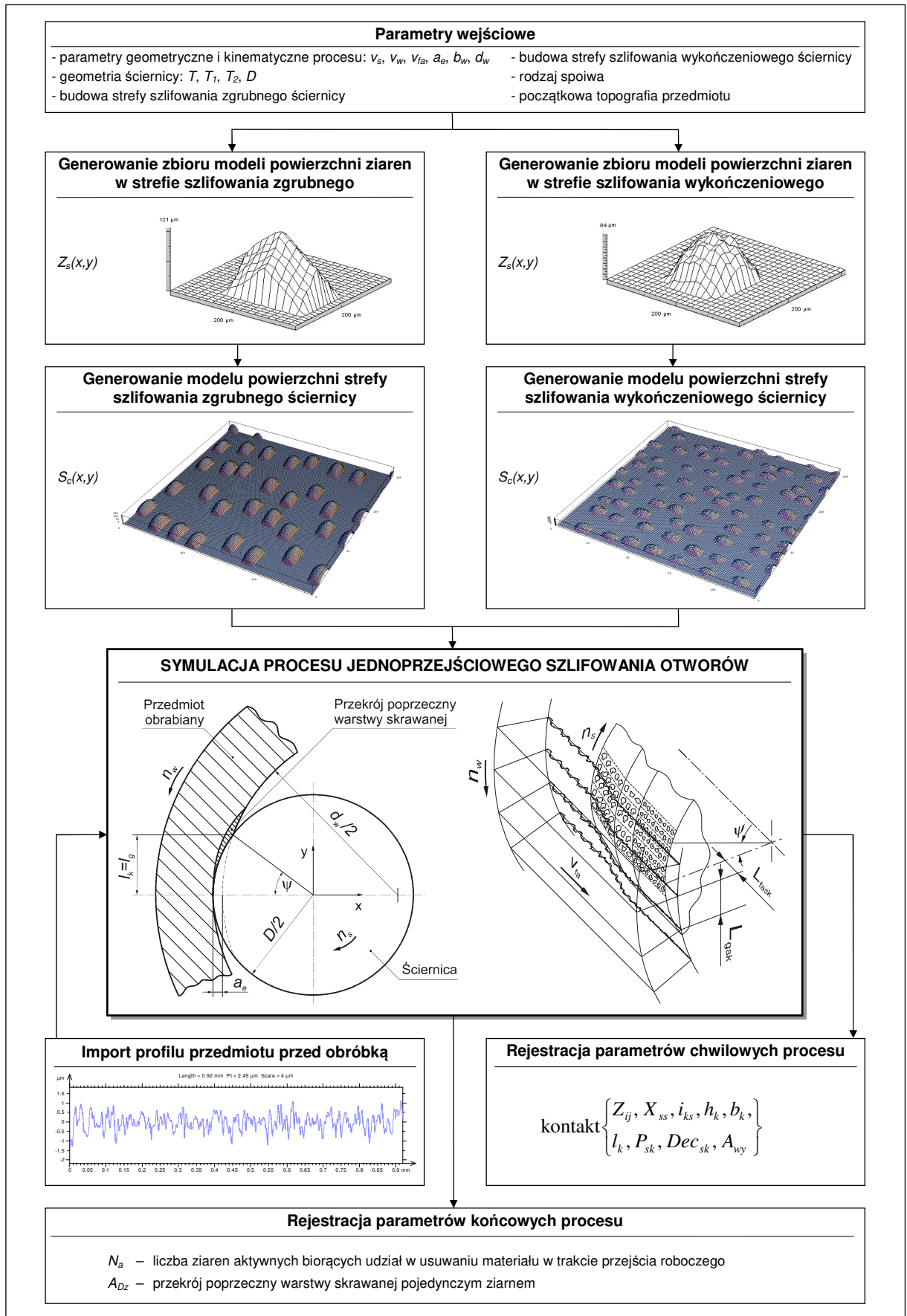
$$\text{kontakt} \{ Z_{ij}, X_{ss}, i_{ks}, h_k, b_k, l_k, P_{sk}, Dec_{sk}, A_{wy} \}, \quad (4.10)$$

gdzie: Z_{ij} – numer ziarna na ściernicy;
 X_{ss} – położenie przekroju w strefie szlifowania;
 i_{ks} – numer etapu symulacji;
 h_k, b_k, l_k – odpowiednio: głębokość, szerokość i długość kontaktu;
 P_{sk} – wyznaczone prawdopodobieństwo skrawania danym ziarnem;
 Dec_{sk} – podjęta decyzja dotycząca typu kontaktu;
 A_{wy} – pole powierzchni wypływek.

Opisywana metoda symulacji umożliwia zapamiętywanie stanów pośrednich zarówno parametrów procesu, jak i profili mikrogeometrii powierzchni przedmiotu obrabianego. Dzięki temu możliwe jest zatrzymanie procesu w dowolnej chwili i przeprowadzenie analizy przebiegu zmienności chropowatości poszczególnych zarysów przedmiotu.

4.2 Symulacja procesu szlifowania jednoprzęściowego otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

Proces symulacji można podzielić na trzy główne etapy: generowanie powierzchni ziaren ściernych, generowanie topografii powierzchni ściernicy oraz etap obliczeń symulacyjnych kontaktu ziarna z przedmiotem obrabianym (rys. 4-9).



Rys. 4-9. Schemat symulacji procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

4.2.1 Cel, zakres i warunki symulacji

Model symulacyjny opisujący wpływ geometrycznych cech czynnej powierzchni ściernicy na kształtowanie powierzchni przedmiotu obrabianego wykorzystany został w niniejszej pracy do rozpoznania wpływu zmian struktury czynnej powierzchni narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie na warunki procesu jednoprzęściowego szlifowania osiowego otworów.

Zakres badań symulacyjnych obejmował wyznaczenie liczby ziaren aktywnych biorących udział w usuwaniu materiału w czasie przejścia roboczego ściernicy N_a oraz przekrojów poprzecznych warstw skrawanych pojedynczym ziarnem A_{Dz} , przy następujących zmiennych parametrach budowy ściernicy:

- rodzaj ziaren w poszczególnych strefach: 99A/SG; SG/99A; SG/SG;
- wielkość ziaren w strefie szlifowania zgrubnego: 46; 60;
- wielkość ziaren w strefie szlifowania wykończeniowego: 60; 80; 120;
- wysokość ściernicy: $T=10, 15, 20$ mm;
- udział wysokości stref: $T_1/T_2=50/50; 60/40; 70/30; 80/20; 90/10$.

Stała pozostawała średnica ściernicy $D=35$ mm oraz średnica i szerokość przedmiotu obrabianego ($d_w=40$ mm, $b_w=18$ mm).

Badania symulacyjne podzielone zostały na trzy podstawowe etapy. W pierwszym ustalono wpływ rodzaju i wielkości ziaren w poszczególnych strefach narzędzia ściernego dla $T_1/T_2=70/30$ i $T=20$ mm. Następnie ustalono wpływ zmian udziału stref T_1/T_2 i wysokości T . W końcowej fazie badań porównano wyniki uzyskane narzędziem ściernym o najlepszych właściwościach do wyników symulacji szlifowania przeprowadzonej z wykorzystaniem ściernicy konwencjonalnej o budowie jednorodnej.

Wszystkie symulacje procesu jednoprzęściowego szlifowania osiowego otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie przeprowadzone zostały dla następujących stałych parametrów obróbki:

- prędkość obwodowa ściernicy: $v_s=60$ m/s;
- prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego: $v_w=0,8$ m/s;
- prędkość posuwu osiowego stołu: $v_{fa}=1,0$ mm/s;
- styk roboczy: $a_e=0,1$ mm;
- kąt nakroju stożkowego wynika z wartości styku roboczego ($a_e=0,1$ mm) i szerokości nakroju ($b=0,9 \cdot T_2$):

$$\chi = \tan^{-1}(a_e/b) \quad [^\circ]. \quad (4.11)$$

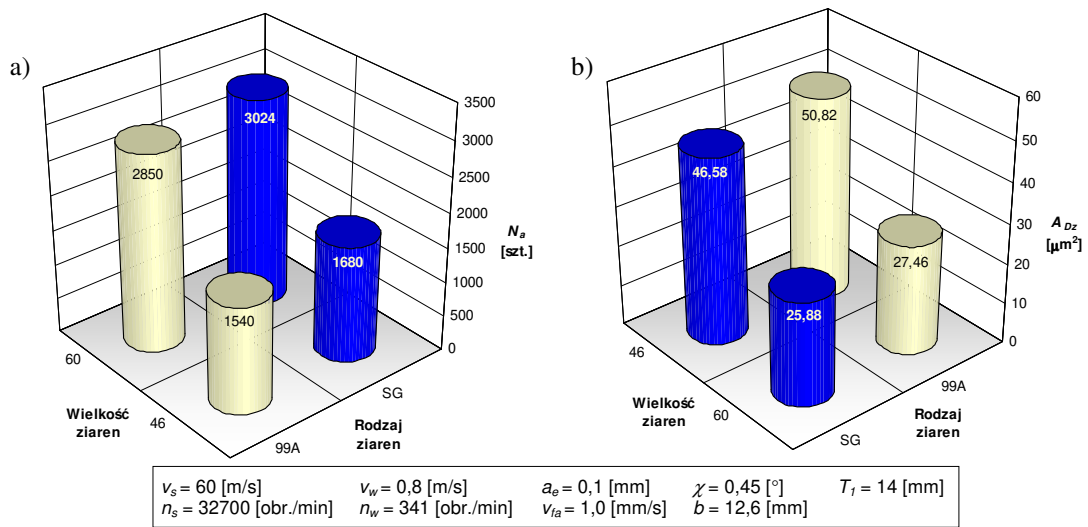
4.2.2 Wyniki symulacji

W pierwszej części badań symulacyjnych określono wpływ rodzaju (99A¹, SG²) i wielkości ziaren (46, 60) użytych do budowy strefy szlifowania zgrubnego o wysokości $T_1=14$ mm (co odpowiada 70% udziałowi strefy T_1 w całkowitej wysokości ściernicy $T=20$ mm) na przyjęte wielkości wyjściowe (N_a, A_{Dz}).

¹ 99A – elektrokorund szlachetny, charakteryzujący się budową polikrystaliczną.

² SG – mikrokryształiczny korund spiekany wytwarzany metodą zarodkowania w żelu (*Seeded Gel* – SG)

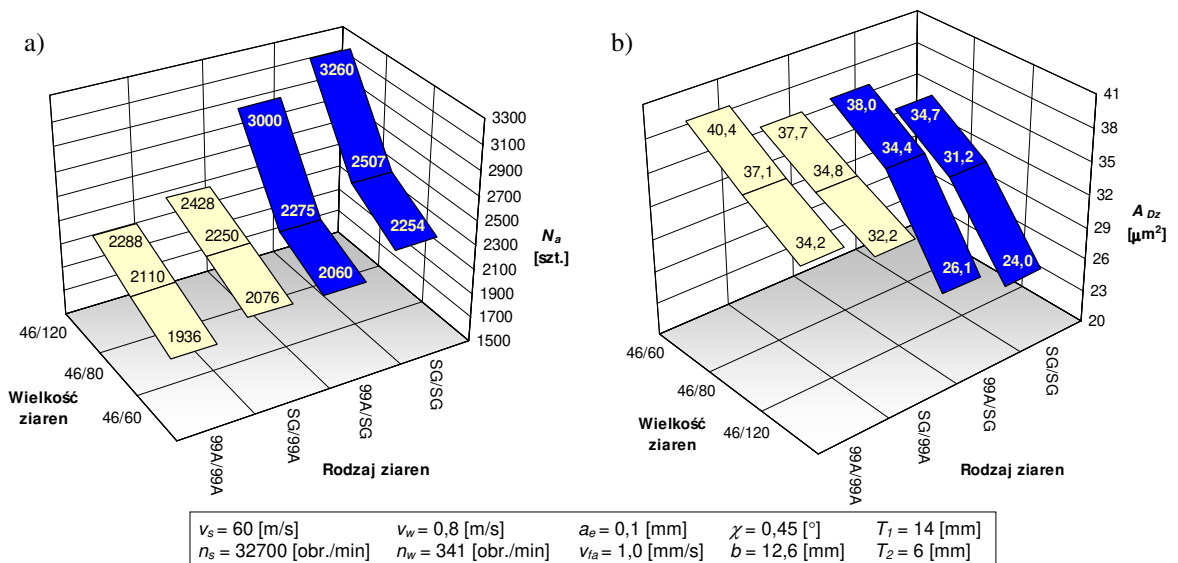
Uzyskane wyniki symulacji wskazują na możliwość zwiększenia liczby aktywnych wierzchołków skrawających w przypadku zastosowania w strefie szlifowania zgrubnego mikrokrystalicznych ziaren korundu spiekane SG (rys. 4-10a).



Rys. 4-10. Wpływ rodzaju i wielkości ziaren w strefie szlifowania zgrubnego na liczbę ziaren aktywnych N_a (a) i przekroje poprzeczne warstw skrawanych pojedynczym ziarnem A_{Dz} (b) przy obróbce wyłącznie obszarem szlifowania zgrubnego ściernicy

Liczba ziaren aktywnych jest bezpośrednio związana z przekrojem warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem, która maleje wraz ze wzrostem N_a (rys. 4-10b). Ze sporządzonych wykresów wynika, że zróżnicowanie wielkości ziaren ściernych w znacznie większym stopniu wpłynęło na wartości parametrów N_a i A_{Dz} . Zmniejszenie wielkości ziaren z 46 do 60 spowodowało około 45% wzrost liczby ziaren aktywnych oraz znaczne zmniejszenie przekrojów warstw skrawanych pojedynczym ziarnem (rys. 4-10a, b).

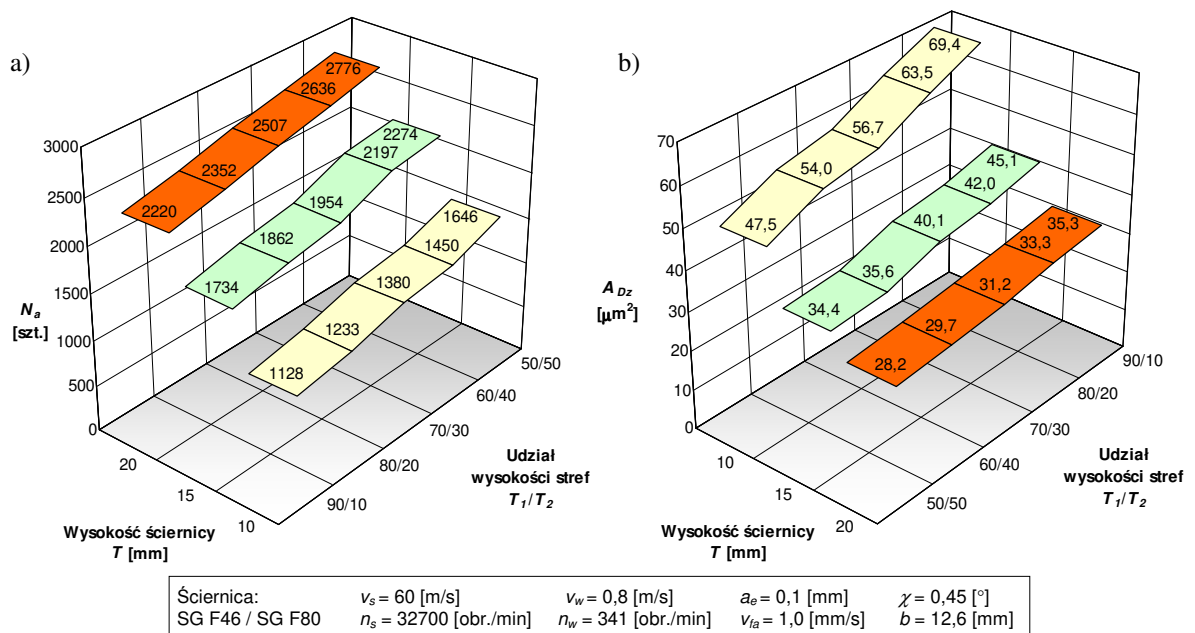
W dalszych badaniach symulacyjnych określono wpływ wielkości (60, 80, 120) oraz rodzaju ziaren (99A, SG) użytych do budowy strefy szlifowania wykończeniowego ściernicy o wysokości $T_2=6$ mm na liczbę ziaren aktywnych N_a i przekroje poprzeczne skrawane pojedynczym ziarnem A_{Dz} (rys. 4-11a, b).



Rys. 4-11. Wpływ rodzaju i wielkości ziaren w strefie szlifowania wykończeniowego ściernicy na liczbę ziaren aktywnych N_a (a) i przekroje poprzeczne warstw skrawanych pojedynczym ziarnem A_{Dz} (b)

Przedstawione wyniki (rys. 4-11a, b) uzyskano podczas symulacji obróbki strefą szlifowania wykończeniowego o różnej charakterystyce, przy stałej wielkości ziaren 99A lub SG w strefie szlifowania zgrubnego wynoszącej 46. Również z tych badań wynika, że zastosowanie modeli mikrokrystalicznych ziaren SG pozwala zdecydowanie (nawet o 25%) zwiększyć liczbę wierzchołków aktywnych zarejestrowanych w strefie styku ściernicy z przedmiotem obrabianym. Jest to szczególnie widoczne w przypadku zastosowania ziaren SG wielkości 120 do budowy strefy szlifowania wykończeniowego ściernicy (rys. 4-11a). Większa liczba N_a powoduje jednocześnie zmniejszenie wielkości przekroju poprzecznego warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem (rys. 4-11b). Wyniki symulacji uzyskane w przypadku, gdy w strefie szlifowania zgrubnego znajdowały się ziarna SG, charakteryzują się nieco korzystniejszym przebiegiem w porównaniu do rezultatów zarejestrowanych w trakcie symulacji szlifowania ściernicami z ziarnami 99A w stożkowej strefie atakującej narzędzia ściernego. Z wykresów przedstawionych na rys. 4-11 wynika, że decydujący wpływ na wartości parametrów N_a i A_{Dz} w badanym procesie ma wielkość ziaren. Zmniejszenie rozmiaru ziaren w strefie szlifowania wykończeniowego (o wysokości $T_2=6$ mm) z 60 do 120 pozwoliło na zwiększenie liczby ziaren aktywnych o 50% w przypadku ziaren korundu spiekane oraz o niecałe 20% dla ziaren elektrokorundu szlachetnego (rys. 4-11a).

W kolejnym etapie badań symulacyjnych określono, w jaki sposób, na szukane parametry (N_a , A_{Dz}) wpływa zmiana całkowitej wysokości ściernicy T oraz zróżnicowanie udziału procentowego wysokości poszczególnych stref funkcjonalnych narzędzia ściernego T_1/T_2 , na przykładzie ściernic zbudowanych z ziaren SG o wielkości 46 w strefie szlifowania zgrubnego i 80 w części wykończeniowej (rys. 4-12).



Rys. 4-12. Wpływ całkowitej wysokości ściernicy T i udziału wysokości stref T_1/T_2 na liczbę ziaren aktywnych N_a (a) i przekroje poprzeczne warstw skrawanych pojedynczym ziarnem A_{Dz} (b)

Jak widać na sporządzonych wykresach (rys. 4-12), wysokość ściernicy T wprost proporcjonalnie wpływa na liczbę ziaren znajdujących się na czynnej powierzchni ściernicy, a co za tym idzie, na liczbę ziaren aktywnych biorących udział w procesie usuwania materiału. Zwiększenie wysokości z 10 do 20 mm powoduje dwukrotne zwiększenie liczby N_a i jednocześnie proporcjonalne zmniejszenie przekrojów poprzecznych warstw skrawanych przypadających na pojedynczy wierzchołek aktywny A_{Dz} (rys. 4-12a, b).

Zmiana udziału drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego T_2 w całkowitej wysokości ściernicy T z 10 do 50% wywołała wzrost liczby ziaren aktywnych N_a o 45% dla $T=10$ mm, 30% dla $T=15$ mm i 25% w przypadku ściernicy o całkowitej wysokości $T=20$ mm. Zmiana liczby ziaren aktywnych powoduje proporcjonalne zmniejszenie wartości A_{Dz} (rys. 4-12a, b).

4.3 Wnioski

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika bezpośredni związek między liczbą ziaren aktywnych N_a i polem przekroju poprzecznego warstwy skrawanej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający A_{Dz} . Można również oczekiwać, że obniżanie wartości A_{Dz} prowadzi do zmniejszania chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego.

Zasadniczy wpływ na liczbę ziaren aktywnych, zarówno w strefie szlifowania zgrubnego, jak i wykończeniowego ściernicy, ma wielkość ziaren (rys. 4-10 i 4-11). Wraz ze zmniejszaniem rozmiaru ziaren zwiększa się ich liczbę na CPS, co prowadzi do wzrostu liczby ziaren aktywnych N_a . Jednak w przypadku strefy szlifowania zgrubnego, przy projektowaniu ściernicy należy brać pod uwagę również wielkość i liczbę przestrzeni międzyziarnowych zapewniających gromadzenie i transport wiórów poza strefę obróbki. Większe przestrzenie towarzyszące dużym rozmiarom ziaren zapewniają lepsze doprowadzenie cieczy chłodząco-smarującej, mniejsze prawdopodobieństwo zalepiania CPS produktami obróbki i w efekcie bardziej stabilny przebieg usuwania materiału przy niższych obciążeniach cieplnych PO i ściernicy. Wynika z tego, że do budowy strefy szlifowania zgrubnego należy zastosować większe ziarna (46), a obniżenie chropowatości powierzchni zapewnić w procesie szlifowania wykończeniowego drobnoziarnistą walcową strefą ściernicy.

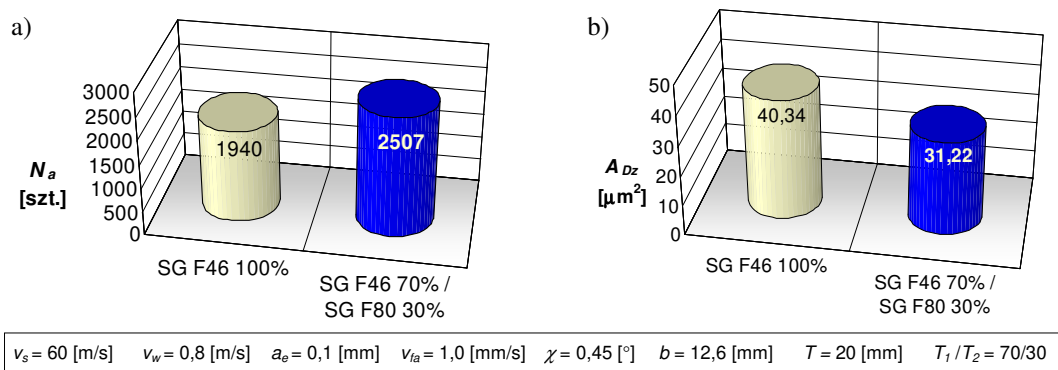
Zmniejszenie wielkości ziaren w strefie szlifowania wykończeniowego pozwala na znaczne obniżenie przekrojów poprzecznych skrawanych pojedynczym ziarnem. Jednak również w tej strefie należy uwzględnić takie czynniki, jak zdolność odprowadzenia wiórów, a wraz z nim ciepła poza strefę obróbki. W tym kontekście najbardziej korzystne wydają się ziarna wielkości 60 lub 80, ponieważ zapewniają relatywnie znaczne przestrzenie międzyziarnowe wynikające z mniejszej liczby ziaren aktywnych N_a w porównaniu do wyników uzyskanych ściernicami z ziarnem wielkości 120 w walcowej strefie ściernicy (rys. 4-11a).

Kolejnym istotnym parametrem budowy ściernicy wpływającym w dużym stopniu zarówno na przebieg, jak i na efekty procesu obróbkowego, jest rodzaj ziaren. Zastosowanie w symulacji modeli mikrokryształicznych ziaren korundu spiekanego pozwoliło nawet na 25% podniesienie wartości parametru N_a , w odniesieniu do wyników uzyskanych przy zastosowaniu modeli polikryształicznych ziaren 99A.

Innym parametrem decydującym o ilości ziaren aktywnych jest całkowita wysokość ściernicy T . Zwiększająca się wraz ze wzrostem T powierzchnia czynna ściernicy zapewnia obniżenie wielkości przekrojów poprzecznych warstw skrawanych większą liczbą ziaren (rys. 4-12), co powinno zapewnić zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionej. Większa wysokość T oznacza również możliwość bardziej łagodnego rozłożenia nadmiaru obróbkowego na szerszym nakroju stożkowym. Wynika z tego, że należy stosować ściernice o wysokości nie mniejszej niż $T=20$ mm. Wielkość ta jest standardowym wymiarem stosowanym w procesach szlifowania otworów. Natomiast należy unikać dalszego zwiększania wysokości T , ponieważ powoduje to zwiększanie wartości sił szlifowania, co może prowadzić do wzrostu odkształceń sprężystych układu OUPN.

W badaniach symulacyjnych określono również wpływ udziału wysokości poszczególnych stref funkcjonalnych ściernicy T_1/T_2 na wartości parametru N_a i A_{Dz} (rys. 4-12). Wynika z nich, że najmniejsze przekroje warstw skrawanych pojedynczym ziarnem zapewnia ściernica o 50% udziale wysokości strefy szlifowania wykończeniowego T_2 . Należy jednak pamiętać, że zwiększanie wysokości T_2 odbywa się kosztem strefy szlifowania zgrubnego. W celu uzyskiwania wysokich wydajności ubytkowych konieczne jest usuwanie w jednym przejściu znacznych grubości warstwy skrawanej dochodzących do 0,2 mm. Należy zatem wybrać kompromis pomiędzy jakością powierzchni obrabianej a możliwością osiągania znacznych wydajności ubytkowych badanego procesu. Z wykresu zamieszczonego na rys. 4-12b wynika, że w przypadku zastosowania ściernicy o wysokości $T=20$ mm, relatywnie małe przekroje warstw skrawanych pojedynczym ziarnem można uzyskać przy udziale T_1/T_2 wynoszącym 70/30 lub nawet 80/20.

Z porównania wyników symulacji obróbki przeprowadzonej z wykorzystaniem ściernicy jednorodnej (SG F46 100%) i narzędzia o strefowo zróżnicowanej budowie (SG F46 70% / SG F80 30%) wytypowanego na podstawie powyższych wniosków wynika, że dzięki zastosowaniu ściernicy nowego typu możliwe jest znaczące zwiększenie liczby ziaren aktywnych prowadzące do zmniejszenia wartości przekrojów poprzecznych skrawanych pojedynczym ziarnem oraz pozwalające oczekiwać obniżenia chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 4-13).



Rys. 4-13. Porównanie liczby ziaren aktywnych N_a (a) i przekrojów poprzecznych warstw skrawanych pojedynczym ziarnem A_{Dz} (b) uzyskanych w wyniku symulacji szlifowania z użyciem narzędzia ściernego o strefowo zróżnicowanej budowie (SG F46 70% / SG F80 30%) i ściernicy jednorodnej (SG F46 100%) o wysokości $T=20$ mm

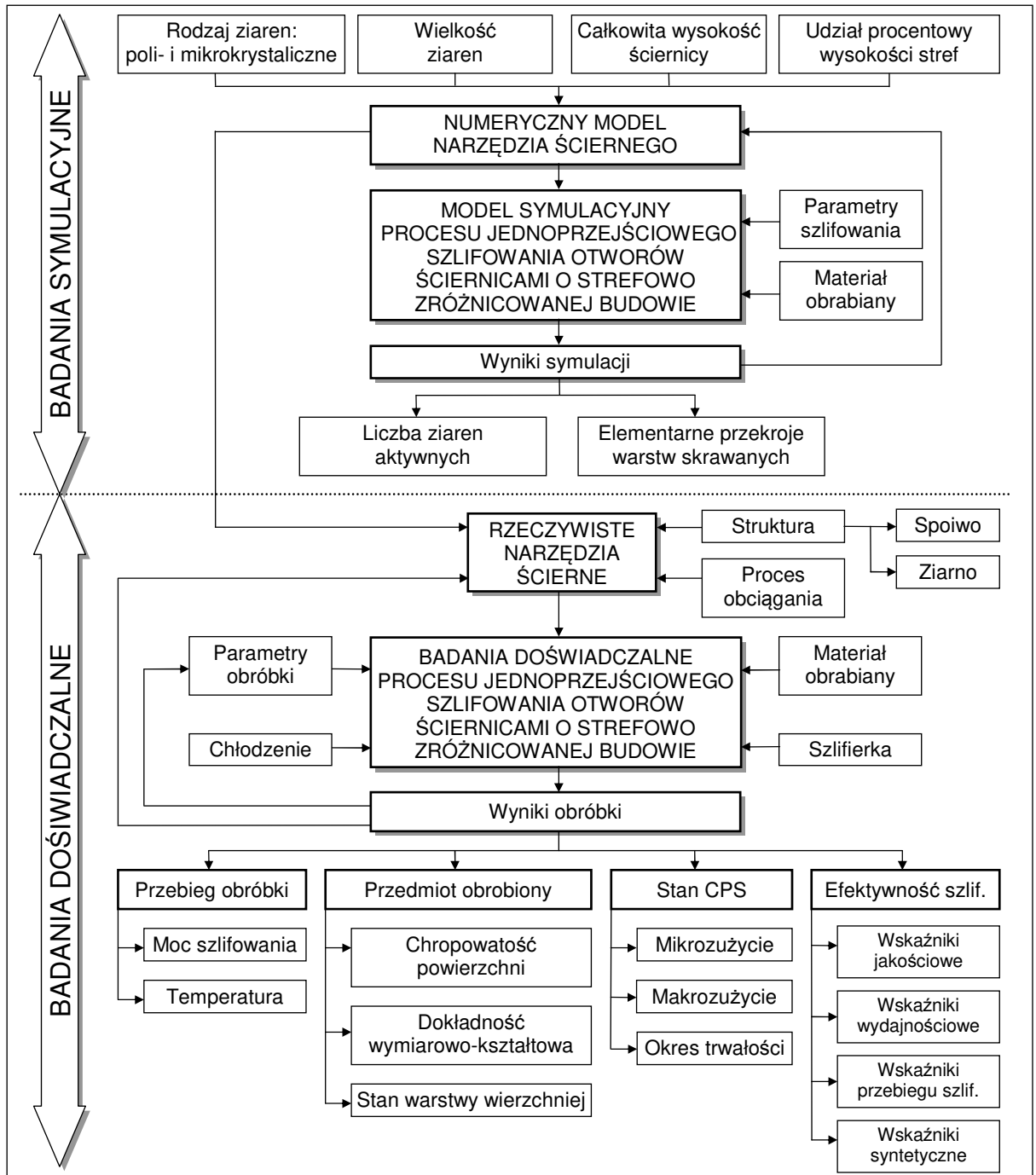
Po uwzględnieniu wniosków wynikających z przeprowadzonych badań symulacyjnych do prób doświadczalnych wytypowano ściernice o całkowitej wysokości $T=20$ mm, których budowa powinna spełniać następujące wytyczne:

- strefa szlifowania zgrubnego:
 - rodzaj ziaren: SG lub 99A;
 - wielkość ziaren: 46;
 - wysokość strefy: $T_1=70$ lub 80% całkowitej wysokości T ;
- strefa szlifowania wykończeniowego:
 - rodzaj ziaren: SG lub 99A;
 - wielkość ziaren: 80 lub 60;
 - wysokość strefy: $T_2=30$ lub 20% całkowitej wysokości T .

5

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych procesu jednoprzęciowego osiowego szlifowania obwodowego otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie uzyskano wyniki stanowiące podstawę do budowy narzędzi ściernych oraz prowadzenia badań rzeczywistych tego procesu (rys. 5-1).



Rys. 5-1. Kolejne etapy badań symulacyjnych i doświadczalnych procesu jednoprzęciowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

5.1 Cel i zakres badań

Głównym celem badań doświadczalnych jednoprzęściowego procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych narzędziami ściernymi o strefowo zróżnicowanej budowie było:

- określenie najkorzystniejszej budowy strefowo zróżnicowanego narzędzia ściernego ze względu na efekty procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych;
- wyznaczenie najkorzystniejszych, ze względu na efektywność procesu i jakość powierzchni szlifowanej, warunków i parametrów szlifowania;
- wyznaczenie okresu trwałości badanych narzędzi ściernych;
- określenie efektywności jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie;
- odniesienie wyników realizacji badanego procesu z zastosowaniem strefowo zróżnicowanych narzędzi ściernych do efektów szlifowania ściernicami o budowie jednorodnej.

Zamierzone cele badawcze osiągnięto, realizując prace w dwóch etapach obejmujących badania rozpoznawcze i właściwe.

Celem pierwszego etapu badań doświadczalnych było szerokie rozpoznanie warunków i efektów realizacji jednoprzęściowego szlifowania otworów z wykorzystaniem nowo opracowanych narzędzi ściernych.

Zakres badań rozpoznawczych obejmował:

- wyznaczenie wpływu rodzaju ziaren ściernych w strefie szlifowania zgrubnego i wykończeniowego ściernicy na jakość powierzchni przedmiotu obrobionego (R_a , R_z , S_m , Δ_a i t_p – SCGC), moc P i temperaturę Θ szlifowania oraz zużycie objętościowe V_s i błędy kształtu ściernicy (Δ , rms);
- ustalenie najkorzystniejszych, ze względu na moc szlifowania i jakość powierzchni przedmiotu obrobionego, wartości parametrów wejściowych procesu (v_s , v_w , q , a_e , v_{fd});
- określenie wpływu zmian parametrów geometrycznych nakroju stożkowego ściernicy (χ i b) na efekty realizacji badanego procesu;
- ustalenie wpływu parametrów obciążania (v_{sd} , v_{fd} , a_{ed}) na moc szlifowania oraz chropowatość powierzchni przedmiotów po obróbce;
- porównanie efektywności realizacji procesu jednoprzęściowego z zastosowaniem badanych ściernic do wyników uzyskanych narzędziami o budowie jednorodnej (R_a , P_c , P'_{sc} , Q_w , G , E_s , K);
- zbadanie trwałości narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie na podstawie zmian mocy szlifowania, parametrów chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego, zużycia objętościowego oraz błędów kształtu ściernicy;
- wytyczenie zakresu badań właściwych.

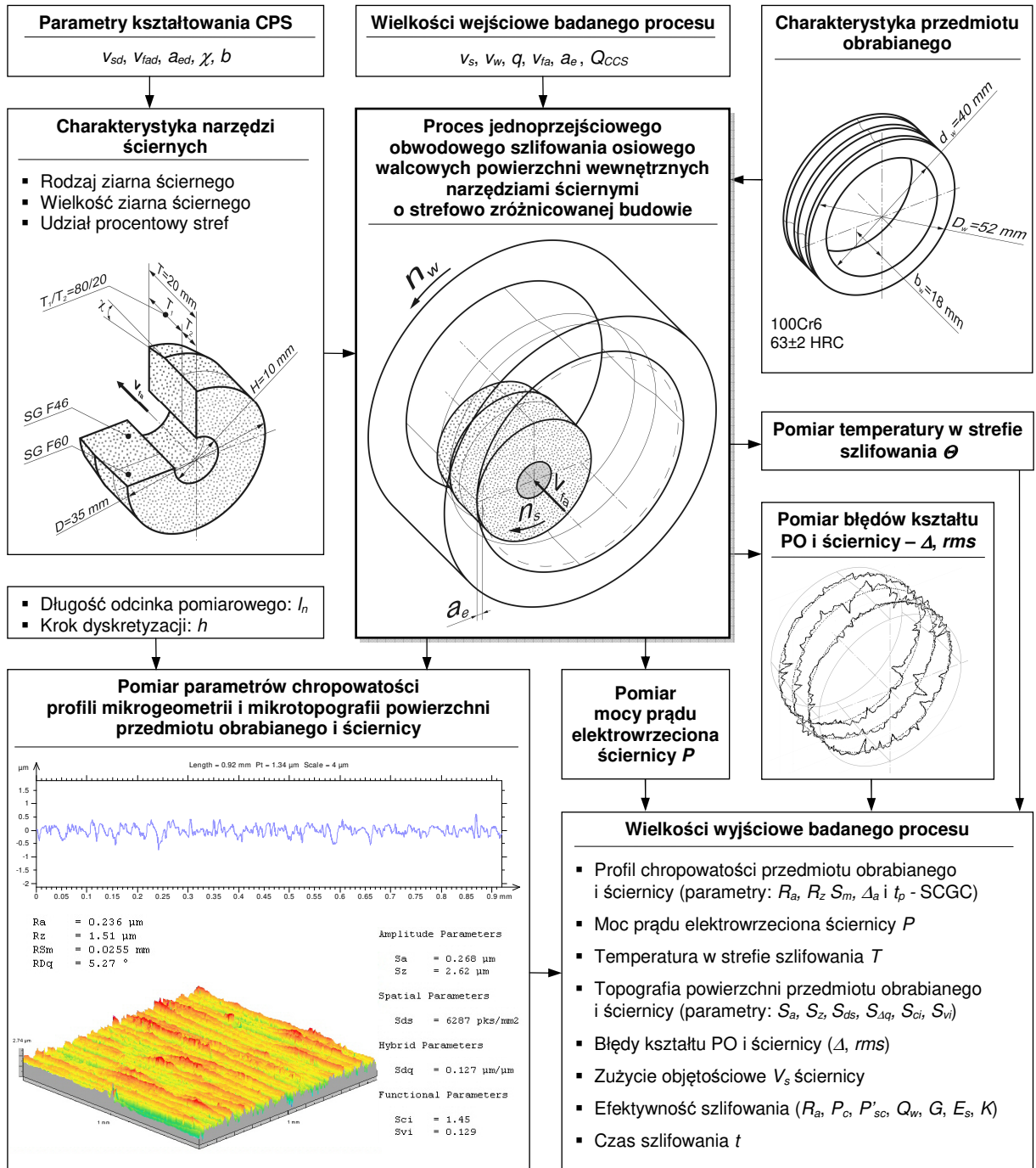
Zakres badań właściwych ustalony został na podstawie analizy wyników badań rozpoznawczych opisywanego procesu i obejmował:

- wyznaczenie wpływu zróżnicowania wielkości ziarna ściernego w strefie szlifowania wykończeniowego narzędzia ściernego na rezultaty obróbki;
- określenie wpływu udziału procentowego poszczególnych stref ściernicy T_1/T_2 na moc szlifowania i chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego;
- zbadanie możliwości wzrostu wydajności ubytkowej szlifowania Q_w poprzez zwiększanie wartości parametrów a_e i v_{fa} ;
- wyznaczenie modeli matematycznych opisujących zmiany mocy szlifowania oraz chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego w jednoprzęściowym procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie;
- wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie;
- porównanie efektów realizacji badanego procesu z zastosowaniem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie i narzędzi ściernych pozbawionych drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego ($R_a, P_c, P'_{sc}, Q_w, K$).

Badania przeprowadzono, zmieniając budowę narzędzi ściernych w zakresie rodzaju i wielkości ziaren ściernych, udziału procentowego wysokości poszczególnych stref oraz wartości następujących parametrów szlifowania: v_s – prędkości obwodowej ściernicy, v_w – prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego, q – stosunku prędkości, v_{fa} – prędkości posuwu osiowego stołu, a_e – styku roboczego, χ, b – kąta i szerokości nakroju stożkowego ściernicy i parametrów obciążania (v_{sd}, v_{fad}, a_{ed}).

Zachowano stały przedmiot obrabiany (stal stopowa 100Cr6 o twardości 63 ± 2 HRC), zalewowy sposób podawania cieczy chłodząco-smarującej i jednoziarnisty obciążacz diamentowy do profilowania i ostrzenia narzędzi ściernych.

Wielkości wejściowe i wyjściowe badanego procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych przedstawione zostały na rys. 5-2. Schemat ten obejmuje zarówno metodykę badań rozpoznawczych, jak i właściwych.



Rys. 5-2. Schemat badań doświadczalnych jedoprzejściowego obwodowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

5.2 Metodyka badań

Zastosowana metodyka badań doświadczalnych różniła się w przypadku badań rozpoznawczych i właściwych. Wynikało to z innego celu prowadzenia tych etapów doświadczeń, a także ze wzrostu dokładności pomiarów w przypadku badań właściwych. Przy realizacji badań właściwych poszerzono również zakres mierzonych wielkości wyjściowych o naprężenia warstwy wierzchniej przedmiotów po szlifowaniu oraz zużycie krawędziowe stosowanych narzędzi ściernych.

5.2.1 Badania rozpoznawcze

Badania rozpoznawcze przeprowadzono dla następujących narzędzi ściernych, różniących się między sobą rodzajem zastosowanego ziarna ściernego (99A i SG) w poszczególnych strefach funkcjonalnych:

- 1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%³;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / 99A/F80 I 7 V DG 30%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%.

Do badań włączono również narzędzia ścierne w całości wykonane z ziaren jednej wielkości, stanowiące odniesienie dla ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie:

- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 100%;
- 1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 100%.

Dodatkowo przy pomiarach temperatury wykorzystano ściernicę 1 - 35x20x10 - SG/F60 K 7 V DG 100%, a przy ustalaniu najkorzystniejszych parametrów kształtowania CPS, narzędzie ścierne 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F60 I 7 V DG 20%.

W trakcie badań mierzono czas szlifowania t , osiowy profil chropowatości powierzchni obrobionej (parametry: R_a , R_z , S_m , Δ_a i t_p - SCGC), początkową i maksymalną moc szlifowania P oraz zużycie objętościowe V_s i błędy kształtu narzędzi ściernych (Δ , rms). Wykonano również pomiary temperatury Θ metodą termowizyjną w trakcie szlifowania z wykorzystaniem wybranych narzędzi ściernych.

Przy planowaniu badań rozpoznawczych wykorzystano program *Experiment Planner 1.0*. Stosując plan statystyczny randomizowany kompletny sprawdzano, czy wpływ danego czynnika na badany obiekt jest istotny [KUK00]. Zaplanowano oddzielne eksperymenty dla każdego z badanych czynników.

Wyznaczenie najkorzystniejszych warunków realizacji procesu

Pierwsza część badań rozpoznawczych miała na celu sprawdzenie istotności wpływu badanych czynników oraz wyznaczenie najkorzystniejszych wartości następujących parametrów procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych:

- prędkość obwodowa ściernicy $v_s=40; 50; 60; 70$ m/s;
- prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego $v_w=0,4; 0,8; 1,2; 1,6$ m/s;
- stosunek prędkości $q=38; 50; 75; 150$;
- prędkość posuwu osiowego stołu $v_{fa}=1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ mm/s;
- styk roboczy $a_e=0,100; 0,125; 0,150; 0,175; 0,200$ mm;
- kąt nakroju stożkowego ściernicy $\chi=0,38; 0,57; 1,15^\circ$;
- szerokość nakroju stożkowego ściernicy $b=5; 10; 15$ mm.

³ Zaproponowany sposób oznaczania narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie różni się od wytycznych zawartych w PN-ISO 525 „Narzędzia ścierne spojone. Wymagania ogólne” z czerwca 2001 r. [PN01]. Stosowany przez autora pracy sposób oznaczania zawiera pełną charakterystykę obu stref ściernicy oraz podaje procentowy udział wysokości poszczególnych stref.

W czasie badań niezmienny pozostawał rodzaj przedmiotu obrabianego, wydatek ($Q_{CCS}=5,3$ l/min), rodzaj (emulsja) i sposób podawania (zalewowy) cieczy chłodząco-smarującej, parametry obciążania ($n_{sd}=12\ 500$ obr./min, $v_{fad}=30$ mm/s, $a_{ed}=0,0125$ mm, $i_d=6$) oraz zastosowany do profilowania i ostrzenia narzędzi ściernych jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie $Q_d=1,25$ kr.

Proces szlifowania prowadzono, wykonując pojedyncze przejście ($n=1$) dla każdego z zaplanowanych punktów pomiarowych. Średnicę narzędzia ściernego mierzono w dwóch punktach za pomocą mikrometru (VIS mmZb 25-50 - dokładność pomiarowa ± 1 μ m) po obciążeniu oraz po przeszlifowaniu przedmiotu obrabianego. Również średnicę szlifowanego pierścienia mierzono w dwóch punktach: przed i po obróbce przy użyciu średnicówki czujnikowej SOMET 30,5-55,5/260 o dokładności ± 1 μ m.

Każdorazowo po przeszlifowaniu jednego przedmiotu obrabianego obciążano narzędzie ściernie, aby zapewnić powtarzalny stan czynnej powierzchni ściernicy dla każdej próby. Po zamocowaniu przedmiotu obrabianego w uchwycie szlifierki wyrównywano jego powierzchnię wewnętrzną przy użyciu ściernicy elektrokorundowej w celu usunięcia ewentualnych błędów kształtu i położenia oraz zapewnienia jednakowej grubości warstwy usuwanego materiału na całej długości otworu. Po zadaniu żądanej prędkości obrotowej wrzeczona narzędzia ściernego, rejestrowano wartość początkową, a w trakcie realizacji procesu wartość maksymalną mocy elektrycznej wrzeczona, która wyświetlana była na ekranie komputera sterującego pracą wrzeczona. Po obróbce mierzone były parametry chropowatości na podstawie profilu osiowego mikrogeometrii powierzchni przedmiotu szlifowanego.

Wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów kształtowania CPS

Dodatkowo zbadano wpływ parametrów obciążania narzędzia ściernego na rezultaty badanego procesu. Do obciążania zastosowano jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie $Q_d=1,25$ kr i czynnej szerokości ostrza wynoszącej⁴ $b_d=0,276$ mm. W trakcie badań stała pozostawała wartość styku roboczego obciążania, która wynosiła $a_{ed}=0,0125$ mm oraz liczba przejść obciążających: $i_d(\text{stożek})=20$, $i_d(\text{walec})=6$. Zmieniano wartości prędkości obwodowej narzędzia ściernego ($v_{sd}=10; 15; 20$ m/s) i prędkości posuwu osiowego obciążacza:

- przy kształtowaniu nakroju stożkowego: $v_{fad}(\text{stożek})=160; 200; 240; 280$ mm/s, co odpowiadało zmianom stopnia pokrycia $k_d=b_d/f_d$ w zakresie: $0,17\div 0,10$ dla $v_{sd}=10$ m/s; $0,26\div 0,15$ dla $v_{sd}=15$ m/s i $0,34\div 0,20$ dla $v_{sd}=20$ m/s;
- przy ostrzeniu części walcowej: $v_{fad}(\text{walec})=10; 30; 50; 70$ mm/s, co odpowiadało zmianom stopnia pokrycia $k_d=b_d/f_d$ w zakresie: $2,75\div 0,39$ dla $v_{sd}=10$ m/s; $4,12\div 0,59$ dla $v_{sd}=15$ m/s i $5,49\div 0,78$ dla $v_{sd}=20$ m/s.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia ściernego 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F60 I 7 V DG 20%, którego gruboziarnista strefa szlifowania zgrubnego stanowiła 80% wysokości ($T_1=16$ mm). Na CPS kształtowano nakrój stożkowy o długości $b=0,9\cdot T_1=14,4$ mm i wartości kąta $\chi=0,40^\circ$ dostosowanej do wartości naddatku obróbkowego ($a_e=0,1$ mm).

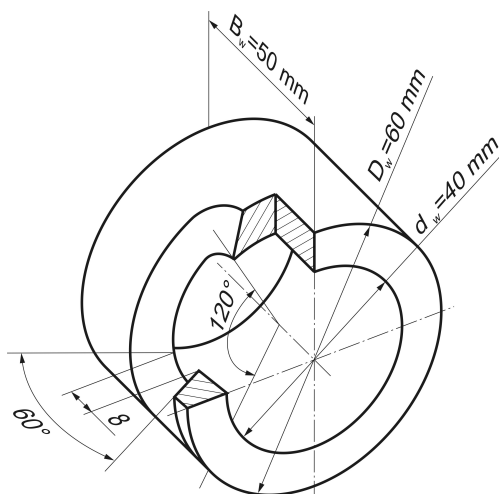
W trakcie tego etapu badań przyjęto następujące wartości parametrów szlifowania: $v_s=60$ m/s, $v_w=0,75$ m/s, $q=80$, $v_{fa}=1,0$ mm/s, $a_e=0,10$ mm, $Q_{CCS}=5,0$ l/min.

⁴ Podaną wartość zmierzono przed rozpoczęciem badań na projektorze pomiarowym typu OPTIMUS G IL firmy Schunk Werth Messtechnik z dokładnością $\pm 0,2\%$. Nie uwzględnia ona zużycia ostrza obciążacza.

Przed rozpoczęciem obróbki mierzono w dwóch miejscach średnicę szlifowanego otworu oraz średnicę narzędzia ściernego. Czynności te powtarzano po zakończeniu procesu szlifowania danego przedmiotu. Każdy kolejny pierścień był wstępnie wyrównywany za pomocą elektrokorundowego narzędzia ściernego. W trakcie realizacji badanego procesu rejestrowano początkową oraz maksymalną moc elektryczną wrzeczona ściernicy. Po obróbce mierzono osiowy profil mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych.

Pomiary temperatury

Pomiaru temperatury w trakcie realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych dokonano z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. W celu zmierzenia temperatury bezpośrednio w strefie szlifowania, czyli w miejscu kontaktu narzędzia ściernego z przedmiotem szlifowanym, wykonano specjalną tuleję pomiarową (rys. 5-3). Na $\frac{1}{3}$ jej obwodu wykonano otwór, którego ściany rozwarte były pod kątem 60° , co miało umożliwić rejestrowanie temperatury w bezpośredniej bliskości strefy szlifowania. Przedmiot szlifowany wykonano ze stali 40H o twardości 53 ± 2 HRC⁵. Dodatkowo została maksymalnie zredukowana prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego ($n_w = 18$ obr./min), aby możliwe było wykonanie pojedynczego pomiaru dokładnie w chwili, w której wycięcie w tulei znajduje się naprzeciwko detektora podczerwieni, odsłaniając strefę obróbki.



Rys. 5-3. Tuleja do pomiaru temperatury metodą termowizyjną w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów

Ponieważ pomiarów nie można było przeprowadzić z udziałem cieczy chłodząco-smarującej, przeprowadzono proces szlifowania na sucho. Wymusiło to znaczne zmniejszenie grubości warstwy materiału⁶ usuwanej w jednym przejściu ściernicy ($a_e = 0,025$ mm). Do takiej wartości styku roboczego dobrano kąt nakroju stożkowego badanych ściernic, który przy szerokości nakroju $b = 10$ mm był równy $\chi = 0,14^\circ$. Pozostałe parametry procesu pozostawiono na niezmiennym poziomie ($v_s = 60$ m/s i $v_{fa} = 1,0$ mm/s).

⁵ Twardość tulei zbadano z dokładnością $\pm 2\%$ na twardościomierzu do pomiaru sposobem Rockwella typu PRL610, wyprodukowanym przez Zakłady Produkcji Aparatury Badawczej KABiD PRESS. Podana wartość stanowi średnią z 10 pomiarów wykonanych na czole tulei.

⁶ Próby szlifowania na sucho ze stykiem roboczym $a_e = 0,10$ i $a_e = 0,05$ mm kończyły się nagłym wzrostem mocy szlifowania po kilku sekundach trwania procesu lub nawet pęknięciem ściernicy spowodowanym nadmiernym obciążeniem cieplnym, przez co były przerywane. Dopiero zmniejszenie styku roboczego do poziomu $0,025$ mm pozwoliło na prowadzenie szlifowania jednoprzęściowego bez udziału CCS.

Podczas pomiarów kamerę termowizyjną usytuowano w odległości 61 cm od mierzonej powierzchni, prostopadle do niej, zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w pracach [MIN04, RAY].

Badaniom poddano trzy narzędzia ściernie:

- 1 - 35x20x10 - SG/F60 K 7 V DG 100%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 100%;
- 1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 100%.

Przed rozpoczęciem szlifowania, w trakcie realizacji obróbki oraz bezpośrednio po jej zakończeniu rejestrowano termogramy z częstotliwością około 1 pomiaru na 3 s. Dla każdej z wytypowanych ściernic pomiary powtórzone trzykrotnie.

Celem badań było określenie wpływu rodzaju i wielkości ziarna ściernego na temperaturę w strefie obróbki w jednoprzęściowym procesie szlifowania otworów. W badanych ściernicach wykonano nakrój stożkowy o szerokości ($b=10$ mm) równej połowie wysokości narzędzia ściernego. Wykorzystane 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 poszczególnych strefach.

Wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych

Badanie trwałości narzędzi ściernych polegało na przeszlifowaniu przez każdą ze ściernic 20 pierścieni, przy czym narzędzia były profilowane i ostrzone tylko raz – przed rozpoczęciem obróbki. Podczas tego cyklu badań szlifowano z zastosowaniem najkorzystniejszych, ze względu na mierzone efekty procesu, wartości parametrów wyznaczonych na podstawie pierwszej części badań rozpoznawczych ($v_s=60$ m/s, $v_w=0,75$ m/s, $q=80$, $v_{fa}=1,0$ mm/s, $a_e=0,10$ mm, $\chi=0,57^\circ$, $b=10$ mm).

Przed rozpoczęciem obróbki każdego z 20 przedmiotów obrabianych mierzono w dwóch miejscach średnicę szlifowanego otworu oraz średnicę narzędzia ściernego. Czynności te powtarzano po zakończeniu procesu szlifowania danego pierścienia. Każdy kolejny pierścień był wstępnie wyrównywany w procesie wieloprzęściowego szlifowania prostoliniowo-zwrotnego za pomocą elektrokorundowego narzędzia ściernego. W trakcie realizacji badanego procesu rejestrowano początkową oraz maksymalną moc elektryczną wrzeczona ściernicy. Po obciążeniu, a następnie przeszlifowaniu każdego kolejnego pięciu próbek, badano błędy kształtu ściernic na początku nakroju stożkowego (5 mm od czoła), na końcu stożka (10 mm od czoła) i na części walcowej (15 mm od czoła ściernicy). W efekcie otrzymano obraz błędów kształtu narzędzi ściernych w stanie wyjściowym i po przeszlifowaniu w procesie jednoprzęściowym z zadanymi parametrami 5, 10, 15, i 20 przedmiotów. Dokonano również pomiarów chropowatości powierzchni pierścieni po obróbce.

Ocena efektywności szlifowania z użyciem badanych ściernic

Na podstawie wyników badań odporności na zużycie narzędzi ściernych dokonano oceny efektywności realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych opracowanymi ściernicami. Spośród wielu opisanych w literaturze kryteriów oceny szlifowania (punkt 2.2) wybrano siedem podstawowych wskaźników podzielonych na poniższe grupy [KOZ79]:

- wskaźnik jakościowy: $WJ=R_a$ [μm];

- wskaźnik wydajnościowy: $WW=Q_w$ [mm^3/s];
- wskaźniki przebiegu szlifowania:
 - $WP_1=P_c$ [W];
 - $WP_2 = P'_{sc} = \frac{P_c}{Q_w}$ [$\text{W}\cdot\text{s}/\text{mm}^3$];
- wskaźniki skojarzone (syntetyczne):
 - $WS_1 = G = \frac{V_w}{V_s}$;
 - $WS_2 = E_s = \frac{G}{P'_{sc}} = \frac{V_w \cdot Q_w}{V_s \cdot P_c}$ [$\text{mm}^3/\text{W}\cdot\text{s}$];
 - $WS_3 = K = \frac{Q_w}{P_c \cdot R_a}$ [$\text{mm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$].

W powyższym zestawieniu nie uwzględniano 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 okresie czasu.

Wytypowane wskaźniki zawierają w większości znormalizowane kryteria (R_a , Q_w , P_c , P'_{sc} , G), powszechnie wykorzystywane do oceny efektów uzyskanych w procesie szlifowania. Pozostałe dwa wskaźniki syntetyczne (WS_2 i WS_3) pozwalają na kompleksową ocenę badanego procesu pod względem technologicznym i ekonomicznym. Efektywność szlifowania E_s (WS_2) zdefiniowana w pracy [YOO98] rośnie wraz ze zwiększaniem objętości usuniętego materiału V_w , wzrostem wydajności ubytkowej Q_w oraz redukcją zużycia objętościowego ściernicy V_s i mocy szlifowania P_c . Natomiast wskaźnik K (WS_3) uwzględnia dodatkowo osiąganą chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego wyrażoną parametrem R_a , pomijając V_w i V_s . Wskaźnik ten został stworzony w oparciu o WS_8 z tab. 2-I [KOZ79]. W niniejszej pracy przyjęto, że moc szlifowania jest równa zarejestrowanemu przyrostowi mocy elektrycznej wrzeczona narzędzia ściernego $P_c=\Delta P$.

5.2.2 Badania właściwe

Badania właściwe przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzi ściernych różniących się między sobą wielkością ziarna w strefie szlifowania wykończeniowego oraz udziałem wysokości stref T_1/T_2 :

- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F60 I 7 V DG 30%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F60 I 7 V DG 20%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 80% / SG/F80 I 7 V DG 20%.

Do badań włączono również ściernicę w całości wykonaną z ziaren jednej wielkości (1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 100%), stanowiącą odniesienie dla pozostałych narzędzi ściernych charakteryzujących się strefowo zróżnicowaną budową.

W czasie badań mierzono czas szlifowania t , parametry osiowego profilu chropowatości powierzchni obrobionej (parametry: R_a , R_z , S_m , A_a i t_p - SCGC), początkową

i maksymalną moc szlifowania w trakcie obróbki P , zużycie objętościowe V_s ściernicy oraz błędy kształtu przeszlifowanych pierścieni i narzędzi ściernych (Δ , rms).

W celu wyznaczenia modelu matematycznego opisującego badany proces wykorzystano program *Experiment Planner 1.0*. Zastosowano trójpoziomowy plan eksperymentu umożliwiający wyznaczenie modelu nieliniowego stopnia drugiego [KUK00].

Ustalenie koniecznej liczby powtórzeń

Liczba powtórzeń pomiarów w każdym punkcie planu eksperymentu decyduje o ilości uzyskanej informacji i precyzji, z jaką estymator przybliży szukaną wartość populacji. Jednocześnie wraz ze wzrostem ilości powtórzeń rośnie koszt i czas realizacji badań. Ostatecznie dąży się do wyznaczenia granicznej wartości ilości powtórzeń n stanowiącej kompromis pomiędzy ww. czynnikami [BAR82, MAŃ76, POL81, POL84], przy czym w literaturze podawany jest zakres $1 \leq n \leq 6$ [POL84] oraz $n \geq 3$ lub $n \geq 5$ [GÓR98].

Przyjmując z góry żadaną precyzję estymacji d , konieczną liczbę powtórzeń można wyznaczyć z następujących wzorów [BAR82]:

$$n \geq n_0 \left(1 + \frac{n_0}{N} \right)^{-1}, \quad (5.1)$$

gdzie: n – minimalna liczba pomiarów;
 n_0 – pierwsze przybliżenie wymaganej liczby pomiarów;
 N – liczba elementów populacji

$$n_0 = \frac{S^2}{V}; \quad (5.2)$$

$$V = \left(\frac{d}{t_\alpha} \right)^2, \quad (5.3)$$

gdzie: d – założona precyzja estymacji;
 t_α – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta przy $N-1$ stopniach swobody i zadanim poziomie istotności statystycznej α .

W przeprowadzonych badaniach właściwych podstawowymi kryteriami oceniającymi badany proces były parametry chropowatości powierzchni szlifowanej oraz moc szlifowania. Konieczną liczbę powtórzeń wyznaczono zarówno dla jednego z parametrów chropowatości (przyjęto R_a), jak i dla przyrostu mocy szlifowania ΔP .

Wartości wariancji S^2 zmiennych wyliczono na podstawie badań rozpoznawczych, w których przeprowadzono $N=20$ prób przy stałych parametrach i warunkach badanego procesu szlifowania.

W opisywanym przypadku stwierdzono na podstawie testu chi-kwadrat (χ^2) [CHM02, KUB98], że rozkład obu zmiennych (średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a i przyrostu mocy szlifowania ΔP) jest zgodny z rozkładem normalnym. Jednak wg zaleceń zawartych w pracach [POL81, POL84], przy liczbie pomiarów paralelnych $n < 25 \div 30$ do oceny niedokładności próbek zastosowano rozkład t-Studenta i przyjęto wartości krytyczne t_α .

Poniżej wyznaczono najmniejszą wartość n , dla której estymator zmiennej R_a wyznaczony zostanie z 95% prawdopodobieństwem w zasięgu 5% w stosunku do poprawnej wartości:

$$S^2_{Ra}=0,00129 ; d=0,05 ; N=20 ; t_{\alpha}=2,093 \text{ i } \alpha=0,05.$$

Po podstawieniu do wzorów (1-3) otrzymujemy:

$$V=0,00057 ; n_0=2,27 ; n \geq 2,03 \Rightarrow n=3.$$

Minimalna liczba powtórzeń pomiarów wyznaczona na podstawie wariancji średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a wynosi: $n=3$.

Znając wartość n uzyskaną dla parametru R_a , na podstawie tych samych wzorów wyznaczono minimalną liczbę powtórzeń w oparciu o wariancję przyrostu mocy elektrycznej wrzeczona ściernicy ΔP :

$$S^2_{\Delta P}=0,00221 ; d=0,06 ; N=20 ; t_{\alpha}=2,093 \text{ i } \alpha=0,05.$$

W rezultacie:

$$V=0,00082 ; n_0=2,69 ; n \geq 2,37 \Rightarrow n=3.$$

W tym przypadku taka sama liczba powtórzeń $n=3$ zapewnia estymację zmiennej ΔP z 95% prawdopodobieństwem w zasięgu 6% w stosunku do poprawnej wartości.

Badanie wpływu styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} na rezultaty badanego procesu

Pierwsza część badań właściwych miała na celu znalezienie takich wartości parametrów obróbki, przy których możliwe jest uzyskanie jak największej efektywności szlifowania przy zachowaniu żądanej jakości powierzchni szlifowanej. Na podstawie wyników badań rozpoznawczych przyjęto stałe wartości następujących parametrów szlifowania:

- prędkość obwodowa ściernicy $v_s=60$ m/s;
- prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego $v_w=0,75$ m/s;
- stosunek prędkości $q=80$;
- wartość kąta nakroju stożkowego narzędzia ściernego $\chi=0,60 \div 91^\circ$ wynikała z wielkości styku roboczego i szerokości nakroju, której wartość przyjęto jako 90% wysokości strefy szlifowania zgrubnego $b=0,9 \cdot T_l=12,6$ dla ściernic z 70% strefą szlifowania zgrubnego i $b=14,4$ mm dla pozostałych narzędzi ściernych ($T_l=0,8 \cdot T$ oraz $T_l=T$).

Badano możliwość zwiększenia wydajności obróbkowej poprzez zmianę następujących parametrów procesu:

- prędkość posuwu osiowego stołu $v_{fa}=1,0; 1,5; 2,0$ mm/s;
- styk roboczy $a_e=0,150; 0,175; 0,200$ mm.

W czasie badań niezmienny pozostawał rodzaj przedmiotu obrabianego, rodzaj (emulsja) i sposób podawania (zalewowy) cieczy chłodząco-smarującej, parametry obciążania ($a_{ed}=0,0125$ mm, $v_{sd}=10$ m/s, $v_{fad}(\text{stożek})=280$ mm/s, $v_{fad}(\text{walec})=10$ mm/s, $i_d(\text{stożek})=20$, $i_d(\text{walec})=6$) oraz zastosowany do profilowania i ostrzenia narzędzi ściernych jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie $Q_d=1,25$ kr.

Proces szlifowania prowadzono wykonując trzy powtórzenia ($n=3$) dla każdego z zaplanowanych punktów pomiarowych. Przed i po wykonaniu kolejnego badania mierzono w dwóch punktach średnicę narzędzia ściernego za pomocą mikrometru VIS mmZb 25-50 o dokładności pomiarowej $\pm 1 \mu\text{m}$. Również średnicę szlifowanego pierścienia mierzono w dwóch punktach, przed i po obróbce, przy użyciu średnicówki czujnikowej SOMET 30,5-55,5/260 o dokładności $\pm 1 \mu\text{m}$.

Każdorazowo po przeszlifowaniu jednego przedmiotu obrabianego obciążano narzędzie ściernie, aby zapewnić powtarzalny stan czynnej powierzchni ściernicy dla każdej próby. Po zamocowaniu przedmiotu obrabianego w uchwycie szlifierki wyrównywano jego powierzchnię wewnętrzną przy użyciu ściernicy elektrokorundowej w celu usunięcia ewentualnych błędów kształtu i położenia oraz zapewnienia jednakowej grubości warstwy usuwanego materiału na całej długości otworu. Po zadaniu żądanej prędkości obrotowej wrzeczona narzędzia ściernego, rejestrowano wartość początkową, a w trakcie realizacji procesu wartość maksymalną mocy elektrycznej wrzeczona. Po obróbce mierzono parametry chropowatości na podstawie profilu osiowego mikrogeometrii powierzchni przedmiotu szlifowanego oraz naprężenia w warstwie wierzchniej wybranych pierścieni po obróbce.

Wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych

Wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych polegało na przeszlifowaniu przez każdą ze ściernic maksymalnej liczby pierścieni przy zachowaniu wymaganych rezultatów obróbki. Stanowisko badawcze pozwalało na bezpieczne prowadzenie obróbki aż do osiągnięcia całkowitej utraty zdolności skrawnej przez badane narzędzia ściernie, objawiającej się znacznym rozrostem zalepień CPS prowadzącym do nadmiernego wzrostu temperatury i pęknięcia ściernic.

Czynna powierzchnia narzędzi ściernych została ukształtowana i naostrzona tylko raz, przed rozpoczęciem obróbki. Próbie poddano dwie ściernice zbudowane z ziaren o rozmiarze 60 w strefie szlifowania wykończeniowego, a różniące się wysokością tego obszaru – $T_2=6$ i 4 mm:

- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%;
- 1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% / SG/F60 I 7 V DG 30%.

Podczas tego cyklu badań prowadzono obróbkę z następującymi wartościami parametrów szlifowania: $v_s=60$ m/s, $v_w=0,75$ m/s, $q=80$, $v_{fa}=1,5$ mm/s, $a_e=0,15$ mm, $\chi=0,60^\circ$, $b=14,4$ mm, które zapewniły osiągnięcie wydajności ubytkowej na poziomie $Q_w=13,4$ mm³/s.

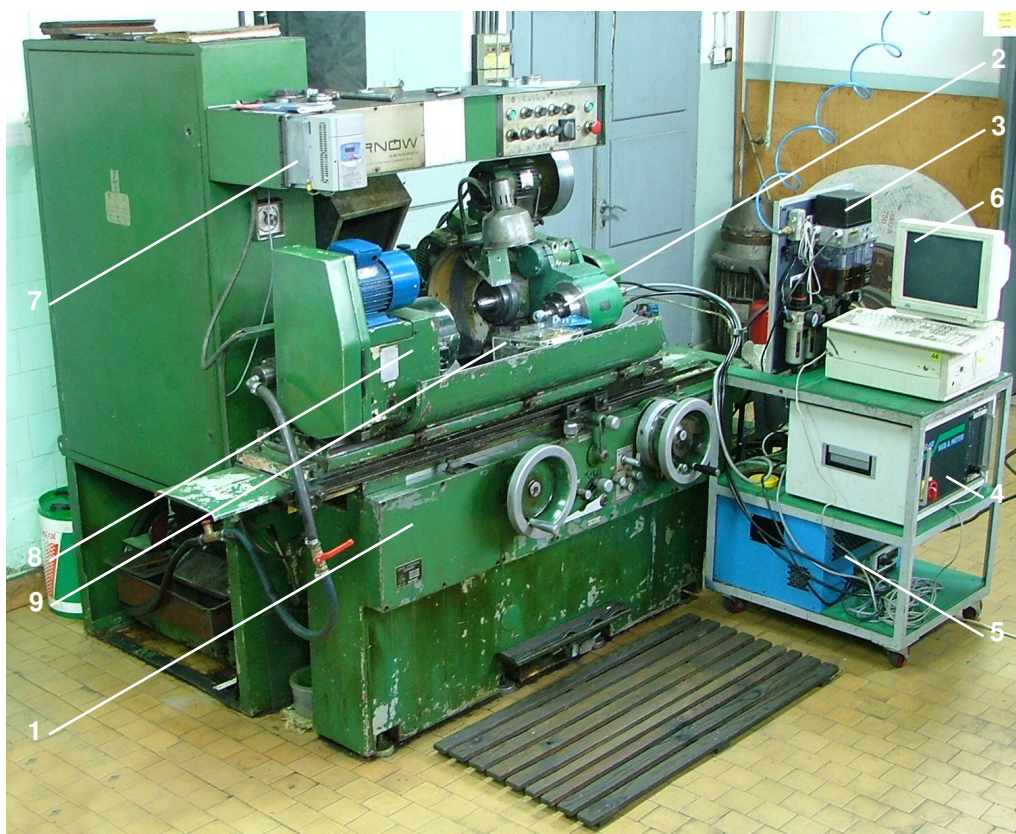
Przed rozpoczęciem obróbki każdego przedmiotu obrabianego mierzono w dwóch miejscach średnicę szlifowanego otworu oraz średnicę narzędzia ściernego. Czynności te powtarzano po zakończeniu procesu szlifowania danego pierścienia. Każdy kolejny pierścień był wstępnie wyrównywany w procesie wieloprześciowego szlifowania prostoliniowo-zwrotnego, za pomocą elektrokorundowego narzędzia ściernego. W trakcie realizacji badanego procesu rejestrowano początkową oraz maksymalną moc elektryczną wrzeczona ściernicy. Po obciążeniu, a następnie przeszlifowaniu kolejnych trzech próbek, badano błędy kształtu ściernic na początku nakroju stożkowego (5 mm od czoła), na końcu stożka (14 mm od czoła) i na części walcowej (17 mm od czoła ściernicy). Rejestrowano również topografie strefy stożkowej i walcowej czynnej powierzchni ściernic. Po obróbce wykonano pomiary osiowych profili chropowatości, błędów kształtu oraz naprężeń w warstwie wierzchniej powierzchni szlifowanych przedmiotów.

Ocena efektywności szlifowania z użyciem badanych ściernic

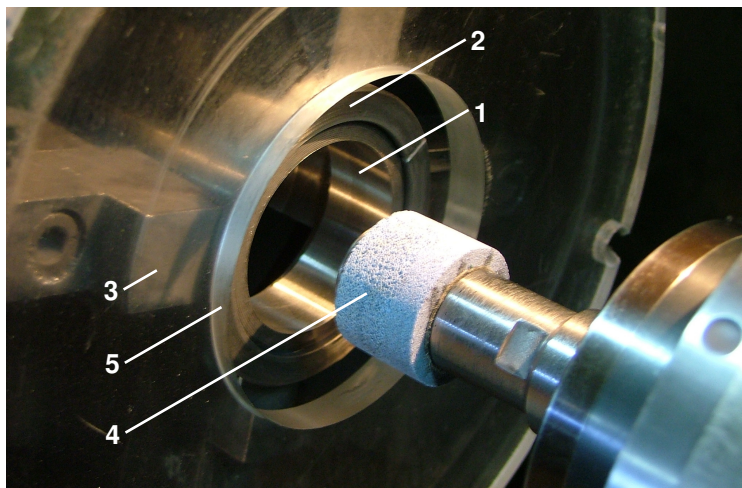
Oceny efektywności szlifowania w badaniach właściwych dokonano z użyciem tych samych wskaźników, co w przypadku badań rozpoznawczych (punkt 5.2.1). Jednak w trakcie badań okresu trwałości narzędzi ściernych nie zarejestrowano zużycia objętościowego ściernic poprzedzającego ich zniszczenie. W związku z tym nie można było wyznaczyć utraconej objętości materiału ściernicy V_s oraz zależnego od niej wskaźnika szlifowania G (WS_1) i efektywności szlifowania E_s (WS_2). Ostatecznie w tej części badań do oceny efektywności badanego procesu posłużyły następujące wskaźniki: $WJ=R_a$ [μm], $WW=Q_w$ [mm^3/s], $WP_1=P_c$ [W], $WP_2=P'_{sc}$ [$\text{W}\cdot\text{s}/\text{mm}^3$] i $WS_3=K$ [$\text{mm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$].

5.3 Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 5-4 i 5-5) zbudowane zostało na bazie szlifierki RUP 28P wyposażonej w elektrowrzeciono firmy FISCHER (typ EV-70/70-2WB), charakteryzujące się maksymalnymi obrotami 60 000 obr./min i mocą wynoszącą 5,2 kW.



Rys. 5-4. Stanowisko badawcze – widok ogólny; 1 – szlifierka uniwersalna RUP 28P, 2 – elektrowrzeciono 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 wrzeciono przedmiotu, 8 – wrzeciono przedmiotu obrabianego, 9 – przyrząd do kształtowania CPS



Rys. 5-5. Stanowisko badawcze – strefa szlifowania; 1 – przedmiot obrabiany, 2 – tuleja samocentryngująca, 3 – uchwyt czteroszczękowy, 4 – narzędzie ściernie, 5 – osłona ze szkła organicznego

W skład stanowiska weszły również następujące urządzenia wspomagające pracę wrzeciona:

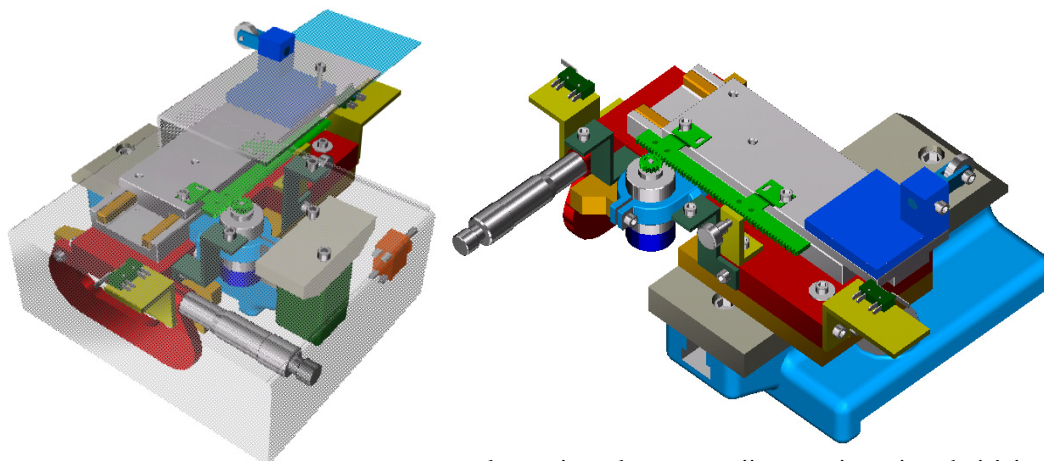
- układ dozowania mieszanki powietrznoolejowej wraz z programowalnym sterownikiem służącym do sterowania cyklami podawania oleju i sprężonego powietrza do elektrowrzeciona (typ IG 54-2);
- agregat chłodzący z automatycznym systemem regulacji temperatury płynu chłodzącego (typ IK-V07);
- przetwornica częstotliwości SIEB&MEYER (typ 21.60) zasilająca i sterująca pracą elektrowrzeciona;
- komputer sprzężony z przetwornicą za pomocą łącza szeregowego RS232 i wyposażony w program *TERM51* służący do zadawania prędkości obrotowej wrzeciona oraz monitorowania warunków jego pracy (mocy elektrycznej szlifowania).

Ponadto szlifierka wyposażona była w przemiennik częstotliwości SJ100 pozwalający na sterowanie częstotliwościowe obrotami wrzeciona przedmiotu obrabianego.

5.4 Przyrząd do kształtowania makrogeometrii CPS

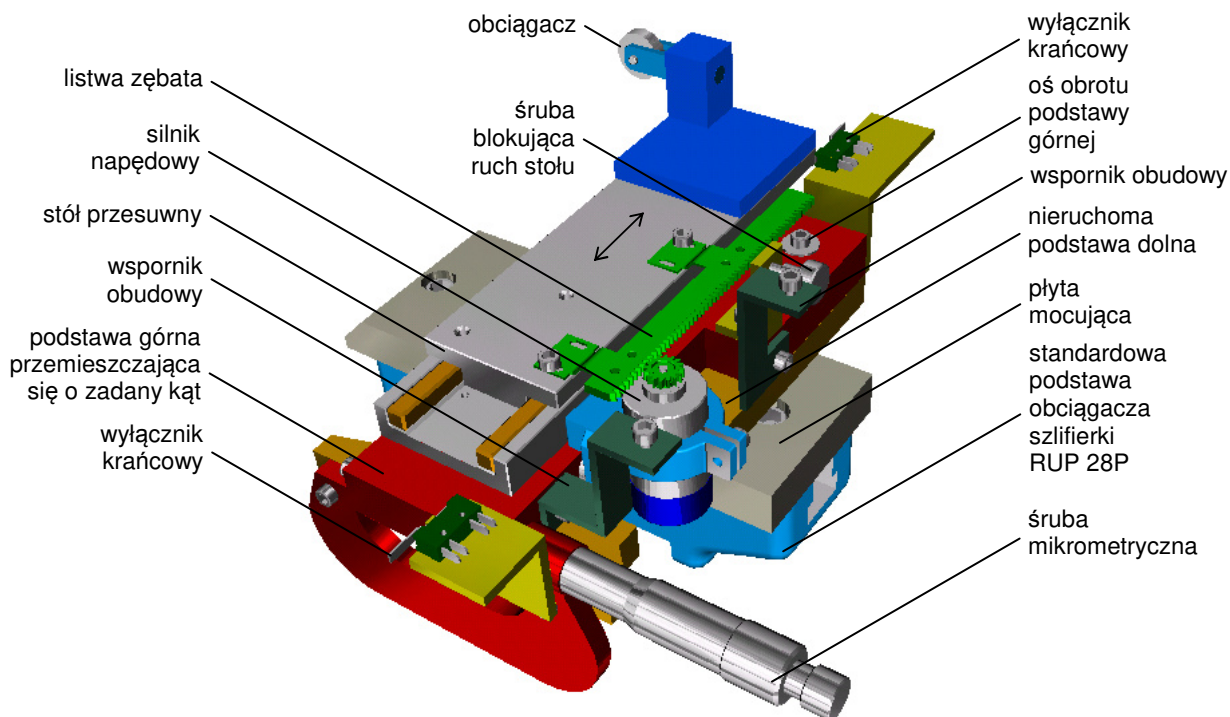
Efektywna realizacja procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie możliwa jest przy zapewnieniu precyzyjnego kształtowania makrogeometrii wykorzystywanych ściernic. Konstrukcja szlifierek konwencjonalnych, jak i CNC pozwala na zmianę położenia kąowego wrzeciona ściernicy, która umożliwia wykonanie nakroju stożkowego na czynnej powierzchni narzędzia ściernego. Takie zmiany ustawień obrabiarki są pracochłonne i w związku z tym nieopłacalne w przypadku konieczności ich dokonywania przy każdym zabiegu obciążania. Ponadto nie zapewniają dostatecznej dokładności pozycjonowania kąowego i nie dają pewności powrotu do ustawienia wyjściowego (zerowego).

Aby umożliwić szybkie kształtowanie nakroju stożkowego o określonych parametrach geometrycznych na czynnej powierzchni narzędzi ściernych, konieczne było skonstruowanie specjalnego oprzyrządowania. Projekt konstrukcyjny został wykonany z użyciem zintegrowanego systemu CAD/CAM/CAE o nazwie *I-DEAS*. Model komputerowy opracowanego przyrządu przedstawia rys. 5-6.



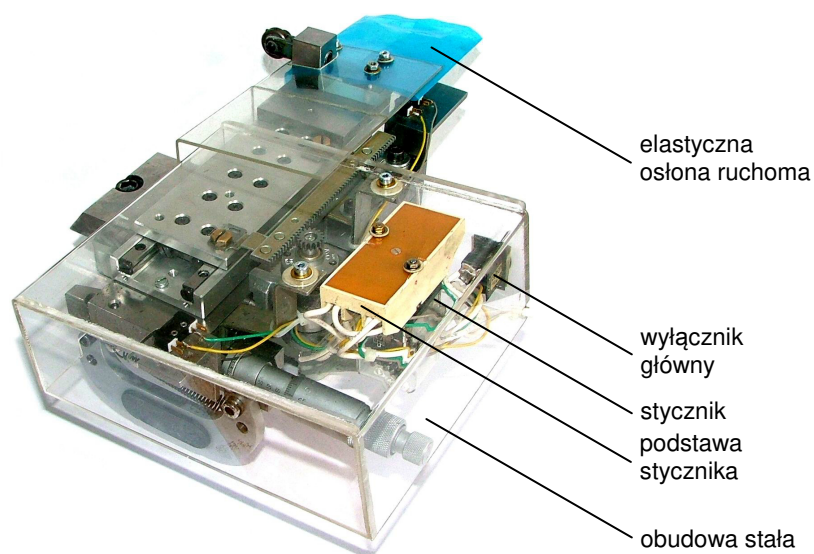
Rys. 5-6. Widok ogólny modelu przyrządu do kształtowania makrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy

Najważniejszym elementem urządzenia (rys. 5-7 i 5-8) jest stół przesuwny na prowadnicach toczyńnych, do którego przytwierdzona została tarczowa oprawa jednoziarnistego obciążacza diamentowego oraz śruba mikrometryczna, dzięki której można z wysoką precyzją ($\pm 3\%$)⁷ zadawać żądane wartości kąta nakroju. Śruba ta jest przymocowana do dolnej części podstawy i bezpośrednio przesuwą górną jej część, na której zamocowany jest stół przesuwny. Przyrząd wyposażony jest w układ napędu stołu składający się z zasilacza, silnika napędowego i listwy zębatej. Sterowanie ruchem posuwisto-zwrotnym odbywa się za pomocą stycznika wraz z wyłącznikami umieszczonymi w pozycjach skrajnych przesuwu stołu. Całość zamocowana została do górnej części podstawy w celu zachowania niezmiennych kinematyki obciążania przy różnych wartościach kąta. Części składowe opisywanego przyrządu zamocowane zostały na standardowej podstawie obciążacza szlifierki RUP 28P.



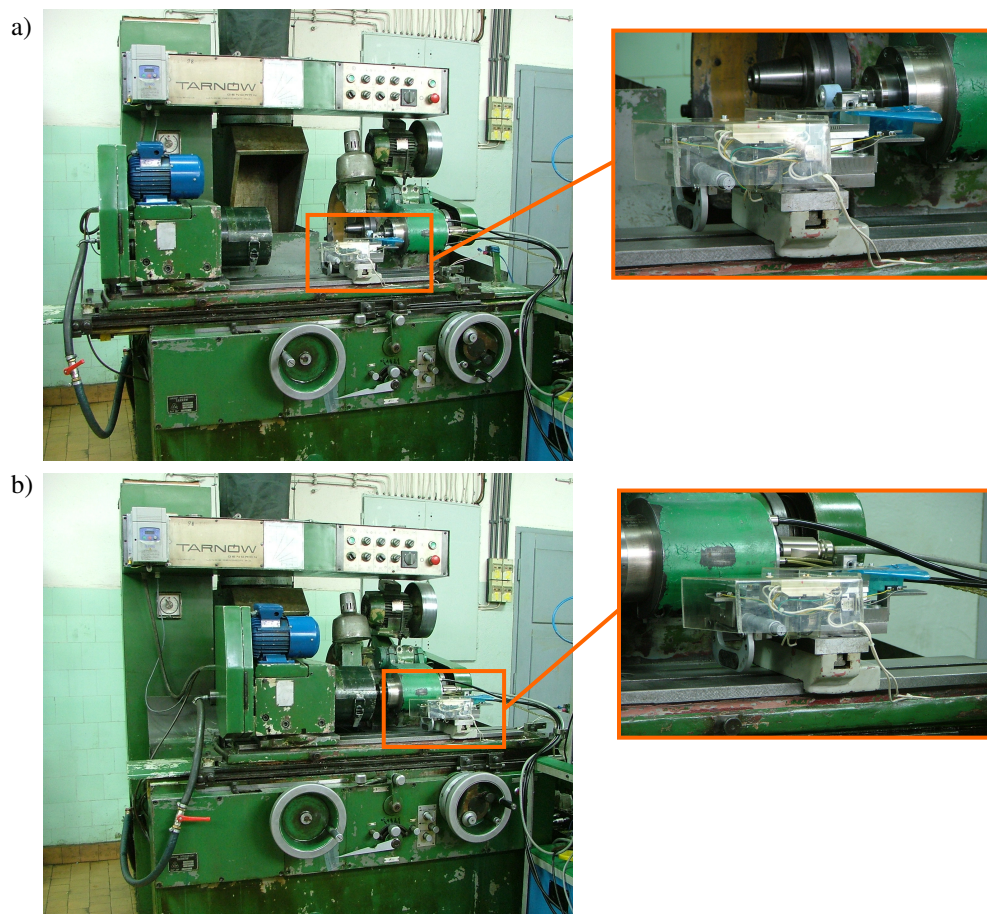
Rys. 5-7. Elementy funkcjonalne przyrządu do kształtowania makrogeometrii narzędzi ściernych

⁷ Dokładność kształtowania makrogeometrii CPS została wyznaczona na podstawie pomiarów wykonanych na projektorze pomiarowym OPTIMUS G IL firmy Schunk Werth Messtechnik – Załącznik Z.1



Rys. 5-8. Widok urządzenia w stanie gotowym do pracy – na pierwszym planie widoczna jest obudowa i osłony chroniące przed wpływem płynów obróbkowych, a także elementy układu zasilania

Przyrząd do obciążania zamocowany został do stołu szlifierki w miejscu, które pozwoliło na obciążanie ściernicy i szlifowanie bez konieczności zdejmowania opracowanego oprzyrządowania (rys. 5-9). Umożliwiło to wykonywanie nakroju stożkowego narzędzi ściernych w procesie obciążania z dużą dokładnością i powtarzalnością oraz pozwoliło na skrócenie czasu tego zabiegu.



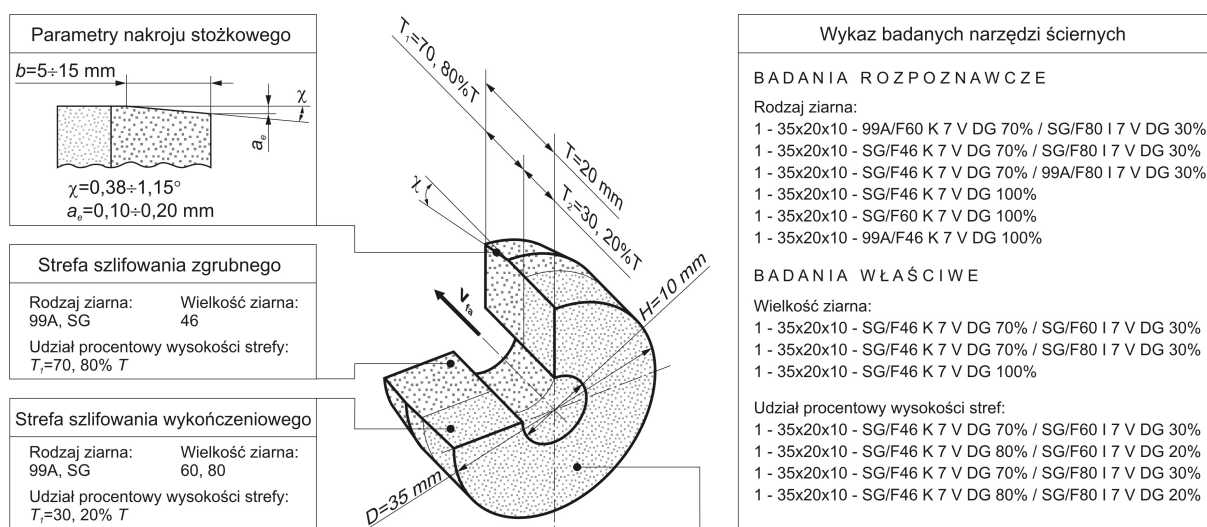
Rys. 5-9. Widok stanowiska badawczego z zamontowanym przyrządem do precyzyjnego obciążania: a) w trakcie obciążania; b) w trakcie szlifowania przyrząd znajduje się poza obszarem roboczym

Przyrząd został tak zaprojektowany, aby 1° wychylenia kąowego odpowiadał wysunięciu śruby mikrometrycznej na długość 3,15 mm. Przed rozpoczęciem obciążania konieczne było również określenie pozycji zerowej, czyli takiej, w której stolik przesuwny z zamocowanym obciążaczem był ustawiony równoległe ze stołem szlifierki. Wyznaczenie pozycji zerowej odbywało się z wykorzystaniem czujnika indukcyjnego zamocowanego na podstawie magnetycznej do wrzeciona ściernicy i przyłożonego do stolika przesuwego przyrządu do obciążania. Obserwacja wskazań czujnika podczas ruchu stołu szlifierki, wraz z jednoczesną regulacją położenia kąowego stolika za pomocą śruby mikrometrycznej, umożliwiały szybkie ustalenie równoległości z dokładnością czujnika indukcyjnego (0,01 mm) na odcinku pomiarowym równym długości stolika – 180 mm (dziesięciokrotnie dłuższym od głębokości szlifowanego otworu).

5.5 Narzędzia ściernic

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano w sumie kilkanaście narzędzi ściernych różniących się rodzajem ziaren, ich wielkością oraz udziałem procentowym strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego.

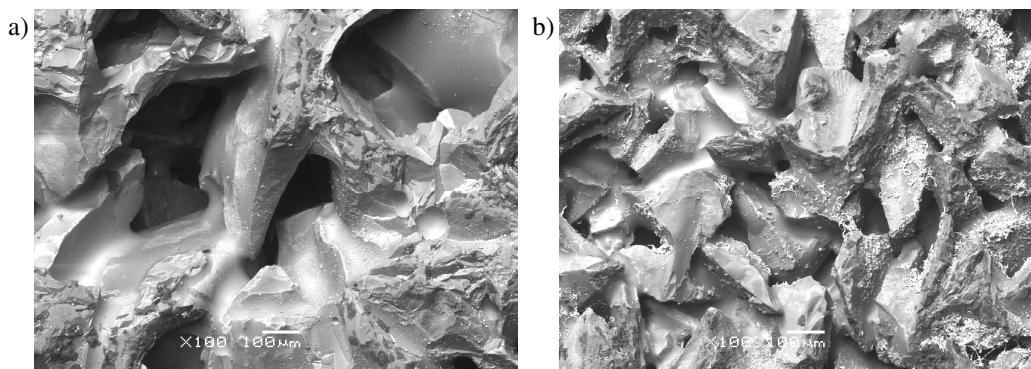
Opracowano i wykonano szereg odmian ściernic na bazie Al_2O_3 [NAD03A, NAD04]. Do ich budowy wykorzystano ziarna elektrokorundu szlachetnego (99A) i korundu spiekane (SG). Na części atakującej narzędzi ściernych ukształtowano nakrój stożkowy, którego kąt dostosowany był do wielkości nadkładu obróbkowego (rys. 5-10).



Rys. 5-10. Charakterystyka zbiorcza wykorzystanych w badaniach narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie wykonanych na bazie ziaren Al_2O_3

Opracowane ściernice zbudowano w oparciu o spoiwo szklanokrystaliczne z układu $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ (oznaczenie skrótowe typu spoiwa: DG), dzięki czemu charakteryzowały się one otwartą strukturą widoczną na zarejestrowanych obrazach mikroskopowych⁸ (rys. 5-11).

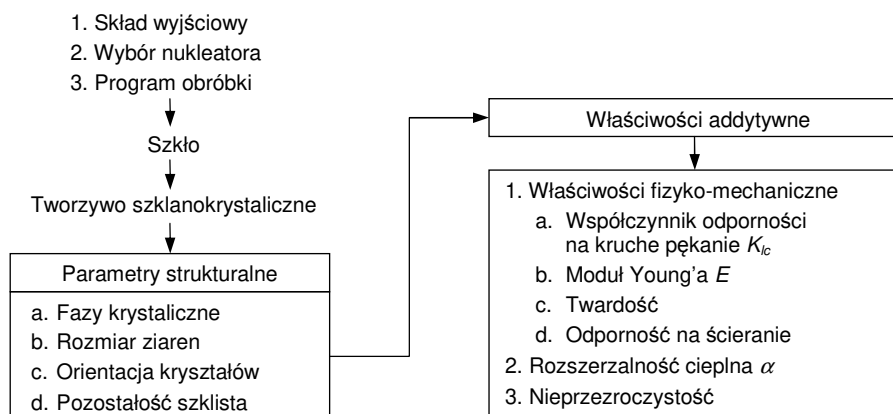
⁸ Obrazy wykonane na elektronowym mikroskopie skaningowym JEOL typu JSM-5500LV, opisanym w punkcie Z.4 załącznika. Więcej widoków mikroskopowych powierzchni wykorzystanych w badaniach narzędzi ściernych przedstawiono w punkcie Z.5 załącznika.



Rys. 5-11. Obrazy mikroskopowe fragmentów CPS o strefowo zróżnicowanej budowie wykonanej z ziaren SG (pow. 100x): a) strefa szlifowania zgrubnego wykonana z ziaren o wielkości 46; b) strefa szlifowania wykończeniowego wykonana z ziaren o wielkości 80 [HER05, NAD05A]

Narzędzia ściernie wykonano w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej, w której od wielu lat prowadzone są intensywne prace nad spoiwami szklanymi i szklanokrystalicznymi (dewitryfikatami) [HER93, HER95, HER97, HER03, KAR95, KRZ04].

Tworzywa szklanokrystaliczne 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 (rys. 5-12).



Rys. 5-12. Zmienne regulujące przebieg procesu krystalizacji do tworzywa szklanokrystalicznego i wynikające z tego procesu parametry strukturalne oraz ściśle z nimi związane właściwości addytywne [HER03]

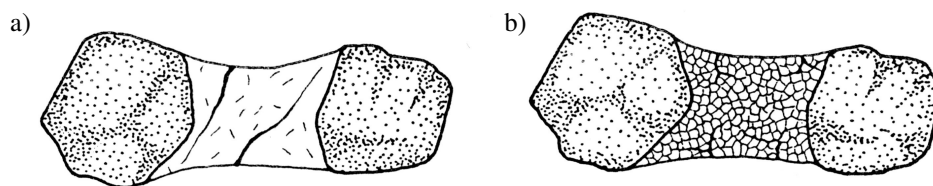
Otrzymanie szkła krystalicznego zależy przede wszystkim od utworzenia odpowiednio dużej ilości zarodków krystalizacji, które powinny być równomiernie rozmieszczone w fazie szklanej. Należy zapewnić im wzrost do wielkości około $0,1 \mu\text{m}$ do $1 \mu\text{m}$, w warunkach podwyższonej temperatury, 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 wydzielających się kryształów, ich wzajemna orientacja, ilość pozostałej fazy szklanej,

a także występowanie wewnętrznych niejednorodnych naprężeń, ma wpływ na jego właściwości użytkowe. Zaznaczyć przy tym należy, że skład fazowy i struktura mogą być dostosowywane do projektowanych właściwości.

Niewielkie różnice współczynników rozszerzalności termicznej ziarna ściernego i spoiwa szklanokrystalicznego wpływają korzystnie na wytrzymałość ściernicy. Przy ochładzaniu oba składniki narzędzia ściernego kurczą się 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 tego narzędzia.

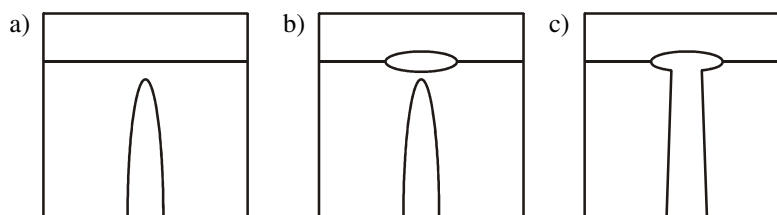
Tworzywa szklanokrystaliczne, w porównaniu ze spoiwami szklanymi charakteryzują się wieloma korzystnymi właściwościami. Posiadają wyższą twardość, drobnokrystaliczną strukturę, dużo wyższą wytrzymałość mechaniczną, trwałość termiczną i odporność na deformację w wysokich temperaturach. Właściwości mechaniczne tych tworzyw 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 narzędzia ściernego. Spoiwa szklanokrystaliczne posiadają wytrzymałość większą od szkła, wynikającą z odmiennego mechanizmu rozprzestrzeniania się pęknięć (rys. 5-13).



Rys. 5-13. Schemat propagacji pęknięć w zależności od rodzaju spoiwa: a) spoiwo szklane; b) spoiwo szklanokrystaliczne [HER95]

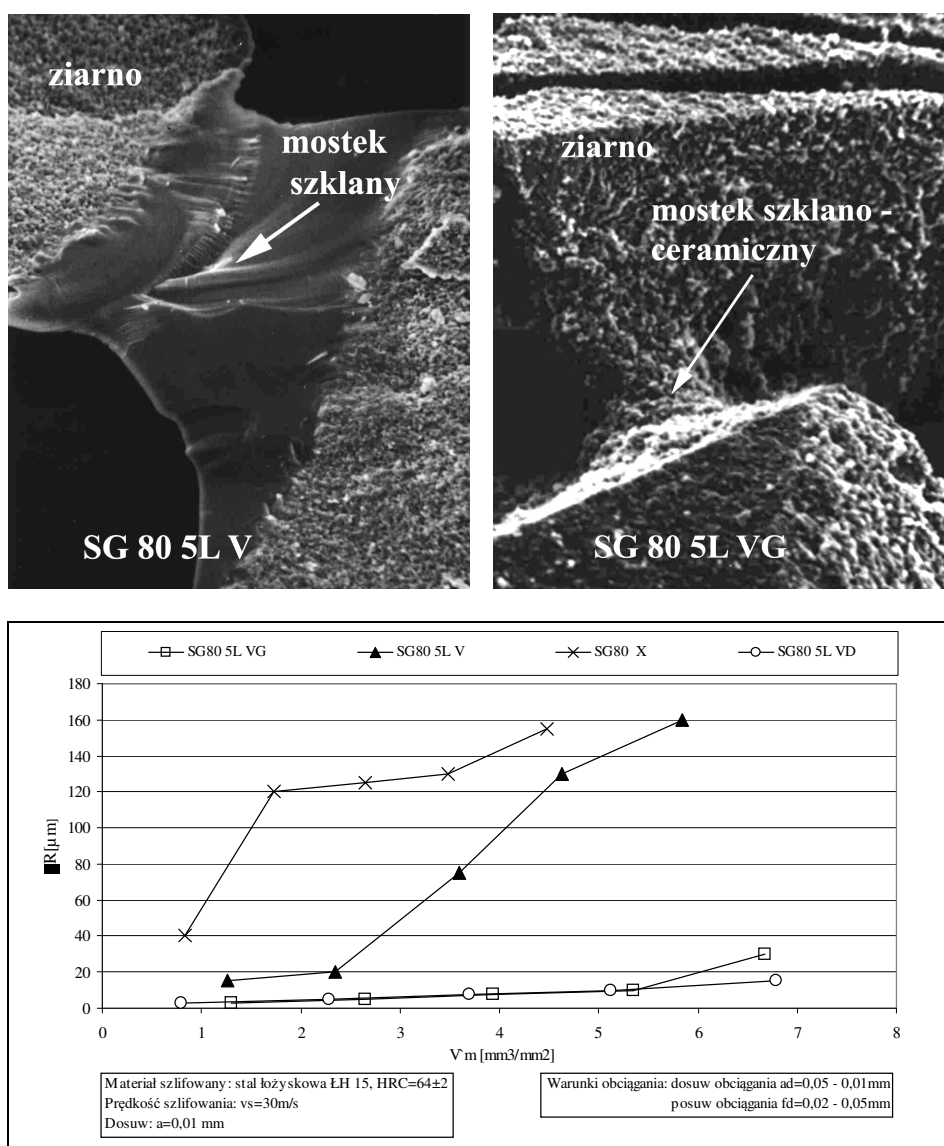
Destrukcja spoiwa jest procesem dwuetapowym. Pierwszy etap polega na wytworzeniu pęknięcia, a w drugim etapie wzrasta ono aż do wykruszenia się fragmentu spoiwa. W jednorodnym izotropowym szkłe pęknięcia rozchodzą się zazwyczaj bez przeszkód i nietatwo się rozgałęziają. Natomiast w materiale szklanokrystalicznym granice kryształów mogą hamować rozprzestrzenianie się pęknięć lub ograniczać ich długość, a tym samym powodują wzrost wytrzymałości spoiwa. Szybkość rozprzestrzeniania się pęknięcia może zmniejszyć się nawet do zera na granicy pomiędzy ziarnem krystalicznym tworzywa dewitryfikacyjnego i fazą szklistą tego spoiwa (rys. 5-14).



Rys. 5-14. Mechanizm Cooka-Gordona hamujący rozprzestrzenianie się pęknięcia w tworzywie szklanokrystalicznym: a) spękanie zbliża się do granicy międzyziarnowej; b) granica międzyziarnowa pęka przed dojściem do niej spękania; c) spękanie w kształcie litery „T” nierozwija się dalej [HER95]

Ponadto spoiwa szklanokrystaliczne, w porównaniu ze spoiwami szklanymi i tradycyjnymi ceramicznymi, mają 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.

Badania procesu szlifowania narzędziami ściernymi wykonanymi na bazie spoiwa szklanokrystalicznego i ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane go o spoiwie szklanokrystalicznym uwi docz niły przewagę tego typu wiązania w porównaniu z konwencjonalnym spoiwem ceramicznym. Analiza zmiany chropowatości powierzchni szlifowanych pokazała, że ściernice ze spoiwem szklanokrystalicznym charakteryzują się długim i stabilnym okresem zachowania wysokiej gładkości obrabianej powierzchni. Świadczy to o stałym i równomiernym zużyciu się (mikrowykruszaniu) zarówno ziarna, jak i spoiwa. Potwierdzają to również wyniki zużycia promieniowego narzędzia ściernego (rys. 5-15).



Rys. 5-15. Zależność zużycia promieniowego ściernic z submikrokrystalicznego tlenku glinu ze spoiwem szklanym i szklanokrystalicznym od objętości zeszlifowanego materiału [HER03, HER04]

W procesie szlifowania zużyciu ulegają zarówno ziarna ściernic, jak i spoiwo. Podczas obróbki ściernic mechaniczne obciążenia ziaren przenoszone są na mostki spoiwa

wiążące ziarno w masę narzędzia ściernego. Obciążenia te sprawiają, że w określonych warunkach mostki spoiwa ulegają pękaniu i zniszczeniu. Mechanizm zmęczeniowego pękania mostków spoiwa szklanokrystalicznego jest porównywalny do zmęczeniowego wykruszenia ziaren ściernych, gdyż są to materiały o zbliżonej kruchości. Taka właściwość spoiwa jest szczególnie istotna w ściernicach z ziarnami mikrokryształicznymi, ponieważ spoiwo szklanokrystaliczne w procesie szlifowania zużywa się według analogicznego mechanizmu destrukcji.

Do badań rozpoznawczych, mających na celu określenie wpływu rodzaju ziarna ściernego w każdej ze stref narzędzia ściernego na rezultaty badanego procesu, opracowano ściernice, w których stosunek wysokości strefy szlifowania zgrubnego do wysokości strefy szlifowania wykończeniowego wynosił $T_1/T_2=70/30$, a całkowita wysokość $T=20$ mm (tab. 5-I). W każdym z narzędzi w strefie szlifowania zgrubnego umieszczono ziarna o wielkości 46, a w strefie szlifowania wykończeniowego o wielkości 80.

Tablica 5-I. Narzędzia ściernie o strefowo zróżnicowanej budowie wykorzystane w badaniach rozpoznawczych jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów

BADANIA ROZPOZNAWCZE							
Nazwa*	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie	Nazwa*	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie
99A/SG			1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30%	99A 100%			1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 100%
SG/99A			1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% 99A/F80 I 7 V DG 30%	SG 100%			1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 100%
SG/SG			1 - 35x20x10 - SG/F46 K 7 V DG 70% SG/F80 I 7 V DG 30%	SG F60 100%			1 - 35x20x10 - SG/F60 K 7 V DG 100%

* **Nazwa** ściernicy to jej oznaczenie skrócone przyjęte dla uproszczenia prezentacji i opisu wyników badań. W przypadku narzędzi wykorzystanych w badaniach rozpoznawczych nazwa zawiera rodzaj ziarna w strefie szlifowania zgrubnego/wykończeniowego. Narzędzia ściernie w całości wykonane z ziaren jednej wielkości oznaczone zostały nazwą ziarna i liczbą 100%. W przypadku ściernicy SG F60 100% dodano informację o rozmiarze ścierniwa dla odróżnienia od ściernicy SG 100% zbudowanej z ziaren o rozmiarze 46.

Na podstawie wyników badań rozpoznawczych, do badań właściwych zaprojektowano i wykonano narzędzia ściernie zbudowane na bazie ziaren korundu spiekanego SG. Celem badań właściwych było określenie wpływu wielkości ziarna oraz udziału procentowego wysokości stref T_1/T_2 na rezultaty badanego procesu. Poddane badaniom ściernice charakteryzowały się zatem zmiennym udziałem procentowym wysokości stref ($T_1/T_2=70/30$ i $T_1/T_2=80/20$). W stożkowej strefie szlifowania zgrubnego zastosowano

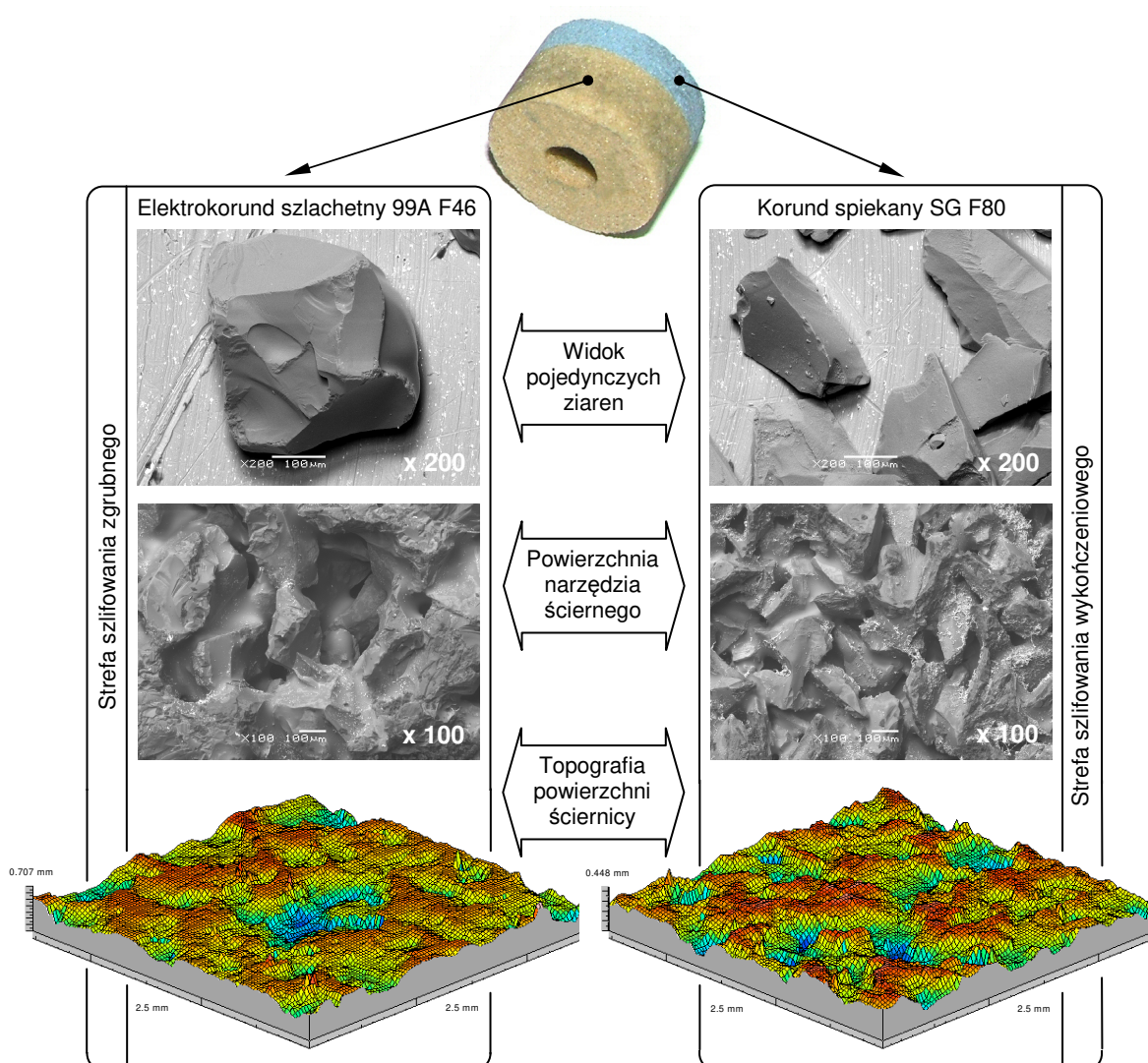
ziarna wielkości 46, natomiast w strefie szlifowania wykończeniowego wielkość ziarna wynosiła 60 i 80 (tab. 5-II).

Tablica 5-II. Narzędzia ściernicze o strefowo zróżnicowanej budowie wykorzystane w badaniach właściwych jednoprzeciściowego procesu szlifowania otworów

BADANIA WŁAŚCIWE							
Nazwa*	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie	Nazwa*	Schemat budowy	Widok ogólny	Oznaczenie
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 7 V DG 100%	* Nazwa ściernicy to jej oznaczenie skrócone przyjęte dla uproszczenia prezentacji i opisu wyników badań. W przypadku ściernic wykorzystanych w badaniach właściwych oznaczenie zawiera wielkość ziarna w strefie szlifowania zgrubnego/wykończeniowego oraz liczbę oznaczającą procentowy udział drugiej strefy. Narzędzie ściernicze w całości wykonane z ziaren jednej wielkości oznaczone zostało wielkością ziarna i liczbą 100%.			

Zarówno twardość, jak i struktura poszczególnych stref ściernicy pozostawały stałe dla wszystkich wykorzystanych podczas badań narzędzi ścierniczych. Dla strefy szlifowania zgrubnego zastosowano stopień twardości K, a dla strefy szlifowania wykończeniowego I. W obu strefach przyjęto strukturę 7.

Poniżej przedstawiono widoki mikroskopowe ziaren ścierniczych i powierzchni poszczególnych stref oraz topografie mikrogeometrii CPS na przykładzie ściernicy 1 - 35x20x10 - 99A/F46 K 7 V DG 70% / SG/F80 I 7 V DG 30% (rys. 5-16).



Rys. 5-16. Widok mikroskopowy ziaren ściernych i czynnej powierzchni strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego oraz topografia mikrogeometrii powierzchni ściernicy 99A/SG

5.6 Parametry i warunki badań

Poniżej scharakteryzowane zostały parametry procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wraz z zakresami ich zmienności. Opisany został również przedmiot obrabiany oraz wydatek i rodzaj stosowanej cieczy chłodząco-smarującej.

Prędkość obwodowa ściernicy podczas szlifowania v_s i obciążenia v_{sd}

Wartość prędkości szlifowania zadawana była z poziomu programu *TERM51* zainstalowanego w komputerze sprzężonym z przetwornicą wrzeczona FISCHER za pomocą łącza szeregowego RS232. Program umożliwiał dowolną modyfikację prędkości obrotowej ściernicy n_s w zakresie od 0÷60 000 obr./min.

W celu sterowania procesem z wykorzystaniem parametru v_s wprowadzane wartości stanowiły rezultat wcześniejszego przeliczenia żądanej prędkości obwodowej na możliwą do wprowadzenia prędkość obrotową n_s wg poniższej zależności:

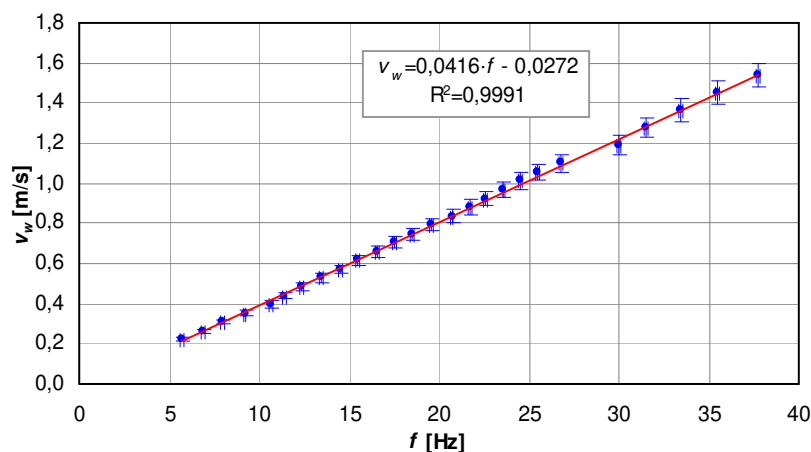
$$n_s = \frac{60 \cdot 1000 \cdot v_s}{\pi \cdot d_s} \quad [\text{obr./min}]. \quad (5.4)$$

Stosowane w trakcie badań wartości prędkości obwodowej v_s przyjmowały następujące wartości: $v_s=40; 50; 60; 70$ m/s, co odpowiadało prędkości obrotowej ściernicy $n_s \cong 22\ 500 \div 39\ 300$ obr./min.

Podczas wykonywania zabiegów obciążania prędkość obwodowa narzędzia ściernego wynosiła: $v_{sd}=10; 15; 20$ m/s czyli $n_s \cong 5\ 700 \div 12\ 500$ obr./min.

Prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego v_w

Zmiany wartości prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w dokonywane były za pośrednictwem przemiennika częstotliwości sterującego pracą silnika napędzającego wrzeciennik przedmiotu obrabianego. Konieczne było wyznaczenie charakterystyki przemiennika określającej zmienność v_w od f (rys. 5-17).



Rys. 5-17. Wyznaczona doświadczalnie charakterystyka zmian prędkości v_w w funkcji częstotliwości przemiennika SJ100 sterującego pracą silnika wrzeciona przedmiotu obrabianego szlifierki RUP 28P

W tym celu wykonano pomiary rzeczywistych prędkości obrotowych przedmiotu obrabianego n_w dla zadanych wartości częstotliwości f , przy użyciu tachometru ręcznego odśrodkowego typu VEB H6. Błąd pomiarowy tachometru wynosił $\pm 2\%$.

W trakcie badań zadawane wartości prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego przyjmowały następujące wartości: $v_w=0,4; 0,8; 1,2; 1,6$ m/s, co odpowiadało zmianom prędkości obrotowej $n_w=182; 364; 546; 728$ obr./min. W przypadku pomiaru temperatury $v_w=0,04$ m/s czyli $n_w=18$ obr./min.

Stosunek prędkości q

Zakres zmienności parametru opisującego stosunek tych prędkości $q=v_s/v_w$ wyznaczyła zastosowana zmienność parametrów v_s i v_w . Stosunek prędkości przyjmował następujące wartości: $q=38; 50; 75; 150$ ($q=1517$ dla pomiarów termowizyjnych).

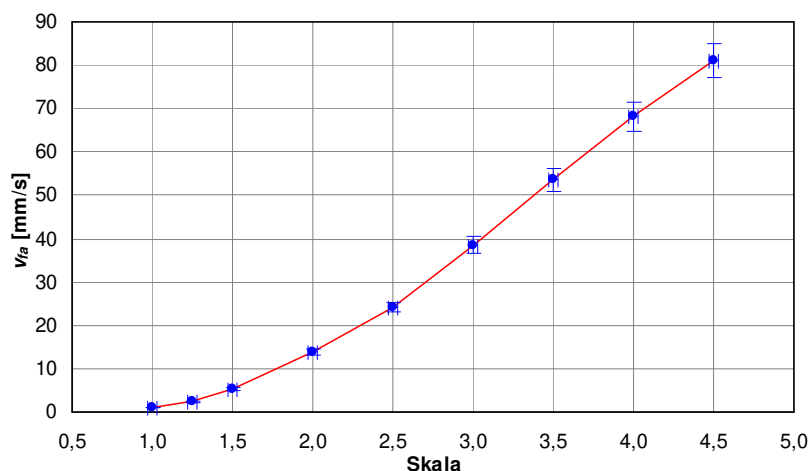
Prędkość posuwu osiowego stołu v_{fa}

Wartość prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki RUP 28P reguluje się bezstopniowo za pomocą zaworu hydraulicznego. W celu ustawienia danej prędkości posuwu v_{fa} mierzono za pomocą stopera czas przemieszczenia stołu na znanej drodze i korygowano ustawienia zaworu. Aby przyspieszyć i jednocześnie zapewnić powtarzalność zadawania żądanych prędkości v_{fa} , dokonano niewielkiej modyfikacji stanowiska badawczego. Do dźwigni regulującej ustawienie zaworu przytwierdzono wskazówkę, natomiast na korpusie szlifierki zamocowano skalę o zakresie $0\div 50^\circ$, w której każdy 1° podzielony został na cztery części (rys. 5-18).



Rys. 5-18. Widok wskazówki oraz skali umożliwiających precyzyjne pozycjonowanie dźwigni zaworu regulującego prędkość posuwu osiowego stołu szlifierki RUP 28P

Trwałe zamocowanie skali umożliwiło wyznaczenie charakterystyki zaworu regulującego prędkość posuwu osiowego stołu (rys. 5-19).



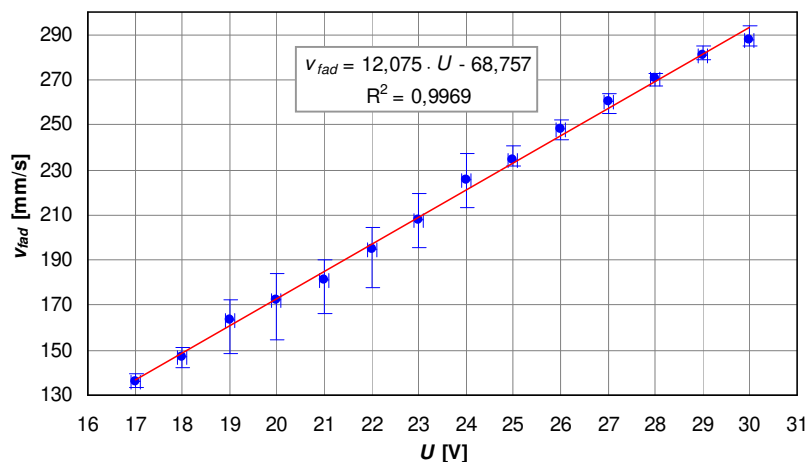
Rys. 5-19. Wyznaczona doświadczalnie charakterystyka zmian v_{fa} w funkcji skali opisującej położenie zaworu regulującego prędkość posuwu osiowego stołu szlifierki RUP 28P

Podczas badań wartość posuwu osiowego stołu zmieniała się następująco: $v_{fa}=1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ mm/s.

Prędkość posuwu osiowego obciążacza v_{fad}

Prędkość posuwu osiowego opracowanego przyrządu do kształtowania czynnej powierzchni narzędzi ściernych regulowana była za pomocą zmian napięcia prądu zasilającego silnik wywołujący ruch stołu przesuwnego (rys. 5-7). Zastosowany wzmacniacz typu INCO ZTR-1/71 pozwalał na zadawanie napięcia z zakresu $0,1\div 30$ V z dokładnością $0,1$ V dla natężenia $0,1\div 10$ A. Na rys. 5-20 przedstawiono charakterystykę zmian prędkości

posuwu osiowego obciążacza v_{fad} w funkcji napięcia prądu zasilacza, sporządzoną na podstawie pomiaru drogi pokonanej w czasie 30 s.



Rys. 5-20. Wyznaczona doświadczalnie charakterystyka zmian prędkości posuwu osiowego obciążacza v_{fad} w funkcji napięcia prądu zasilającego opracowany przyrząd do kształtowania czynnej powierzchni narzędzi ściernych

W trakcie badań wpływu zmian parametrów obciążania na efekty opisywanego procesu, prędkość posuwu osiowego podczas kształtowania nakroju stożkowego wynosiła: $v_{fad(stożek)}=160; 200; 240; 280$ mm/s. Natomiast przy ostrzeniu części walcowej, posuw realizowany był za pomocą stołu szlifierki i przyjmował następujące wartości: $v_{fad(walec)}=10; 30; 50; 70$ mm/s.

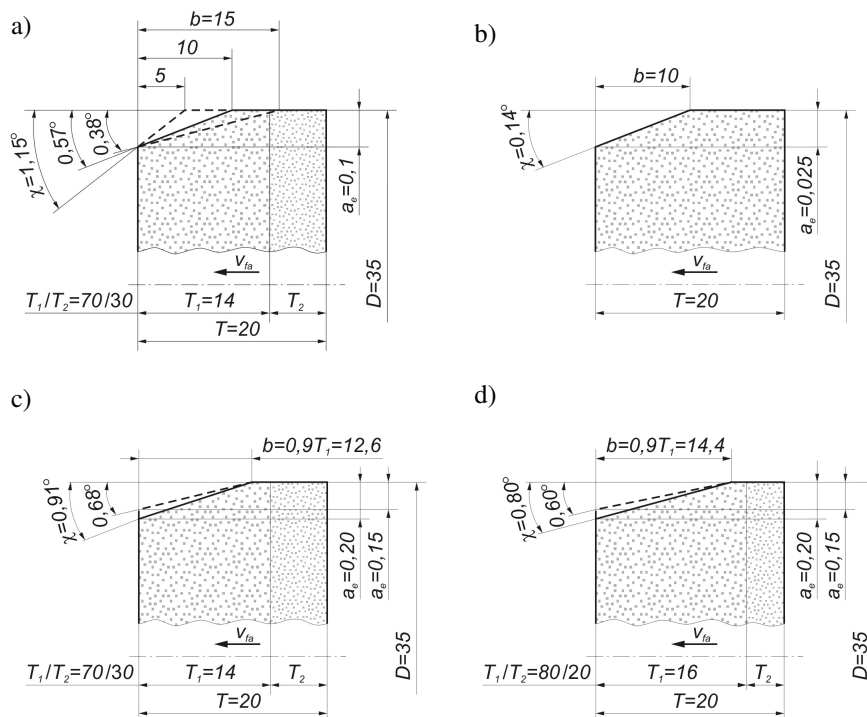
Styk roboczy a_e i styk roboczy obciążania a_{ed}

Wartość styku roboczego zadawano z dokładnością wynoszącą 0,0025 mm, wynikającą z konstrukcji zespołu dosuwu szlifierki RUP 28P. Do pomiaru wartości styku roboczego wykorzystano czujnik zegarowy VIS MDAA o zakresie pomiarowym 10 mm i dokładności $\pm 1 \mu\text{m}$, zamocowany na podstawie magnetycznej. Badania prowadzono z następującymi wartościami głębokości szlifowania: $a_e=0,100; 0,125; 0,150; 0,175; 0,200$ mm ($a_e=0,025$ mm przy pomiarach temperatury).

Podczas obciążania narzędzi ściernych wartość styku roboczego pozostawała na stałym poziomie i wynosiła: $a_{ed}=0,0125$ mm.

Kąt nakroju stożkowego χ

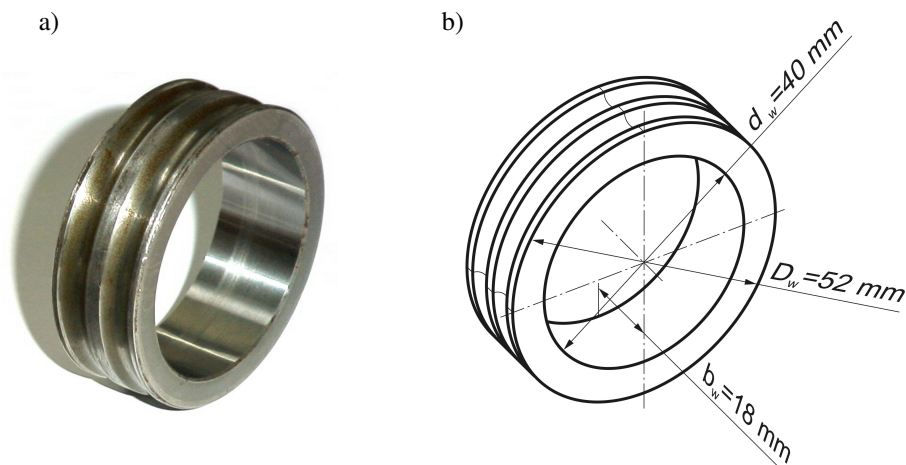
W trakcie przeprowadzonych badań wartość kąta nakroju stożkowego dostosowywana była do wielkości styku roboczego a_e w taki sposób, żeby część stożkowa narzędzia ściernego obejmowała cały naddatek na obróbkę. Drugim parametrem, od którego zależał kąt χ , była długość nakroju b . Przy takim samym styku roboczym, zmiana szerokości nakroju powodowała znaczące różnice kąta (rys. 5-21), którego wartości w trakcie badań wynosiły $\chi=0,14 \div 1,15^\circ$.



Rys. 5-21. Wartości parametrów nakroju stożkowego χ i b narzędzi ściernych: a) badania rozpoznawcze – $a_e=0,1$ mm; b) badania rozpoznawcze (pomiar temperatury) – $a_e=0,025$ mm; c) badania właściwe – $a_e=0,15\pm 0,20$ mm, $T_1/T_2=70/30$; d) badania właściwe – $a_e=0,15\pm 0,20$ mm, $T_1/T_2=80/20$ i $T_1=T$

Przedmiot obrabiany

Przedmiotami obrabianymi były pierścienie łożysk tocznych o średnicy otworu $d_w \cong 42$ mm i szerokości $b_w=18$ mm (rys. 5-22). Próbki wykonane były ze stali stopowej 100Cr6 o twardości 63 ± 2 HRC⁹. Pierścienie mocowane były w uchwycie czteroszczękowym szlifierki za pośrednictwem tulei samocentrującej (rys. 5-5).



Rys. 5-22. Przedmiot szlifowany - półfabrykat łożyska tocznego ze stali stopowej 100Cr6 o twardości 63 ± 2 HRC: a) widok ogólny; b) wymiary charakterystyczne

⁹ Twardość przedmiotów szlifowanych zbadano z dokładnością $\pm 2\%$ na twardościomierzu do pomiaru sposobem Rockwella typu PRL610, wyprodukowanym przez Zakłady Produkcji Aparatury Badawczej KABiD PRESS. Do pomiaru wytypowano losowo 15 pierścieni. Na czole każdego z nich wykonano trzy pomiary. Podana wartość stanowi średnią z 45 pomiarów.

Rodzaj i wydatek cieczy chłodząco-smarującej

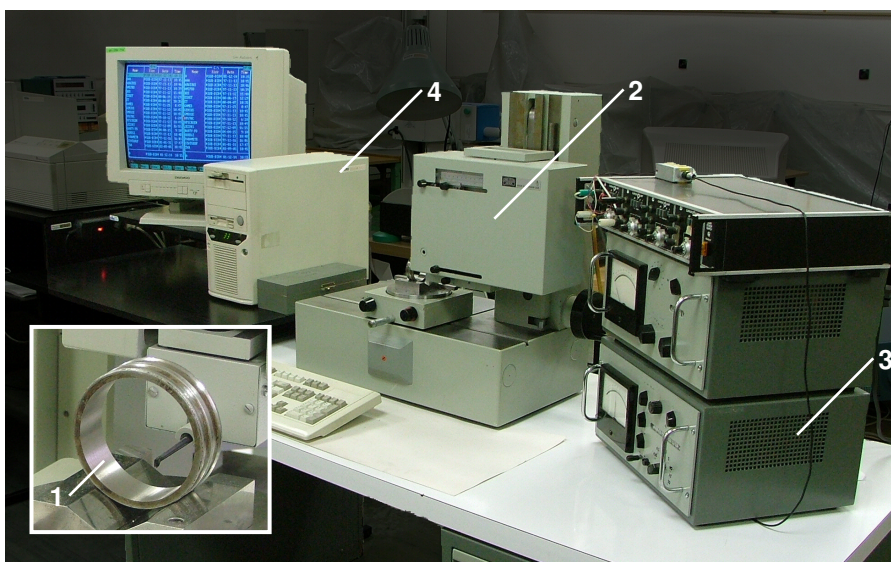
W trakcie realizacji procesu szlifowania otworów z użyciem narzędzi ściernych zbudowanych z ziaren Al_2O_3 , zastosowano 5% wodny roztwór oleju Castrol Syntilo R HS. Podczas badań ciecz podawano metodą zalewową, a jej wydatek wynosił $Q_{CCS}=5,0\div 5,3$ l/min. Ciecz chłodząco-smarującą doprowadzono przewodem zakończonym odcinkiem rury poprowadzonej wewnątrz wrzeciona przedmiotu obrabianego, której wylot skierowany był bezpośrednio w strefę szlifowania.

5.7 Stanowiska pomiarowe

W przeprowadzonych badaniach oceniano chropowatość oraz błędy kształtu struktury geometrycznej szlifowanych walcowych powierzchni wewnętrznych.

5.7.1 Stanowisko do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni

Do pomiaru profili mikrogeometrii szlifowanych wewnętrznych powierzchni walcowych metodą stykową zastosowano profilometr ME-10 firmy Carl Zeiss Jena (rys. 5-23). Rejestracja i zapis danych z profilometru możliwy był dzięki komputerowi wyposażonemu w kartę pomiarową z 12-bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym oraz program *Karta AD*, którego zadaniem była akwizycja danych.



Rys. 5-23. Widok stanowiska do pomiaru profili mikrogeometrii powierzchni metodą stykową; 1 – przedmiot mierzony; 2 – profilometr ME-10; 3 – wzmacniacz sygnału; 4 – komputer z kartą przetwornika AD/DA i oprogramowaniem

Pomiar profilu chropowatości przedmiotu po obróbce przeprowadzano w kierunku osiowym wewnętrznej powierzchni pierścienia, przy czym pomiar rozpoczynano w odległości 2 mm od czoła próbki. Otrzymane wartości parametru R_a szlifowanych powierzchni zawierały się w przedziale $0,07\div 0,59$ μm , a parametr R_z zmieniał się w zakresie $0,60\div 6,58$ μm . Uwzględniając warunek o co najmniej pięciokrotnie dłuższym odcinku elementarnym od średniego odstępu chropowatości S_m , długość odcinka elementarnego przyjęto zgodnie z normą [PN87] na poziomie $l=0,8$ mm. Całkowita długość odcinka pomiarowego stanowi pięciokrotność odcinka elementarnego i wynosi $l_n=4,0$ mm.

Do wyznaczenia parametrów i funkcji chropowatości na podstawie zmierzonego osiowego profilu mikrogeometrii przedmiotów obrobionych posłużono się programem *Parametr-Win 3.0*. Wyznaczane parametry powierzchni podzielone zostały na trzy grupy:

- parametry wysokościowe – w skład tej grupy wchodzi następujące parametry znormalizowane [NOW91]: średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a [μm], maksymalna wysokość profilu R_m [μm], średnia z największych wysokości profilu R_{1m} [μm], wysokość profilu chropowatości wg 10 punktów R_z [μm] oraz nieznormalizowany parametr będący średnią wartością wszystkich lokalnych wzniesień profilu w_{sr} [μm];
- parametry horyzontalne – w skład tej grupy wchodzi średni odstęp miejscowych wzniesień profilu S [μm] oraz średni odstęp chropowatości S_m [μm] (które definiuje [ISO82]) oraz częstość występowania wzniesień profilu m [μm];
- parametry opisujące kształt wzniesień profilu – w skład trzeciej grupy wchodzi średnie pochylenie profilu Δ_a , średnie kwadratowe pochylenie profilu Δ_q , względna długość profilu do długości odcinka pomiarowego l_n oraz średni promień zaokrąglenia wzniesień profilu r_{sr} [μm] (zdefiniowany w pracy [KOC90]).

W skład wyznaczanych statystycznych funkcji chropowatości weszły:

- znormalizowany [ISO82] udział nośny profilu t_p , przedstawiony w postaci symetrycznej krzywej geometrycznego styku SCGC;
- rozkład gęstości rzędnych profilu chropowatości;
- rozkład wierzchołków profilu;
- rozkład promieni zaokrąglenia wzniesień profilu chropowatości;
- rozkład gęstości kątów pochylenia zarysu profilu chropowatości.

Poprawność algorytmów wyznaczania wartości parametrów i funkcji chropowatości przez program *Parametr-Win 3.0* została zweryfikowana w pracy [KOC89].

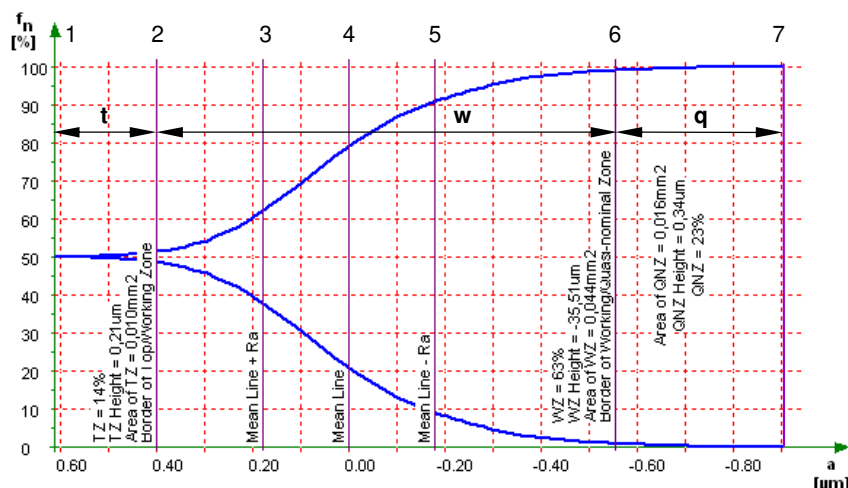
Rejestrację osiowych profili mikrogeometrii przedmiotów szlifowanych dokonano diamentowym ostrzem odwzorowującym w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym równym 90° i promieniu wierzchołka $r=2\mu\text{m}$. Profile zarejestrowano przy powiększeniu pionowym $V_y=5000x$. Prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego profilometru wynosiła $V=0,1\text{ mm/s}$, a w trakcie pomiaru rejestrowanych było 2000 punktów.

Chropowatość powierzchni po szlifowaniu oceniana była wg zaleceń doboru parametrów SGP zawartych w pracy [NOW91], na podstawie profilogramu oraz wyznaczonych wartości następujących znormalizowanych parametrów:

- R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości;
- R_z – wysokość profilu chropowatości wg 10 punktów;
- S_m – średni odstęp chropowatości;
- Δ_a – średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości;
- t_p – udział nośny profilu chropowatości.

Analizę udziału nośnego t_p profilu szlifowanych powierzchni prowadzono z wykorzystaniem Symetrycznej Krzywej Geometrycznego Styku SCGC (*Symmetrical Curve of Geometrical Contact*). Metoda ta opracowana została przez prof. J. Kaczmarka i opisana oraz zweryfikowana w pracach [KAC94, KAC99, KAC99A, KAC01, KAC03].

Metodę SCGC można uznać jako alternatywną oraz niosącą więcej informacji, w odniesieniu do oceny udziału nośnego profilu t_p , za pomocą krzywej nośności *Abbotta-Firestone'a* (AFC – *Abbott-Firestone Curve*) i parametrów t_{p20} , t_{p50} . SCGC (rys. 5-24) stanowi konwersję tej krzywej w taki sposób, aby każda jej odcięta obrazująca kontakt geometryczny została przesunięta równolegle, tak aby środek jej długości znalazł się na prostej prostopadłej do odcinka pomiarowego w połowie jego długości.



Rys. 5-24. Przykład wydruku SCGC (za pomocą programu „Parametr-Win 3.0”) dla profilu chropowatości powierzchni uzyskanej w wyniku szlifowania jednoprzęściowego ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

Przy pomocy SCGC można określić parametry wysokościowe (w tym R_a), parametry stykowe (poziome), charakteryzujące przewidywany styk geometryczny, a także powierzchnię rozwiniętą uwzględniającą chropowatość powierzchni oraz objętość materiału i tzw. pustek, czyli przestrzeni wolnych w strefie chropowatości. Dzięki temu uzyskuje się więcej danych dla przewidywania zachowania się powierzchni w różnych warunkach jej użytkowania.

Na rys. 5-24 przedstawione zostały następujące parametry SCGC:

- punkt P (na linii 1) – to wierzchołek (*Peak*) SCGC, czyli najwyższy punkt profilu chropowatości, przez który przechodzi linia równoległa do linii średniej, będąca górną granicą chropowatości;
- T/W (linia 2) – umowna granica stref chropowatości wierzchołkowej T (*Top Zone*) oraz roboczej W (*Working Zone*). Za kryterium doboru tej granicy dla chropowatości powierzchni współpracujących przyjmuje się takie pole kontaktu, przy którym nie występuje zacieranie montażowe (przyjęto graniczną wartość długości kontaktu równą 2%);
- ML+Ra (linia 3) – linia przechodząca na wysokości będącej sumą wartości linii średniej profilu (ML - *Mean Line*) i średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości R_a ;
- ML (linia 4) – linia średnia profilu chropowatości;
- ML-Ra (linia 5) – linia przechodząca na wysokości ML- R_a ;
- W/Q (linia 6) – umowna granica stref chropowatości: roboczej W i quasi-nominalnej Q (*Quasi-Nominal Zone*), która przechodzi na wysokości kontaktu równego 98% odcinka pomiarowego;

- D-D (na linii 7) – dno (*Depth*) wgłębień SCGC, tj. najniższy punkt profilu chropowatości, przez który przechodzi linia równoległa do linii średniej, będąca dolną granicą chropowatości.

Obszar pomiędzy:

- linią 1 i 2 stanowi strefę wierzchołkową T o wysokości równej t ;
- linią 2 i 6 to strefa robocza W o wysokości równej w ;
- linią 6 i 7 określa strefę quasi-nominalną Q o wysokości równej q .

Krzywa SCGC stanowi granicę pomiędzy materiałem (znajdującym się pod krzywą) a przestrzeniami wolnymi (nad krzywą). Stąd na wydruku podawane są wartości powierzchni stref chropowatości (*Area of Top Zone*, *Area of Working Zone*). Powierzchnia strefy quasi-nominalnej stanowi różnicę pomiędzy powierzchnią całkowitą i sumą powierzchni stref roboczej i wierzchołkowej.

Zaznaczenie na wydruku SCGC położenia linii średniej oraz linii położonych o wartość R_a wyżej i niżej od ML ma na celu:

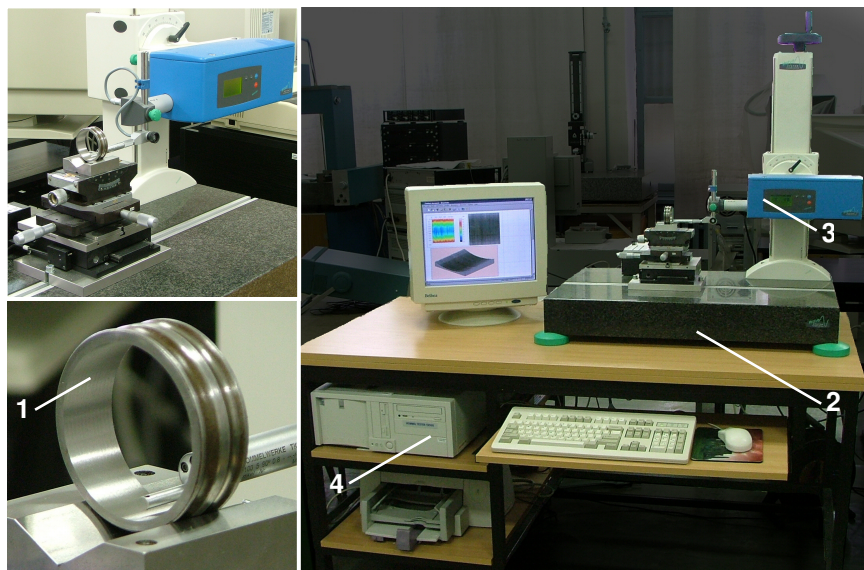
- uczynienie poprzez te wartości metody SCGC kompatybilną z dotychczasowymi metodami pomiaru i oceny chropowatości;
- unaocznienie, że położenie linii średniej jest bardziej miarodajną wielkością dla charakterystyki chropowatości niż R_a ;
- wykazanie, że położenie ML, powiększone i pomniejszone o wartość R_a , jest miarodajnym wskaźnikiem oszacowania, choć z niedomiarem, rozmiarów i powierzchni strefy roboczej.

5.7.2 Stanowiska do pomiaru mikrotopografii powierzchni

Mikrotopografie powierzchni przedmiotów szlifowanych mierzone były z wykorzystaniem metody stykowej. Ze względu na bardzo dużą porowatość struktury, pomiary mikrotopografii powierzchni narzędzi ściernych dokonano na stanowisku umożliwiającym badanie metodą bezstykową.

Stanowisko do pomiarów metodą stykową

Pomiar mikrotopografii przedmiotów obrobionych przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr HOMMEL-TESTER T8000 firmy Hommelwerke z jednostką przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic (rys. 5-25).



Rys. 5-25. Widok stanowiska do pomiaru topografii powierzchni przedmiotów szlifowanych metodą stykową; 1 – przedmiot mierzony; 2 – profilometr HOMMEL-TESTER T8000; 3 – jednostka przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic; 4 – komputer z oprogramowaniem

Topografie powierzchni przedmiotów obrobionych mierzone były na powierzchni 1 mm^2 . Pomiar odbywał się w 101 przejściach z krokiem co $10 \mu\text{m}$. W jednym przejściu rejestrowanych było 2000 punktów z prędkością $V=0,15 \text{ mm/s}$. Pomiarów pierścieni dokonywano przy użyciu czujnika indukcyjnego TKL 100 z diamentowym ostrzem odwzorowującym w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym równym 90° i promieniu wierzchołka $r=2,5 \mu\text{m}$. Pomiar wykonywany był w trybie jednorazowym (rejestracja danych odbywała w tylko w jednym kierunku ruchu czujnika).

Stanowisko do pomiarów metodą bezstykową

Do pomiaru mikrotopografii powierzchni narzędzi ściernych zastosowano stanowisko pomiarowe wyposażone w profilometr TALYSCAN 150 firmy Taylor-Hobson (rys. 5-26) z laserową głowicą pomiarową o nominalnej dokładności $\pm 0,15 \mu\text{m}$.



Rys. 5-26. Widok stanowiska do pomiaru topografii powierzchni narzędzi ściernych metodą bezstykową; 1 – profilometr TALYSCAN 150 z laserową głowicą pomiarową; 2 – komputer z oprogramowaniem; 3 – płyta granitowa

Topografie powierzchni narzędzi ściernych mierzone były na powierzchni $2,5 \text{ mm}^2$. Pomiar odbywał się w 251 przejściach z krokiem co $10 \text{ }\mu\text{m}$. W jednym przejściu rejestrowanych było 2500 punktów z prędkością $V=5,5 \text{ mm/s}$. Pomiar wykonywany był w trybie dwuprzbiegowym (rejestracja danych odbywała w obu kierunkach ruchu mierzonej powierzchni).

Do analizy topografii zmierzonych na obu ww. stanowiskach wykorzystany został program *MountainsMap Universal 3.1.0* firmy Digital Surf, który na podstawie wprowadzonej mikrotopografii obliczał wartości podstawowych parametrów chropowatości powierzchni [HUM04, OCZ03] z poniższych grup:

Parametry amplitudowe:

- S_a - średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni [μm];
- S_q - średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni [μm];
- S_z - dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni [μm];
- S_{sk} - współczynnik skośności powierzchni (asymetria);
- S_{ku} - współczynnik nachylenia powierzchni.

Parametry odległościowe:

- S_{ds} - gęstość wierzchołków nierówności powierzchni [mm^{-2}];
- S_{al} - wskaźnik autokorelacji [mm];
- S_{tr} - współczynnik struktury powierzchni;
- S_{td} - kierunek struktury powierzchni [$^\circ$].

Parametry hybrydowe:

- $S_{\Delta q}$ - średnie kwadratowe pochylenie powierzchni;
- S_{sc} - średnia arytmetyczna krzywizn wierzchołków nierówności powierzchni [μm^{-1}];
- S_{dr} - współczynnik rozwinięcia powierzchni [%].

Parametry funkcjonalne:

- S_{bi} - wskaźnik nośności powierzchni;
- S_{ci} - wskaźnik gromadzenia środka smarnego w rdzeniu;
- S_{vi} - wskaźnik gromadzenia środka smarnego we wgłębieniach.

Ponieważ mikrotopografie mierzono na powierzchniach walcowych (zewnątrznych w przypadku ściernic i wewnętrznych dla przedmiotów obrobionych), przed wyznaczeniem szukanych powierzchniowych parametrów chropowatości odfiltrowywano błąd kształtu.

5.7.3 Stanowisko do pomiaru błędów kształtu elementów obrotowych

Pomiaru odchyłek okrągłości ściernic oraz przedmiotów po obróbce dokonywano na stanowisku pomiarowym PIK-1A przeznaczonym do badań odchyłek kształtu i położenia powierzchni elementów obrotowych zbudowanym przez Centrum Uczelniano-Przemysłowe Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej.

Najważniejsze elementy funkcjonalne stanowiska do pomiaru błędów kształtu elementów obrotowych stanowią:

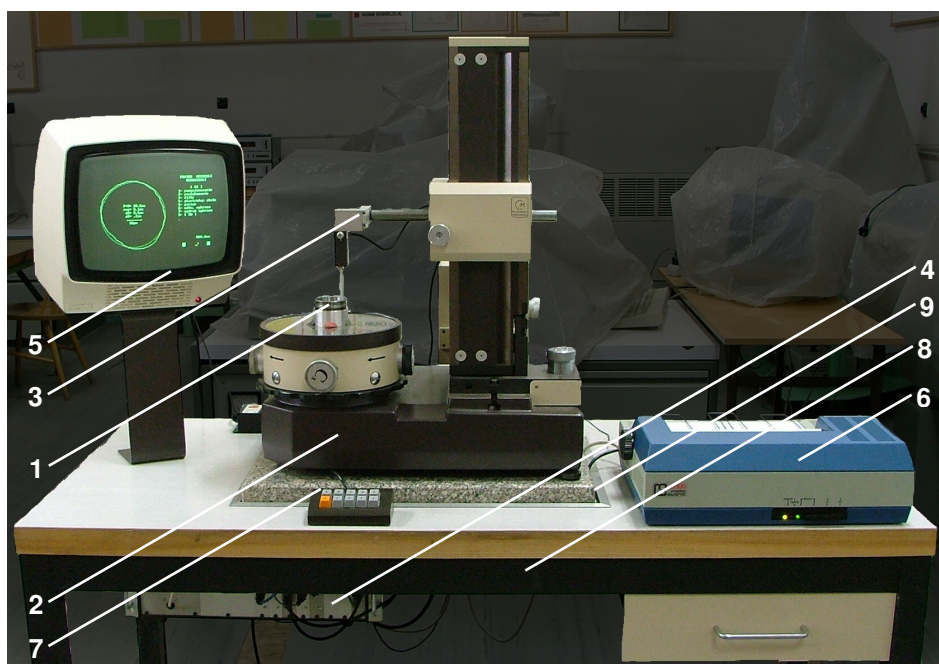
- przyrząd pomiarowy wykonujący ruch względny elementu mierzonego i głowicy czujnika pomiarowego;
- indukcyjny czujnik pomiarowy;
- blok przetwarzania i obróbki sygnału pomiarowego.

Za pomocą stanowiska PIK-1A (rys. 5-27) mierzono następujące parametry narzędzi ściernych oraz walcowych powierzchni wewnętrznych po obróbce:

- maksymalną odchyłkę okrągłości $\Delta (P+V)$ wyznaczaną w odniesieniu do okręgu średniego;
- średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego *rms*.

Pomiarów dokonywano z następującymi wartościami parametrów roboczych:

- prędkość obrotowa stołu: 7 obr./min;
- powiększenie $320 \div 1000 \times$;
- czujnik indukcyjny z końcówką 45 mm.

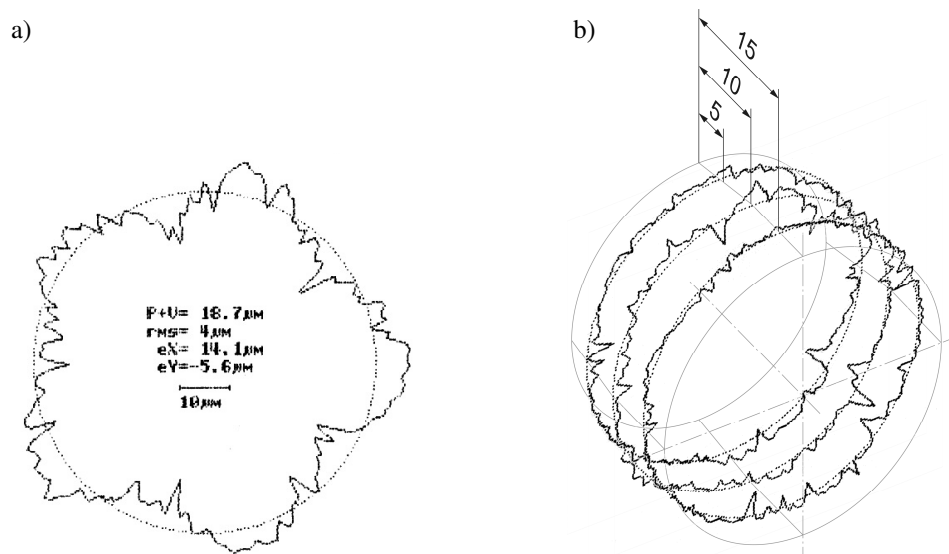


Rys. 5-27. Stanowisko do pomiaru odchyłek kształtu PIK-1A; 1 – przedmiot mierzony; 2 – przyrząd pomiarowy; 3 – indukcyjny czujnik pomiarowy; 4 – blok przetwarzania i obróbki sygnału pomiarowego; 5 – monitor; 6 – drukarka; 7 – klawiatura; 8 – podstawa; 9 – płyta granitowa

Oceny błędów kształtu powierzchni przedmiotów obrabianych oraz narzędzi ściernych dokonywano na podstawie wydruków zarysów obwodowych oraz wartości parametrów *rms* i $\Delta (P+V)$. Wykorzystywane do pomiarów urządzenie PIK-1A generowało wydruki wyników pojedynczego pomiaru w formie przedstawionej na rys. 5-28a.

Pomiary błędów kształtu powierzchni szlifowanych pierścieni wykonywano przy ustawieniu ostrza odwzorowującego w połowie wysokości mierzonej powierzchni. W przypadku ściernic charakteryzujących się strefowo zróżnicowaną budową, dla każdego

narzędzia ściernego pomiary wykonywano na trzech poziomach odpowiadających wysokości 5, 10 i 15 mm. Zarysy obwodowe tych pomiarów zestawiono na jednym wykresie w sposób widoczny na rys. 5-28b.

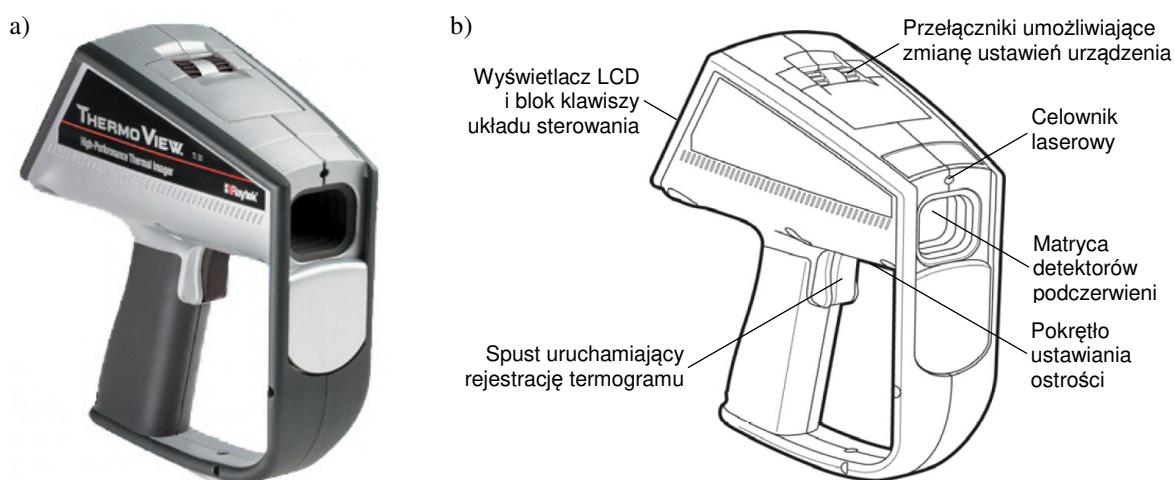


Rys. 5-28. Pomiar błędów kształtu: a) przykładowy wydruk zarysu obwodowego narzędzia ściernego wraz z wartościami parametrów błędów kształtu uzyskany z zastosowaniem stanowiska pomiarowego PIK-1A; b) miejsca pomiaru błędów kształtu na powierzchni narzędzi ściernych

5.7.4 Stanowisko do pomiaru temperatury w strefie szlifowania

Pomiar temperatury w strefie obróbki podczas realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych wykonano przy użyciu kamery termowizyjnej typu ThermoView Ti30 firmy Raytek (rys. 5-29).

Urządzenie umieszczono na statywie, prostopadle do mierzonej powierzchni w minimalnej odległości wynoszącej 61 cm.



Rys. 5-29. Kamera termowizyjna typu ThermoView Ti30 firmy Raytek: a) widok ogólny; b) elementy funkcjonalne [RAY]

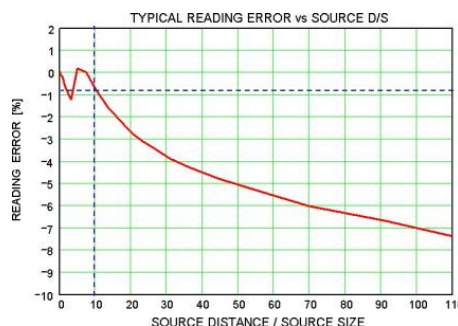
Zastosowane urządzenie należało do grupy kamer o długofalowym zakresie widmowym ($7\div 14 \mu\text{m}$). Zakres pomiarowy kamery wynosił od 0 do 250 °C, a wielkość matrycy detektorów podczerwieni wynosiła 160 x 120 pikseli. Najważniejsze parametry techniczne urządzenia zebrane zostały w tab. 5-III.

Tablica 5-III. Podstawowe parametry techniczne kamery termowizyjnej typu Raytek ThermoView Ti30 [RAY]

Zakres mierzonej temperatury:	0 do 250 °C	Dokładność pomiarowa:	±2% lub ±2 °C (większa wartość)
Rozdzielczość pomiarów temperatury:	±0,1 °C	Rozdzielczość temperaturowa (NETD):	200 mK
Pole widzenia matrycy detektorów (FOV):	17° poziomo 12,8° pionowo	Chwilowe pole widzenia pojedynczego detektora matrycy (IFOV):	1,9 mrad
Wielkość matrycy:	160 x 120 pikseli	Zakres widmowy:	7-14 μm
Częstotliwość odświeżania obrazu:	20 Hz	Ogniskowanie:	od 61 cm do ∞
Możliwość ustawienia emisyjności:	od 0,10 do 1,00 co 0,01	Minimalna średnica pkt. pomiarowego:	7 mm przy 61 cm

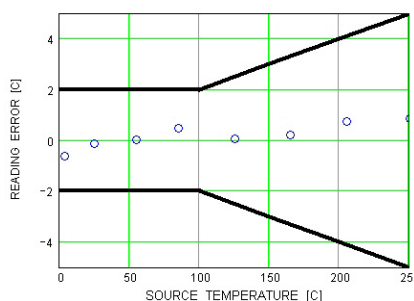
Emisyjność szlifowanej tulei wykonanej ze stali 40H dobrano z tablic emisyjności zamieszczonych w instrukcji kamery termowizyjnej [RAY]. Wynosiła ona: $\varepsilon=0,4\div0,6$. Podczas analizy zarejestrowanych termogramów dla pomiarów temperatury przedmiotu szlifowanego przyjęto wartość średnią z podanego zakresu $\varepsilon=0,5$. Emisyjność narzędzia ściernego przyjęto z tych samych tablic ($\varepsilon=0,95$), stosując wartość podaną dla ceramiki.

Dokładność pomiaru temperatury wykonanego kamerą termowizyjną określono jako sumę błędów wynikającego z warunków pomiaru oraz dokładności urządzenia (rys. 5-30,5-31).



Rys. 5-30. Wykres zmiany błędu pomiaru w funkcji stosunku odległości od źródła (source distance [inch]) do jego rozmiaru (source size [inch]) dla urządzenia Raytek ThermoView Ti30 [RAY]

Z przedstawionego przez producenta kamery wykresu błędów pomiaru w zależności od stosunku odległości od źródła ciepła (source distance SD [inch]) do rozmiaru źródła (source size SS [inch]) – rys. 5-30, wyznaczono odchyłkę wynikającą z warunków badań. Ponieważ wielkość mierzonej powierzchni wynosiła w granicach $SS=2,4''$, a odległość od źródła $SG=24''$, to $SD/SS=10$. Wynika z tego, że w przeprowadzonych badaniach błąd pomiaru temperatury wynikający z warunków pomiaru jest mniejszy niż 1%.



Rys. 5-31. Wykres dokładności pomiarowej kamery termowizyjnej Raytek ThermoView Ti30 [RAY]

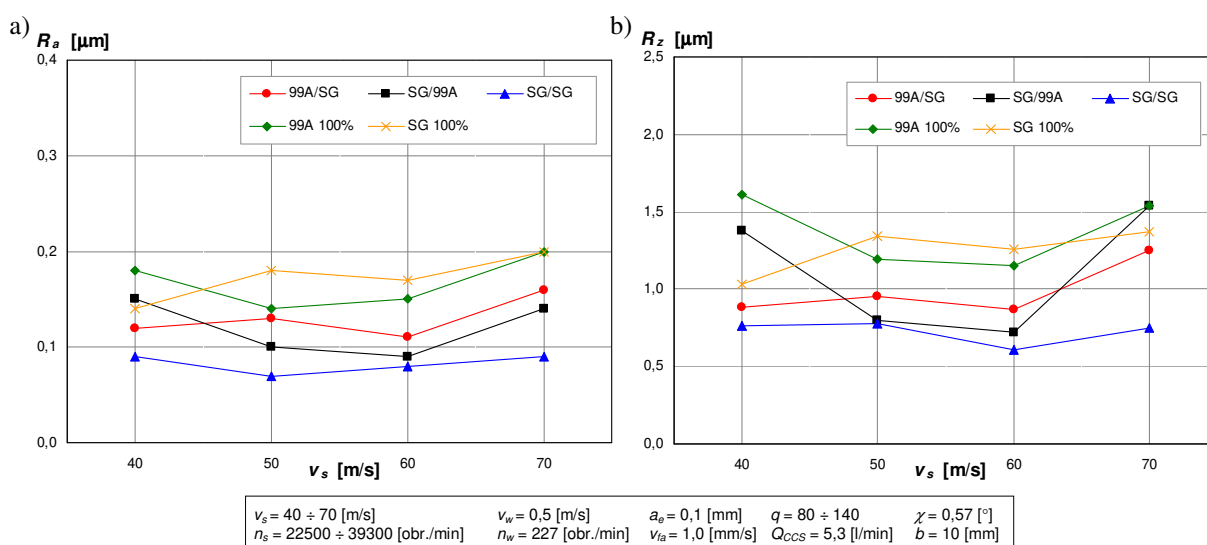
Sumując błąd wynikający z warunków pomiaru oraz dokładności kamery, uzyskujemy wartość całkowitego błędów pomiaru rzędu $\pm 3\%$. Zarejestrowane termogramy analizowano za pomocą programu *InsideIR 2.0.2*.

5.8 Wyniki badań rozpoznawczych i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych ustalono wpływ zastosowanego rodzaju ziarna w poszczególnych strefach narzędzia ściernego na efekty jednoprzęściowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych (jakość powierzchni po szlifowaniu, moc, temperaturę oraz osiąganą efektywność szlifowania). W trakcie badań rozpoznawczych potwierdzono istotność wpływu i wyznaczono najkorzystniejsze, ze względu na mierzone rezultaty obróbki, wartości parametrów badanego procesu: v_s , v_w , a_e , v_{fa} , χ i b [NAD05, NAD05B].

5.8.1 Prędkość obwodowa narzędzia ściernego v_s

Analizując wpływ prędkości szlifowania v_s na parametry R_a i R_z opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości przedmiotów szlifowanych, można zauważyć, że jest on stosunkowo nieznaczny (rys. 5-32a).



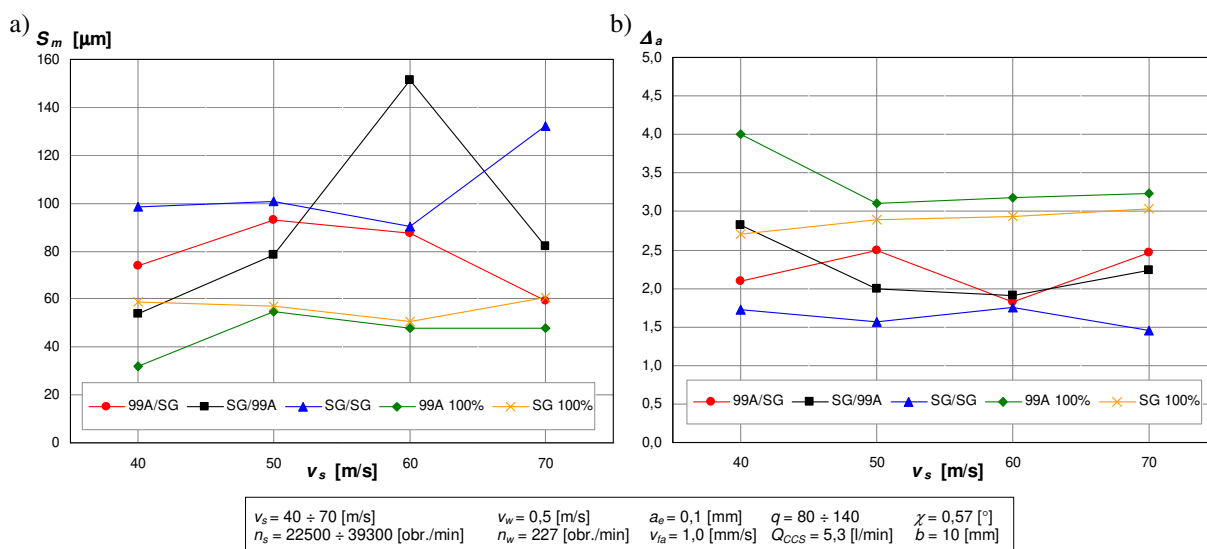
Rys. 5-32. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

Jest to wynikiem oddziaływania walcowej strefy ściernicy biorącej udział w procesie szlifowania wykończeniowego T_2 . Wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z , podobnie jak R_a , nie zmienia się znacząco dla ściernic 99A/SG, SG/SG i SG 100%, zawierających w strefie szlifowania wykończeniowego ziarna SG. Natomiast w przypadku ściernic SG/99A i 99A 100% zauważyć można wyraźny spadek wysokości chropowatości wraz ze wzrostem prędkości ściernicy aż do wartości $v_s = 60$ m/s, po przekroczeniu której R_z rośnie (rys. 5-32b). Jest to podyktowane zmniejszeniem, wraz ze wzrostem v_s , średniego poprzecznego przekroju warstwy skrawanej A_D . Zmianę trendu z malejącego na rosnący po przekroczeniu 60 m/s tłumaczyć można ujawnieniem się drgań dynamicznych i innych zakłóceń wynikających z dużej prędkości obrotowej ściernicy $n_w \approx 40\ 000$ obr./min.

Z wykresu zmiany R_z w funkcji v_s (rys. 5-32b) widać zatem, że ściernice, w których rolę szlifowania wykończeniowego spełniały ziarna elektrokorundu szlachetnego 99A, są dużo bardziej czułe na zmiany prędkości szlifowania w odróżnieniu od pozostałych narzędzi ściernych, które dzięki submikrokryształicznej budowie i zdolności do samoostrzenia ziaren korundu spiekanego SG, zapewniały wysokość chropowatości na podobnym poziomie niezależnie od zmian v_s . Zarówno na wykresie parametru R_a , jak i R_z zauważyć można, że

proces szlifowania narzędziami ściernymi o strefowo zróżnicowanej budowie charakteryzował się niższą chropowatością szlifowanych walcowych powierzchni wewnętrznych w porównaniu do wyników obróbki ściernicami w całości wykonanymi z ziaren jednej wielkości.

Parametr S_m , charakteryzujący średnią odległość wierzchołków profilu chropowatości powierzchni obrobionej wzdłuż jego linii średniej, wykazuje duże rozrzuty wartości dla powierzchni szlifowanych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie (rys. 5-33a).



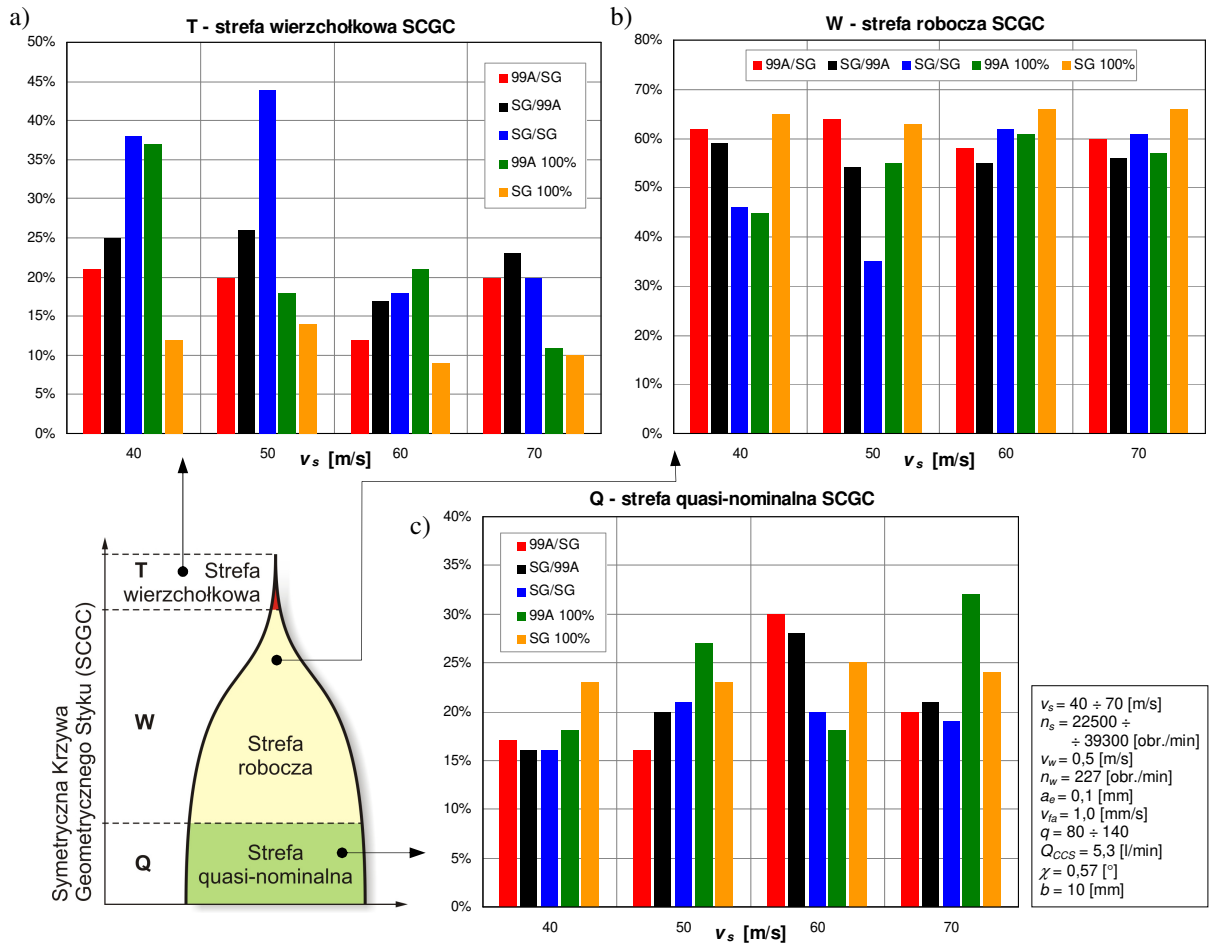
Rys. 5-33. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s na parametry opisujące chropowatość powierzchni szlifowanej: a) średni odstęp chropowatości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δ_a

W całym badanym zakresie zmienności parametru $v_s = 40 \div 70$ m/s, wartości parametru S_m były wyższe w stosunku do ściernicy o budowie jednorodnej, wykonanej z ziaren elektrokorundu szlachetnego. Świadczy to o mniejszym stopniu rozwinięcia powierzchni obrobionej i mniejszej liczbie wierzchołków profilu.

Natomiast wartości parametru Δ_a charakteryzującego kąt pochylenia wierzchołków profilu nierówności powierzchni obrobionych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie kształtowały się na niższym poziomie w stosunku do ściernic o budowie jednorodnej (rys. 5-33b). Wykres zmian Δ_a dla ściernic, w których strefa szlifowania wykończeniowego zbudowana została z ziaren 99A, wskazuje na zmniejszanie średniego kąta pochylenia profilu chropowatości wraz ze wzrostem prędkości szlifowania. Wynika z tego, że podobnie jak w przypadku parametru R_z , również tutaj submikrokrystaliczna budowa ziaren SG decyduje o zdolności narzędzia ściernego do osiągnięcia niskich wartości parametru Δ_a niezależnie od prędkości obwodowej ściernicy. Natomiast polikrystaliczne ziarna 99A umieszczone w strefie szlifowania wykończeniowego pozwalają na osiągnięcie niższych wartości średniego pochylenia profilu wraz ze zmniejszaniem się przekroju poprzecznego warstwy skrawanej związanym ze wzrostem v_s . Analogicznie do wykresów zmian parametrów R_a , R_z i S_m , również wyniki pomiarów Δ_a wskazują na możliwość osiągnięcia bardziej korzystnych wartości parametrów opisujących chropowatość powierzchni szlifowanej przy użyciu narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie.

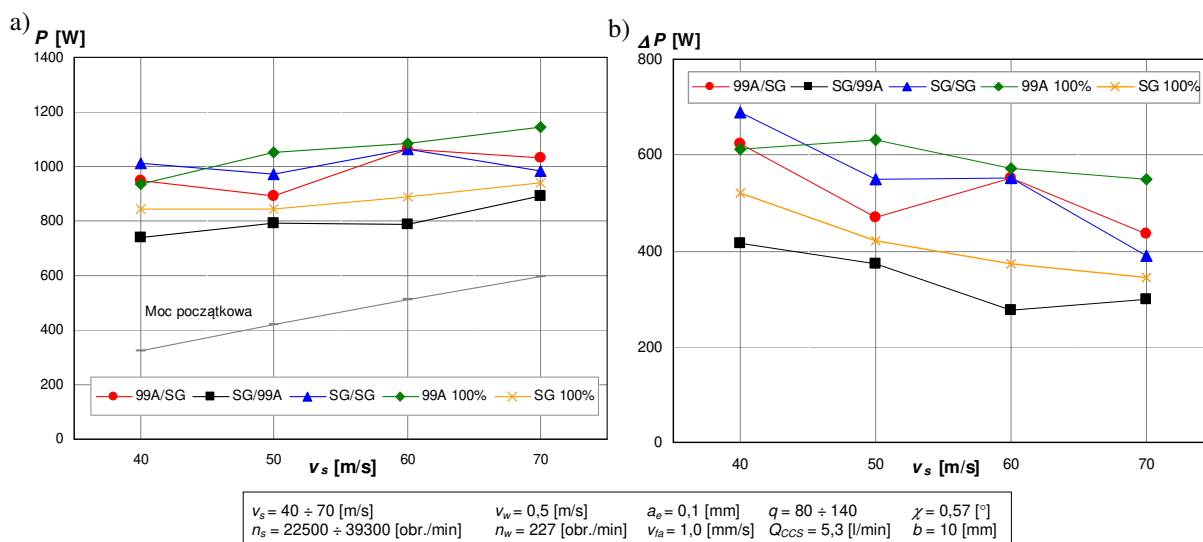
Z analizy zmian wysokości poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku w funkcji prędkości szlifowania można wywnioskować, że powierzchnie o największej nośności uzyskane zostały po obróbce z największymi

prędkościami szlifowania (rys. 5-34). Świadczy o tym wyraźnie malejący wraz ze wzrostem v_s udział strefy wierzchołkowej SCGC oraz nieznacznie wzrastający udział dolnej strefy quasi-nominalnej zarejestrowanych profili chropowatości powierzchni szlifowanych. Strefa robocza W pozostawała na podobnym poziomie dla całego zakresu zmienności prędkości szlifowania.



Rys. 5-34. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s na udział stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC): a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Dla wszystkich badanych ściernic widoczna jest wyraźna tendencja spadkowa mocy prądu wrzeciona narzędzia ściernego P w funkcji prędkości szlifowania (rys. 5-35). Zmniejszające się wraz ze wzrostem v_s elementarne przekroje warstwy skrawanej powodują zmniejszenie poboru mocy koniecznej do wykonania założonego zadania obróbkowego.



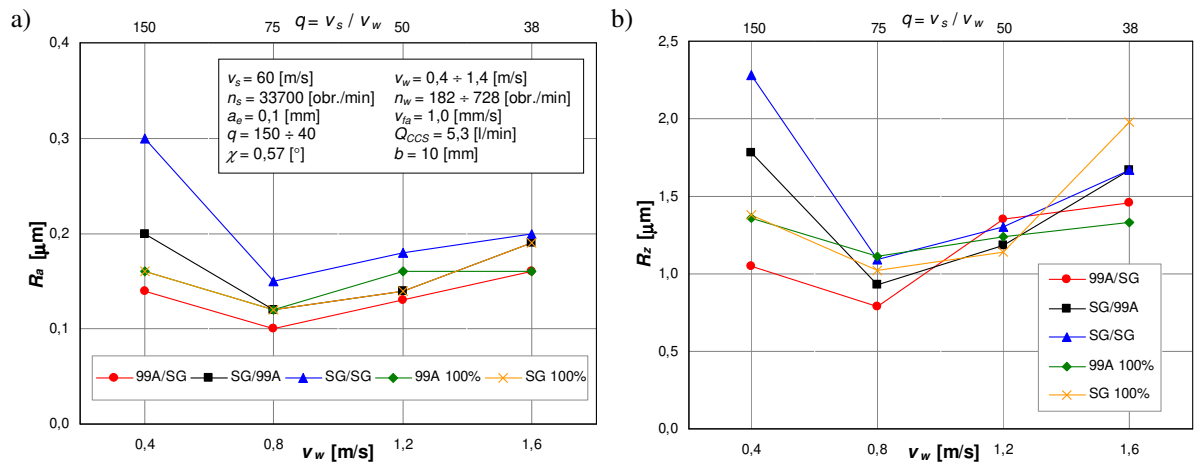
Rys. 5-35. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s na moc prądu wrzeciona ściernicy P (a) i przyrost mocy ΔP (b)

Biorąc pod uwagę zarówno zmiany parametrów opisujących chropowatość (R_a , R_z , S_m , Δ_a) i nośność (SCGC) powierzchni przedmiotu szlifowanego oraz zmiany mocy szlifowania w funkcji prędkości obwodowej narzędzia ściernego, zauważyć można korzystny wpływ wzrostu v_s na rezultaty badanego procesu. Z przyjętego zakresu zmienności prędkości szlifowania najbardziej gładkie powierzchnie (R_a , R_z) uzyskano dla $v_s=60$ m/s. Również analiza zmian udziału stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku wskazuje na pozytywny wpływ rosnących wartości v_s na nośność powierzchni uzyskiwanych w badanym procesie. Mimo widocznej na wykresach mocy szlifowania tendencji do dalszej poprawy warunków obróbki wraz ze wzrostem v_s , przy prędkościach obwodowych ściernicy powyżej 60 m/s ujawniają się zakłócenia wynikające z niedostatecznej sztywności stanowiska badawczego, które powodują wzrost chropowatości powierzchni obrobionej.

Wyniki badań wpływu prędkości szlifowania na proces jednoprzęściowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych uzyskane z wykorzystaniem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie wskazują na możliwość obniżenia chropowatości powierzchni obrabianej w porównaniu do rezultatów tego procesu prowadzonego ściernicami jednorodnymi.

5.8.2 Prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego v_w

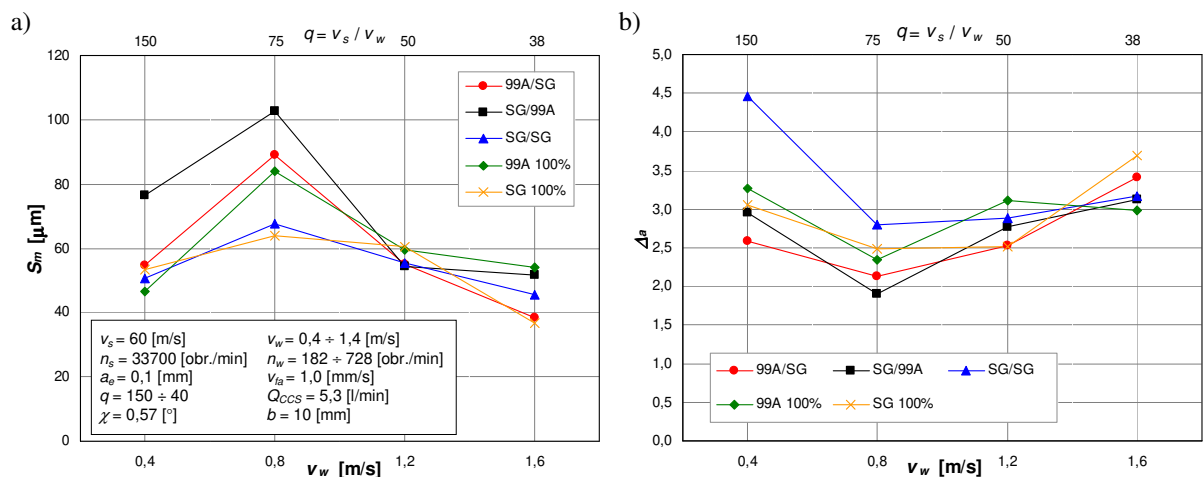
Wyniki przeprowadzonych badań wpływu zmian prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanych wyraźnie pokazują, że najniższe wartości parametry R_a i R_z osiągają dla $v_w=0,8$ m/s. Wartość tę można uznać za krytyczną ($v_{wkr}=0,8$ m/s), ponieważ stanowi ona granicę, przy której następuje zmiana trendu z malejącego na rosnący (rys. 5-36).



Rys. 5-36. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

Zarówno zmiany średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a , jak i wysokości profilu chropowatości wg 10 punktów R_z kształtują się w sposób jednoznacznie określający prędkość obwodową przedmiotu szlifowanego równą v_{wkr} (stosunek prędkości $q=0,75$) jako dającą największą gładkość powierzchni po obróbce. Jednakowy charakter zmian v_w przedstawiają wykresy wszystkich badanych narzędzi ściernych.

Zmiany parametru S_m opisującego cechy horyzontalne profilu chropowatości powierzchni po szlifowaniu odpowiadają wynikom parametrów wysokościowych. Najmniejsza gęstość powierzchniowa wierzchołków chropowatości (największe wartości S_m), przypada na wartość v_{wkr} (rys. 5-37a). Także zmiany wartości parametru Δ_a w funkcji prędkości v_w wskazują, że najkorzystniejsze wartości tego parametru, czyli najmniejsze średnie pochylenie profilu chropowatości, osiągnięte jest przy tej samej wartości v_w (rys. 5-37b).



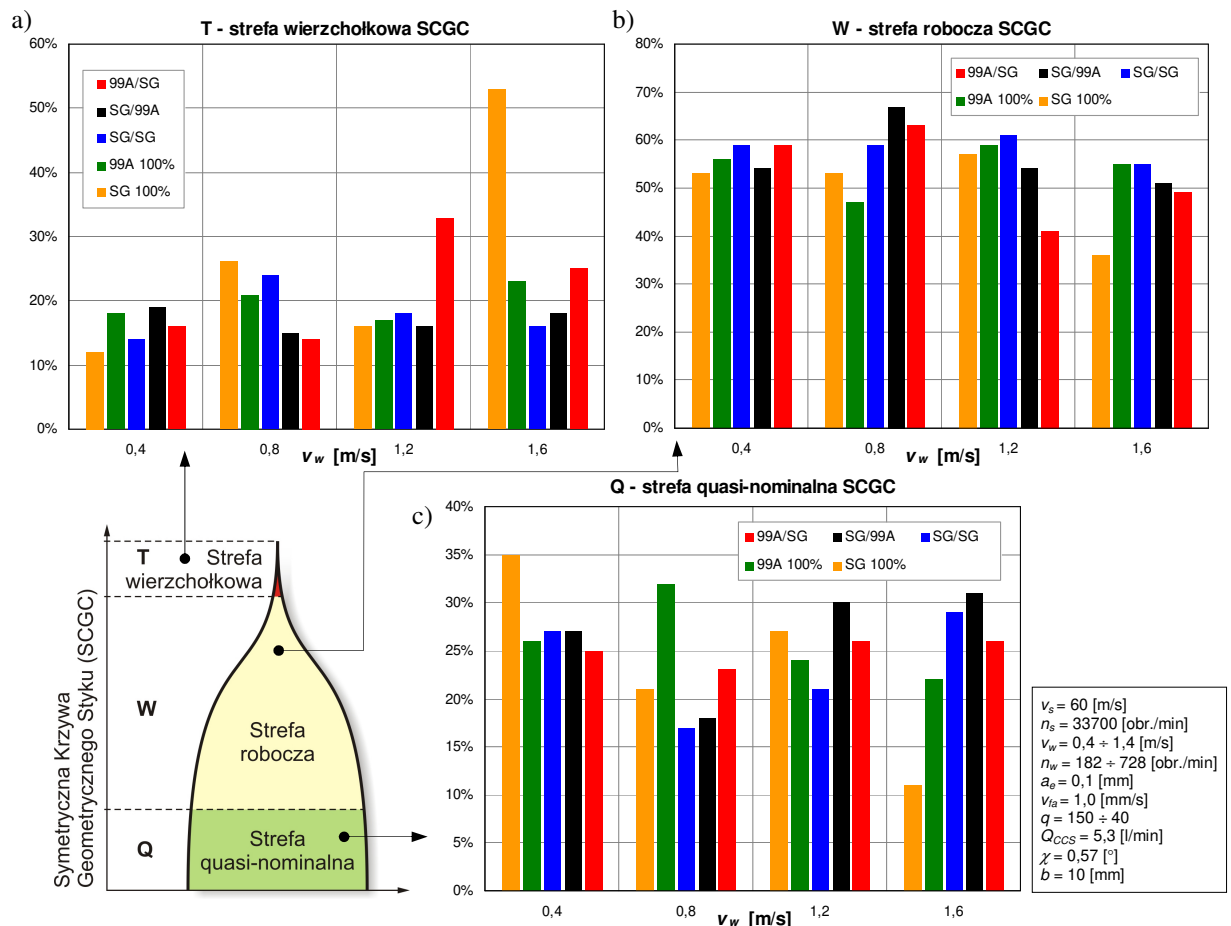
Rys. 5-37. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na parametry opisujące chropowatość powierzchni szlifowanej: a) średni odstęp chropowatości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δ_a

Zredukowanie prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego poniżej wartości v_{wkr} spowodowało zmniejszenie przekrojów warstw skrawanych pojedynczym ziarnem prowadzące do zmian w procesie usuwania materiału. Oddzielaniu wiórów w coraz większym stopniu towarzyszyło tarcie powodujące brzdowanie i tworzenie wyływek. Przyczyniło się

to do pogorszenia chropowatości powierzchni po obróbce. Natomiast wzrost prędkości obwodowej przedmiotu szlifowanego powyżej v_{wkr} spowodował zwiększenie grubości wióra oraz przekroju poprzecznego warstwy skrawanej pojedynczym ostrzem. W rezultacie również w tym przypadku zaobserwowano pogorszenie chropowatości powierzchni szlifowanego przedmiotu.

Analizując uzyskane wyniki badań wpływu prędkości v_w na badany proces, nie można zauważyć znaczącej różnicy w zmianach parametrów opisujących chropowatość powierzchni szlifowanych (R_a , R_z , S_m i Δ_a) narzędziami ściernymi o strefowo zróżnicowanej budowie oraz ściernicami w całości wykonanymi z ziaren jednej wielkości. Można wnioskować, że jest to skutkiem doboru pozostałych parametrów szlifowania, w szczególności znacznej prędkości obwodowej ściernicy $v_s=60$ m/s, oraz niewielkiego posuwu osiowego stołu $v_{fa}=1,0$ mm/s, zapewniającym dużą liczbę przeszlifowań powierzchni obrabianej.

Wartości udziału procentowego poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku reprezentującej udział nośny profili chropowatości powierzchni szlifowanych badanymi ściernicami wskazują na nieznaczny spadek nośności wraz ze wzrostem prędkości obwodowej przedmiotu szlifowanego (rys. 5-38).

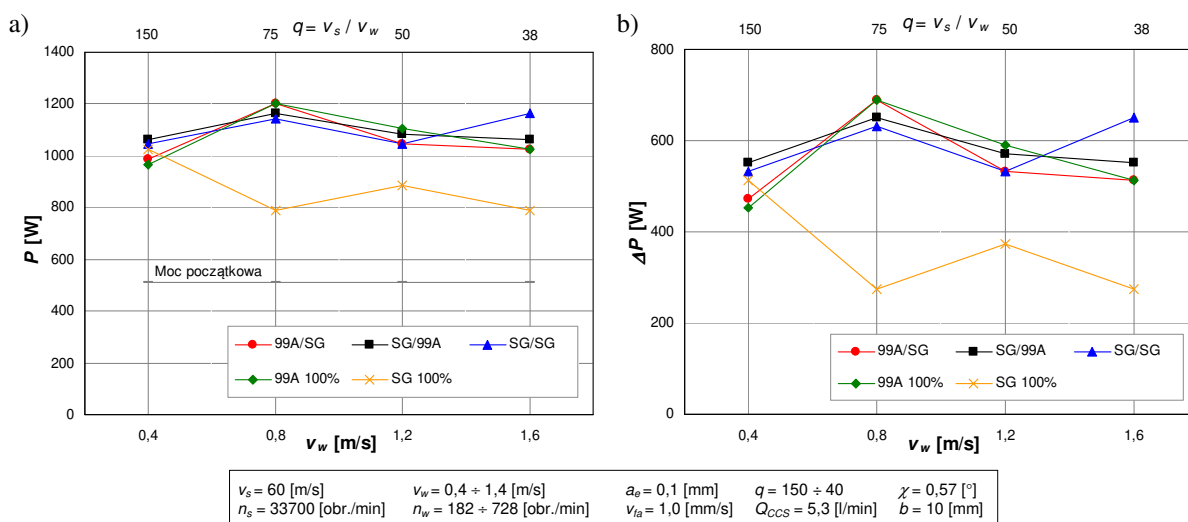


Rys. 5-38. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na udział stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC): a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Świadczy o tym widoczny na wykresach (rys. 5-38a, c) wzrost wartości udziału strefy wierzchołkowej T oraz jednoczesny spadek udziału strefy quasi-nominalnej Q, towarzyszący zwiększaniu prędkości v_w . Wynika z tego, że zaobserwowane pogorszenie

chropowatości, wywołane zwiększającymi się wraz ze wzrostem v_s przekrojami warstwy skrawanej przypadającymi na pojedyncze ziarno, powoduje obniżenie nośności powierzchni szlifowanych.

Wykres zmiany mocy szlifowania w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu szlifowanego (rys. 5-39) wskazuje na nieznaczny spadek P powyżej wartości $v_{w\ kr}$. Wzrost prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego powyżej $v_{w\ kr}$ pozwolił na wywołanie zjawiska samoostrzenia CPS spowodowanego rosnącymi obciążeniami ziaren skrawających. W przeprowadzonych badaniach nawet narzędzie ściernie 99A/SG oraz 99A 100% wykonane w całości z ziaren 99A, dzięki zastosowaniu spoiwa szklanokrystalicznego, realizowało obróbkę z nieznacznie malejącym, wraz ze wzrostem v_w , zapotrzebowaniem na moc. Tłumaczyć to można towarzyszącą zwiększeniu v_w redukcją właściwej siły stycznej skrawania a wraz z nią mocy koniecznej do usunięcia zadanej warstwy materiału.



Rys. 5-39. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na moc prądu wrzeczona ściernicy P (a) i przyrost mocy ΔP (b)

Wyraźny wzrost mocy szlifowania zauważyć można natomiast między wartością $v_w=0,4$ a $0,8$ m/s. Wywołany jest on zwiększeniem grubości wióra oraz przekroju poprzecznego warstwy skrawanej pojedynczym wierzchołkiem. Można przypuszczać, że w tym zakresie zmienności v_w (poniżej $v_{w\ kr}$) obciążenia ziaren oraz mostków spoiwa są zbyt małe, aby wywołać zjawisko odnawiania CPS i tworzenia nowych ostrych krawędzi skrawających. Dominuje zatem ścieranie i tępienie wierzchołków ziaren ściernych, przez co wzrostowi mocy towarzyszy obniżenie chropowatości powierzchni obrobionej.

Od większości badanych ściernic, dla których zmiany mocy kształtują się bardzo podobnie, odróżnia się narzędzie ściernie SG 100% (rys. 5-39). Moc szlifowania z wykorzystaniem tej ściernicy była wyraźnie niższa, co wynika z dużej zdolności mikrokrystalicznych ziaren SG do tworzenia nowych ostrych naroży i krawędzi skrawających wpływających na redukcję sił i mocy szlifowania. Tak znaczne obniżenie mocy nie wystąpiło w przypadku drugiego narzędzia ściernego zbudowanego z ziaren SG. Ściernica SG/SG posiadała w strefie szlifowania wygładzające drobniejsze ziarna (wielkości 80), które mimo zdolności do samoostrzenia, poprzez swą większą koncentrację na czynnej powierzchni ściernicy, nie pozwoliły na tak znaczne obniżenie wartości P .

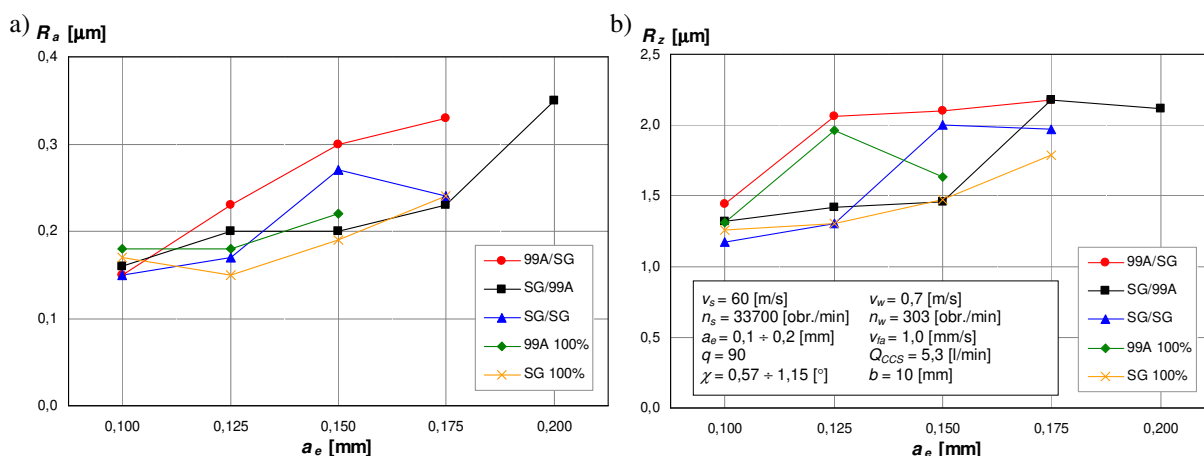
Porównując ze sobą wyniki zmian parametrów chropowatości powierzchni szlifowanych (R_a , R_z , S_m i Δ_a) w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu szlifowanego, można łatwo wskazać na wartość $v_{w\ kr}=0,8$ m/s ($q=75$) jako najkorzystniejszą dla realizacji

badanego procesu. Trzeba jednak wziąć pod uwagę fakt wyższego poboru mocy przy prowadzeniu procesu obróbkowego właśnie z taką wartością prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego.

Rezultaty badań wpływu prędkości v_w na proces jednoprzęściowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych nie wykazały znaczących różnic pomiędzy efektami realizacji obróbki z zastosowaniem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie i z zastosowaniem narzędzi ściernych pozbawionych drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego. Wyjątek stanowi ściernica SG 100%, która odznaczała się na tle pozostałych narzędzi ściernych znacznie niższymi wartościami mocy szlifowania.

5.8.3 Styk roboczy a_e

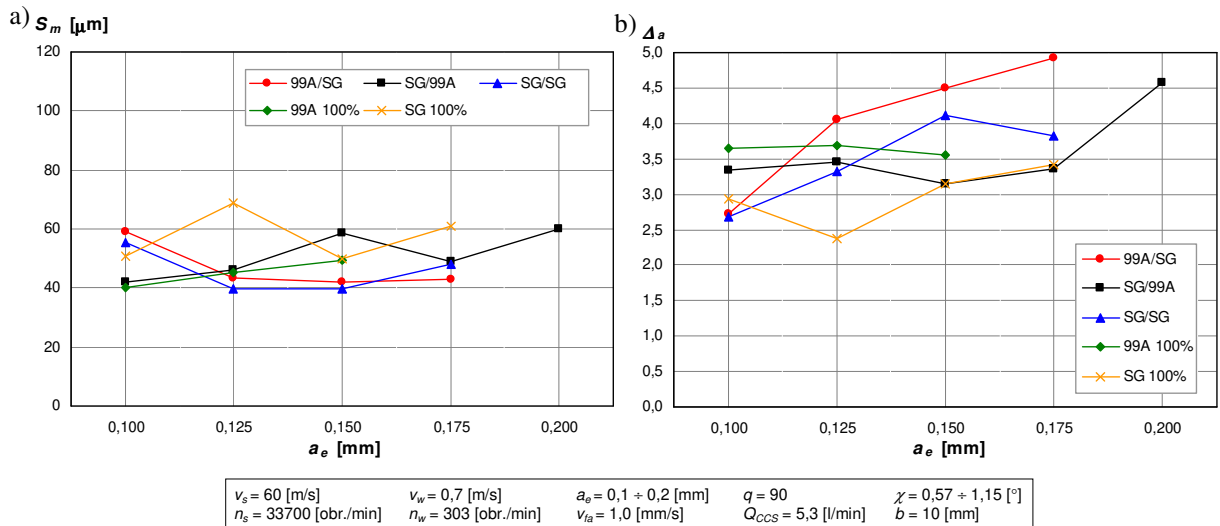
Zmiany wartości parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej (R_a i R_z) w funkcji zmian styku roboczego a_e wskazują na pogarszanie gładkości powierzchni przedmiotów obrabianych wszystkimi rodzajami narzędzi ściernych wraz ze wzrostem głębokości szlifowania (rys. 5-40). Wynika z tego, że rosnące wraz ze zwiększającym się a_e obciążenie strefy ściernicy realizującej szlifowanie zgrubne, powoduje przejmowanie funkcji usuwania materiału przez strefę walcową kosztem procesu wygładzania i wyiskrzania.



Rys. 5-40. Wpływ wartości styku roboczego a_e na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

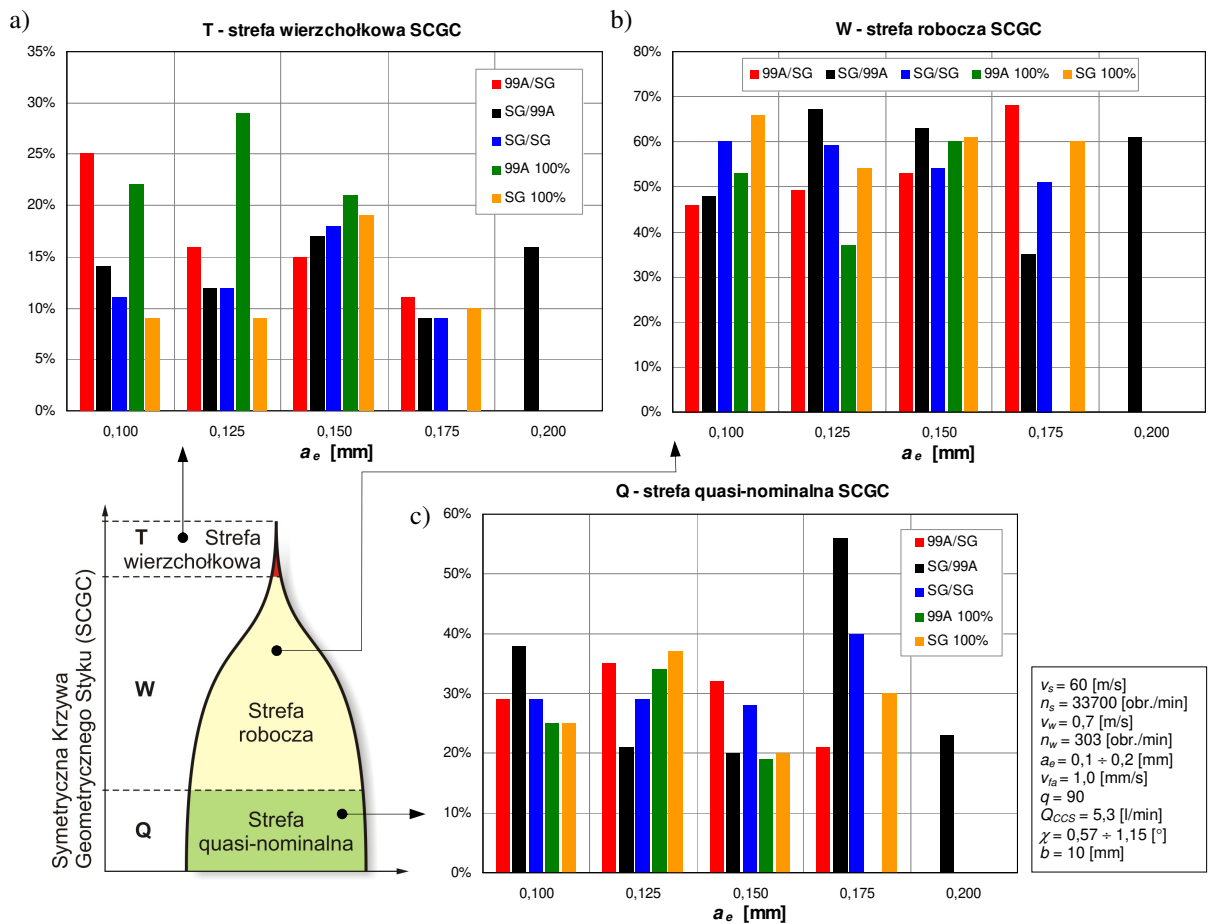
Wzrost wartości styku roboczego nie wpływał istotnie na zmiany parametru S_m opisującego horyzontalne cechy profilu chropowatości szlifowanych powierzchni. Średni odstęp chropowatości pozostawał dla wszystkich ściernic na niskim poziomie, co wskazuje na dużą powierzchniową gęstość wierzchołków chropowatości (rys. 5-41a).

W przypadku większości ściernic wzrost a_e przyczynił się do zwiększenia wartości średniego pochylenia profilu Δ_a (rys. 5-41b). Jedynie ściernica SG/99A, której strefa szlifowania wygładzającego zbudowana została z ziaren elektrokorundu szlachetnego, a także ściernica 99A 100% w całości wykonana z tego materiału ściernego, nie spowodowała wzrostu parametru Δ_a aż do $a_e=0,175$ mm. Dopiero w wyniku szlifowania ze stykiem roboczym $a_e=0,2$ mm narzędzie ściernie SG/99A wygenerowało powierzchnię o zwiększonym średnim pochyleniu wierzchołków profilu chropowatości. Można zatem przyjąć, że również dla opisywanych dwóch ściernic parametr ten ma tendencję zwykłą wraz ze wzrostem wartości styku roboczego.



Rys. 5-41. Wpływ wartości styku roboczego a_e na parametry opisujące chropowatość powierzchni szlifowanej: a) średni odstęp chropowatości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δa

Interpretując wykresy zmian udziału poszczególnych stref SCGC profilu chropowatości szlifowanych powierzchni, trudno doszukać się jednoznacznego wpływu wzrostu wartości styku roboczego na nośność powierzchni po szlifowaniu (rys. 5-42).

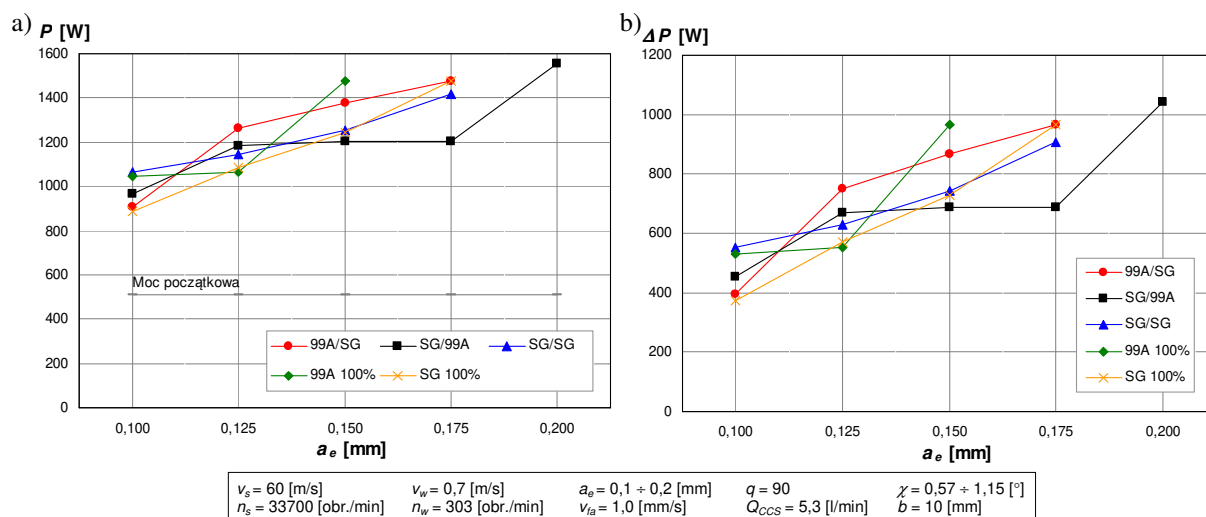


Rys. 5-42. Wpływ wartości styku roboczego a_e na udział stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC): a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Mimo wyraźnego wzrostu wartości parametrów wysokościowych oraz średniego pochylenia profilu wraz ze zwiększaniem warstwy usuwanego materiału, nie wpłynęło to

w znacznym stopniu na nośność obrabianych powierzchni. Jedynie w przypadku ściernicy 99A/SG widoczna jest pozytywna tendencja do redukcji udziału strefy wierzchołkowej na korzyść strefy roboczej wraz ze wzrostem a_e . Zmierzone wartości parametrów SCGC pozostałych narzędzi ściernych charakteryzują się znacznymi rozrzutami bez wyraźnego trendu wzrostowego czy spadkowego.

Moc szlifowania dla wszystkich narzędzi ściernych wykorzystanych w badaniach rozpoznawczych kształtuje się na zbliżonym poziomie, wykazując wyraźną tendencję zwyżkową w funkcji rosnącego styku roboczego (rys. 5-43).



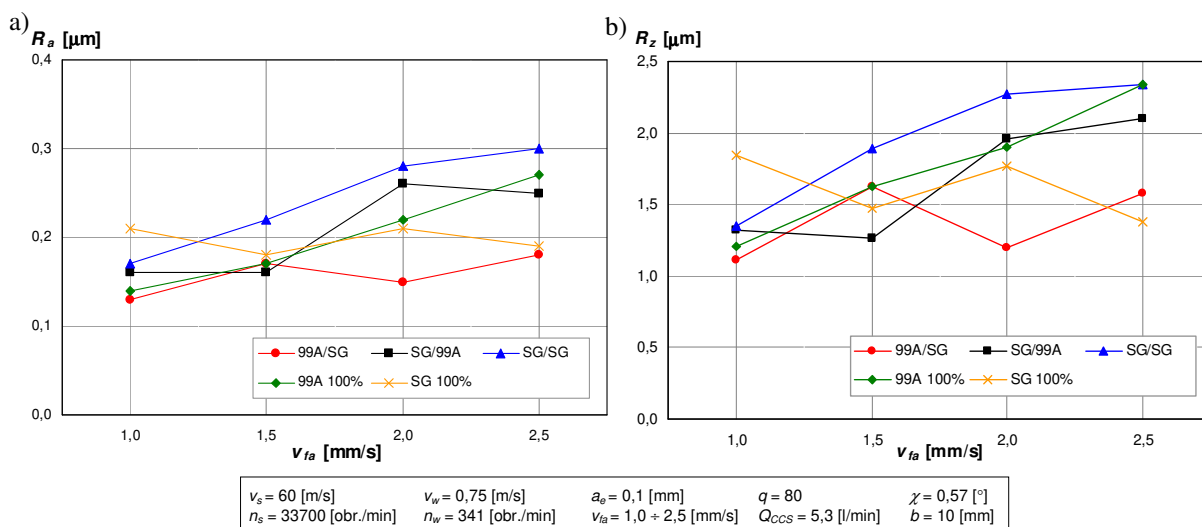
Rys. 5-43. Wpływ wartości styku roboczego a_e na moc prądu wrzeciona ściernicy P (a) i przyrost mocy ΔP (b)

W przypadku ściernicy 99A 100% szybki wzrost mocy spowodował zakończenie eksperymentów już przy wartości $a_e = 0,15$ mm. Wrzeciono narzędzia ściernego nie pozwala na prowadzenie obróbki powyżej granicy 1700 W. Stabilna praca ściernicy SG/99A pozwoliła na przeprowadzenie prób nawet dla grubości warstwy skrawanej wynoszącej 0,2 mm.

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że w celu zintensyfikowania wydajności ubytkowej w badanym procesie poprzez wzrost wartości styku roboczego, należy zwiększyć udział strefy szlifowania zgrubnego w całej wysokości narzędzia ściernego. Pozwoli to na wydłużenie nakroju stożkowego i łagodne rozłożenie nadmiaru obróbkowego na powierzchni strefy szlifowania zgrubnego ściernicy, aby w efekcie zapewnić prawidłową pracę walcowej strefy szlifowania wykończeniowego, która mimo mniejszej wysokości zdąży (przy niewielkim posuwie osiowym v_{fa} i znacznej prędkości v_s) wygładzić i wyiskrzyć obrabianą powierzchnię. Jeżeli celem obróbki byłoby uzyskanie jak największej wydajności ubytkowej (której zwiększenie powoduje pogorszenie chropowatości powierzchni PO), to podstawowym ograniczeniem wydaje się znaczący wzrost mocy szlifowania. Zmniejszenie wartości P może zostać osiągnięte w wyniku modyfikacji pozostałych parametrów obróbki (głównie v_{fa} i v_s).

5.8.4 Prędkość posuwu osiowego stołu v_{fa}

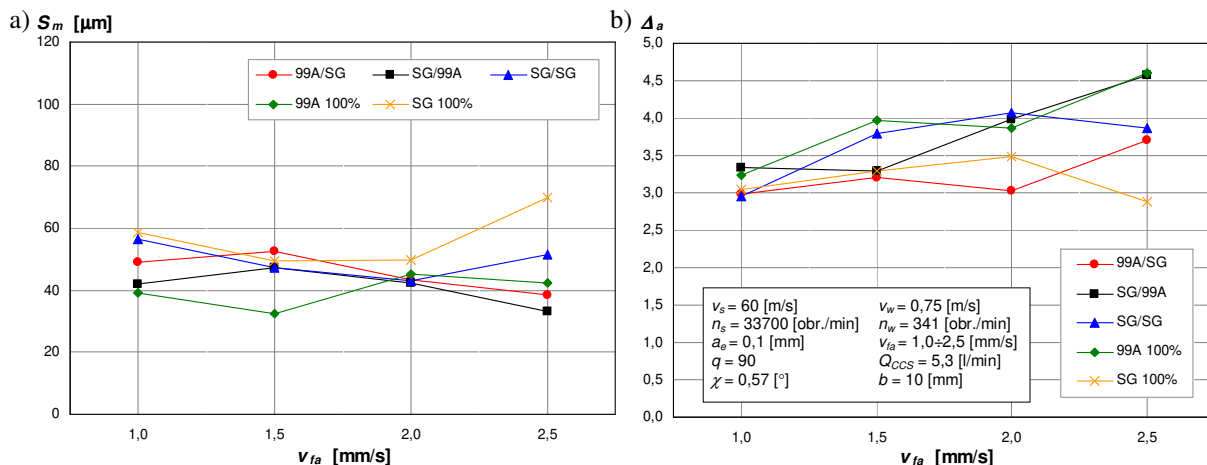
Zmiana parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu wskazuje na pogorszenie gładkości towarzyszące wzrostowi v_{fa} (rys. 5-44). Przy czym zwiększenie prędkości posuwu osiowego z 1,0 do 2,5 mm/s spowodowało ponad dwukrotne zwiększenie wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu oraz wysokości chropowatości wg 10 punktów.



Rys. 5-44. Wpływ prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

Oznacza to, że usunięcie tej samej objętości materiału obrabianego, z 2,5-krotnie większą prędkością posuwu osiowego stołu, nie spowodowało nagłego pogorszenia gładkości szlifowanej powierzchni i możliwe jest podwyższenie wydajności ubytkowej badanego procesu poprzez zwiększenie wartości v_{fa} . Tym bardziej że wartości parametrów R_a i R_z zmierzonych na powierzchniach szlifowanych ściernicą 99A/SG i SG 100% oscylują wokół niezmiennych wartości lub tylko nieznacznie wzrastają (99A/SG).

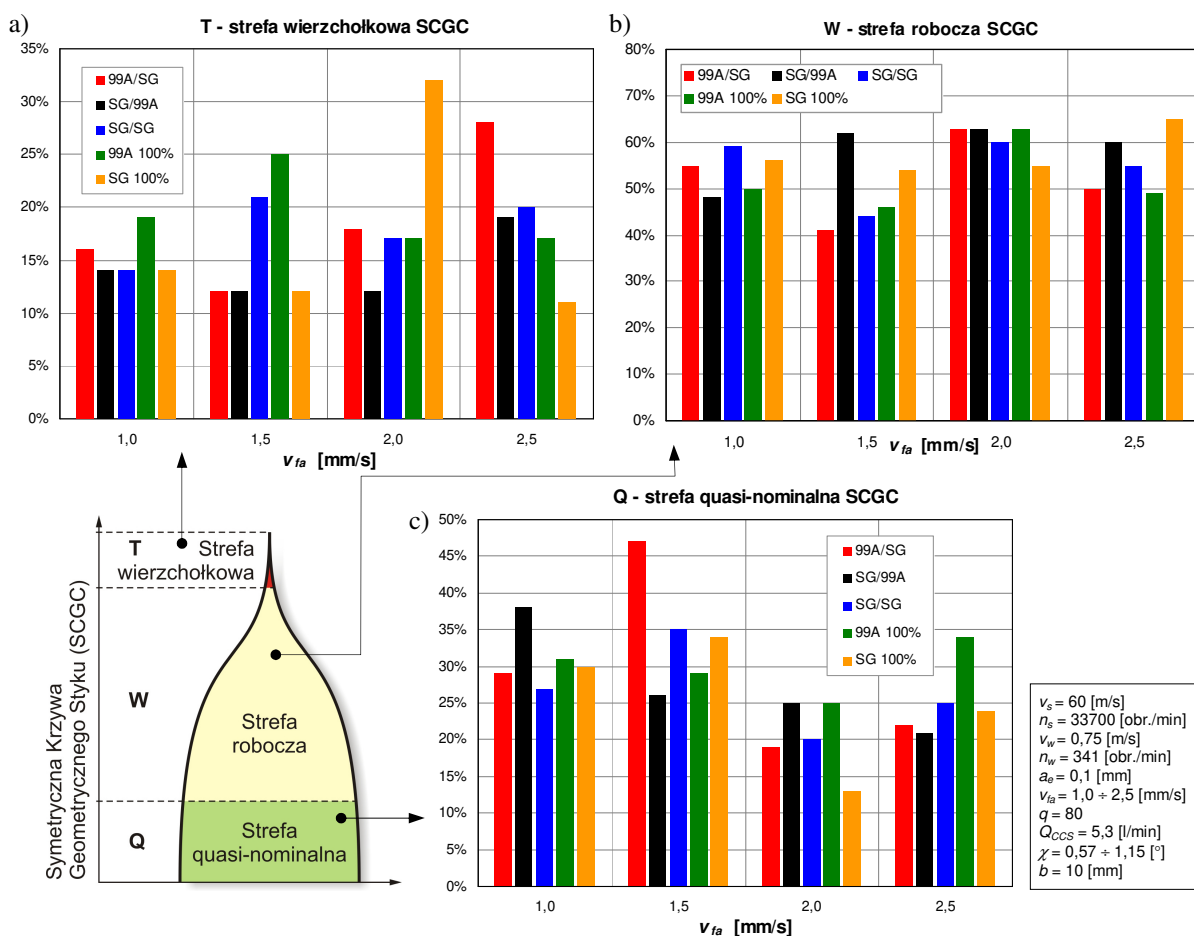
Zmiany wartości średniego odstepu chropowatości S_m w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu nie ujawniają wyraźnej tendencji. Wykresy dla wszystkich narzędzi ściernych przedstawiają równy, niski poziom tego parametru, oznaczający znaczną powierzchniową gęstość wierzchołków chropowatości (rys. 5-45a).



Rys. 5-45. Wpływ prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} na parametry opisujące chropowatość powierzchni szlifowanej: a) średni odstęp chropowatości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δ_a

Wartości parametru opisującego kształt profilu chropowatości Δ_a w funkcji prędkości v_{fa} wzrastają (rys. 5-45b) analogicznie do zmian parametrów wysokościowych (R_a i R_z). Jednak w odróżnieniu od nich, średnie pochylenie profilu chropowatości powierzchni szlifowanych wszystkimi ściernicami odznacza się mniejszym wzrostem (przedział wartości od około 3 do 4,5).

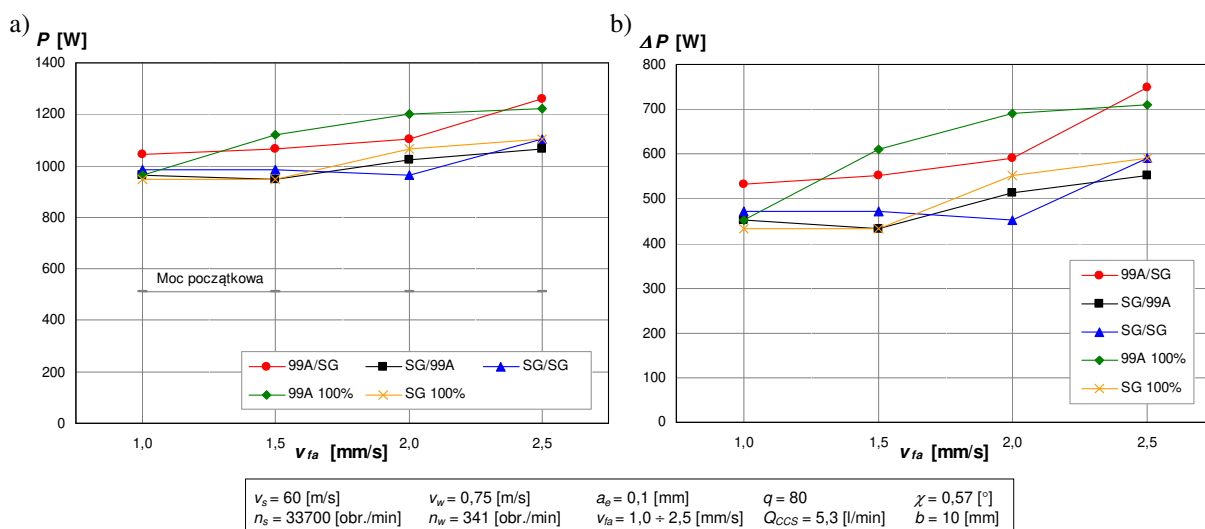
Obserwując wykres zmian udziału strefy wierzchołkowej SCGC, zauważyć można niewielką tendencję wzrostową wraz z rosnącą prędkością posuwu osiowego v_{fa} (rys. 5-46a). Jednocześnie uwidacznia się redukcja udziału strefy Q (rys. 5-46c) przy niemal niezmiennych wartościach udziału strefy roboczej (rys. 5-46b).



Rys. 5-46. Wpływ prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} na udział stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC): a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Wynika to z krótszego czasu obróbki i związanej z tym mniejszej liczby przeszlifowań powierzchni przedmiotu obrabianego przez strefę wygładzającą ściernicy. W rezultacie na szlifowanej powierzchni pozostaje więcej niewyiskrzonych nierówności powodujących wzrost wysokościowych parametrów chropowatości oraz zwiększa się udział strefy wierzchołkowej symetrycznej krzywej geometrycznego styku, a co za tym idzie, obniża się nośność obrobionych powierzchni.

Wykresy zmian mocy prądu wrzeczona ściernicy w funkcji prędkości posuwu osiowego stołu wskazują na wzrost mocy P dla wszystkich badanych narzędzi ściernych (rys. 5-47). Najbardziej tendencja wzrostowa widoczna jest dla ściernic 99A/SG i 99A 100% odznaczających się polikrystalicznymi ziarnami elektrokorundu szlachetnego w stożkowej strefie szlifowania zgrubnego. Natomiast wyniki pomiarów przeprowadzonych podczas pracy ściernic, w których do szlifowania zgrubnego zastosowano mikrokrystaliczne ziarna SG, wskazują zarówno niższe wartości mocy, jak i mniej znaczący jej wzrost. Spowodowane jest to większą zdolnością skrawną ziaren korundu spiekane, które mimo 2,5-krotnie większej prędkości v_{fa} , wykazywały tylko o 25% większy pobór mocy ΔP przy usuwaniu tej samej objętości materiału obrabianego.

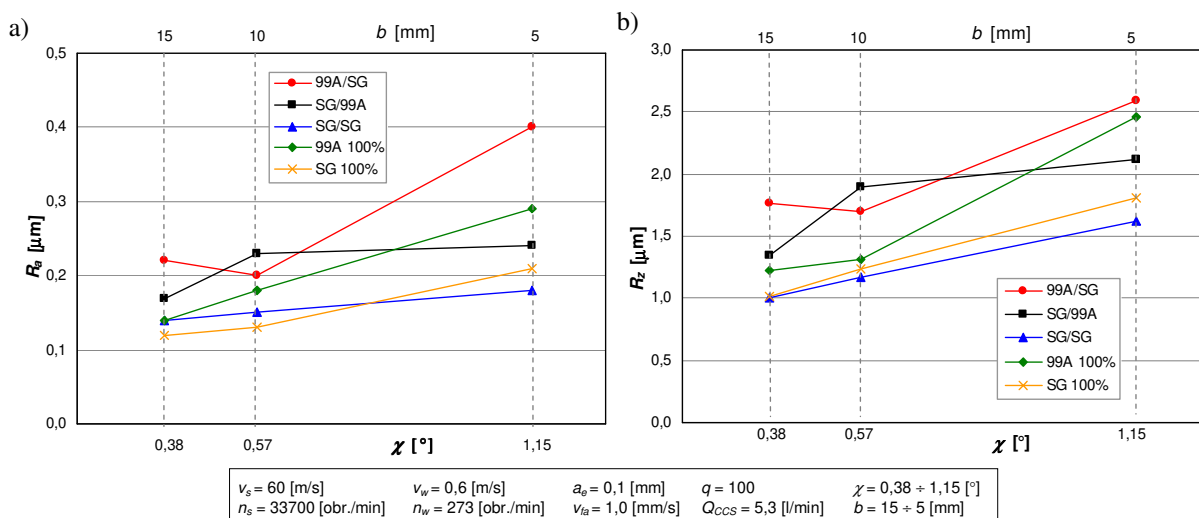


Rys. 5-47. Wpływ prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} na moc prądu wrzeciona ściernicy P (a) i przyrost mocy ΔP (b)

Wyniki badań wpływu prędkości v_{fa} na chropowatość powierzchni obrabianej oraz moc szlifowania wskazują na możliwość zwiększenia wydajności ubytkowej badanego procesu przy niewielkim wzroście mocy i chropowatości przedmiotu szlifowanego. Szczególnie korzystne w tym kontekście wydają się narzędzia ściernicze z ziarnem SG w strefie szlifowania zgrubnego, które wykazały się mniejszym wzrostem mocy szlifowania.

5.8.5 Kąt nakroju stożkowego χ

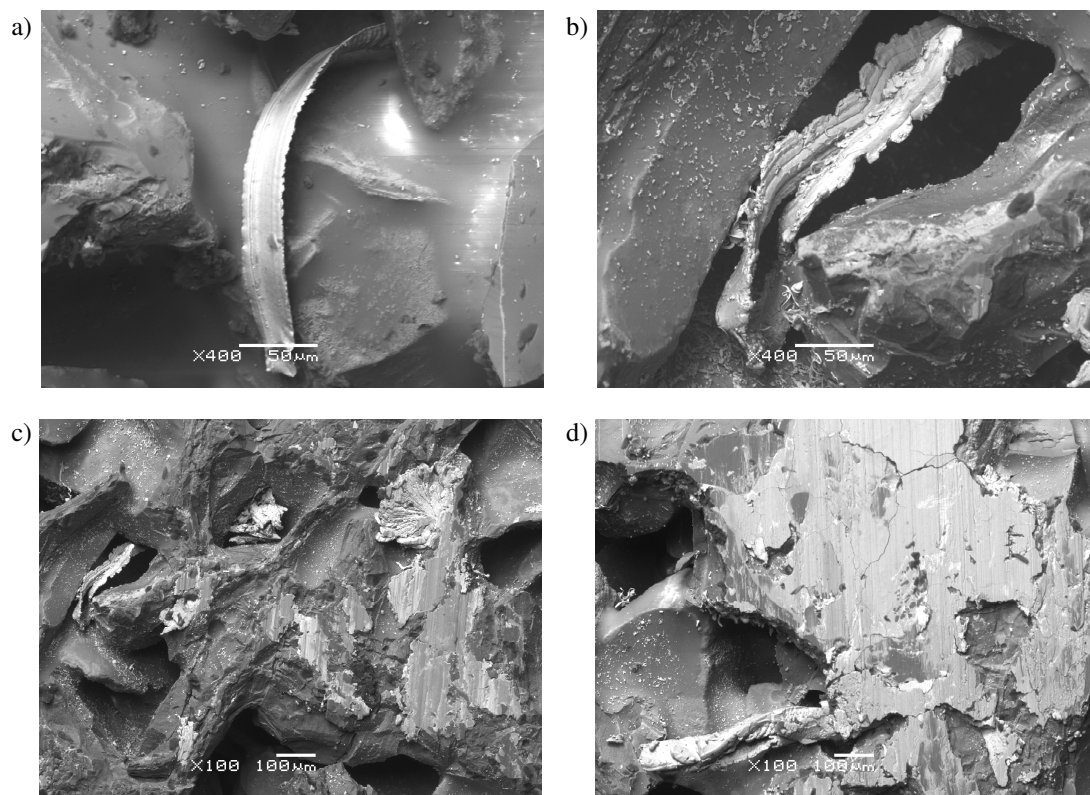
Wyniki badań wskazują na wzrost wartości parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej R_a i R_z wraz ze wzrostem wartości kąta nakroju stożkowego (rys. 5-48).



Rys. 5-48. Wpływ wartości kąta nakroju stożkowego χ na parametry opisujące wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

Tendencję taką prezentują zarówno wyniki zarejestrowane dla powierzchni szlifowanych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie, jak i dla powierzchni szlifowanych narzędziami ścierniczymi wykonanymi bez strefy szlifowania wykończeniowego. Jest to spowodowane skracającą się wraz ze wzrostem kąta χ szerokością nakroju. Krótki

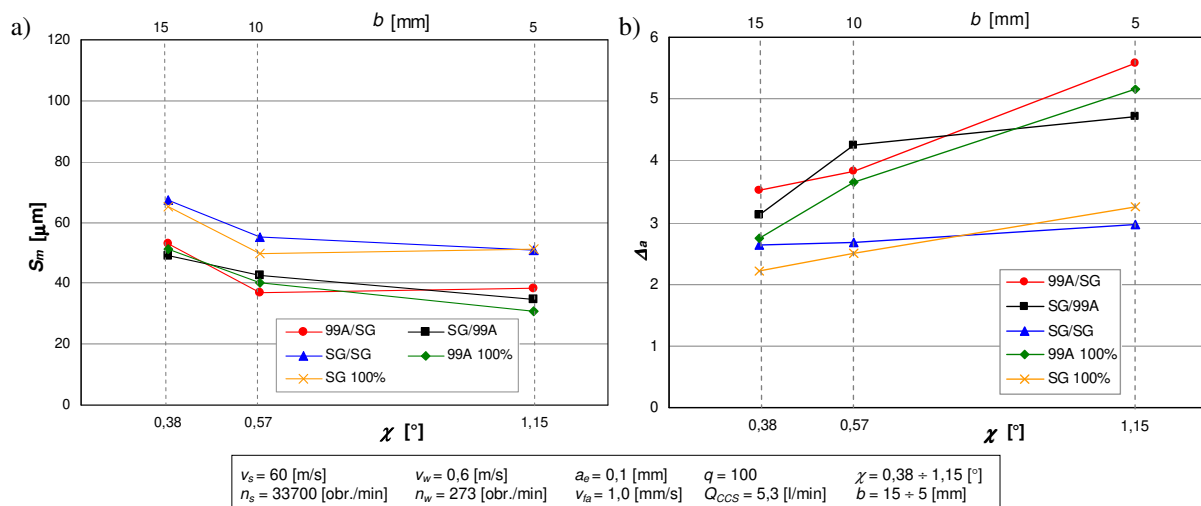
stożek utrudnia efektywną realizację szlifowania zgrubnego przez ograniczoną liczbę ziaren aktywnych, które jednocześnie poddawane są podwyższonym obciążeniom. Nagromadzenie dużych wiórów na niewielkim obszarze, mimo wysokiej porowatości, powoduje dużą intensywność zalepiania czynnej powierzchni narzędzia ściernego (rys. 5-49).



Rys. 5-49. Widok mikroskopowy wiórów i zalepień zaobserwowanych na czynnej powierzchni strefy szlifowania zgrubnego badanych narzędzi ściernych: a) ściernica 99A/SG (pow. 400x); b) ściernica SG/SG (pow. 400x); c) ściernica SG/SG (pow. 100x); d) ściernica SG/99A (pow. 100x)

Wzrastają w takim przypadku odkształcenia układu OUPN, przez co część walcowa ściernicy, poza funkcją szlifowania wykończeniowego i wyiskrzaniem, musi również usunąć pozostałą warstwę materiału. W efekcie, mimo długiej walcowej strefy wygładzającej, osiągnane chropowatości powierzchni wyrażone parametrami R_a i R_z przyjmują najwyższy poziom dla kąta $\chi=1,15^\circ$, który odpowiada szerokości nakroju stożkowego $b=5$ mm.

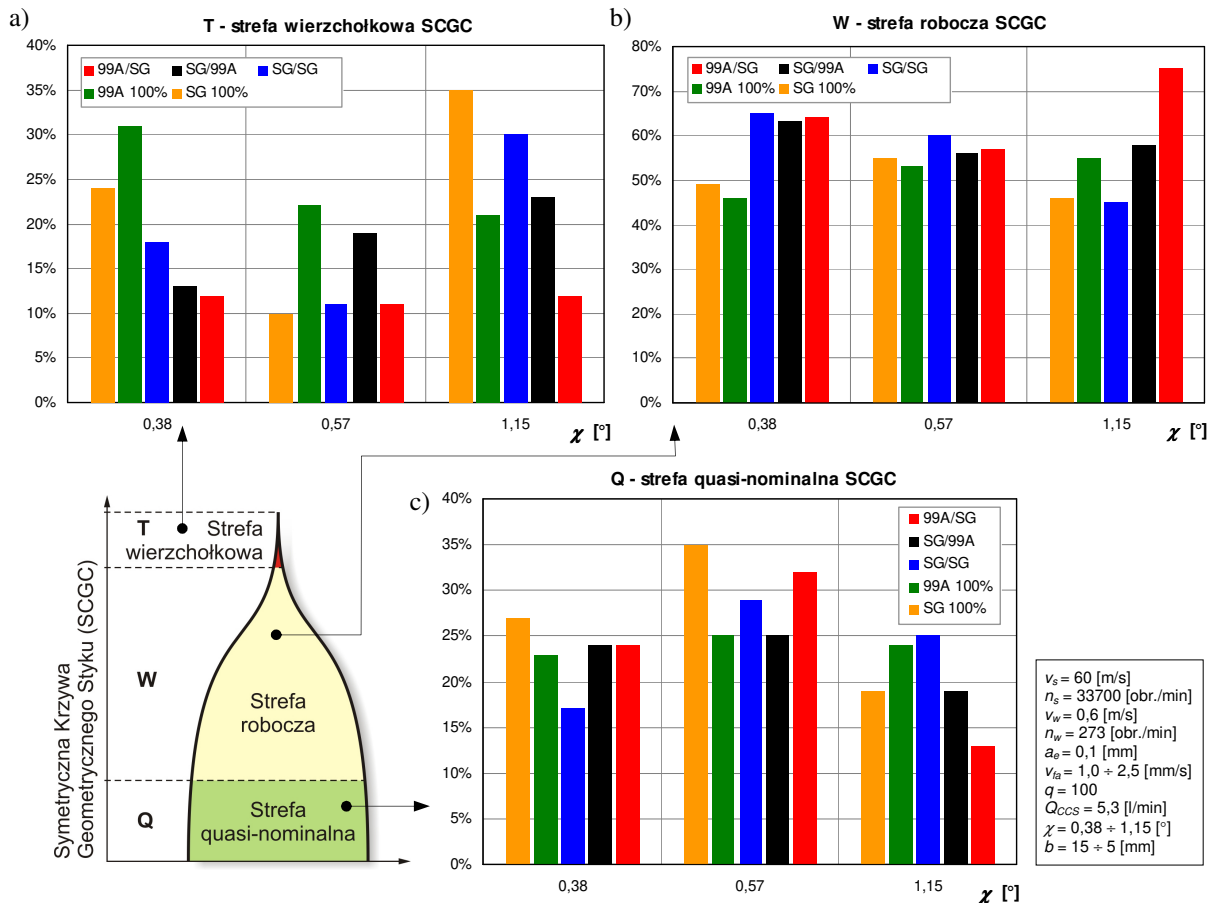
Wykres zmian parametru S_m opisującego parametry wzdłużne profilu chropowatości powierzchni obrobionej ujawnia tendencję malejącą wraz ze wzrostem wartości kąta χ (rys. 5-50a). Spadek wartości średniego odstepu chropowatości odpowiada większej powierzchniowej gęstości wierzchołków, czyli mniejszej gładkości otrzymanej powierzchni. Średnie pochylenie profilu Δ_a zmienia się w funkcji kąta nakroju stożkowego analogicznie do parametrów R_a i R_z , przyjmując najniższe wartości dla $\chi=0,38^\circ$ (rys. 5-50b).



Rys. 5-50. Wpływ wartości kąta nakroju stożkowego χ na parametry opisujące chropowatość powierzchni szlifowanej: a) średni odstęp chropowatości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δ_a

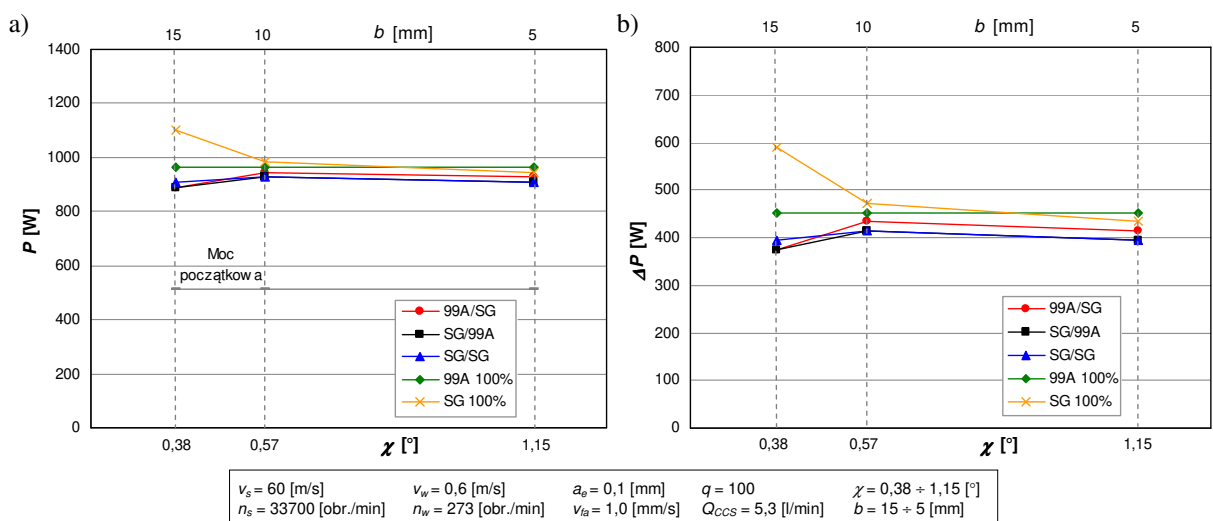
Na wykresach parametrów R_a , R_z , S_m i Δ_a zaobserwować można wyraźne oddzielenie linii reprezentujących wyniki uzyskane podczas obróbki ściernicą SG/SG i SG 100% od linii przedstawiających wyniki pozostałych narzędzi ściernych. Ściernice zbudowane wyłącznie z ziaren korundu spiekane SG charakteryzowały się podczas omawianych badań niemal identyczną zmiennością wyników oraz wyraźnie korzystniejszym poziomem wspomnianych parametrów chropowatości. Tłumaczyć to można mikrokryształiczną budową tego rodzaju ziaren oraz ich zdolnością do samoostrzenia. Mimo że w pozostałych narzędziach ściernych również występowały strefy zbudowane z ziaren SG (za wyjątkiem narzędzia 99A 100%), to w połączeniu z polikryształicznymi ziarnami elektrokorundu szlachetnego 99A ściernice te nie zapewniły równie gładkich powierzchni przedmiotu szlifowanego.

Analizując wykresy zmian udziału poszczególnych stref SCGC w funkcji kąta χ (rys. 5-51), można zauważyć, że największy udział strefy wierzchołkowej i jednocześnie najmniejszy strefy quasi-nominalnej (czyli najbardziej niekorzystne wyniki) zmierzony został na powierzchniach szlifowanych z największym kątem nakroju stożkowego ($\chi=1,15^\circ$). O ile wysokość strefy roboczej pozostała na zbliżonym poziomie, to udział strefy T i Q wskazuje na osiągnięcie największej nośności powierzchni podczas obróbki z $\chi=0,57^\circ$. Dalsze zmniejszanie wartości kąta nakroju stożkowego spowodowało nieznaczne pogorszenie nośności obrobionych powierzchni.



Rys. 5-51. Wpływ wartości kąta nakroju stożkowego χ na udział stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC): a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Zmiana kąta nakroju stożkowego badanych ściernic przebiegała w zakresie od $0,38$ do $1,15^\circ$. Miało to, jak pokazują wyniki parametrów chropowatości, znaczący wpływ na przebieg badanego procesu oraz na gładkość powierzchni przedmiotów obrobionych. Takie zróżnicowanie kąta χ nie wpłynęło jednak na zarejestrowane wartości mocy prądu wrzeczona narzędzia ściernego P , która pozostawała na stałym poziomie w całym zakresie zmienności badanego parametru (rys. 5-52).



Rys. 5-52. Wpływ wartości kąta nakroju χ na moc prądu wrzeczona ściernicy P (a) i przyrost mocy ΔP (b)

Z otrzymanych wyników badań można wywnioskować, że najkorzystniejsze wartości parametrów opisujących chropowatość powierzchni szlifowanych otrzymane zostały dla procesu realizowanego z kątem nakroju stożkowego narzędzia ściernego wynoszącym $\chi=0,38^\circ$. Ta wartość kąta χ odpowiada największej szerokości nakroju $b=15$ mm. Oznacza to, że równomierne rozłożenie całkowitego naddatku obróbkowego na większej powierzchni nakroju stożkowego ściernicy pozwala na bardziej efektywną pracę strefy szlifowania zgrubnego. W rezultacie krótsza walcowa część narzędzia ściernego usuwa mniejszą objętość materiału, co zapewnia niższą chropowatość powierzchni obrobionej.

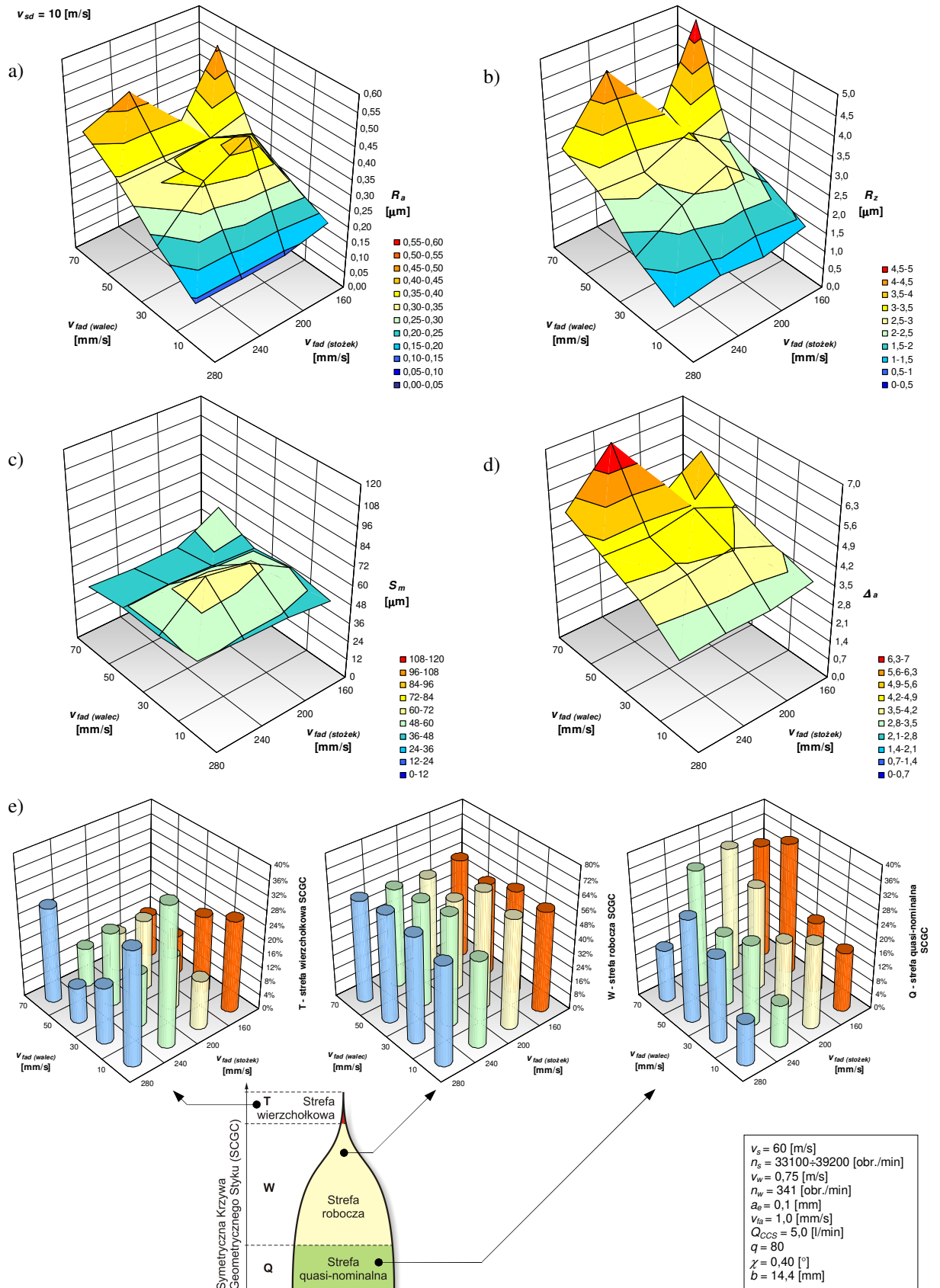
Przeprowadzone badania wpływu wartości kąta nakroju stożkowego ściernicy na parametry chropowatości powierzchni obrobionych oraz moc szlifowania, wskazały na możliwość optymalizacji warunków realizacji badanego procesu za pomocą kąta χ . Zauważyć przy tym należy, że precyzyjne wykonywanie nakroju stożkowego w zakresie małych wartości kąta wymaga stosowania specjalnego oprzyrządowania.

5.8.6 Parametry kształtowania CPS

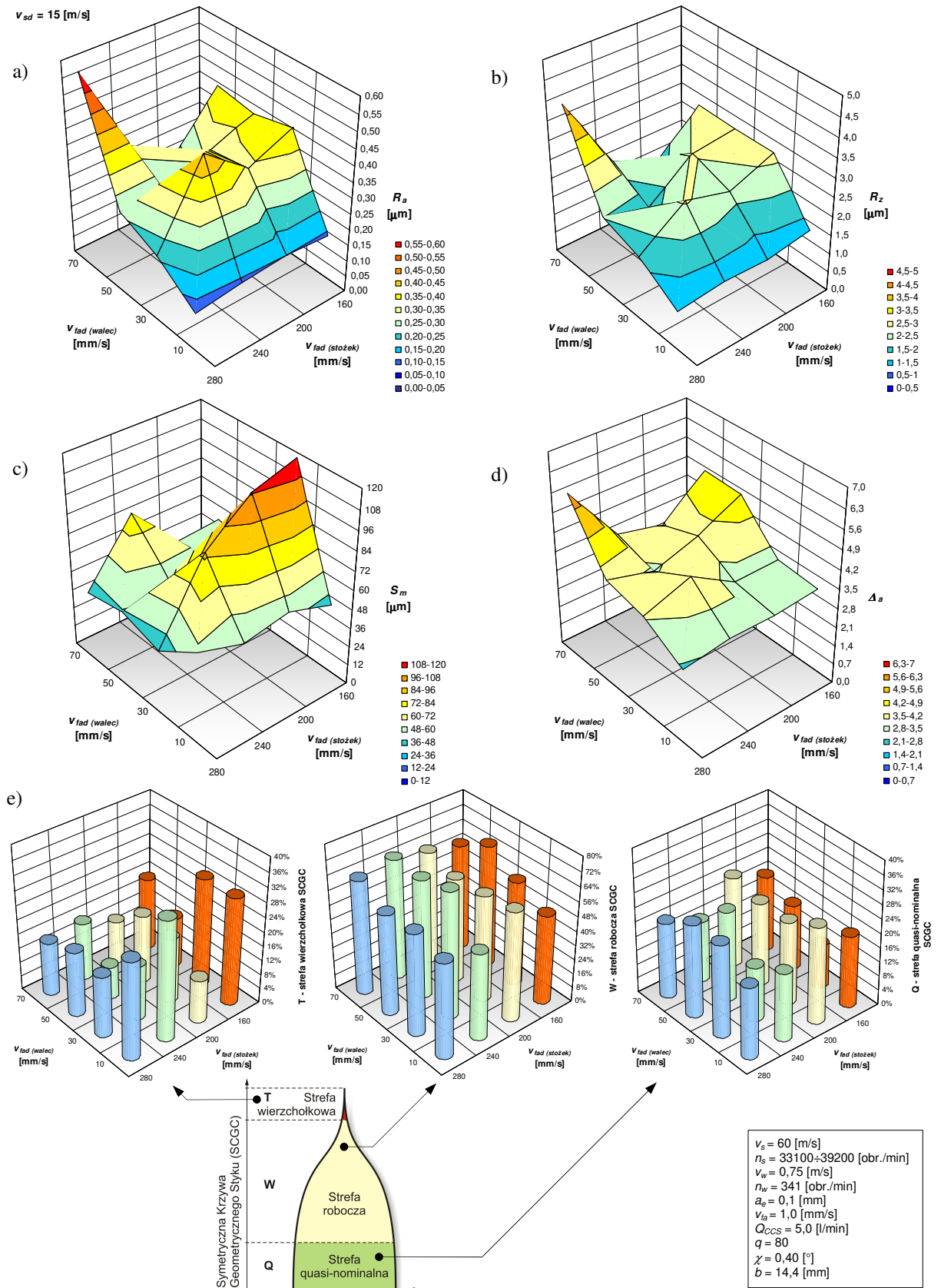
W ramach badań rozpoznawczych przeprowadzono również próby mające na celu wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów kształtowania czynnej powierzchni narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie. Do parametrów, od których zależy stan ściernicy po obciążeniu, należy zaliczyć: prędkość obwodową narzędzia ściernego v_{sd} , prędkość posuwu osiowego obciążacza v_{fad} oraz głębokość usuwanej warstwy ścierniwa a_{ed} (w badaniach przyjęto stałą wartość styku roboczego obciążania: $a_{ed}=0,0125$ mm).

W przypadku ściernic ze stożkową częścią szlifowania zgrubnego zabieg obciążania podzielony był na dwa etapy. W pierwszym kształtowano nakrój o zadanych parametrach (χ, 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 narzędzia ściernego. Zastosowanie odmiennych wartości v_{fad} podczas kształtowania poszczególnych części ściernicy miało na celu podniesienie zdolności skrawnej powierzchni narzędzia ściernego w strefie stożkowej oraz zapewnienie jak najlepszego wygładzenia powierzchni przez strefę walcową.

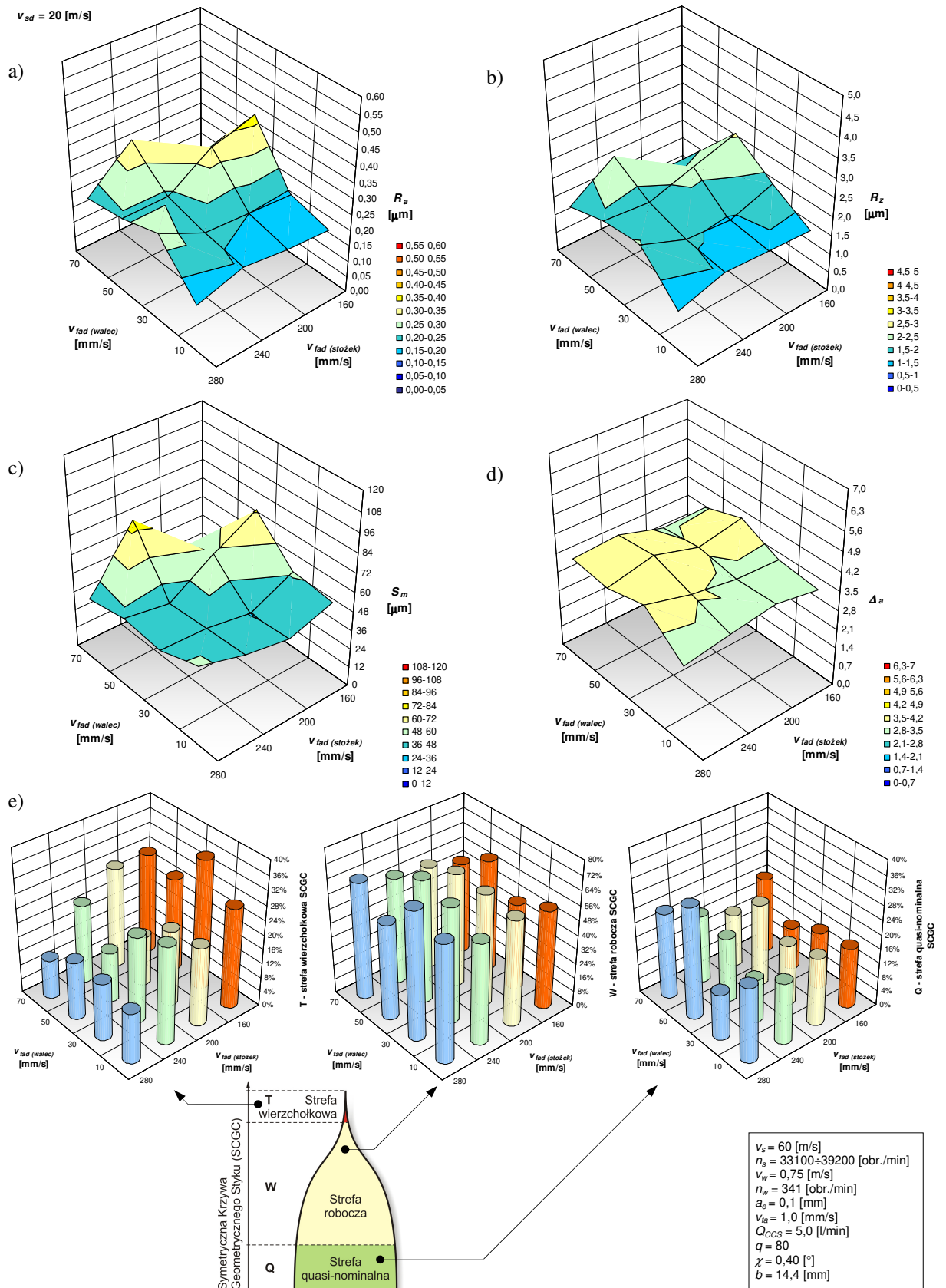
Na rys. 5-53÷55 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań wpływu prędkości posuwu osiowego przy kształtowaniu strefy stożkowej v_{fad} (stożek) i walcowej v_{fad} (walec) narzędzia ściernego na chropowatość powierzchni po szlifowaniu. Rysunki te zawierają zestawienie wykresów zmian parametrów opisujących chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego (R_a, R_z, S_m, Δ_a i udział stref SCGC) dla prędkości obwodowej ściernicy $v_{sd}=10$ (rys. 5-53), $v_{sd}=15$ (rys. 5-54) i $v_{sd}=20$ m/s (rys. 5-55).



Rys. 5-53. Zmiany parametrów opisujących chropowatość powierzchni przedmiotów obrabianych w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciążaniu strefy stożkowej ($v_{fad(stożek)}$) i walcowej ($v_{fad(walec)}$) narzędzia ściernego dla $v_{sd}=10$ m/s: 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 Δ_a ; e) udział poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC)



Rys. 5-54. Zmiany parametrów opisujących chropowatość powierzchni przedmiotów obrabianych w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciążaniu strefy stożkowej ($v_{fad(stożek)}$) i walcowej ($v_{fad(walec)}$) narzędzia ściernego dla $v_{sd}=15$ m/s: 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 Δ_a ; e) udział poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC)



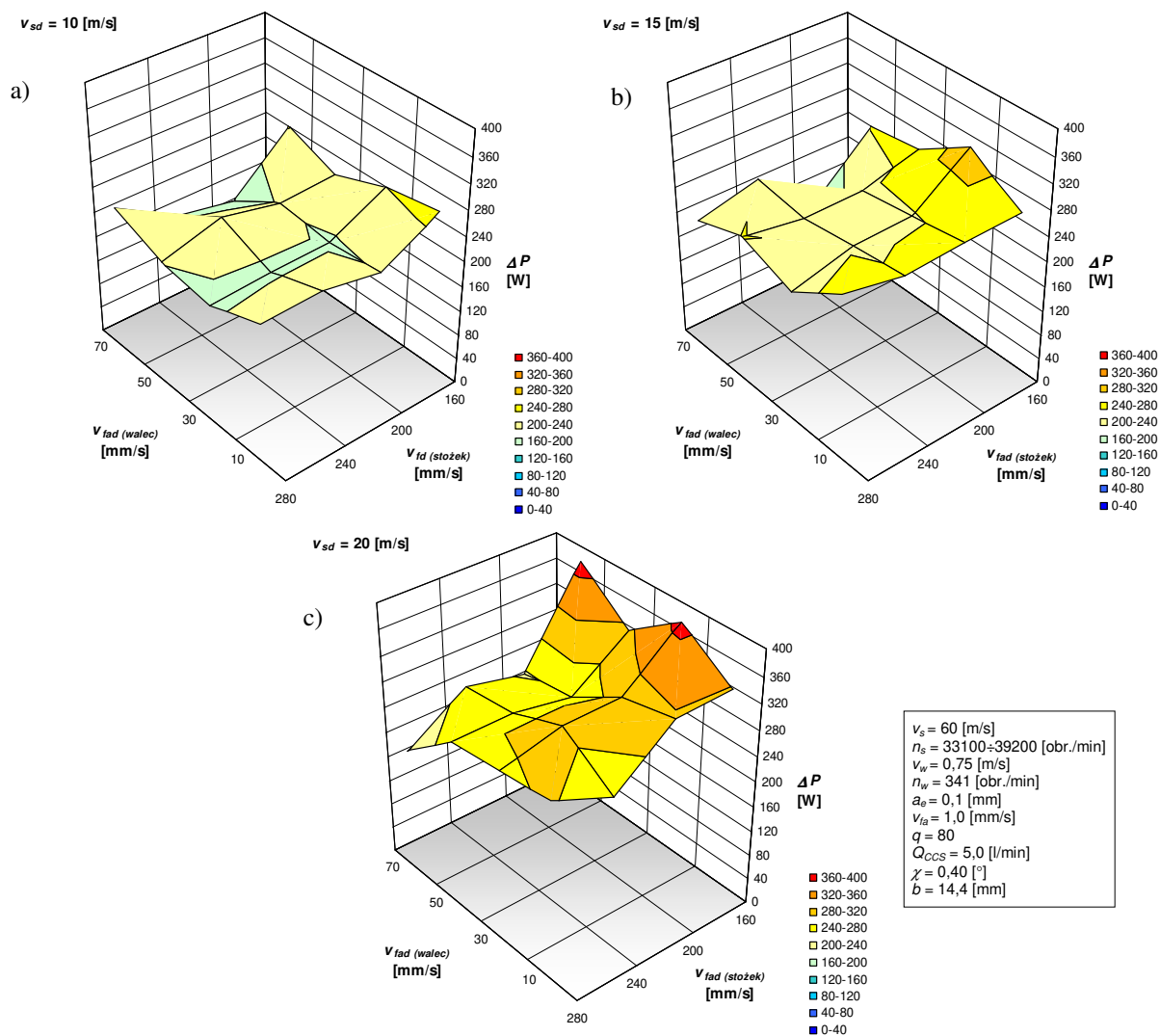
Rys. 5-55. Zmiany parametrów opisujących chropowatość powierzchni przedmiotów obrobionych w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciążaniu strefy stożkowej (v_{fad} (stożek)) i walcowej (v_{fad} (walec)) narzędzia ściernego dla $v_{sd}=20$ m/s: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z ; c) średni odstęp chropowatości S_m ; d) średnie pochylenie profilu Δ_a ; e) udział poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC)

Porównanie zmian wartości parametrów R_a , R_z , S_m i Δ_a w funkcji prędkości posuwu osiowego przy ostrzeniu części walcowej ściernicy wskazuje na znaczny spadek chropowatości powierzchni przedmiotów szlifowanych ściernicą obciążoną z najmniejszą wartością $v_{fad(walec)}$. Dla $v_{sd}=10$ m/s zarejestrowano ponad trzykrotne obniżenie średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a z wartości około $0,50 \mu\text{m}$ przy $v_{fad(walec)}=70$ mm/s do $0,14 \mu\text{m}$ przy $v_{fad(walec)}=10$ mm/s. Tendencja ta utrzymuje się niezależnie od wartości prędkości v_{sd} i pozostaje stała dla całego zakresu zmienności $v_{fad(stożek)}$. W takich warunkach powierzchnia walcowej części narzędzia ściernego jest kształtowana przy największym stopniu pokrycia k_d . W efekcie otrzymuje się topografię z największą ilością kinematycznych ostrzy skrawających N_{kin} [GOŁ04] powstałych na skutek wykruszania fragmentów mikrokrystalicznych ziaren korundu spiekane (rys. 5-57b i 5-58b). Uzyskana w ten sposób duża liczba ostrzy zapewniła najlepsze wygładzenie szlifowanej powierzchni.

Duża wartość prędkości posuwu obciążacza przy kształtowaniu nakroju stożkowego $v_{fad(stożek)}$ nie wpływa na chropowatość powierzchni PO osiąganą w badanym procesie, za którą w głównej mierze odpowiada strefa walcowa narzędzia ściernego. Pozwala jednak na wygenerowanie bardzo ostrej powierzchni ściernicy z dużymi przestrzeniami międzyziarnowymi zapobiegającymi zalepianiu CPS (rys. 5-57a i 5-58a). Taka charakterystyka powierzchni strefy stożkowej umożliwia bardziej efektywne usuwanie nadmiaru obróbkowego, co przyczynia się do obniżenia mocy szlifowania (rys. 5-56). 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. 5-56c).

Wzrost prędkości posuwu obciążania nakroju stożkowego nieznacznie wpłynął również na bardziej korzystny rozkład udziału poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku. Jest to szczególnie widoczne w wynikach uzyskanych przy $v_{sd}=20$ m/s (rys. 5-55e). Wraz ze wzrostem wartości $v_{fad(stożek)}$ zmniejszała się wysokość strefy wierzchołkowej T przy jednoczesnym wzroście udziału strefy roboczej W i quasi-nominalnej Q.

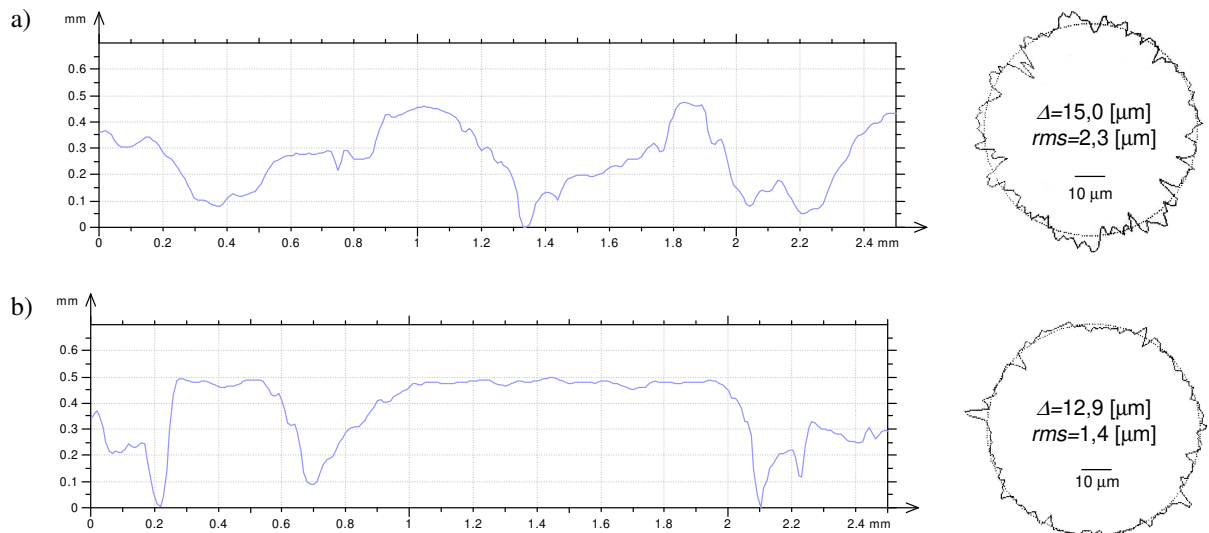
Zmiana prędkości obwodowej ściernicy z 10 do 20 m/s spowodowała wzrost zapotrzebowania na moc w badanym procesie (rys. 5-56). Obliczone wartości średnie przyrostu mocy szlifowania dla wszystkich punktów pomiarowych zmieniały się od 210 W przy $v_{sd}=10$ m/s, przez 236 W dla $v_{sd}=15$ m/s aż do wartości 284 W zarejestrowanej podczas realizacji opisywanego procesu narzędziem ściernym obciążonym z $v_{sd}=20$ m/s. Jest to wynikiem zwiększania się wraz z rosnącym v_{sd} wartości stopnia pokrycia k_d , co prowadzi do generowania coraz większej liczby kinematycznych ostrzy skrawających N_{kin} [GOŁ04].



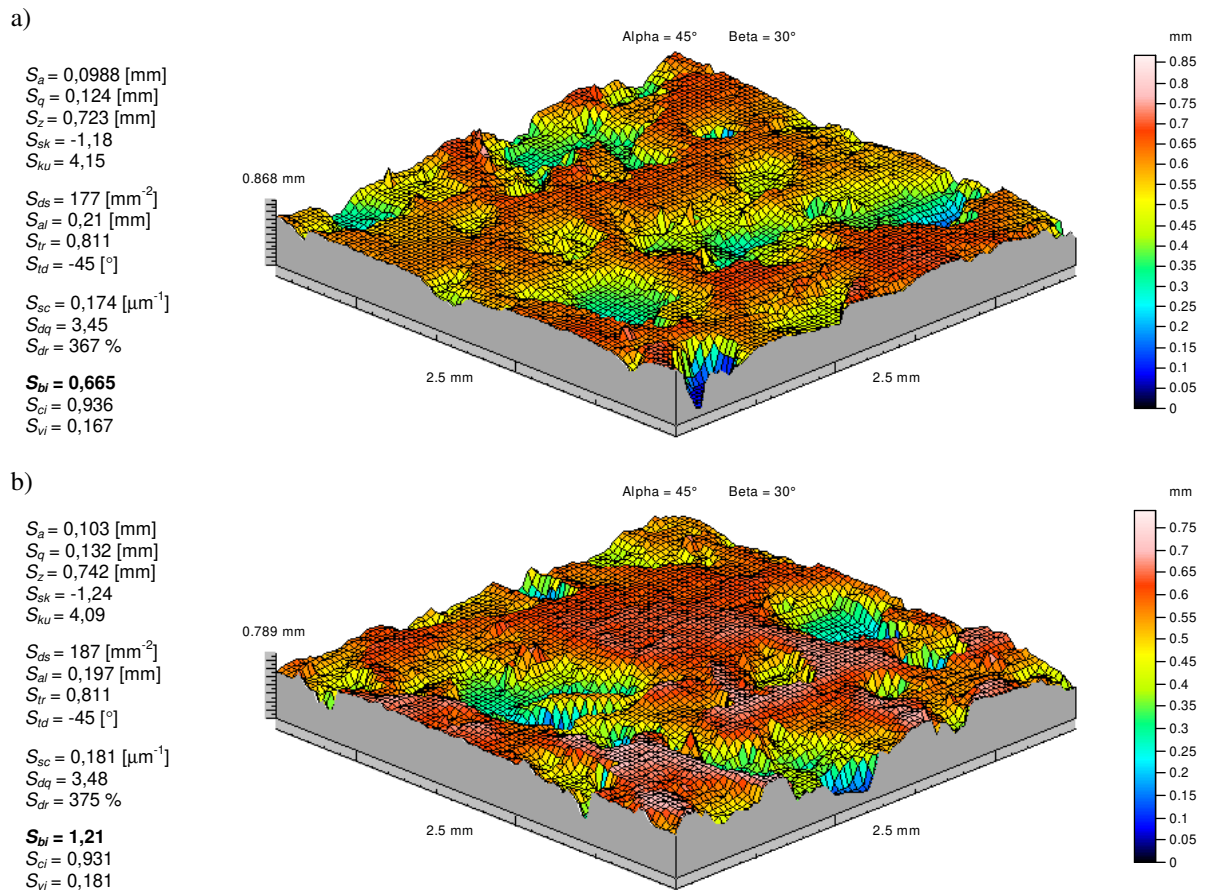
Rys. 5-56. Zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP w funkcji prędkości posuwu osiowego przy obciążaniu strefy stożkowej (v_{fad} (stożek)) i walcowej (v_{fad} (waliec)) narzędzia ściernego dla trzech wartości prędkości obwodowa ściernicy: a) $v_{sd}=10$ m/s; b) $v_{sd}=15$ m/s; c) $v_{sd}=20$ m/s

Porównanie mikrogeometrii poszczególnych stref funkcjonalnych narzędzia ściernego przedstawiono na rys. 5-57 i 5-58. 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 o rozmiarze 46.

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 $v_{fad}=280$ mm/s ($k_d=0,10$) wskaźnik nośności wynosił $S_{bi}=0,665$ (rys. 5-58a). Natomiast na podstawie mikrotopografii części realizującej szlifowanie wykończeniowe obciążonej z prędkością posuwu $v_{fad}=10$ mm/s ($k_d=2,75$) wyznaczono wartość $S_{bi}=1,21$ (rys. 5-58b).



Rys. 5-57. Przykładowe profile osiowe oraz zarysy obwodowe mikrogeometrii narzędzia ściernego 46-100% po obciążeniu z prędkością $v_{sd}=10$ m/s: a) strefa stożkowa ($v_{fad(stożek)}=280$ mm/s; $k_d=0,10$); b) część walcowa ($v_{fad(walec)}=10$ mm/s; $k_d=2,75$)



Rys. 5-58. Topografia i parametry chropowatości powierzchni narzędzia ściernego 46-100% po obciążeniu z prędkością $v_{sd}=10$ m/s: a) strefa stożkowa ($v_{fad(stożek)}=280$ mm/s; $k_d=0,10$); b) część walcowa ($v_{fad(walec)}=10$ mm/s; $k_d=2,75$)

Parametr ten opisuje cechy funkcjonalne SGP i służy do analizy powierzchni stykowych. Wskaźnik nośności S_{bi} obliczany jest ze stosunku wartości średniego

kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni S_q do wysokości nierówności powierzchni przy wartości c_l powierzchni nośnej [OCZ03]:

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{c_l}} = \frac{1}{h_{c_l}}, \quad (5.5)$$

gdzie η_{c_l} oraz h_{c_l} oznaczają odpowiednio wysokość nierówności powierzchni oraz znormalizowaną wysokość nierówności powierzchni przy wartości c_l powierzchni nośnej. Wartość domyślna c_l wynosi 5% w odniesieniu do najwyższego punktu powierzchni resztkowej w obrębie obszaru próbkowania. 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 ilością mikrowierzchołków oraz mniejszą głębokością nierówności, czyli struktury dostosowanej do realizacji szlifowania wykończeniowego i wyiskrzania.

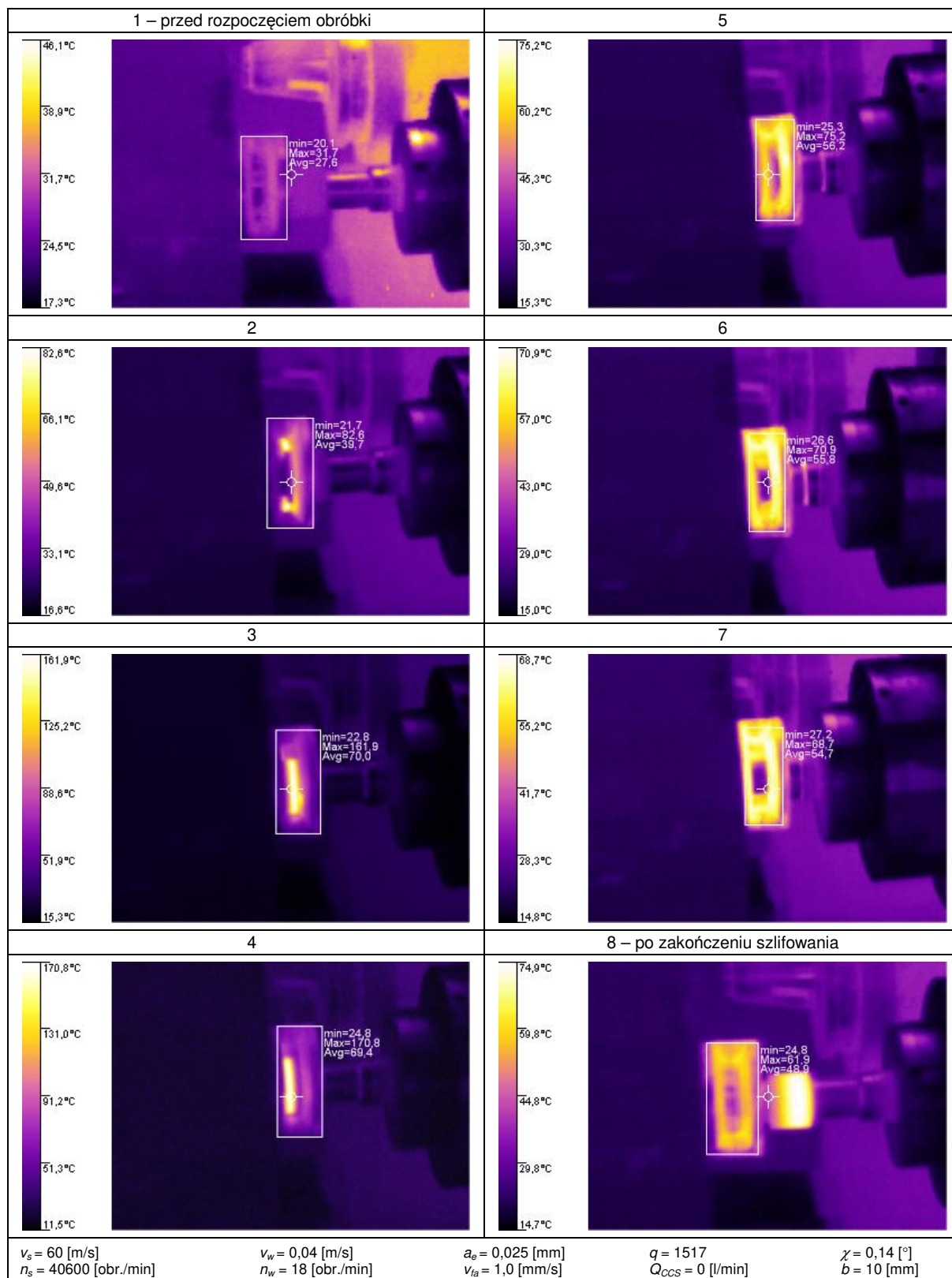
Przeprowadzone badania wskazują na możliwość dostosowania stanu poszczególnych stref CPS do realizowanych przez nie różnych funkcji obróbkowych. Odpowiedni dobór v_{sd} oraz wysokie prędkości kształtowania strefy stożkowej v_{fad} (stożek) pozwalają na znaczną redukcję mocy szlifowania przy niewielkim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

Więcej przykładów mikrotopografii powierzchni strefy stożkowej i walcowej narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie zarejestrowanych po obciążaniu z różnymi wartościami v_{fad} zamieszczono w punkcie Z5.5 i Z5.6.1 załącznika.

5.8.7 Temperatura Θ_p

Zarejestrowane wyniki pomiaru temperatury w strefie szlifowania badanego procesu stanowią jedynie rozpoznanie możliwości realizacji takich pomiarów z użyciem metod termowizyjnych. Zastosowany sposób „podejrzenia” warunków obróbki poprzez zastosowanie szczeliny w przedmiocie obrabianym pozwolił na zebranie informacji o temperaturze podczas jednoprzęściowego szlifowania otworów. Ze względu na wykorzystaną metodę pomiarową oraz fakt, że rejestrowany przez kamerę obraz w trakcie obróbki przedstawiał, poza przedmiotem szlifowanym i wirującą z prędkością około 40 000 obr./min ściernicą, również wydostające się ze strefy szlifowania wióry, wykonane pomiary nie dają informacji o faktycznej temperaturze w strefie usuwania materiału. Pomiary te pozwalają jedynie na analizę porównawczą warunków termicznych szlifowania z zastosowaniem różnych narzędzi ściernych.

Poniżej przedstawiono przykładowe termogramy zarejestrowane podczas obserwacji procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicą SG F46 100% (druga seria pomiarów) – rys 5-59.



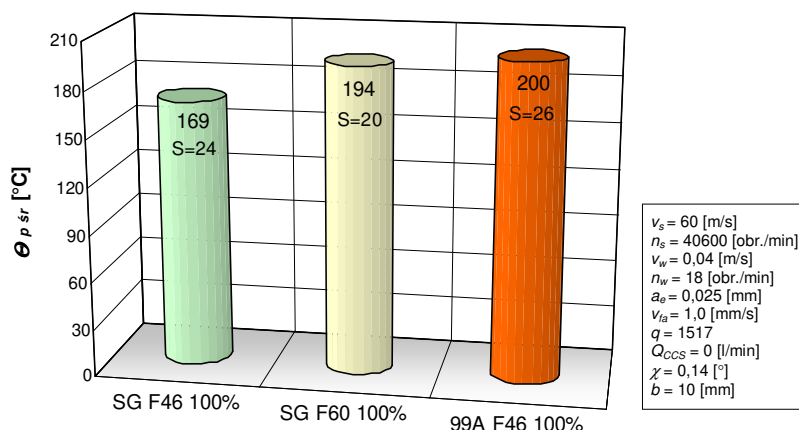
Rys. 5-59. Przykładowe termogramy zarejestrowane podczas realizacji jednoprzęciowego procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicą SG F46 100%

Zestawienie wyników wszystkich zrealizowanych pomiarów termowizyjnych zawiera tab. 5-IV, a graficznie ilustruje je rys. 5-60.

Tablica 5-IV. Wyniki pomiarów temperatury w strefie obróbki podczas procesu jednoprzęciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych

Ściernica	Seria pomiarów	Najwyższa zarejestrowana temperatura Θ_p [°C]	Wartość średnia Θ_p [°C]
SG F60 100%	1	177,4	194
	2	189,8	
	3	216,1	
SG F46 100%	1	144,3	169
	2	170,8	
	3	192,4	
99A F46 100%	1	196,4	200
	2	175,9	
	3	228,5	

Najkorzystniejsze (najniższe) wartości temperatury w strefie szlifowania zarejestrowano dla ściernicy zbudowanej z ziaren SG wielkości 46 (wartość średnia $\Theta_p=169$ °C). Zmierzona temperatura w przypadku zastosowania analogicznego narzędzia ściernego z ziarnami wielkości 60 jest o 15% wyższa ($\Theta_p=194$ °C). Wynika z tego, że wzrost wielkości ziarna powoduje redukcję obciążenia cieplnego w badanym procesie. Tłumaczyć to można większymi przekrojami warstw skrawanych pojedynczym ziarnem, powstawaniem większych wiórów i wydalaniem ciepła wraz z nimi, przy zmniejszonym nagrzewaniu przedmiotu obrabianego. W przypadku CPS z mniejszą ilością większych ziaren zredukowany jest również udział tarcia, a większe przestrzenie międzyziarnowe skuteczniej usuwają wióry ze strefy obróbki i doprowadzają do niej czynnik chłodzący (w przypadku zrealizowanych badań powietrze).

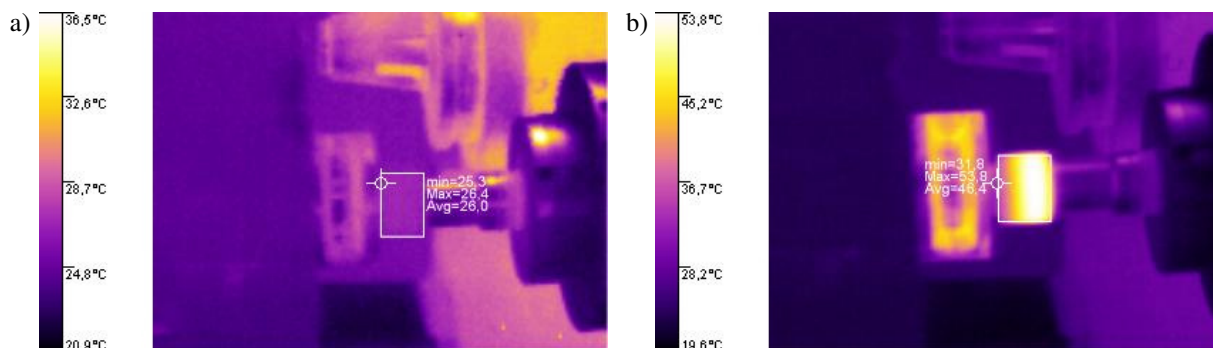


Rys. 5-60. Średnie maksymalne temperatury oraz wartości odchylenia standardowego zarejestrowane w badanym procesie szlifowania ściernicami zbudowanymi z ziaren SG i 99A wielkości 60 i 46

Porównanie wyników badań dla ściernicy SG F46 i 99A F46, czyli narzędzi ściernych o jednakowych wielkościach ziaren, ale innym ich rodzaju, wskazuje na korzystniejszy termicznie przebieg obróbki przy zastosowaniu submikrokryształicznych ziaren korundu spiekane. Temperatura w strefie szlifowania z użyciem ściernicy 99A F46 była o 18% wyższa ($\Theta_p=200$ °C) niż w przypadku ściernicy SG F46. Wynika to przede wszystkim z różnicy w wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ wynoszącego ~ 14 W/m·K dla elektrokorundu [OCZ00] i ~ 30 W/m·K [ANT91, DOB05] w przypadku korundu spiekane. Na zarejestrowane wartości wpływa również większa zdolność skrawna ziaren SG będąca efektem mikrokryształicznej budowy tego materiału ściernego.

Porównanie termogramów ściernicy przed i po obróbce (rys. 5-61) wskazuje na niewielki wzrost temperatury z początkowych 26,4 °C do 53,8 °C. Na wartość zmierzonej

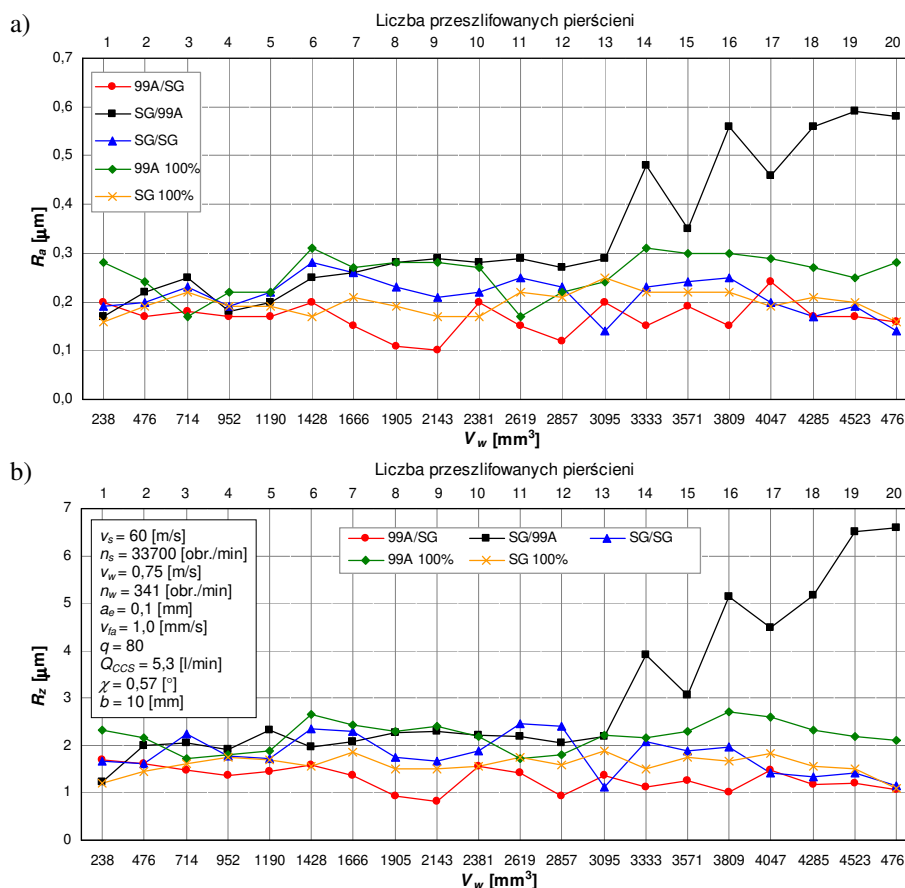
temperatury po obróbce miało jednak duży wpływ zjawisko chłodzenia powietrzem wirującego z prędkością około 40 000 obr./min narzędzia ściernego. Mimo że zmierzone wartości maksymalne temperatury w badanym procesie wynosiły około 200 °C, po kilkunastu sekundach od zakończenia szlifowania, potrzebnych do zatrzymania ściernicy, zarejestrowana temperatura narzędzia ściernego była czterokrotnie niższa.



Rys. 5-61. Termogramy narzędzia ściernego SG F46 100%: a) przed szlifowaniem; b) po szlifowaniu

5.8.8 Zużycie narzędzi ściernych

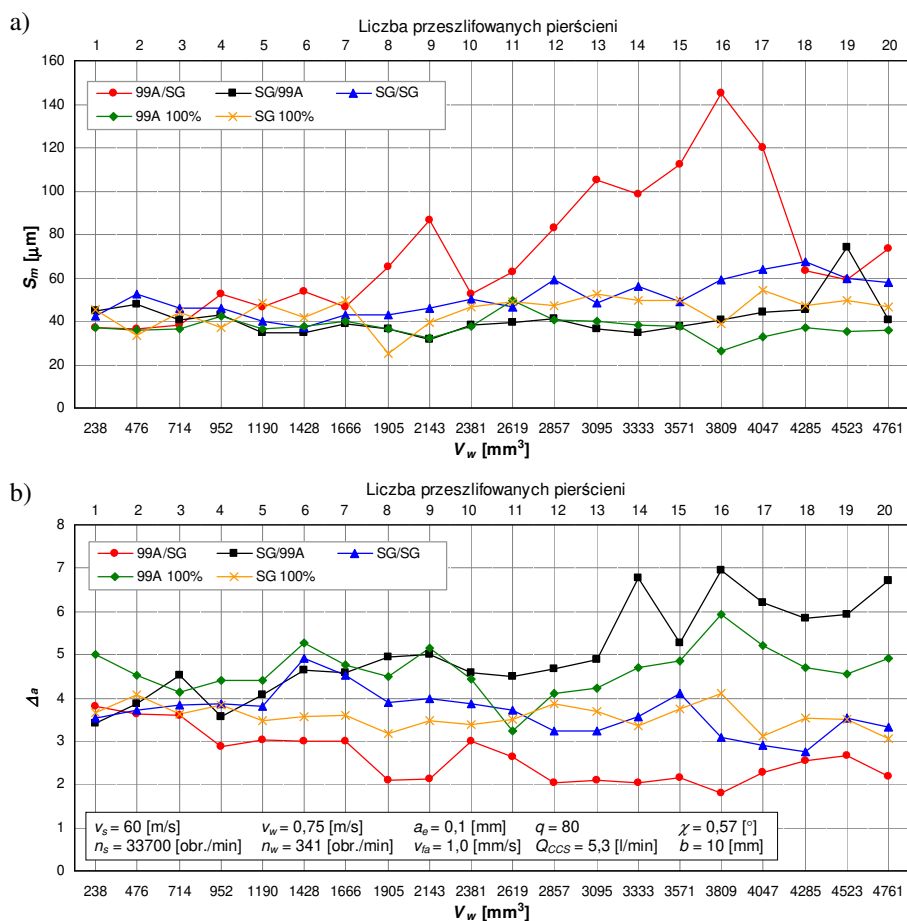
Wykresy zmian wartości parametrów opisujących wysokościowe cechy profili chropowatości szlifowanych powierzchni w funkcji objętości usuwanego materiału V_w wskazują na niewielką zmienność osiąganą gładkośći przedmiotów szlifowanych badanymi ściernicami (rys. 5-62).



Rys. 5-62. Zmiany wartości parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni szlifowanej w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z

Wyjątek stanowi narzędzie ściernie SG/99A, które po przekroczeniu objętości usuwanego materiału $V_w=3095 \text{ mm}^3$, odpowiadającej przeszlifowaniu 13 pierścieni, kształtowało powierzchnie o coraz większych wartościach parametrów R_a i R_z . Mogło to zostać spowodowane spadkiem zdolności skrawnej ziaren elektrokorundu szlachetnego znajdujących się w strefie szlifowania wykończeniowego ściernicy, wywołanego postępującym tępieniem wierzchołków polikrystalicznych ziaren 99A oraz zalepianiem CPS. Najniższe wartości parametrów R_a i R_z uzyskane zostały z wykorzystaniem ściernic odznaczających się ziarnami SG w strefie szlifowania wykończeniowego (99A/SG i SG/SG) oraz narzędzia ściernego SG 100%. Wynika z tego, że mikrokrystaliczna budowa tego typu ziaren zapewnia uzyskiwanie wysokich gładkości przedmiotów obrabianych w długich okresach pracy ściernicy.

Na wykresie zmian średniego odstepu chropowości S_m (rys. 5-63a) w funkcji objętości usuniętego materiału widoczne są równomierne, utrzymujące się na niskim poziomie przebiegi uzyskane dla powierzchni szlifowanych badanymi ściernicami. Jedyne narzędzie ściernie 99A/SG wykazywało tendencję do zwiększania wartości parametru S_m . Można sądzić, że zmiany te były wynikiem postępującego tępienia polikrystalicznych ziaren elektrokorundu szlachetnego znajdujących się w strefie szlifowania zgrubnego ściernicy i spadku liczby wierzchołków aktywnych.

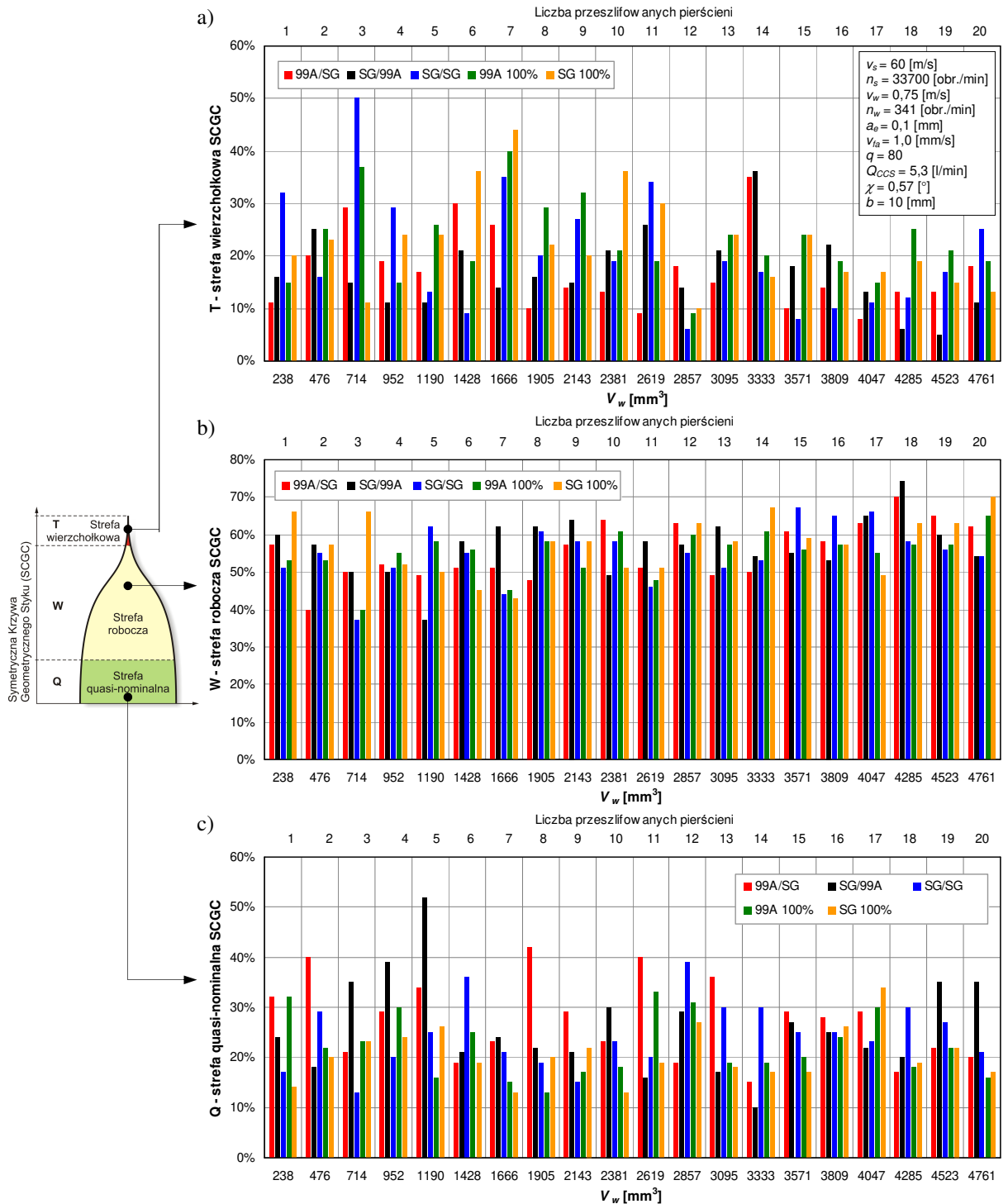


Rys. 5-63. Zmiany wartości parametrów chropowości powierzchni szlifowanej w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) średni odstęp chropowości S_m ; b) średnie pochylenie profilu Δ_a

Wykres zmian średniego pochylenia profilu Δ_a dla ściernic 99A/SG, SG/SG i SG 100% (rys. 5-63b) wskazuje na niewielką tendencję spadkową kąta pochylenia wraz ze

wzrostem objętości zeszlifowanego materiału. Narzędzia ściernie SG/99A i 99A 100% wyraźnie kształtują coraz większe wartości Δ_a , świadczące o ich postępującym zużyciu.

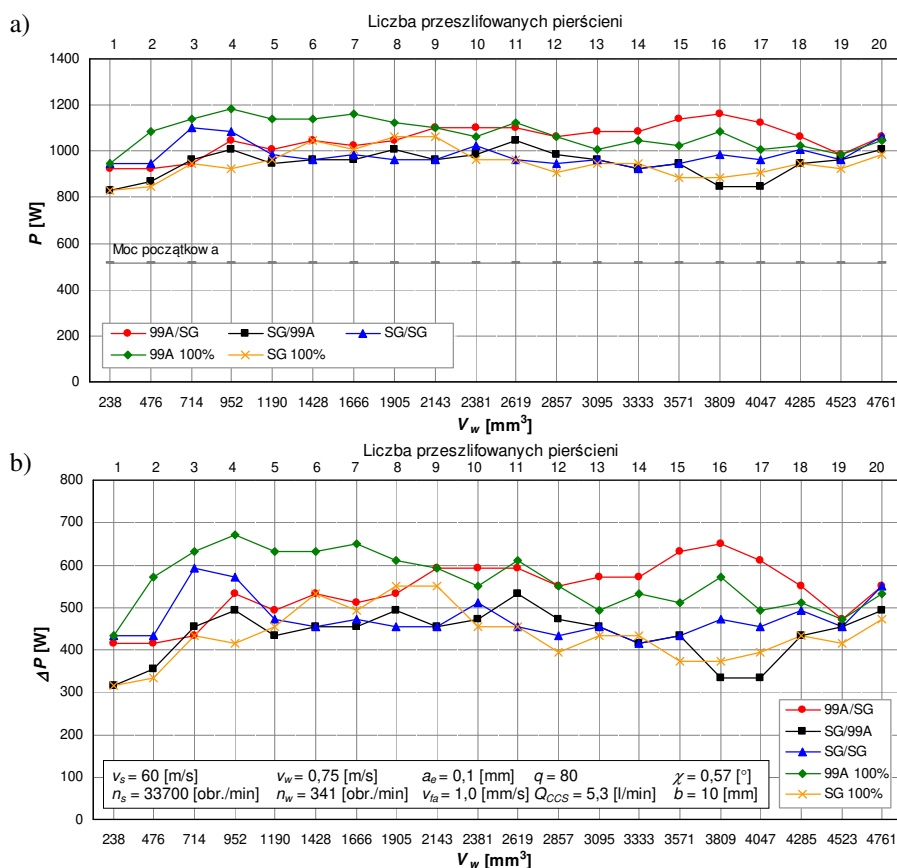
Wartości udziału strefy wierzchołkowej symetrycznej krzywej geometrycznego styku maleją wraz ze wzrostem usuniętej przez badane narzędzia ściernie objętości materiału (rys. 5-64a). Jednocześnie nieznaczną tendencją wzrostową wykazuje udział strefy roboczej SCGC (rys. 5-564b). Strefa quasi-nominalna pozostaje na niezmiennym poziomie i oscyluje wokół wartości 20÷30% (rys. 5-64c).



Rys. 5-64. Zmiany wartości udziałów stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC) w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) strefa wierzchołkowa T; b) strefa robocza W; c) strefa quasi-nominalna Q

Spadkowi wysokości strefy wierzchołkowej w funkcji objętości usuniętego materiału towarzyszył wzrost udziału strefy roboczej. Zmiany te nie wpłynęły jednak istotnie na udział strefy quasi-nominalnej, decydującej o nośności obrabianej powierzchni. Zmierzone parametry SCGC szlifowanych powierzchni mogą wskazywać na powolne tępienie badanych ściernic i częściową utratę ich zdolności skrawnej, mimo skłonności do samoostrzenia ziaren SG oraz zastosowanego spoiwa szklanokrystalicznego.

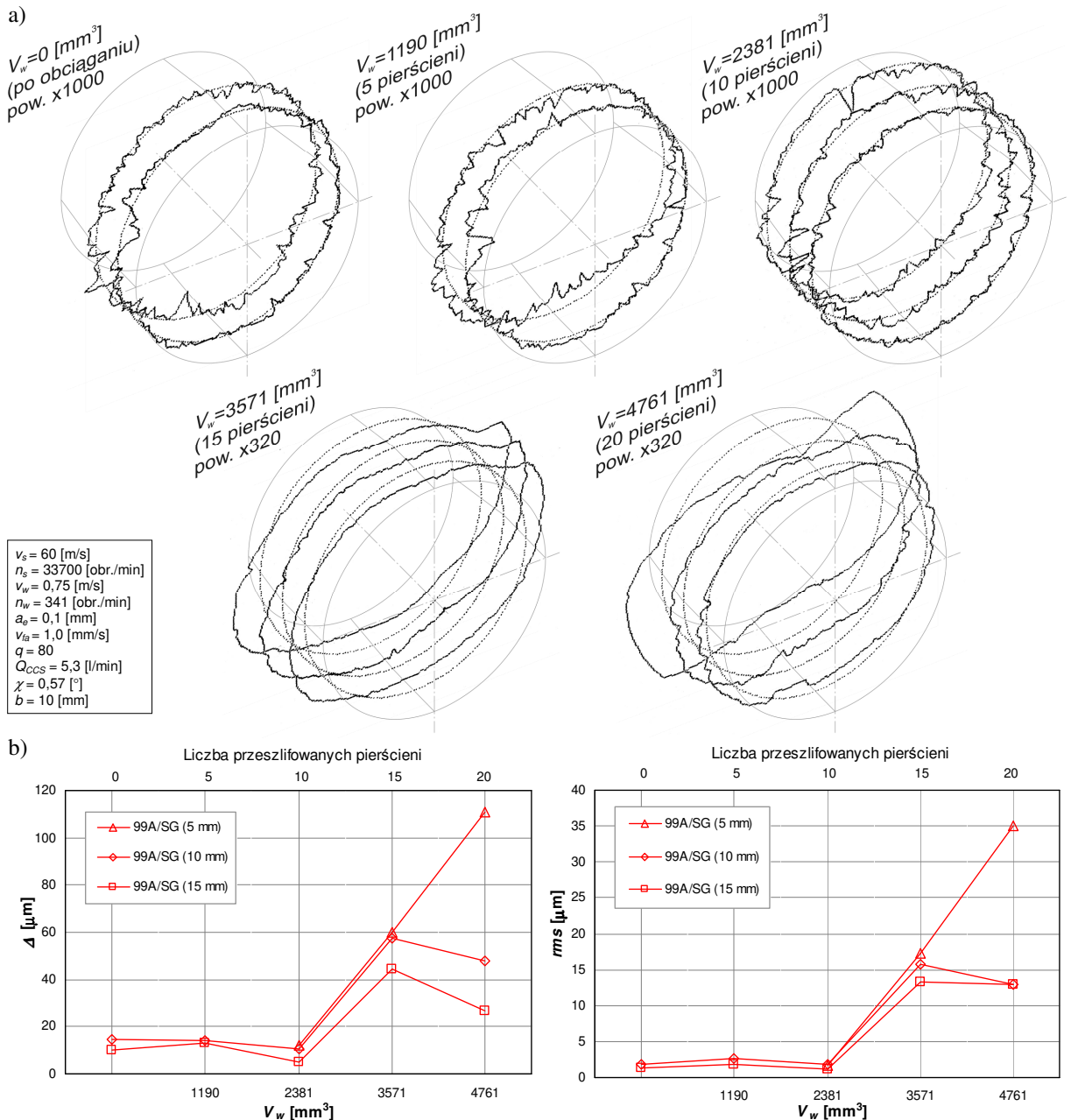
Wykresy wartości mocy szlifowania, rejestrowanych podczas obróbki kolejnych pierścieni, charakteryzują się początkowym wzrostem wynikającym z utraty przez narzędzia ściernie właściwości skrawnych nadanych w zabiegu obciążania (rys. 5-65).



Rys. 5-65. Zmiany wartości mocy prądu wrzeciona ściernicy P w funkcji objętości usuwanego materiału V_w (a) i przyrost mocy ΔP (b)

Kolejne punkty pomiarowe wskazują na stabilizację zmian mocy elektrycznej wrzeciona ściernicy, co wskazuje na regenerację czynnej powierzchni badanych narzędzi ściernych w wyniku postępującego procesu samoostrzenia. Cecha ta dotyczy wszystkich badanych ściernic i nie zależy od gatunku ziarna wykorzystanego do ich budowy, co świadczy o korzystnym wpływie zastosowanego spoiwa szklanokrystalicznego. Polikrystaliczna struktura tego kompozytu zapewnia stałe i równomierne mikrowykruszanie w trakcie procesu szlifowania zarówno ziaren ściernych, jak i samego spoiwa. Na omawianych wykresach zauważyć można również wyższy poziom mocy, odpowiadający procesowi prowadzonemu z użyciem narzędzi ściernych z ziarnami elektrokorundu szlachetnego w strefie szlifowania zgrubnego (99A/SG i 99A 100%). W przypadku pozostałych ściernic, w których ta strefa zbudowana była z ziaren korundu spiekane, moc P przyjmowała nieco niższe wartości. Wynika to z większej zdolności skrawnej ziaren SG, których mikrokryształiczna budowa pozwala na usuwanie materiału wieloma mikrowierzchołkami powstałymi w wyniku samoostrzenia.

W trakcie badań zużycia narzędzi ściernych mierzono błędy kształtu wyrażone maksymalną odchyłką okrągłości Δ ($P+V$) oraz średnim kwadratowym odchyleniem od okręgu średniego rms . Kształt zarysów obwodowych czynnej powierzchni ściernicy 99A/SG oraz wykresy zmiany ww. parametrów po przeszlifowaniu 5, 10, 15 i 20 pierścieni, a także w stanie wyjściowym (po obciążeniu) przedstawia rys. 5-66.

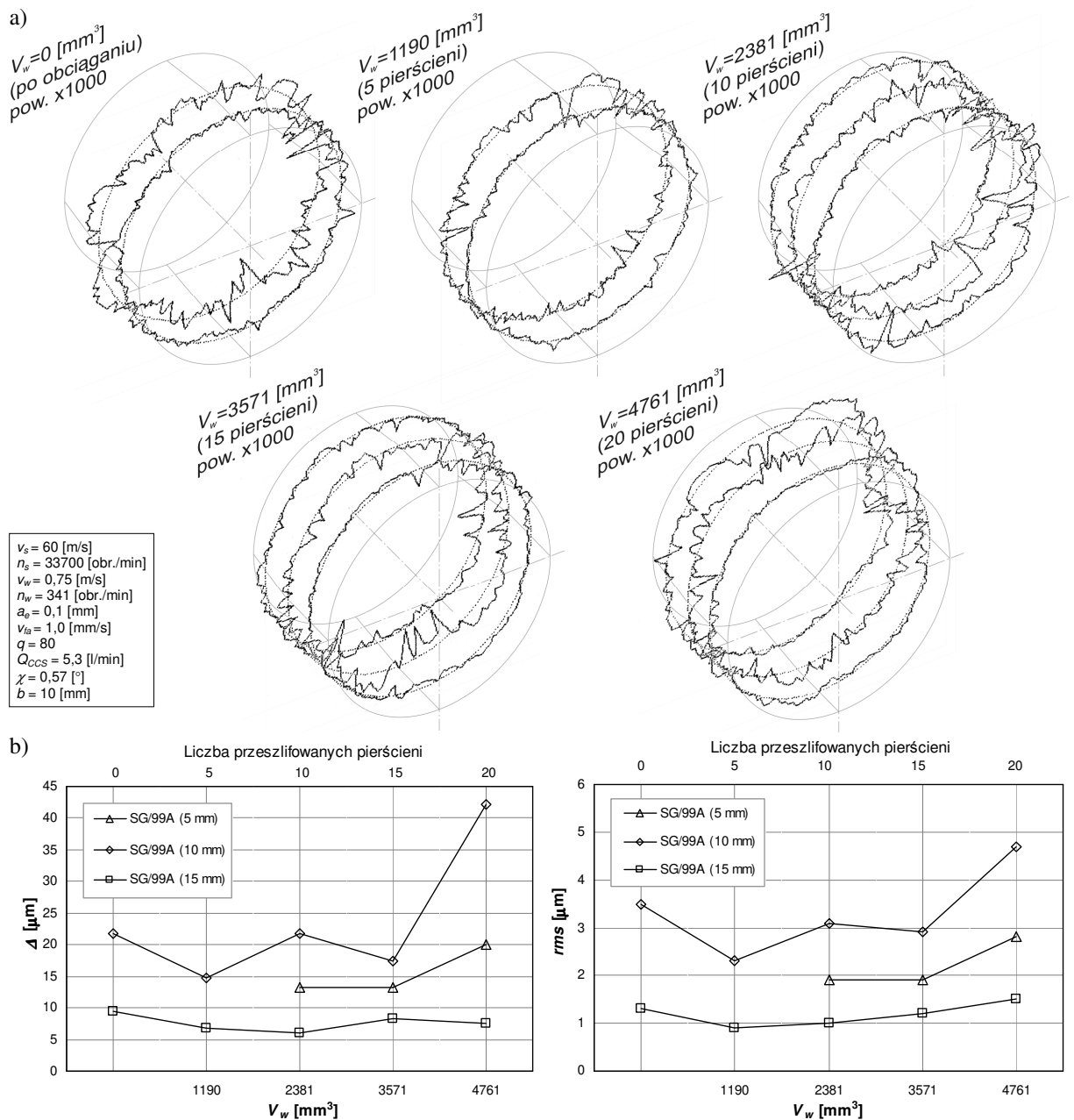


Rys. 5-66. Błędy kształtu ściernicy 99A/SG na początku (5 mm) i końcu strefy stożkowej (10 mm) oraz w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm): a) zarysy obwodowe CPS; b) wykresy zmian wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w

Ze sporządzonych wykresów wyraźnie wynika gwałtowny wzrost wartości obu parametrów opisujących błędy kształtu badanego narzędzia ściernego po usunięciu 2381 mm³ materiału obrabianego. Szczególnie silna tendencja wzrostowa zarejestrowana została na początku stożkowej strefy szlifowania zgrubnego, czyli na 5. mm od czoła ściernicy. Ten duży wzrost błędów kształtu widoczny jest również na zestawieniu zarysów obwodowych

CPS (rys. 5-66a), które dla $V_w=3571$ i $V_w=4761$ mm³ rejestrowane były z mniejszym powiększeniem (320x). Jednak nawet przy tym powiększeniu, obwodowy zarys obrazujący stan CPS w strefie stożkowej po przeszlifowaniu całej serii 20 pierścieni nie zmieścił się w zakresie pomiarowym.

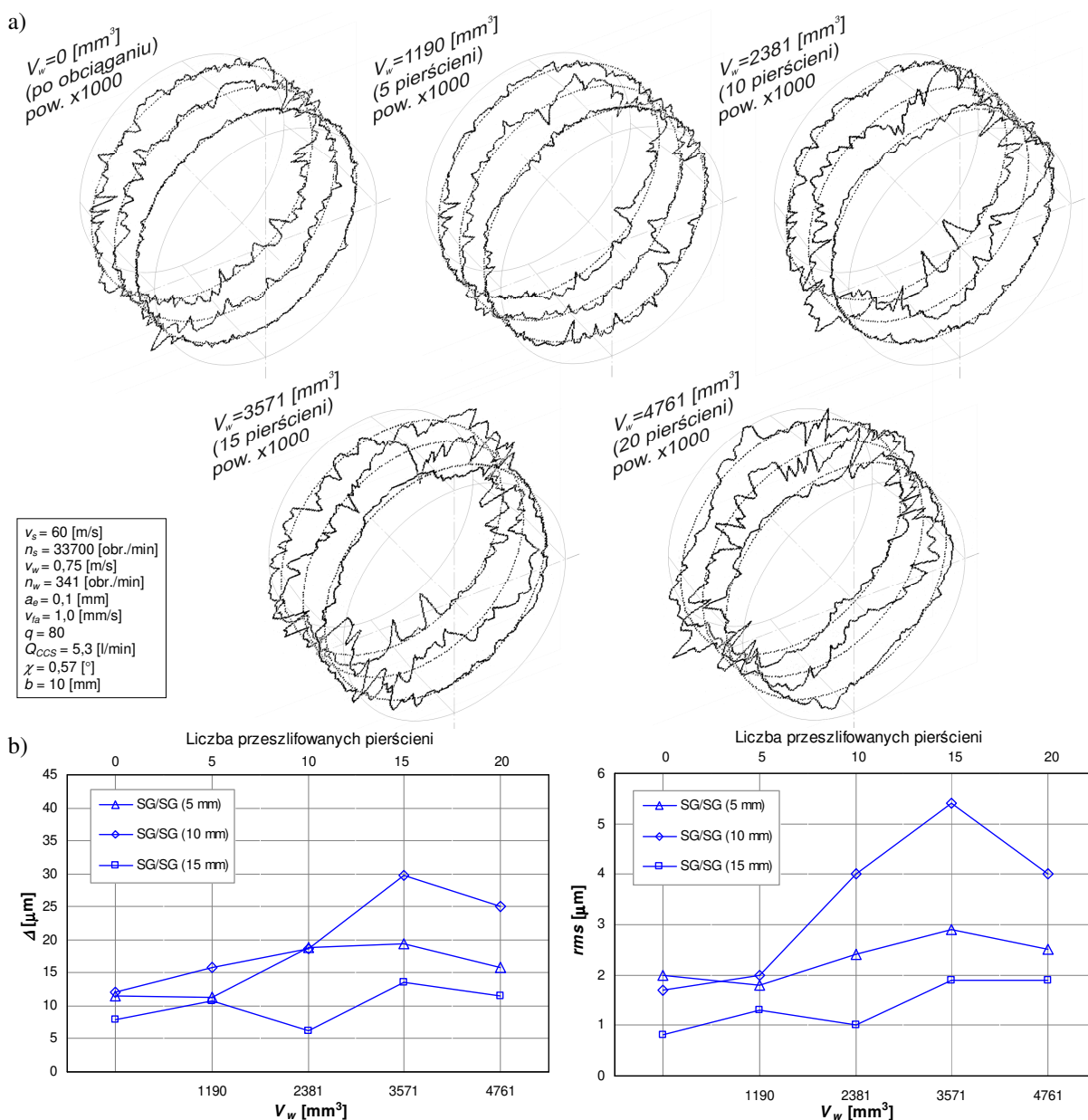
Na wykresach zauważyć można również, że linia przedstawiająca najmniejsze wartości błędów kształtu sporządzona została na podstawie pomiarów części walcowej ściernicy, poddanej najmniejszym obciążeniom wynikającym z realizacji procesu obróbkowego. Główne zadanie usuwania materiału wykonywała stożkowa strefa narzędzia ściernego zbudowana z ziaren elektrokorundu szlachetnego, i to na niej zostały zmierzone największe wartości parametrów Δ i rms (5 mm od czoła).



Rys. 5-67. Błędy kształtu ściernicy SG/99A na początku (5 mm) i końcu strefy stożkowej (10 mm) oraz w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm): a) zarysy obwodowe CPS; b) wykresy zmian wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w

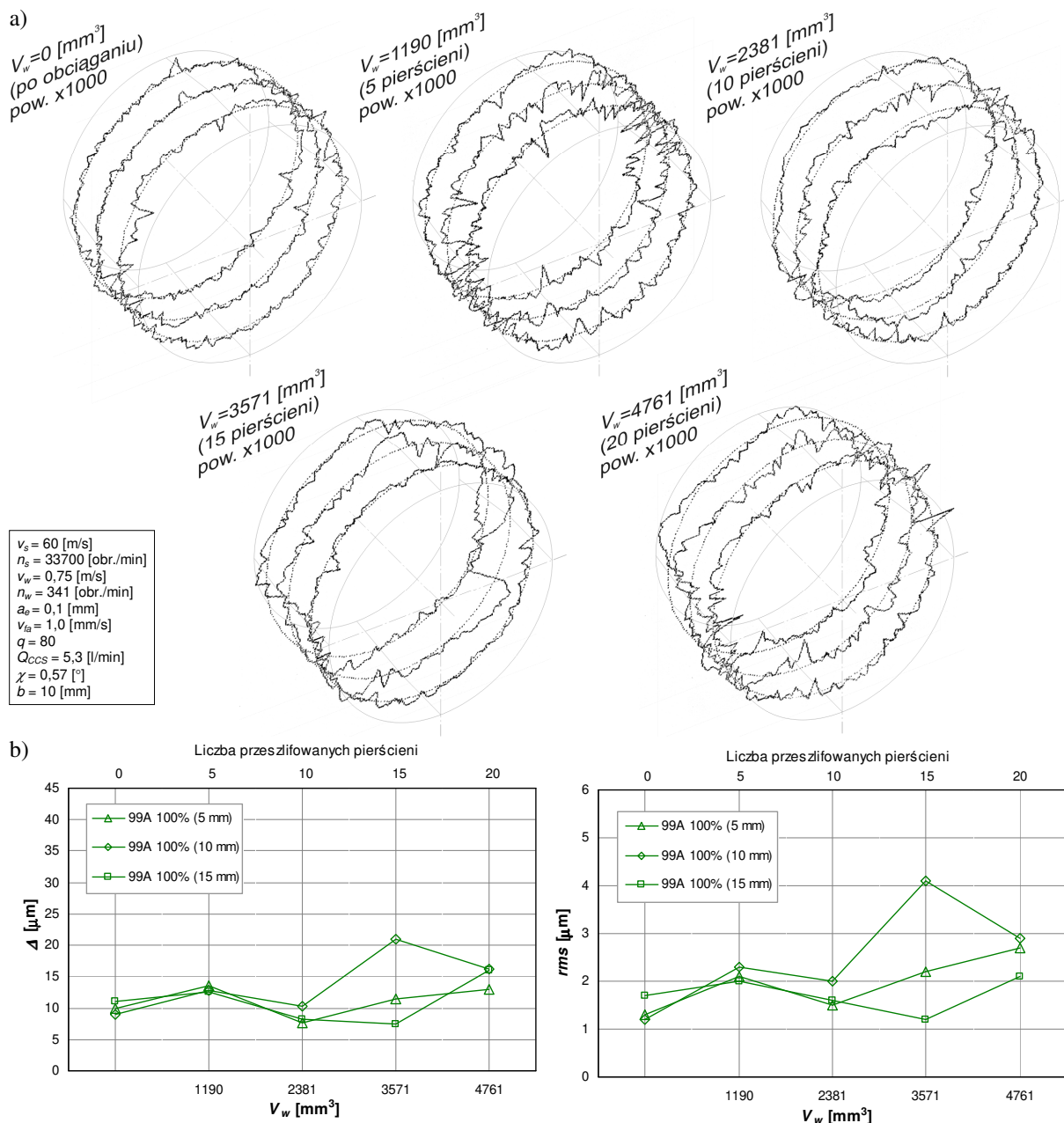
Z zestawienia wyników pomiarów ściernicy SG/99A (rys. 5-67) wynika łagodna tendencja wzrostowa wartości parametrów Δ i rms , szczególnie widoczna na końcu części stożkowej. Wyraźne jest również zróżnicowanie zarejestrowanych błędów kształtu dla kolejnych obszarów narzędzia ściernego. Najmniejsze odchyłki kształtu występowały w strefie wykończeniowej (15 mm), największe zaś na końcu stożka (10 mm).

Podobnie kształtowały się parametry Δ i rms w funkcji objętości usuwanego materiału, zmierzone na ściernicy SG/SG (rys. 5-68). Również w tym przypadku duże obciążenia przypadające na koniec stożkowej strefy szlifowania zgrubnego (10 mm) wywołują najbardziej wyraźny wzrost oraz największe wartości błędów kształtu. Maksymalna odchyłka okrągłości oraz średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego dla strefy walcowej (15 mm) po przeszlifowaniu 20 pierścieni przyjmowały niemal trzykrotnie niższy poziom, a nieco większe wartości zmierzono na początku części stożkowej (5 mm).



Rys. 5-68. Błędy kształtu ściernicy SG/SG na początku (5 mm) i końcu strefy stożkowej (10 mm) oraz w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm): a) zarysy obwodowe CPS; b) wykresy zmian wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w

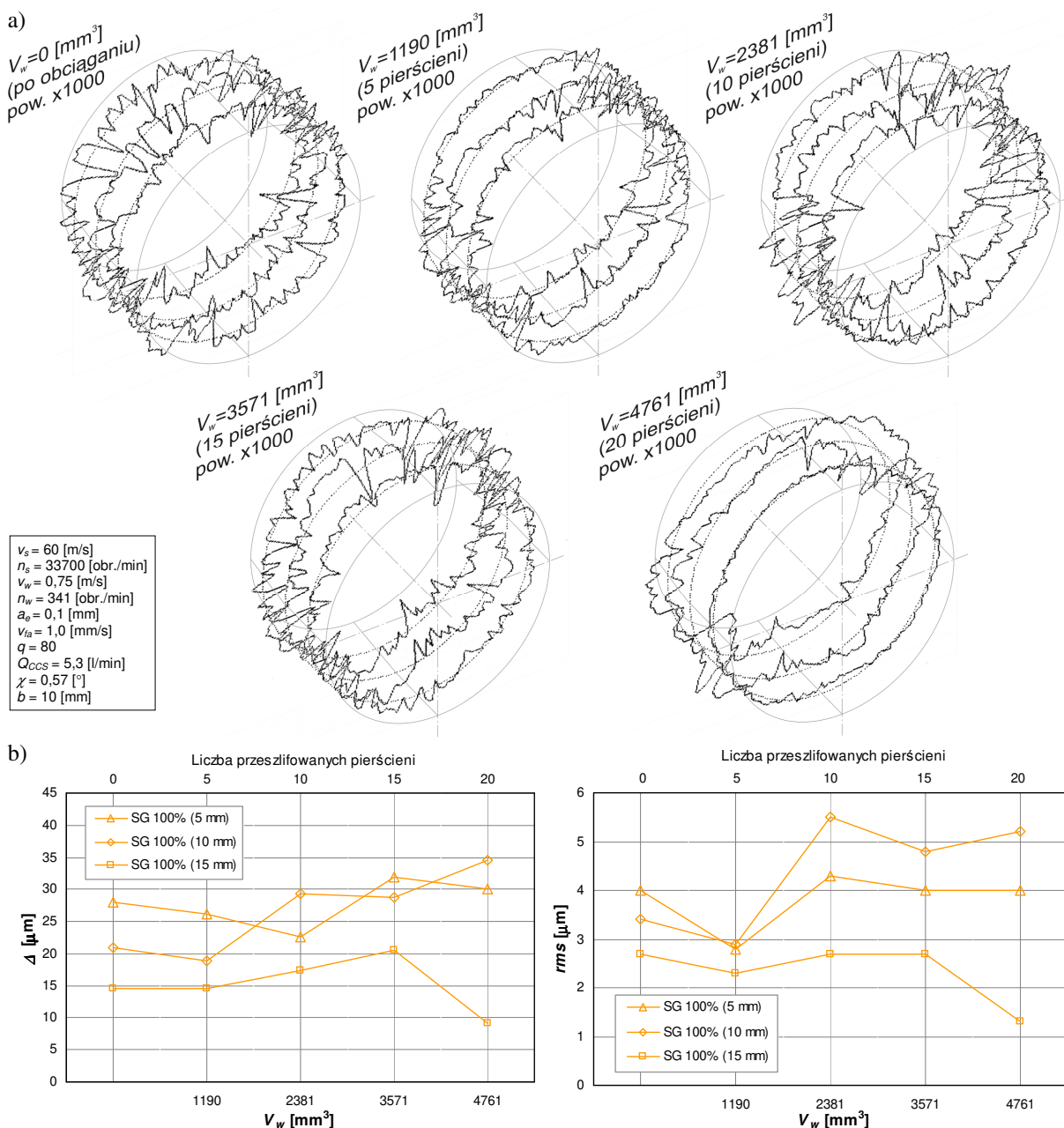
Wyniki pomiarów błędów kształtu ściernicy 99A 100% (rys. 5-69) wskazują na niewielki wzrost parametrów Δ i rms w funkcji objętości usuwanego materiału. Na uwagę zasługuje brak wyraźnego zróżnicowania wartości zmierzonych na początku, środku i końcu narzędzia ściernego w początkowym okresie pracy ściernicy. Jednak już dla pomiarów wykonanych po przeszlifowaniu 15 i 20 pierścieni uwidocznił się wpływ zwiększonego obciążenia części stożkowej.



Rys. 5-69. Błędy kształtu ściernicy 99A 100% na początku (5 mm) i końcu strefy stożkowej (10 mm) oraz w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm): a) zarysy obwodowe CPS; b) wykresy zmian wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w

Drugim narzędziem ściernym wykonanym w całości z jednego gatunku ziarna była ściernica SG 100%. Zmiany wartości parametrów Δ i rms również w tym przypadku odzwierciedlają odmienne obciążenie części stożkowej i walcowej (rys. 5-70). Pomimo wyraźnie większych wartości błędów kształtu zarejestrowanych na początku i końcu stożka

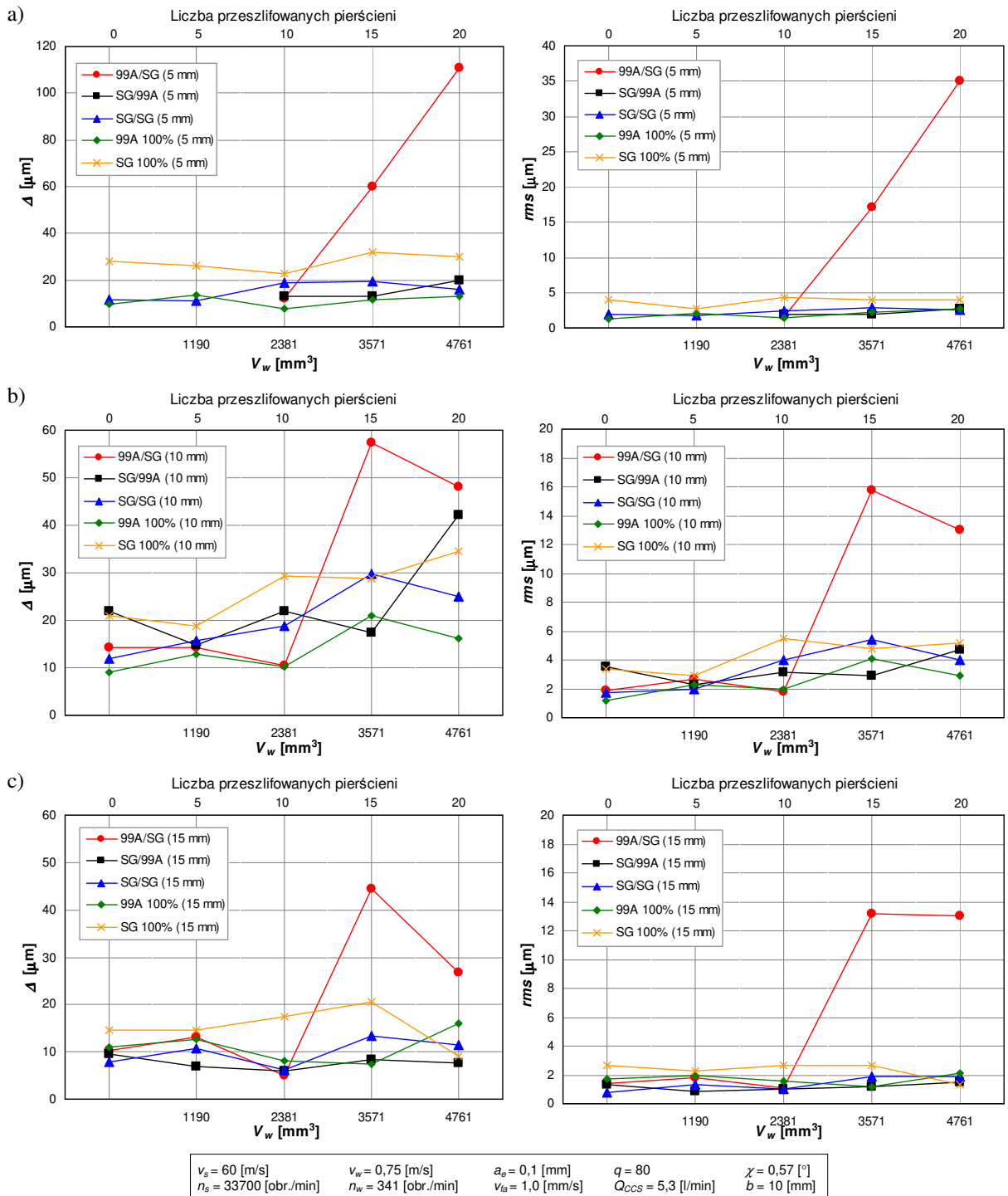
(5 i 10 mm), w porównaniu do części walcowej (15 mm), sporządzone wykresy wskazują na stały rosnący trend ich zmian w funkcji V_w .



Rys. 5-70. Błędy kształtu ściernicy SG 100% na początku (5 mm) i końcu strefy stożkowej (10 mm) oraz w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm): a) zarysy obwodowe CPS; b) wykresy zmian wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w

Z zestawienia wartości parametrów opisujących błędy kształtu badanych narzędzi ściernych (rys. 5-71) wynika, że największą odchyłkę okrągłości zarejestrowano dla ściernicy 99A/SG. Wyrazny wzrost Δ i rms nastąpił po przeszlifowaniu 10 pierścieni i był najsilniejszy na początku strefy stożkowej. Podobnego przebiegu nie zanotowano dla porównywalnego narzędzia ściernego 99A 100%, którego strefa szlifowania zgrubnego wykonana była z takich samych ziaren. Można zatem sądzić, że wyniki badań dla ściernicy 99A/SG były skutkiem ujawnienia się np. defektu w strukturze części stożkowej. Mimo zdolności zastosowanego spoiwa szklanokrystalicznego do odnawiania CPS, którą można zaobserwować na wykresach

sporządzonych dla końca stożka (10 mm) i dla walcowej części wygładzającej (15 mm), wzrost wartości parametrów Δ i rms mierzonych na początku stożka nie został zahamowany.



Rys. 5-71. Zmiany wartości maksymalnej odchyłki okrągłości Δ ($P+V$) oraz wartości średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego badanych narzędzi ściernych rms w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) na początku strefy stożkowej (5 mm); b) na końcu strefy szlifowania zgrubnego (10 mm); c) w walcowej strefie szlifowania wykończeniowego (15 mm)

W pozostałej grupie narzędzi ściernych największe błędy kształtu zarejestrowano dla ściernicy SG 100%. Wartości te odbiegały jednak tylko nieznacznie od reszty wykresów i utrzymywały się na stałym poziomie. Jedynie w przypadku pomiarów dokonywanych na

końcu stożka (10 mm) widoczny jest lekki trend rosnący. Większe odchyłki okrągłości opisywanego narzędzia ściernego wynikają z nieco wyższego poziomu początkowego błędów kształtu CPS, będącego rezultatem zabiegu obciągania ($V_w=0 \text{ mm}^3$).

Porównując wyniki przeprowadzonych pomiarów parametrów Δ i rms , zauważyć należy, że największe błędy kształtu ujawniają się na końcu (10 mm) oraz na początku (5 mm) stożka badanych narzędzi ściernych, co wynika z dużego obciążenia tej strefy. Część walcowa, realizująca szlifowanie wykończeniowe i wyskrzanie, charakteryzowała się w niektórych przypadkach dwu- lub nawet trzykrotnie mniejszymi odchyłkami okrągłości.

Zmiany wszystkich analizowanych parametrów opisujących chropowatość powierzchni obrobionej (R_a , R_z , S_m , Δ_a) w funkcji objętości usuwanego materiału kształtują się najmniej korzystnie dla przedmiotów obrabianych ściernicami SG/99A i 99A 100%. Wynika z tego, że umieszczenie w strefie szlifowania wykończeniowego ziaren korundu spiekanego pozwala na otrzymanie powierzchni o mniejszej chropowatości. Także narzędzie ściernie wykonane całkowicie z ziaren SG o wielkości 46, dzięki mikrokryształicznej strukturze tego typu ścierniwa i przyjętym warunkom szlifowania, zapewniło większą gładkość obrabianych powierzchni w porównaniu do ściernic, w których do obróbki wykończeniowej zastosowano ziarna elektrokorundu szlachetnego 99A.

Analiza zmian mocy w funkcji objętości usuwanego materiału wskazuje, że najmniejsze i stałe zapotrzebowanie na moc wykazują ściernice z ziarnami typu SG w strefie szlifowania zgrubnego. Natomiast wyniki pomiarów błędów kształtu narzędzi ściernych ujawniają zdolność do odnawiania ich czynnej powierzchni, wynikającą z zastosowanego spoiwa szklanokryształicznego.

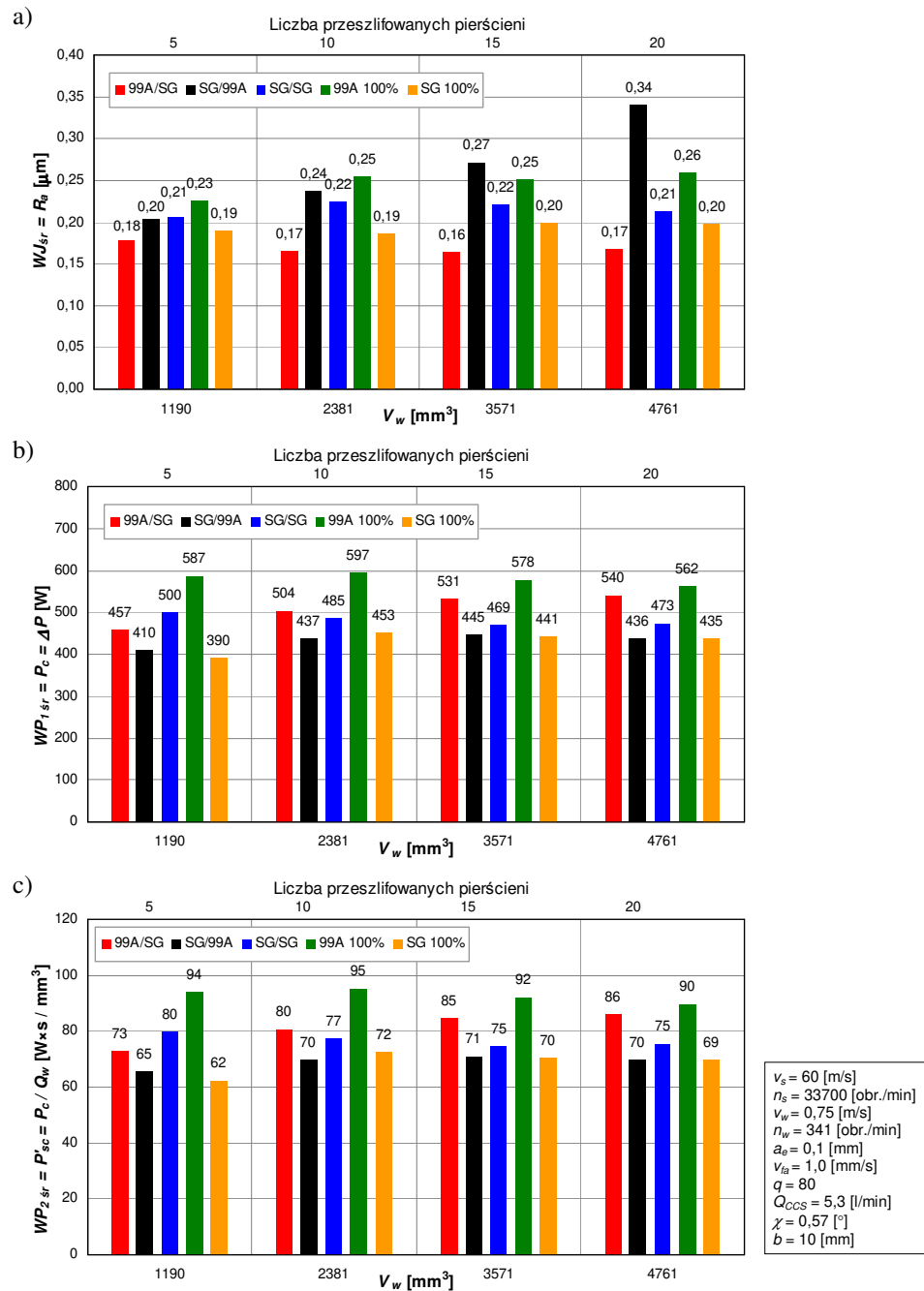
5.8.9 Ocena efektywności szlifowania

Porównując wartości wskaźnika jakościowego (R_a) pięciu badanych narzędzi ściernych, wyznaczone jako średnia pomiarów wszystkich 20 obrobionych pierścieni, można zauważyć, że najmniejszą chropowatością odznaczają się przedmioty szlifowane ściernicą 99A/SG, SG/SG i SG 100% (rys. 5-72a). Pozostałe narzędzia ściernie z ziarnami elektrokorundu szlachetnego w strefie szlifowania wykończeniowego (SG/99A i 99A 100%), kształtują powierzchnie o większym średnim arytmetycznym odchyleniu profilu.

Wskaźnik wydajnościowy ($WW=Q_w$) w części badań rozpoznawczych dotyczących zużycia narzędzi ściernych dla przyjętych parametrów obróbki pozostawał na niezmiennym poziomie i wynosił $Q_w=6,26 \text{ mm}^3/\text{s}$.

Z wykresów zmian wskaźników przebiegu szlifowania WP_1 i WP_2 (rys. 5-72b, c) wynika, że najniższym zapotrzebowaniem na moc odznaczał się proces prowadzony ściernicą SG/99A, SG/SG oraz SG 100%. Wszystkie wymienione narzędzia ściernie charakteryzowały się strefą szlifowania zgrubnego zbudowaną z ziaren SG.

Analiza wykresów z rys. 5-72 pozwala wytypować ściernice SG/SG oraz SG 100% jako narzędzia zapewniające uzyskanie niskich wartości chropowatości przedmiotów szlifowanych przy relatywnie niskiej mocy szlifowania. Ściernica 99A/SG, która zapewnia najniższą wartość wskaźnika jakościowego (oznaczającą wynik najbardziej korzystny dla tego kryterium), jednocześnie wykazała się o 24% wyższym poborem mocy w porównaniu do najlepszego narzędzia SG 100%. Dla tego samego kryterium wynik ściernicy SG/SG był wyższy tylko o 9%. Także w przypadku narzędzia ściernego SG/99A, korzystnej wartości mocy szlifowania nie towarzyszy niska chropowatość powierzchni szlifowanej ($R_{a\text{sr}}$ największe wśród badanych ściernic i aż dwa razy większe niż dla narzędzia 99A/SG).

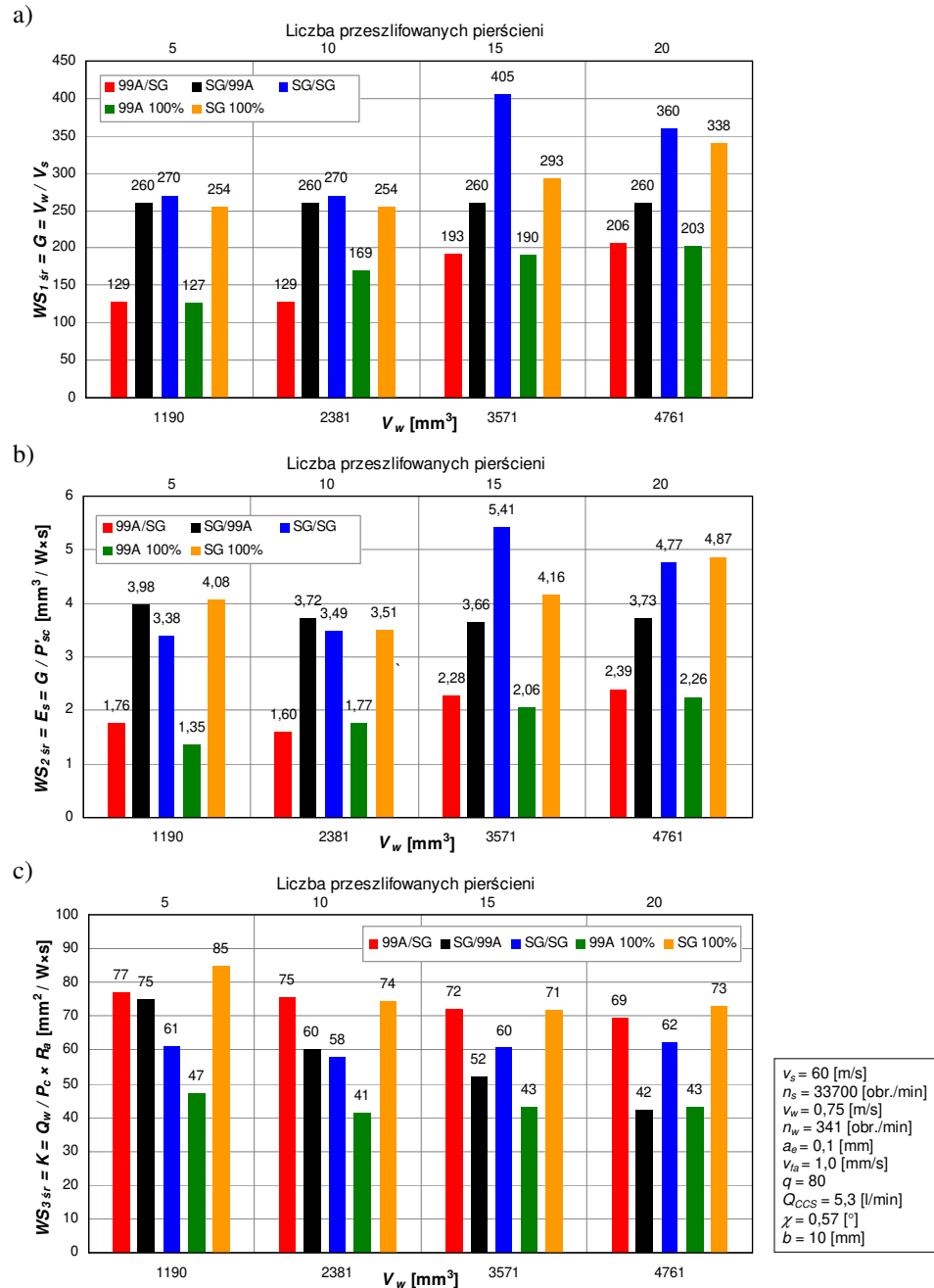


Rys. 5-72. Zmiany wartości średnich kryteriów oceny efektywności szlifowania w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) WJ – średnie arytmetyczne odchylenia profilu R_a ; b) WP_1 – przyrost mocy szlifowania ΔP ; c) WP_2 – właściwa moc czynna szlifowania P'_{sc}

Wyraźnie najlepszą wartość średnią pierwszego wskaźnika syntetycznego $WS_1=G$ po usunięciu 4761 mm^3 materiału obrabianego zapewniła ściernica SG/SG oraz SG 100% (rys. 5-73a). Dowodzi to przewagi ziaren korundu spiekane nad tradycyjnym ścierniwem elektrokorundowym. Specyficzny sposób pracy mikrokrystalicznego korundu spiekane zapewnił ściernicom zbudowanym wyłącznie z tego rodzaju ziaren najniższe zużycie objętościowe V_s i w efekcie najkorzystniejszą wartość wskaźnika G .

Wykresy zmiany kolejnego wskaźnika syntetycznego $WS_2=E_s$ również wskazują na ściernicę SG/SG oraz SG 100% jako narzędzie zapewniające najwyższy poziom tego kryterium (rys. 5-73b). Szczególnie widoczne jest to po przeszlifowaniu 20 pierścieni i usunięciu materiału obrabianego o objętości $V_w=4761 \text{ mm}^3$. Efektywność mniejszą o 33%

zapewniła ściernica SG/99A, a dwukrotnie niższy poziom E_s uzyskały narzędzia ściernie 99A/SG i 99A 100%. Tak niskie wartości dla narzędzi, w których w strefie szlifowania zgrubnego znajdowały się ziarna 99A, wynikają z ich mniejszej, w porównaniu do ziaren SG, odporności na zużycie objętościowe V_s (rys. 5-73a) oraz z większego poboru mocy w trakcie szlifowania (rys. 5-72b).



Rys. 5-73. Zmiany wartości średnich kryteriów syntetycznych oceny efektywności szlifowania w funkcji objętości usuwanego materiału V_w : a) WS_1 – wskaźnik szlifowania G ; b) WS_2 – efektywność szlifowania E_s ; c) WS_3 – wskaźnik zdolności skrawnej K

Nieco inaczej kształtują się wyniki średnich wartości syntetycznego wskaźnika zdolności skrawnej K uzyskane po przeszlifowaniu 20 pierścieni (rys. 5-73c). Przy stałej wydajności ubytkowej Q_w na wartość wskaźnika K wpłynęła uzyskana chropowatość powierzchni przedmiotu oraz pobór mocy szlifowania. W efekcie najkorzystniejszy wynik zapewniła ściernica SG 100% oraz 99A/SG. Narzędzie ściernie SG/SG uzyskało wartość

niższą od najlepszego wyniku o 15%, a kolejne dwie ściernice o 42%. Wysoka wartość wskaźnika K dla narzędzi SG 100% i SG/SG jest wynikiem generowania powierzchni o chropowatości rzędu $R_a=0,2 \mu\text{m}$ (rys. 5-72a) i najmniejszej mocy szlifowania – odpowiednio 435 i 473 W (rys. 5-72b). Natomiast korzystny wynik narzędzia ściernego 99A/SG, mimo wyższej w odniesieniu do dwóch ww. ściernic mocy szlifowania ($\Delta P=540 \text{ W}$), był skutkiem najniższej w zestawieniu wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu ($R_a=0,17 \mu\text{m}$).

Ze sporządzonych wykresów zmian poszczególnych kryteriów oceny efektywności szlifowania (rys. 5-72 i 5-73) wynika, że spośród narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie najkorzystniejsze wyniki zapewnia ściernica SG/SG. Jej zastosowanie pozwoliło uzyskać powierzchnie o niskiej chropowatości przy relatywnie niewielkim poborze mocy i najmniejszym zużyciu objętościowym (najwyższa wartość $WS_1=G$ i $WS_2=E_s$). Jedynie w przypadku syntetycznego wskaźnika zdolności skrawnej $WS_3=K$ wynik ściernicy 99A/SG był o 11% wyższy, co wynikało z mniejszej chropowatości powierzchni przedmiotów obrobionych tym narzędziem. Narzędzie to uzyskało jednak o 43% gorszą wartość wskaźnika szlifowania G i aż o połowę niższą efektywność szlifowania E_s .

Odnosząc uzyskane wyniki do ściernic pozbawionych strefowo zróżnicowanej budowy, należy stwierdzić, że przy zastosowaniu ściernicy 99A 100% otrzymano najmniej korzystne wartości niemal wszystkich opisywanych kryteriów. Jedynie w przypadku wskaźnika jakościowego gorszym rezultatem wykazało się narzędzie SG/99A. Oznacza to, że ściernica zbudowana wyłącznie z ziaren elektrokorundu szlachetnego nie jest w stanie zapewnić równie wysokiej efektywności realizacji badanego procesu co pozostałe narzędzia ściernic. Natomiast ściernica SG 100% odznaczała się równie dobrymi wynikami co strefowo zróżnicowane narzędzie ściernic SG/SG.

5.9 Wnioski z badań rozpoznawczych

Wyniki badań rozpoznawczych pozwoliły na określenie wartości parametrów jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie, przy których możliwe jest uzyskanie najmniejszej chropowatości obrabianych powierzchni oraz niskiego wydatku mocy przy usuwaniu zadanej warstwy materiału. Stanowiły również podstawę do określenia najlepszego, ze względu na mierzone rezultaty obróbki, rodzaju ziarna w każdej ze stref nowo opracowanych ściernic.

Prędkości v_s i v_w

Analiza sporządzonych wykresów zmian poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni (R_a , R_z , S_m , Δ_a , SCGC) oraz mocy szlifowania pozwoliła określić najkorzystniejsze wartości prędkości obwodowej narzędzia ściernego ($v_s=60 \text{ m/s}$) i przedmiotu obrabianego ($v_w=0,8 \text{ m/s}$). Wyniki badań wpływu v_s na chropowatość powierzchni po szlifowaniu ujawniają możliwość uzyskiwania bardziej gładkich powierzchni przy zastosowaniu ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie (rys. 5-32 i 5-33). Jednak wykresy sporządzone dla badań wpływu zmian pozostałych parametrów szlifowania (v_w , a_e , v_{fa} , χ) na chropowatość obrobionych powierzchni nie potwierdziły tej tendencji (rys. 5-36, 5-37, 5-40, 5-41, 5-44, 5-45 oraz 5-48 i 5-50). Wynika z tego, że przy zastosowanych parametrach i warunkach szlifowania nie ujawnił się jednoznaczny wpływ stosowania strefy szlifowania wykończeniowej zbudowanej z ziaren o mniejszej wielkości na parametry opisujące chropowatość powierzchni po obróbce.

Styk roboczy a_e i posuw osiowy stołu v_{fa}

Badania wpływu zmian wartości styku roboczego oraz prędkości posuwu osiowego stołu, wielkości decydujących o wydajności ubytkowej rozpatrywanego procesu, wykazały możliwość intensyfikacji obróbki za pomocą tych wielkości. Przyjęte w badaniach rozpoznawczych jako bezpieczne wartości $a_e=0,1$ mm i $v_{fa}=1,0$ mm/s, mogą być w badaniach właściwych zwiększane przy zastosowaniu narzędzi ściernych zbudowanych z ziaren korundu spiekanego. Ograniczeniem jest tutaj moc konieczna do realizacji zadania obróbkowego. W przypadku ściernic z ziarnami elektrokorundu szlachetnego, pobór mocy kształtował się na wyraźnie wyższym poziomie (rys. 5-43 i 5-47), przez co do dalszych badań wytypowano narzędzia ścierne wykonane wyłącznie z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego, tj. SG/SG oraz SG 100%, jako odniesienie do wyników uzyskanych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie.

Parametry nakroju stożkowego χ i b

Zmierzone parametry chropowatości obrobionych powierzchni oraz moc szlifowania wskazały jednoznacznie na poprawę warunków realizacji badanego procesu wraz ze zmniejszaniem wartości kąta nakroju stożkowego ściernicy (rys. 5-48 ÷ 5-51). Równomierne rozłożenie naddatku obróbkowego na większej powierzchni szerszego nakroju stożkowego pozwoliło na bardziej efektywne usuwanie materiału w strefie szlifowania zgrubnego i mimo skrócenia walcowej części ściernicy, wpłynęło na poprawę gładkości szlifowanych powierzchni. Jednocześnie modyfikacja parametrów nakroju nie wpłynęła znacząco na moc szlifowania. Uzyskane wyniki były podstawą do określenia szerokości nakroju stożkowego wykonywanego na czynnej powierzchni narzędzi ściernych podczas badań właściwych. Przyjęto, że szerokość nakroju będzie równa 90% szerokości strefy szlifowania zgrubnego $b=0,9 \cdot T_1$. Taka wartość pozwala na maksymalne wykorzystanie szerokości strefy ściernicy skonstruowanej z myślą o intensywnym usuwaniu materiału oraz pozostawia margines na przesuwanie się końca nakroju w kierunku części walcowej, spowodowanego postępującym zużyciem ściernicy. Ostateczna wartość kąta nakroju χ wynikać będzie z szerokości nakroju b i wielkości styku roboczego a_e .

Temperatura Θ_p

Porównanie temperatury zmierzonej w trakcie jednoprzęściowego szlifowania otworów wybranymi narzędziami ściernymi wykazało, że najmniejsza ilość ciepła generowana jest podczas obróbki ściernicą zbudowaną z ziaren SG o rozmiarze 46. Zmniejszenie wielkości ziaren SG do 60 spowodowało wzrost zarejestrowanej temperatury, podobnie jak zastosowanie ściernicy wykonanej z 99A, mimo dużej wielkości ziaren – 46. Zarejestrowane termogramy pozwalają sądzić, że zastosowanie ziaren SG o rozmiarze 46 w strefie szlifowania zgrubnego, pozwala uniknąć defektów cieplnych szlifowanych powierzchni (np. przypaleń szlifierskich).

Parametry kształtowania CPS

Ze zrealizowanych badań wpływu parametrów obciążania wynika, że istnieje możliwość dostosowania stanu poszczególnych stref funkcjonalnych CPS do realizowanych przez nie typów obróbki. Przy prędkości obwodowej ściernicy $v_{sd}=10$ m/s oraz zastosowaniu prędkości kształtowania strefy stożkowej na poziomie $v_{fad(stożek)}=280$ mm/s ($k_d=2,75$), uzyskano znaczną redukcję mocy szlifowania przy niewielkim wzroście chropowatości powierzchni szlifowanej. Natomiast najkorzystniejsze wartości parametrów opisujących chropowatość przedmiotu obrobionego uzyskano dzięki starannie wyrównanej i naostrzonej

powierzchni strefy walcowej narzędzia ściernego, otrzymanej przy zastosowaniu niewielkiej prędkości posuwu obciążacza $v_{fad} (walec) = 10 \text{ mm/s}$ ($k_d = 0,10$).

Zużycie narzędzi ściernych

Analiza zmian parametrów opisujących chropowatość powierzchni szlifowanych w trakcie badań trwałości narzędzi ściernych ujawnia niestabilną pracę ściernicy SG/99A przejawiającą się znacznym wzrostem parametrów R_a i R_z po przekroczeniu $V_w = 3095 \text{ mm}^3$ (czyli po przeszlifowaniu 13 pierścieni) – rys. 5-62. Najbardziej gładkie powierzchnie uzyskano z zastosowaniem ściernic z ziarnami SG w strefie wygładzającej. Na uwagę zasługuje fakt, że różnice w chropowatości uzyskiwanej ww. ściernicami, w porównaniu do pozostałych narzędzi ściernych (SG/99A i 99A 100%), zwiększają się wraz z rosnącą objętością usuniętego materiału (rys. 5-54 i 5-55). Narzędzia ściernic z ziarnami elektrokorundu szlachetnego odznaczały się również większym zapotrzebowaniem na moc w badanym procesie (rys. 5-65). Zarejestrowane zmiany błędów kształtu w trakcie szlifowania kolejnych przedmiotów ujawniły zdecydowany wzrost wartości Δ i rms w przypadku ściernicy 99A/SG (rys. 5-71). Nie wydaje się jednak zasadnym obciążanie za ten stan rzeczy zastosowanego w strefie szlifowania zgrubnego ziarna 99A, ponieważ wyniki te nie powtórzyły się w przypadku ściernicy 99A 100%. Zmiany błędów kształtu pozostałych narzędzi ściernych kształtowały się na zbliżonym niskim poziomie, co było w głównej mierze skutkiem zastosowania spoiwa szklanokrystalicznego zapewniającego samoostrzenie CPS.

Ocena efektywności szlifowania

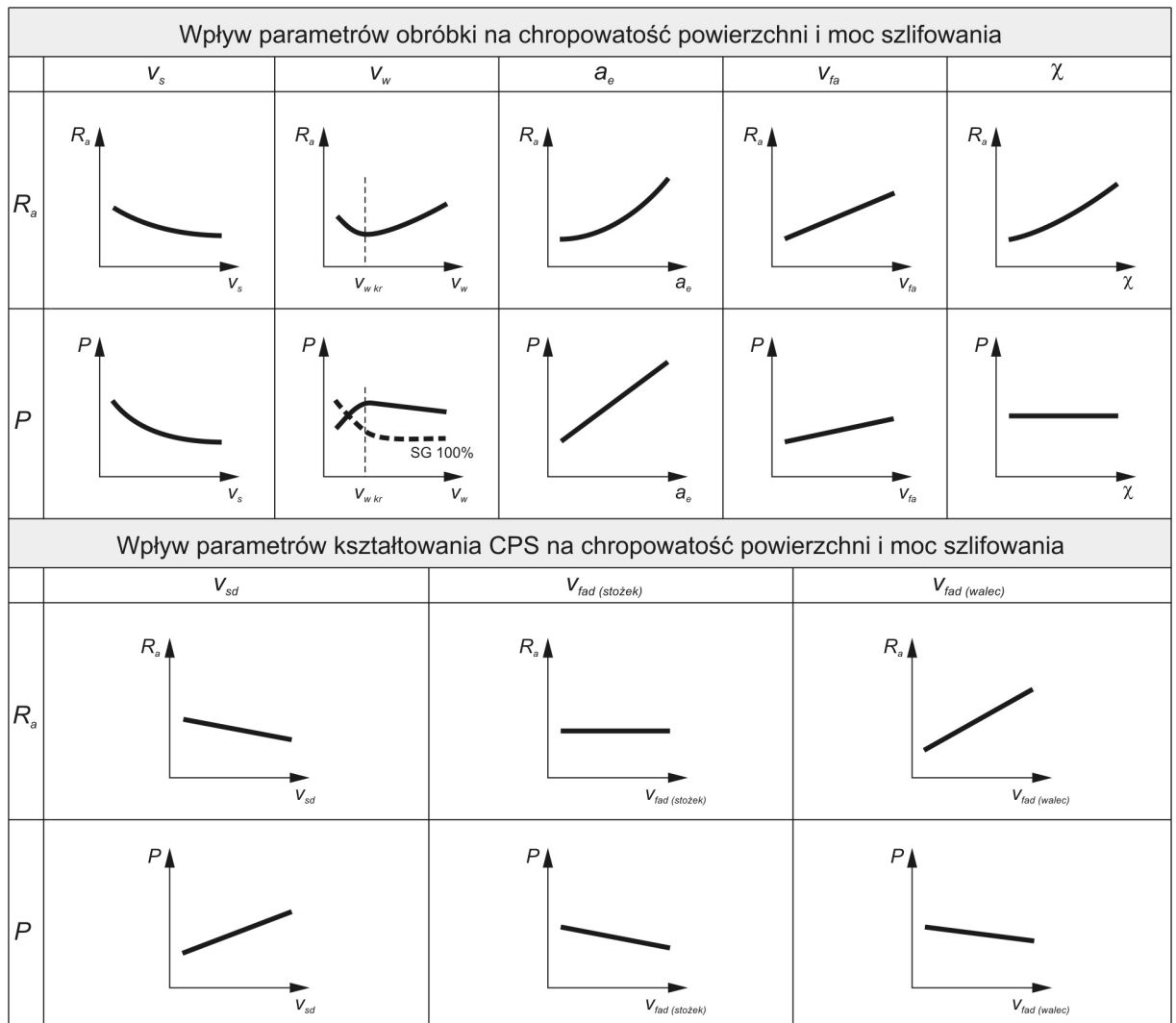
Z analizy uzyskanych wartości wskaźników oceny efektywności badanego procesu szlifowania wynika, że ściernice SG/SG i SG 100% zapewniają najwyższe, spośród badanych narzędzi, wartości wyznaczonych kryteriów (rys. 5-72, 5-73). Realizacja szlifowania jednoprzęściowego z zastosowaniem wymienionych ściernic pozwoliła na uzyskanie niskiej chropowatości obrobionych powierzchni, przy stosunkowo małym wydatku mocy i najmniejszym zużyciu objętościowym, przekładającym się na wysokie wartości wskaźnika szlifowania G .

Podsumowanie badań rozpoznawczych i wytyczenie zakresu badań właściwych

Poniżej wymieniono najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań rozpoznawczych:

- uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu poszczególnych wielkości nastawczych badanego procesu na jego efekty i wyznaczenie najkorzystniejszych wartości podstawowych parametrów szlifowania ($v_s = 60 \text{ m/s}$, $v_w = 0,8 \text{ m/s}$, $b = 0,9 \cdot T_1$) oraz kształtowania CPS ($v_{sd} = 10 \text{ m/s}$, $v_{fad} (stożek) = 280 \text{ mm/s}$, $v_{fad} (walec) = 10 \text{ mm/s}$), a także określenie kierunku poszukiwań pozostałych czynników (a_e , v_{fa});
- w trakcie badań ustalono, że najbardziej korzystne wyniki badanego procesu obróbkowego (chropowatość powierzchni obrobionej, moc, temperaturę, zużycie i efektywność szlifowania) można otrzymać przy zastosowaniu ściernicy zbudowanej z ziaren korundu spiekane (SG), zarówno w strefie szlifowania zgrubnego, jak i wykończeniowego;
- zastosowanie ściernicy SG 100% zapewniło otrzymanie porównywalnie dobrych efektów jak w przypadku narzędzia SG/SG, dlatego ściernica pozbawiona drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego powinna w badaniach właściwych stanowić odniesienie dla narzędzi o strefowo zróżnicowanej budowie.

Zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników badań rozpoznawczych procesu jednoprzęciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie przedstawiono na rys. 5-74 i 5-75.



Rys. 5-74. Zestawienie uzyskanych wyników badań rozpoznawczych procesu jednoprzęciowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

Wpływ rodzaju ziarna w strefie szlifowania zgrubnego i wykończeniowego narzędzia ściernego na efekty realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych					
R_a ↗	99A		99A	R_a ↗	
P ↗				P ⇐	
Θ_p ↗				Θ_p ↗	
Δ ⇐				Δ ⇐	
E_s ↘				E_s ↘	
R_a ↘	SG		SG	R_a ↘	
P ↘				P ⇐	
Θ_p ↘				Θ_p ↘	
Δ ⇐				Δ ⇐	
E_s ↗				E_s ↗	

Rys. 5-75. Zestawienie wyników badań rozpoznawczych – wpływ rodzaju ziarna w poszczególnych strefach funkcjonalnych narzędzi ściernych

Szeroki zakres przeprowadzonego rozpoznania umożliwił wyznaczenie kierunku dalszych prac, w których skupiono się na:

- wyznaczeniu wpływu zróżnicowania wielkości ziarna ściernego w strefie szlifowania wykończeniowego ściernicy – do badań właściwych włączono ściernice z ziarnem SG wielkości 60 w walcowej strefie wykończeniowej, w celu porównania ze stworzonym na potrzeby badań rozpoznawczych narzędziem ściernym z ziarnem wielkości 80;
- określeniu wpływu udziału procentowego poszczególnych stref narzędzia ściernego T_1/T_2 – niskie wartości uzyskiwanych parametrów opisujących chropowatość szlifowanych w badaniach rozpoznawczych powierzchni były podstawą do włączenia w zakres badań właściwych narzędzi ściernych o mniejszym udziale strefy szlifowania wykończeniowego $T_1/T_2=80/20$ i porównaniu ich z już opracowanymi ściernicami o udziale $T_1/T_2=70/30$;
- zbadaniu możliwości wzrostu wydajności ubytkowej szlifowania Q_w poprzez zwiększanie wartości parametrów a_e i v_{fa} ;
- porównanie efektów realizacji badanego procesu z zastosowaniem ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie i narzędzi ściernych pozbawionych drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego;
- wyznaczenie modeli matematycznych opisujących zmiany mocy szlifowania oraz chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego w jednoprzęściowym procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie;
- wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie;

5.10 Wyniki badań właściwych i ich analiza

Na podstawie wyników badań rozpoznawczych ustalono plan i zakres badań właściwych przeprowadzonych z wykorzystaniem narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie, skonstruowanych na bazie ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego.

5.10.1 Wpływ zmiany styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego v_{fa}

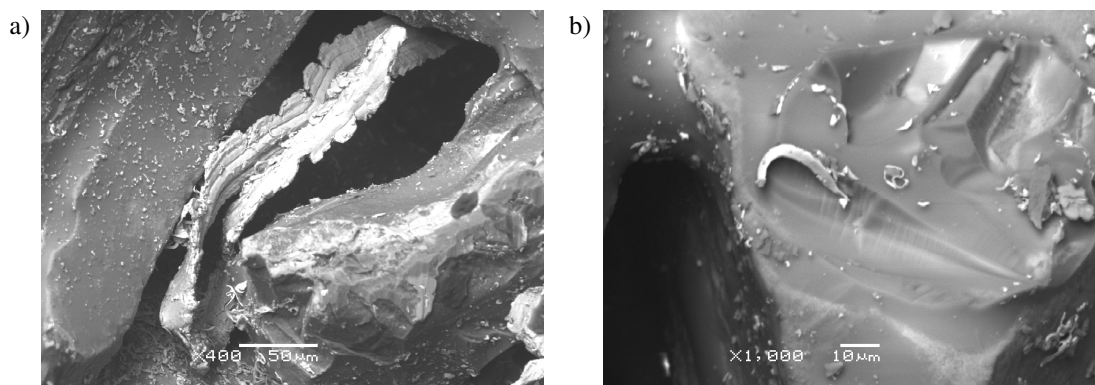
Badania rozpoznawcze pozwoliły ustalić rodzaj ziarna ściernego w poszczególnych strefach funkcjonalnych ściernicy, zapewniający najkorzystniejsze rezultaty badanego procesu. Jednocześnie ustalono w nich warunki zarówno szlifowania, jak i kształtowania CPS, umożliwiające jak najpełniejsze wykorzystanie zdolności skrawnej nowo opracowanych narzędzi ściernych. Jednak w tych eksperymentach wydajność ubytkowa szlifowania pozostawała na relatywnie niskim poziomie ($Q_w=6,26 \text{ mm}^3/\text{s}$). Jednym z celów badań właściwych było ustalenie wpływu zwiększenia wartości styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego v_{fa} (które bezpośrednio odpowiadają za wydajność ubytkową – rys. 5-88) na przebieg i wyniki procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie.

Badania właściwe zrealizowane zostały w oparciu o trójpoziomowy plan eksperymentu, umożliwiający wyznaczenie modelu nieliniowego stopnia drugiego. Spośród pięciu klas modelu matematycznego obiektu badań (MMOB), które udostępniła zastosowane oprogramowanie *Experiment Planner 1.0*, wybrano funkcję opisującą zarejestrowane wyniki z największym dopasowaniem. Analizę stopnia zgodności poszczególnych klas modeli przeprowadzono równolegle dla zmierzonych parametrów chropowatości oraz mocy szlifowania i zamieszczono w załączniku (punkt Z.3). W rezultacie ustalono, że chropowatość powierzchni obrobionej najlepiej opisuje model wykładniczy (za kryterium przyjęto współczynnik korelacji wielowymiarowej R). Natomiast z porównania modeli opisujących pobór mocy szlifowania wynika, że najwyższy stopień dopasowania wykazuje funkcja wielomianowa.

Parametry chropowatości powierzchni obrobionej

Wykresy zmian parametrów opisujących wysokościowe cechy profilu chropowatości powierzchni obrobionej R_a i R_z (tab. 5-V i 5-VI) wskazują, że najniższe wartości osiągają ściernice z większym, wynoszącym 30%, udziałem strefy szlifowania wykończeniowego. Przewaga tych narzędzi jest szczególnie widoczna dla małych wartości styku roboczego i posuwu osiowego.

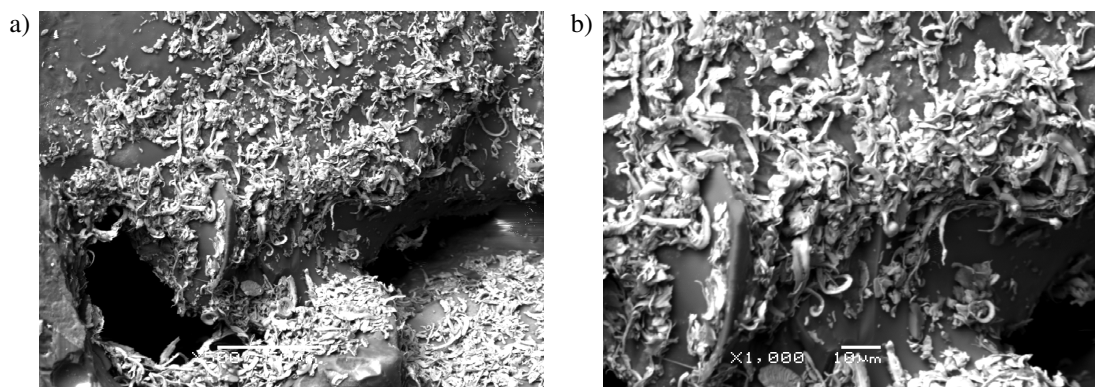
Najniższą wartość R_a i R_z zapewniła ściernica 46/80-30%, co tłumaczyć należy dużą ilością mikrowierzchołków skrawających w strefie szlifowania wykończeniowego zbudowanej z ziaren wielkości 80. Powierzchnia wygenerowana przez część stożkową takiej ściernicy zostaje ostatecznie wykończona i wyiskrzona 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. 5-76).



Rys. 5-76. Porównanie wielkości wiórów zaobserwowanych na czynnej powierzchni ściernicy 46/80-30%:
a) strefa szlifowania zgrubnego (pow. 400x); b) strefa szlifowania wykończeniowego (pow. 1000x)

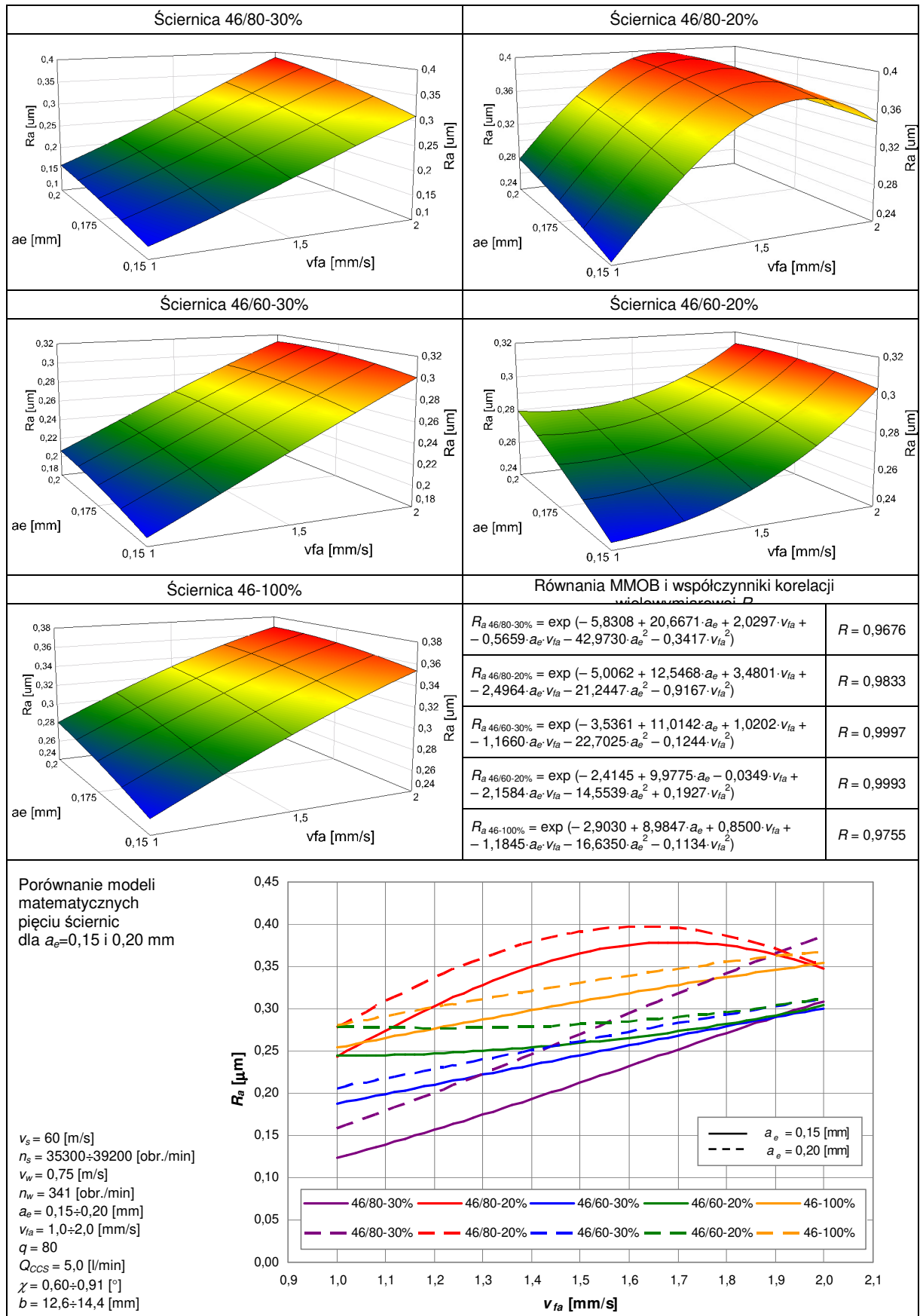
W rezultacie przy mniejszych wydajnościach ubytkowych, kształtowana jest powierzchnia charakteryzująca się nawet dwukrotnie mniejszymi wartościami parametrów R_a i R_z w porównaniu do narzędzia ściernego zbudowanego w całości z ziaren o wielkości 46.

Nieco większą chropowatość, w zakresie niskich wartości v_{fa} , uzyskano, stosując ściernicę 46/60-30%. Narzędzie to okazało się mniej wrażliwe 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 mm³/s (dla $a_e=0,20$ mm, $v_{fa}=2,0$ mm/s) spowodował jedynie około 30% wzrost parametrów wysokościowych chropowatości 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. 5-77).

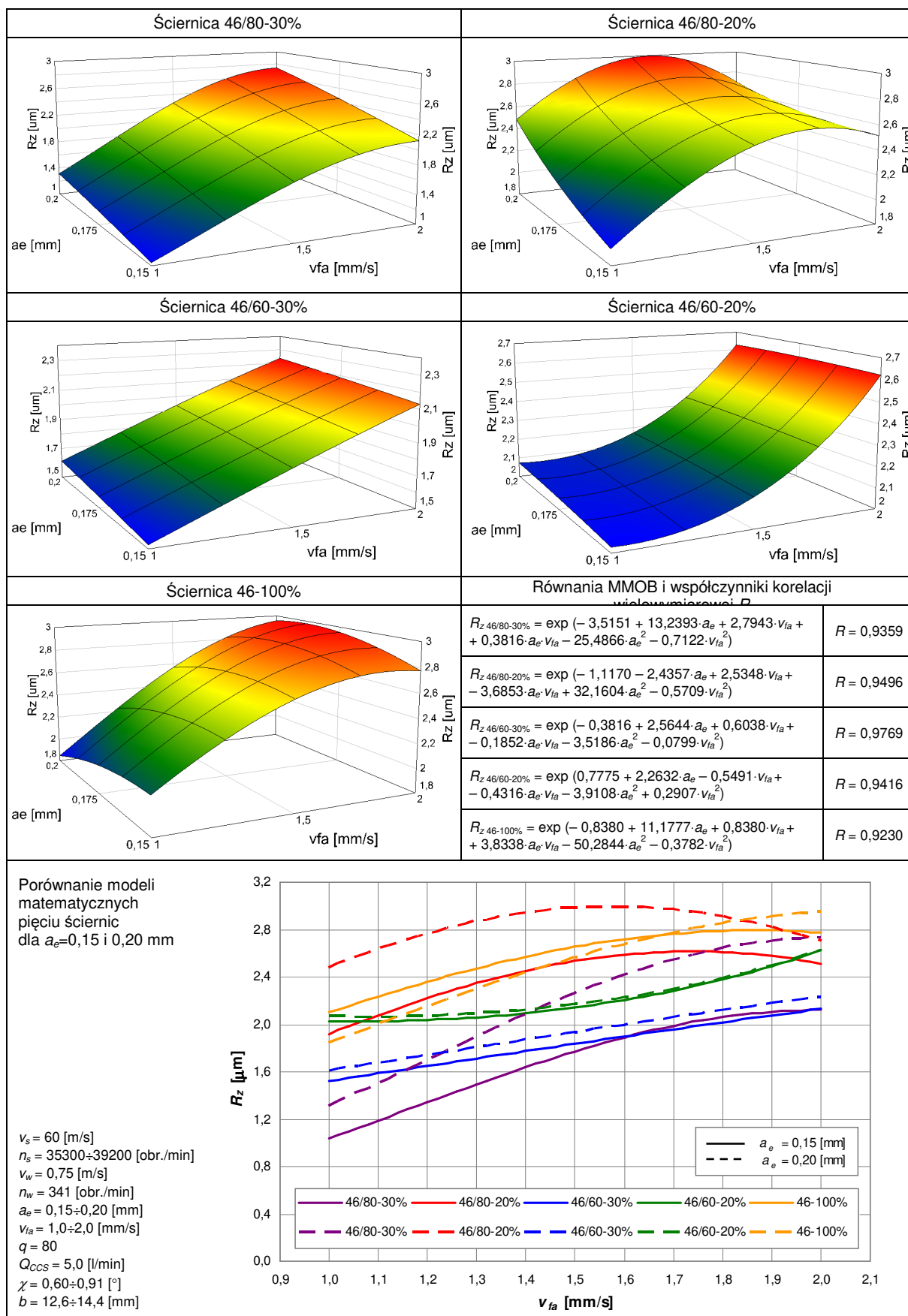


Rys. 5-77. Obrazy wiórów zaobserwowane na czynnej powierzchni strefy szlifowania wykończeniowego ściernicy 46/60-30%: a) powiększenie 500x; b) powiększenie 1000x

Tablica 5-V. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego R_a w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}



Tablica 5-VI. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany wysokości profilu chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wg 10 punktów R_z w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}



Jeszcze mniejszą zmienność zarejestrowano dla drugiej ściernicy z ziarnem wielkości 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 i wzrost przekroju warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem, przez co tworzą się większe wióry i wzrasta chropowatość obrobionej powierzchni.

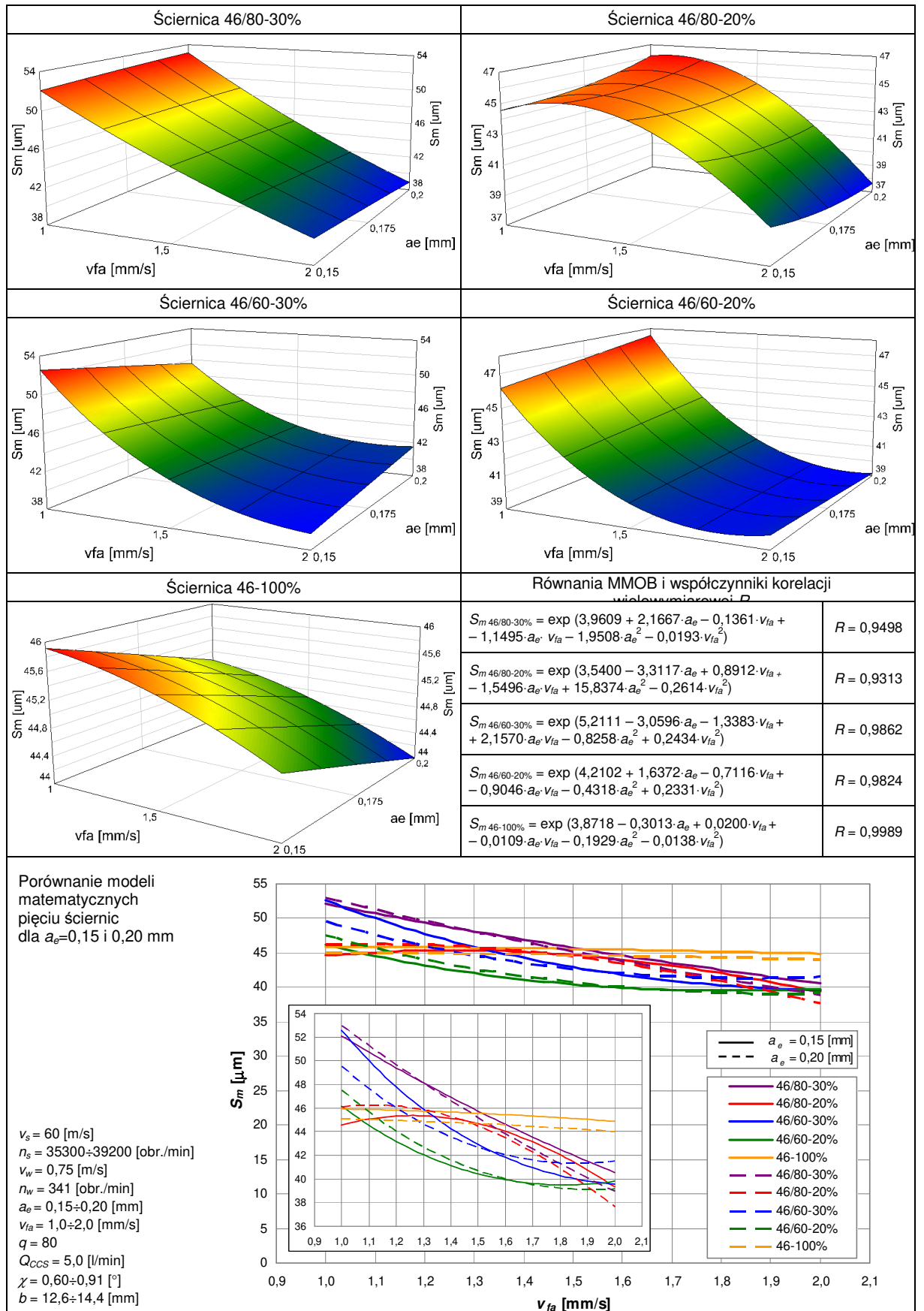
Największe wartości parametrów R_a i R_z spośród przebadanych narzędzi odnotowano dla powierzchni szlifowanych ściernicą 46/80-20%. Wyniki pomiarów były gorsze nawet od narzędzia ściernego 46-100%, które z założenia stanowić miało odniesienie dla ściernic, w których zastosowano strefowe zróżnicowanie budowy w celu obniżenia chropowatości powierzchni obrobionej. 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 MMOB. 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.

Podsumowując uzyskane wyniki zmian wartości parametrów R_a i R_z , należy stwierdzić, że największy wpływ na parametry wysokościowe profilu chropowatości PO 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 ściernic 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 R_a i R_z zmierzone po szlifowaniu z prędkością posuwu osiowego wynoszącą 1,0 mm/s, widać podział na dwie grupy ściernic. Niższe wartości uzyskiwały narzędzia z 30% strefą T_2 , natomiast pozostałe ściernice kształtowały powierzchnie o większej chropowatości. W przypadku dwóch narzędzi z wyższą strefą walcową (46/80-30% i 46/60-30%), o chropowatości decydowała wielkość ziarna w tej części ściernicy.

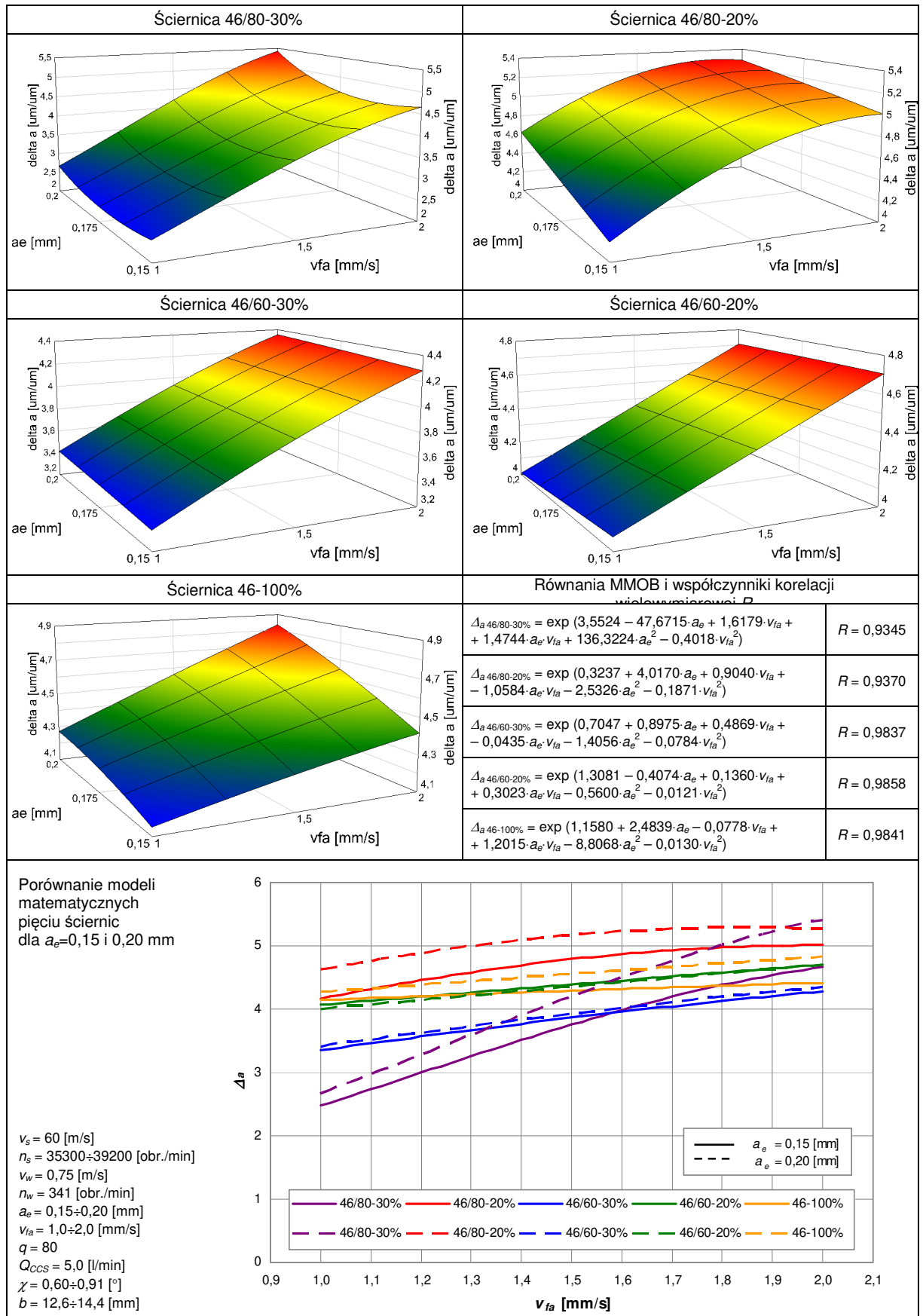
Opisanym tendencjom zmian wartości parametrów wysokościowych profilu chropowatości PO odpowiadały przebiegi średniego rozstępu wierzchołków profilu chropowatości S_m (tab. 5-VII). Dla wszystkich narzędzi ściernych zanotowano nieznaczny spadek wartości parametru S_m , który odpowiada większej powierzchniowej gęstości wierzchołków, czyli większemu rozwinięciu otrzymanej 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 R_a i R_z towarzyszy spadek S_m .

Kolejne zestawienie (tab. 5-VIII) prezentuje zmiany średniego pochylenia profilu chropowatości Δ_a w funkcji styku roboczego i prędkości posuwu osiowego. Parametr ten wykazuje trendy wzrostowe wraz ze zwiększaniem a_e i v_{fa} , a położenie linii poszczególnych narzędzi ściernych odpowiada wynikom cech wysokościowych profili zmierzonych z powierzchni przedmiotu obrobionego.

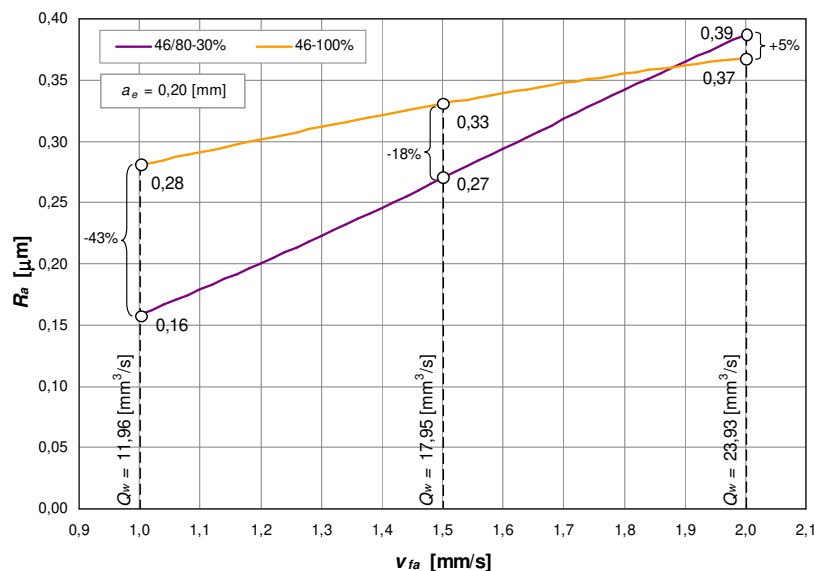
Tablica 5-VII. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany średniego odstepu profilu chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego S_m w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}



Tablica 5-VIII. Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany średniego arytmetycznego pochylenia profilu chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego Δ_a w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}

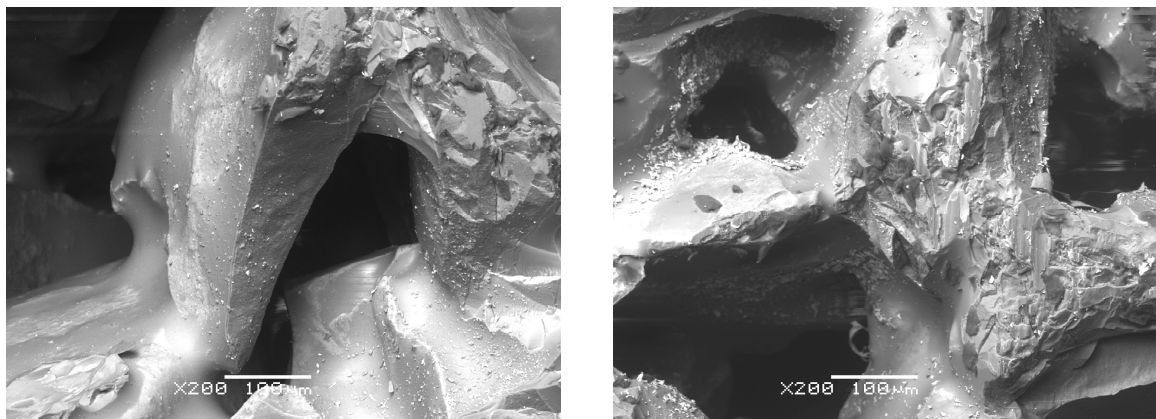


Wraz ze wzrostem wydajności ubytkowej różnice w osiągniętych chropowatościach powierzchni PO wyraźnie malały. Widoczne jest to m.in. przy porównaniu zmian średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a w funkcji prędkości posuwu v_{fa} dla $a_e=0,20$ mm. Na rys. 5-78 zestawiono wyniki dla narzędzia ściernego, którego średnia wartość R_a spośród wszystkich wyników była najniższa (46/80-30%) i ściernicy o budowie jednorodnej (46-100%).



Rys. 5-78. Porównanie zmian średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a zmierzonego po obróbce ściernicą 46/80-30% i 46-100% w funkcji prędkości posuwu v_{fa} przy styku roboczym $a_e=0,20$ mm

Wraz ze wzrostem a_e i v_{fa} wyraźnie rośnie wydajność ubytkowa szlifowania. Zwiększa się obciążenie narzędzi ściernych, które w trudnych warunkach, mimo strefowo zróżnicowanej budowy, generują coraz większe chropowatości powierzchni PO, przy czym wzrost ten jest dużo szybszy niż w przypadku ściernicy 46-100%. W efekcie, dla maksymalnej wydajności Q_w , zbliżony poziom wysokości nierówności obrabianej powierzchni osiągnąć można bez wprowadzania dodatkowej strefy w narzędziu ściernym, a jedynie stosując ziarna SG o mikrokrystalicznej budowie odznaczające się dużą ilością mikrowierzchołków. Większe rozmiary ziaren wpływają na obniżenie koncentracji ostrzy skrawających, zwiększając jednocześnie przestrzenie, w których mogą gromadzić się wióry (rys. 5-79).

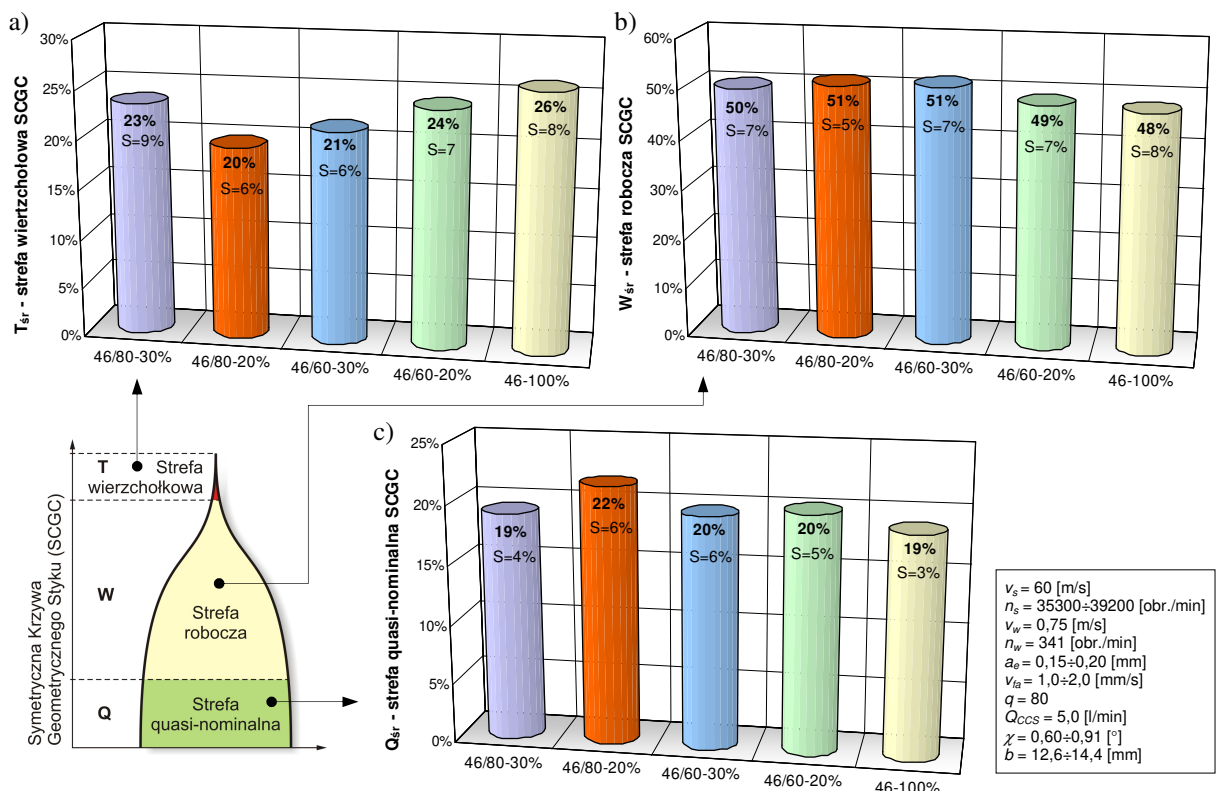


Rys. 5-79. Przykładowe widoki czynnej powierzchni ściernicy wykonanej z ziaren SG o wielkości 46 z widocznymi dużymi przestrzeniami międzyziarnowymi (pow. 200x)

Wprowadzenie strefy szlifowania wykończeniowego o wysokości 30%, zbudowanej z ziaren wielkości 80, powoduje ograniczenie udziału bardzo porowatej powierzchni narzędzia tworzonej przez ziarna 46. Pozostała część CPS nie jest w stanie równie dobrze realizować szlifowania zgrubnego, ponieważ dostosowana została do wygładzania i wyiskrzania powierzchni. Natomiast przy większych wartościach wydajności ubytkowej, na skutek zwiększonych odkształceń sprężystych OUPN, nakrój stożkowy usuwa mniejszą część całkowitego styku roboczego, pozostawiając więcej materiału do zeszlifowania przez część walcową.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na podwyższanie chropowatości obrobionych pierścieni jest malejąca wraz ze wzrostem posuwu liczba przeszlifowań U powierzchni PO 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 narzędzia ściernego v_s , powodującym podwyższenie liczby przeszlifowań, wpływ stosowania ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie byłby bardziej znaczący.

Ponieważ zmierzone wartości udziału poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku (SCGC) charakteryzowały się znacznym rozrzutem, nie dawały one podstaw do określenia zależności między nośnością powierzchni obrobionej a przyjętymi w badaniach zmiennymi wartościami parametrów szlifowania. Uśrednione wyniki przeprowadzonych pomiarów wraz z wartościami odchylenia standardowego, będącego miarą rozproszenia prezentowanych wartości, umieszczono na rys. 5-80.



Rys. 5-80. Średni udział poszczególnych stref symetrycznej krzywej geometrycznego styku SCGC i wartość odchylenia standardowego S w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}

Wynika z nich, że niezależnie od zastosowanego narzędzia, strefa wierzchołkowa T stanowiła średnio $20 \div 26\%$ SCGC. Średnie wartości udziału strefy roboczej W i quasi-nominalnej Q zarejestrowane na powierzchniach przedmiotów obrobionych badanymi

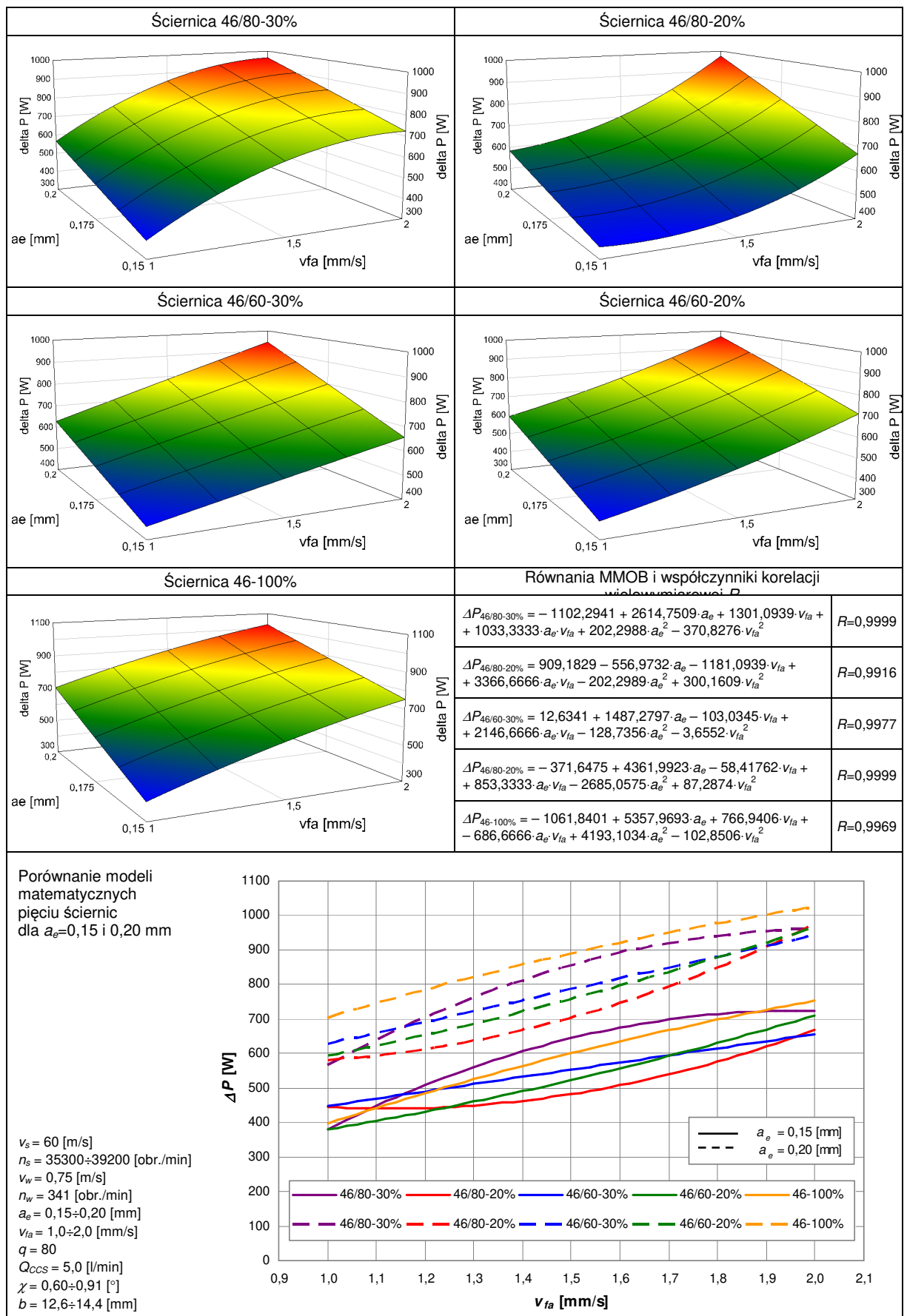
ściernicami zmieniały się w jeszcze mniejszym zakresie: $48 \div 51\%$ strefa T i $19 \div 22\%$ strefa Q. Na podstawie zmierzonych wartości można wnioskować, że udział poszczególnych stref krzywej SCGC, opisującej nośność powierzchni obrobionej, zależy przede wszystkim od zastosowanej odmiany kinematycznej procesu obróbkowego. Można zatem stwierdzić, że powierzchnie wewnętrzne pierścieni szlifowanych w procesie jednoprzęściowym ściernicami z nakrojem stożkowym charakteryzują się około 50% udziałem strefy roboczej SCGC oraz zbliżonymi wartościami udziału strefy wierzchołkowej i quasi-nominalnej. Wniosek taki wydaje się prawdziwy zarówno przy stosowaniu narzędzi ze strefą szlifowania wykończeniowego o odmiennej budowie, jak i dla ściernic w całości wykonanych z jednego ścierniwa. Uzyskane wyniki odpowiadają podawanym zaleceniom dla większości zastosowań eksploatacyjnych [KAC99]. Optymalny kształt sfery chropowatości wyrażony symetryczną krzywą geometrycznego styku powinien wg tych wytycznych charakteryzować się małymi wysokościami stref wierzchołkowej i quasi-nominalnej, a równocześnie jak najmniejszą wysokością sfery chropowatości.

Moc szlifowania

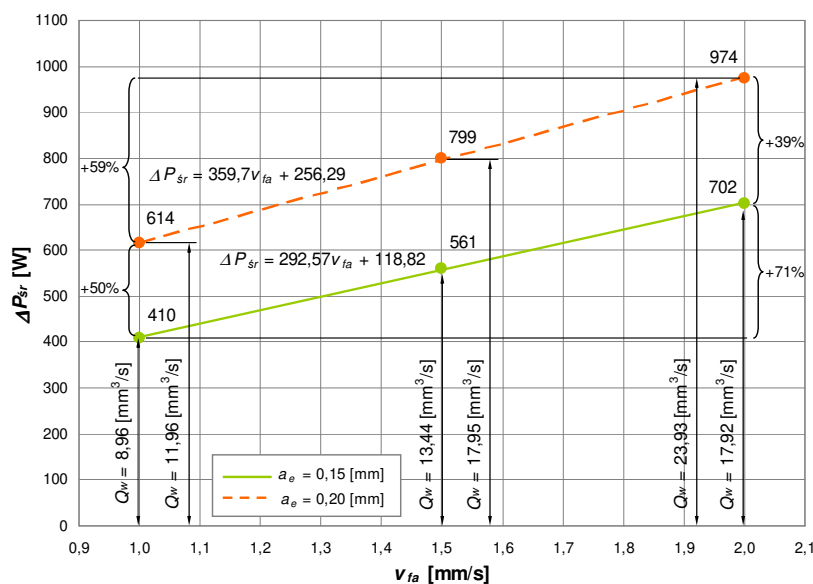
Zestawienie modeli matematycznych opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania w funkcji styku roboczego i prędkości posuwu osiowego stołu zawiera tab. 5-IX.

Z prezentowanych wyników można wywnioskować, że wszystkie ściernice wykorzystane w badaniach właściwych charakteryzowały się porównywalnym poborem mocy w trakcie realizacji zadania obróbkowego. Od rezultatów zanotowanych dla narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie nieznacznie odbiega ściernica 46-100%. Wykazuje ona zwiększone zapotrzebowanie na moc, które jest szczególnie widoczne w przypadku szlifowania z największym stykiem roboczym $a_e=0,20$ mm. Wynika to ze zwiększonych przekrojów warstw skrawanych pojedynczymi ziarnami tego narzędzia. Czynna powierzchnia tej ściernicy charakteryzuje się stosunkowo mniejszą liczbą wierzchołków skrawających, które poddawane są zwiększonym obciążeniom w trakcie procesu obróbkowego, co w efekcie powoduje wzrost mocy szlifowania.

Tablica 5-IX. Zestawienie modeli matematycznych opisujących przyrost mocy szlifowania ΔP w funkcji styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa}



Zarejestrowane zmiany zależą w głównej mierze od prędkości posuwu i głębokości szlifowania. Widać to wyraźnie na rys. 5-81, prezentującym porównanie średnich wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP , uzyskane po obróbce wszystkimi narzędziami ściernymi dla prędkości posuwu $v_{fa}=1,0; 1,5; 2,0$ mm/s oraz $a_e=0,15$ i $0,20$ mm.



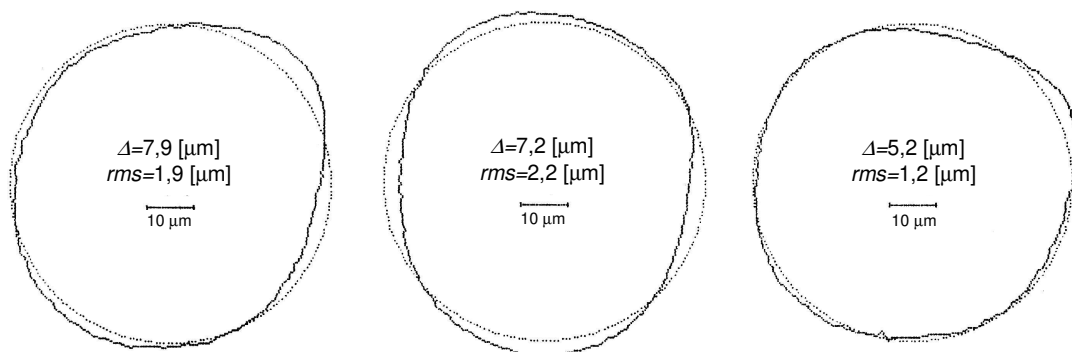
Rys. 5-81. Porównanie średnich wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP uzyskane po obróbce wszystkimi narzędziami ściernymi dla prędkości posuwu $v_{fa}=1,0; 1,5$ i $2,0$ mm/s – wyniki odpowiadające nadatkowi obróbkowemu $a_e=0,15$ i $0,20$ mm aproksymowano funkcją liniową

Wynika z niego, że zwiększenie wydajności ubytkowej Q_w o 33%, wynikające ze zmiany styku roboczego z $0,15$ 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. Spostrzeżenie to pokrywa się z zarejestrowanymi wynikami badań rozpoznawczych (punkt 5.8.3 i 5.8.4).

Z otrzymanych modeli matematycznych opisujących zmiany mocy szlifowania w funkcji a_e i v_{fa} (tab. 5-IX) wynika, że znaczącym ograniczeniem dla osiągania większych wydajności ubytkowych w badanym procesie jest wartość styku roboczego. Przyjęty w zrealizowanych próbach zakres zmienności a_e , wynoszący od $0,15$ do $0,20$ mm, odpowiada wielkości nadatku obróbkowego pozostawianego na szlifowanie w stosowanych w przemyśle procesach wytwarzania pierścieni łożysk tocznych. Dla takich zastosowań procesu jednoprzęściowego 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 narzędzi ściernych.

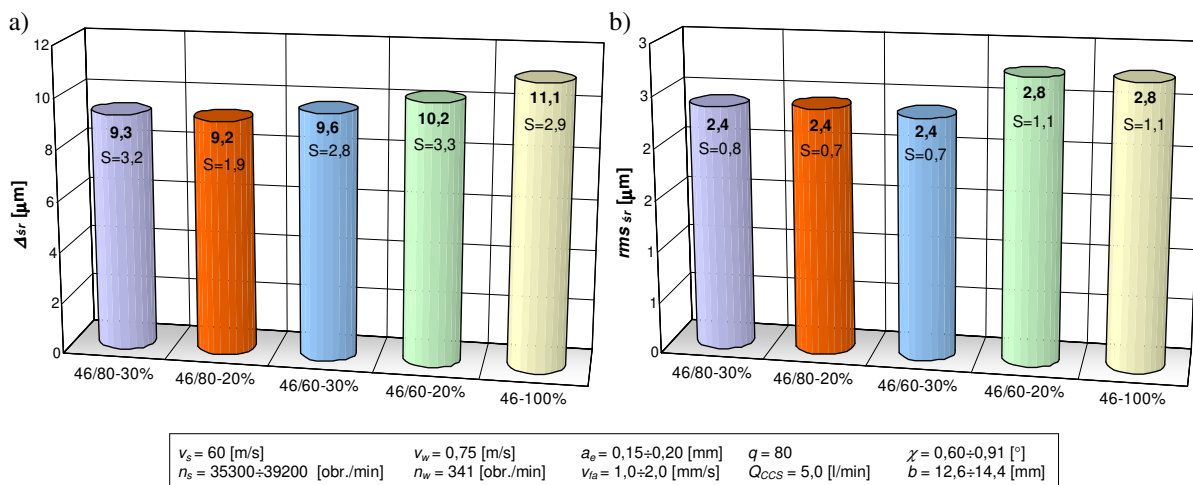
Błędy kształtu przedmiotu obrobionego

Zmierzone wartości maksymalnej odchyłki okrągłości $\Delta=P+V$ oraz średniego kwadratowego odchylenia od okręgu średniego rms (rys. 5-82), nie dają podstaw do określenia wpływu zmian parametrów szlifowania na błędy kształtu przedmiotu obrobionego w badanym procesie.



Rys. 5-82. Przykładowe zarysy obwodowe przedmiotów po szlifowaniu

O zbliżonych wartościach uzyskanych błędów kształtu przedmiotów obrobionych, niezależnie od zmian wydajności ubytkowej, decydował sposób zamocowania pierścieni (rys. 5-5). Na rys. 5-83 zestawiono uśrednione wyniki parametrów Δ i rms , zmierzone z powierzchni wewnętrznych obrobionych poszczególnymi narzędziami ściernymi.



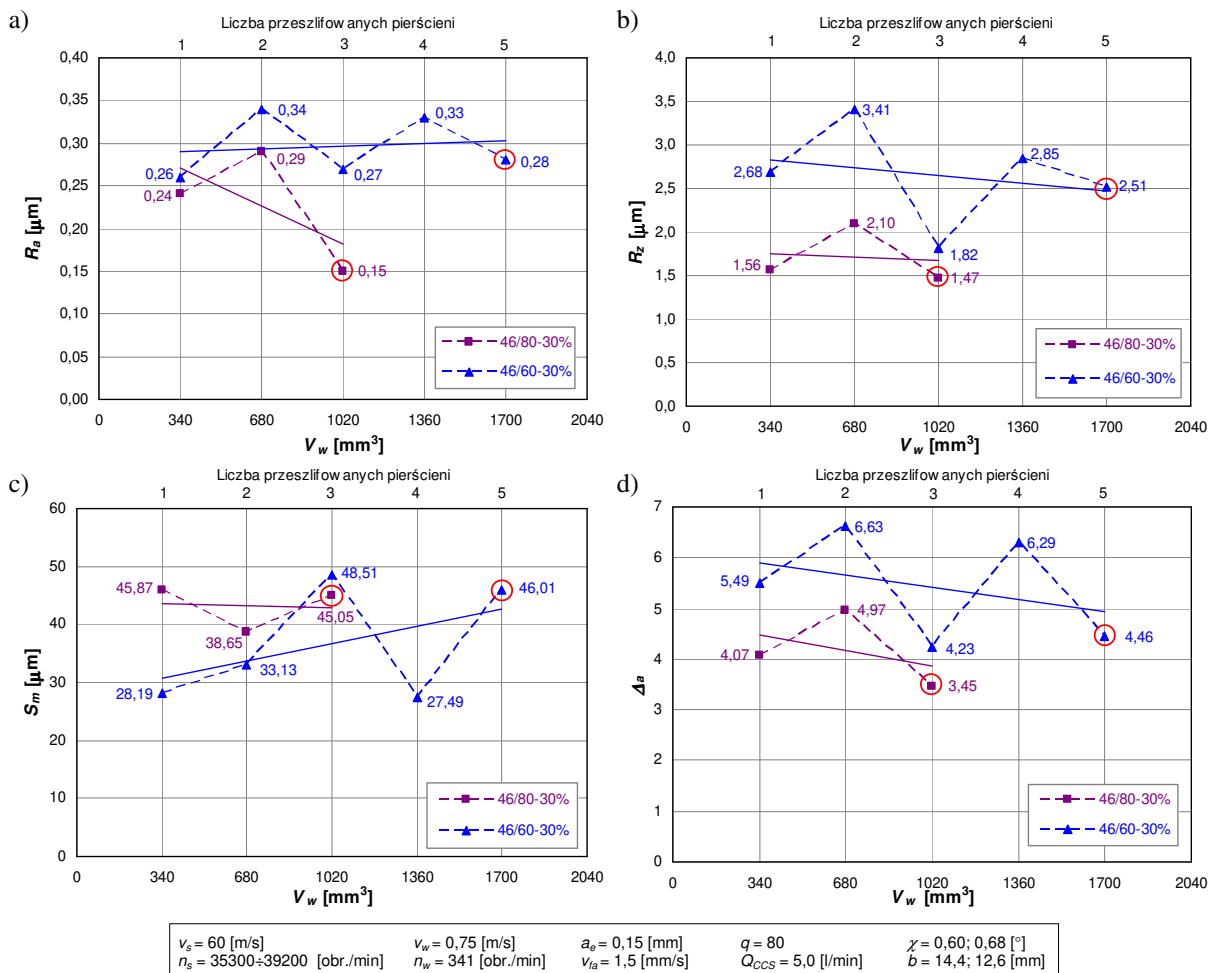
Rys. 5-83. Wartości średnie i odchylenie standardowe S parametrów opisujących błędy kształtu przedmiotów szlifowanych badanymi narzędziami ściernymi: a) maksymalna odchyłka okrągłości $\Delta=P+V$; b) średnie kwadratowe odchylenie od okręgu średniego rms

Powyższe wykresy prezentują zbliżony poziom błędów kształtu przedmiotów obrobionych dla wszystkich narzędzi ściernych wykorzystanych w badaniach właściwych. Widoczne są również znaczne rozrzuty rejestrowanych wartości.

5.10.2 Zużycie narzędzi ściernych

Do eksperymentów mających na celu wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych o strefowu zróżnicowanej budowie w procesie jednaprzęściowego szlifowania otworów wytypowano ściernice, które zapewniły najbardziej korzystne rezultaty w opisanych wyżej (punkt 5.10.1) badaniach wpływu a_e i v_{fa} . Były to narzędzia o 30% udziale drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego: 46/80-30% i 46/60-30%.

Sporządzone wykresy zmian parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej (rys. 5-84) przedstawiają bardziej korzystne wartości uzyskane dla ściernicy z ziarnem wielkości 80 w strefie wykończeniowej, co wynika z większej koncentracji mniejszych ziaren ściernych (w porównaniu do drugiego narzędzia z ziarnem 60 w tej strefie) i w rezultacie podwyższonej liczby wierzchołków skrawających generujących bardziej gładką powierzchnię. Przebieg zmian parametrów opisujących wysokościowe (rys. 5-84a, b), jak i horyzontalne cechy profilu chropowatości (rys. 5-84c) oraz jego kształt (rys. 5-84d), wskazują na szybką utratę zdolności skrawnej badanych narzędzi.

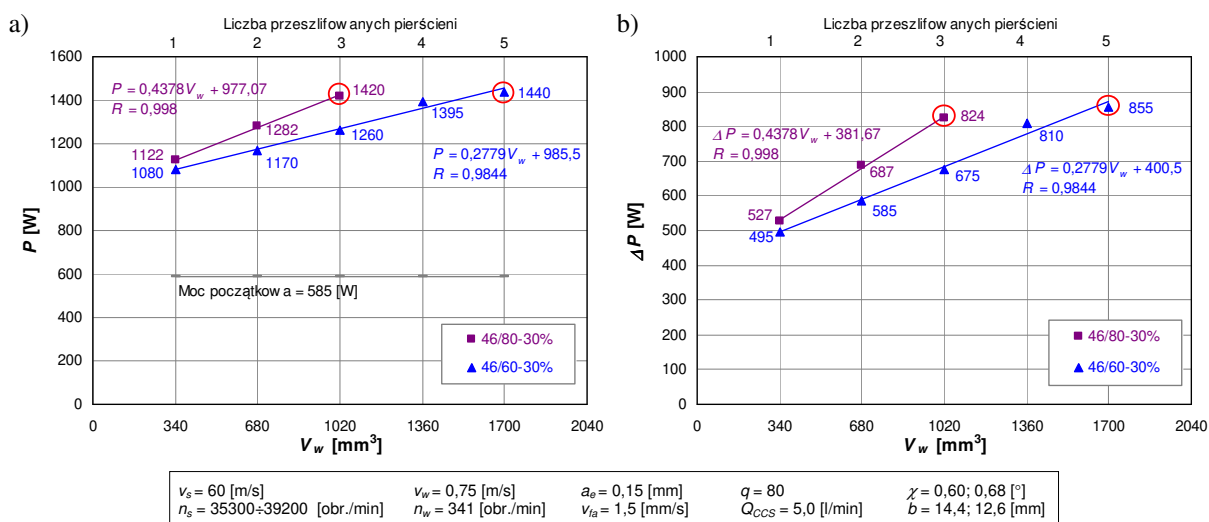


Rys. 5-84. Zmiany wartości parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej w funkcji objętości usuwanego materiału V_w – czerwonym kółkiem zaznaczono pierścienie przy szlifowaniu których ściernica uległa zniszczeniu: a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu R_a ; b) wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z ; c) średni odstęp chropowatości S_m ; d) średnie pochylenie profilu $\Delta\beta$

W przypadku ściernicy 46/80-30% zanotowano nieznaczny wzrost chropowatości powierzchni drugiego pierścienia, a w końcowej fazie obróbki trzeciego przedmiotu narzędzie pękło (punkt zaznaczony na wykresach czerwonym kółkiem). Uzyskana znacznie niższa chropowatość, zmierzona w części powierzchni pierścienia przeszlifowanej przez całą ściernicę, pozwala sądzić, że ziarna ściernie uległy stępieniu, wygładzając obrabianą powierzchnię. Zniszczenie ściernicy wywołane zatem zostało znacznie większym tarciem, spotęgowanym jeszcze wzrastającym zalepianiem jego czynnej powierzchni. Zaistniałe warunki nie pozwoliły na odnowienie CPS i wystąpienie zjawiska samoostření ziaren SG. Poprzedził je krytyczny wzrost obciążeń termicznych narzędzia ściernego, doprowadzając do jego destrukcji.

Również dla ściernicy 46/60-30% zaobserwować można podobny mechanizm, z tym że zniszczenie nastąpiło przy obróbce piątego w kolejności pierścienia, czyli po usunięciu niecałych 1700 mm^3 szlifowanego materiału. Okres trwałości tego narzędzia był dłuższy z tego samego powodu, dla którego chropowatość powierzchni obrabianej kształtowała się na wyższym poziomie niż w przypadku ściernicy 46/80-30%. Powierzchnia walcowej części narzędzia z mniejszą liczbą nieco większych ziaren charakteryzowała się odpowiednio zredukowaną liczbą wierzchołków skrawających, jak również większymi przestrzeniami międzyziarnowymi pozwalającymi na wyprowadzenie produktów obróbki ze strefy szlifowania. W rezultacie zalepiania CPS przyrastały wolniej i nadmierny wzrost temperatury nastąpił później.

O postępującej wraz ze wzrostem objętości usuwanego materiału V_w utracie zdolności skrawnej badanych narzędzi świadczą również wykresy zmian zarejestrowanej mocy szlifowania (rys. 5-85). 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 do 0,28 dla ściernicy 46/60-30%.

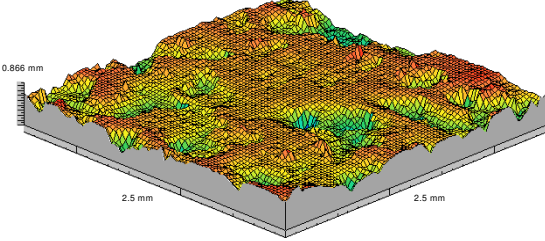
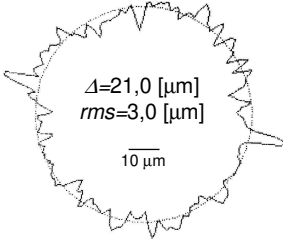
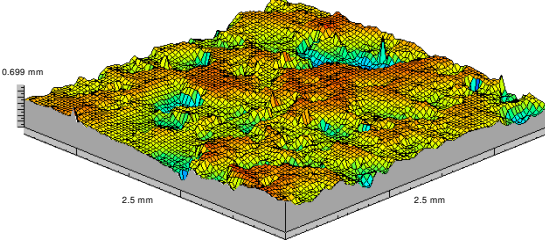
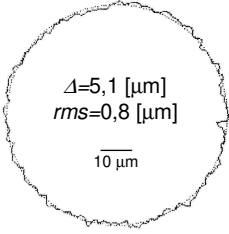
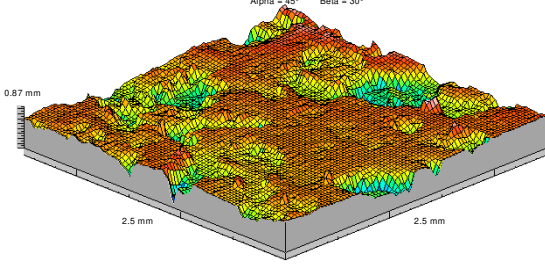
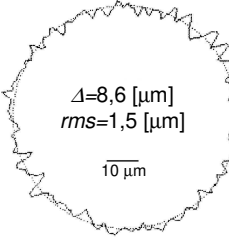
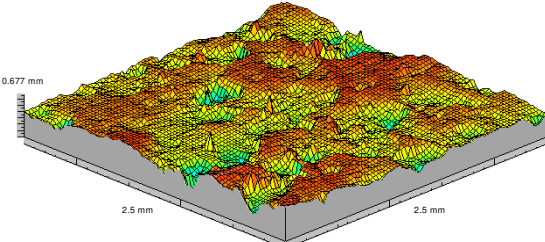
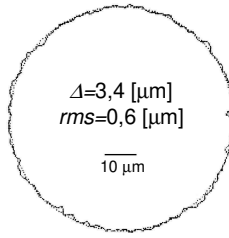


Rys. 5-85. Zmiany wartości mocy prądu wrzeciona ściernicy P w funkcji objętości usuwanego materiału V_w (a) i przyrostu mocy ΔP (b) – czerwonym kółkiem zaznaczono pierścienie przy szlifowaniu których ściernica uległa zniszczeniu

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 szklanokrystalicznego, charakteryzującego się mechanizmem destrukcji mostków zbliżonym do mechanizmu samoostrzenia ziaren korundu spiekane, 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 jednoprzęściowego 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 mm^3 materiału obrabianego, przedstawia tab. 5-X.

Tablica 5-X. Zestawienie parametrów i widoków 3D mikrotopografii CPS oraz zarysów obwodowych narzędzia ściernego 46/60-30% po obciążeniu i po usunięciu 1020 mm³ materiału obrabianego

	Parametry SGP	Widok 3D	Błędy kształtu
Po obciążeniu	Parametry SGP: Sa = 0.082 mm Sq = 0.104 mm Sz = 0.765 mm Ssk = -1.03 Sku = 3.95 Sds = 223 pks/mm ² Sal = 0.153 mm Str = 0.675 Std = -45 ° Ssc = 0.212 1/μm Sdq = 3.31 μm/μm Sdr = 352 % Sbi = 0.44 Sci = 1.08 Svi = 0.168	Stożkowa strefa szlifowania zgrubnego Alpha = 45° Beta = 30° 	
	Parametry SGP: Sa = 0.0629 mm Sq = 0.0792 mm Sz = 0.529 mm Ssk = -0.916 Sku = 4.03 Sds = 199 pks/mm ² Sal = 0.16 mm Str = 0.645 Std = -45 ° Ssc = 0.156 1/μm Sdq = 2.71 μm/μm Sdr = 241 % Sbi = 0.904 Sci = 1.16 Svi = 0.153	Walcowa strefa szlifowania wykończeniowego Alpha = 45° Beta = 30° 	
Po przeszlifowaniu 3 pierścieni (V _w =1020 mm ³)	Parametry SGP: Sa = 0.0796 mm Sq = 0.104 mm Sz = 0.749 mm Ssk = -1.27 Sku = 4.63 Sds = 189 pks/mm ² Sal = 0.185 mm Str = 0.531 Std = -45 ° Ssc = 0.193 1/μm Sdq = 3.23 μm/μm Sdr = 324 % Sbi = 0.516 Sci = 0.908 Svi = 0.184	Stożkowa strefa szlifowania zgrubnego Alpha = 45° Beta = 30° 	
	Parametry SGP: Sa = 0.0572 mm Sq = 0.0724 mm Sz = 0.538 mm Ssk = -0.818 Sku = 3.91 Sds = 166 pks/mm ² Sal = 0.152 mm Str = 0.753 Std = -45 ° Ssc = 0.163 1/μm Sdq = 2.6 μm/μm Sdr = 217 % Sbi = 0.786 Sci = 1.21 Svi = 0.154	Walcowa strefa szlifowania wykończeniowego Alpha = 45° Beta = 30° 	

Wygładzenie czynnej powierzchni obu stref ściernicy widoczne jest wyraźnie na zarysach obwodowych zmierzonych w celu wyznaczenia błędów kształtu badanego narzędzia. Wartość maksymalnej odchyłki błędu kołowości strefy szlifowania zgrubnego $\Delta(P+V)$ zmalała na skutek obróbki niemal trzykrotnie z 21,0 do 8,6 μm, wyraźnie wskazując na obniżenie wysokości nierówności zarysu obwodowego. Podobnie, ale w mniejszym zakresie, zmieniła się Δ zmierzona w walcowej części szlifowania wykończeniowego, z wartości 5,1 μm po obciążeniu, do 3,4 μm po przeszlifowaniu trzech pierścieni.

Stępienie CPS wywołane zużyciem zauważyć można również na widoku 3D zarejestrowanych mikrotopografii oraz wyrażone zostało ono ilościowo parametrami chropowatości SGP. Najwyraźniej na zmiany topografii zareagował parametr S_{ds} (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni) oraz S_{dr} (współczynnik rozwinięcia powierzchni).

Parametr S_{ds} wyznaczony dla strefy stożkowej wynosił po obciążeniu 223 wierzchołki na mm^2 , a po przeszlifowaniu trzech pierścieni zmalał o 15% do wartości 189 mm^2 . Podobnie rzecz się miała w przypadku walcowej strefy szlifowania wykończeniowego. Gęstość wierzchołków nierówności tej powierzchni wynosiła 199 mm^2 po obciążeniu i zanotowano 17% spadek do wartości 166 mm^2 . Współczynnik rozwinięcia powierzchni S_{dr} również zmalał z 352 do 324% w przypadku strefy stożkowej i z 241 do 217% dla walcowej części ściernicy. Wielkości te wyraźnie odpowiadają zmianom mocy szlifowania, która z wartości 1080 W przy obróbce pierwszego pierścienia wzrosła o 22% do 1395 W przy szlifowaniu czwartego przedmiotu obrabianego.

Z przeprowadzonych badań odporności na zużycie narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie wynika, że charakteryzują się one ograniczoną żywotnością przy realizacji jednoprzęściowego szlifowania otworów z wydajnością ubytkową na poziomie 13,4 mm^3/s . Porównując otrzymane wyniki do przebiegu badań rozpoznawczych (punkt 5.8.8), można stwierdzić, że ponad dwukrotne zwiększenie wydajności ubytkowej z 6,26 (dla $a_e=0,1$ mm, $v_{fa}=1,0$ mm/s) do 13,4 mm^3/s (dla $a_e=0,15$ mm, $v_{fa}=1,5$ mm/s) spowodowało zdecydowane skrócenie okresu trwałości badanych narzędzi. W przypadku badań rozpoznawczych, raz obciążoną ściernicą pomyślnie przeszlifowano ponad 4700 mm^3 materiału obrabianego, co odpowiadało obrobeniu 20 pierścieni, przy czym w próbie tej nie doprowadzono do całkowitej utraty zdolności skrawnych narzędzi. Badane ściernice wykazywały skłonność do odnawiania CPS i zachowywały jakość powierzchni obrobionej oraz moc szlifowania na stałym poziomie przy stosunkowo niewielkim zużyciu objętościowym V_s . Zintensyfikowanie obróbki poprzez zwiększenie wartości parametrów decydujących o jej wydajności spowodowało jednak zdecydowane pogorszenie warunków szlifowania, które doprowadziły do pęknięcia narzędzi już przy obróbce trzeciego (ściernica 46/80-30%) i piątego pierścienia (ściernica 46/60-30%).

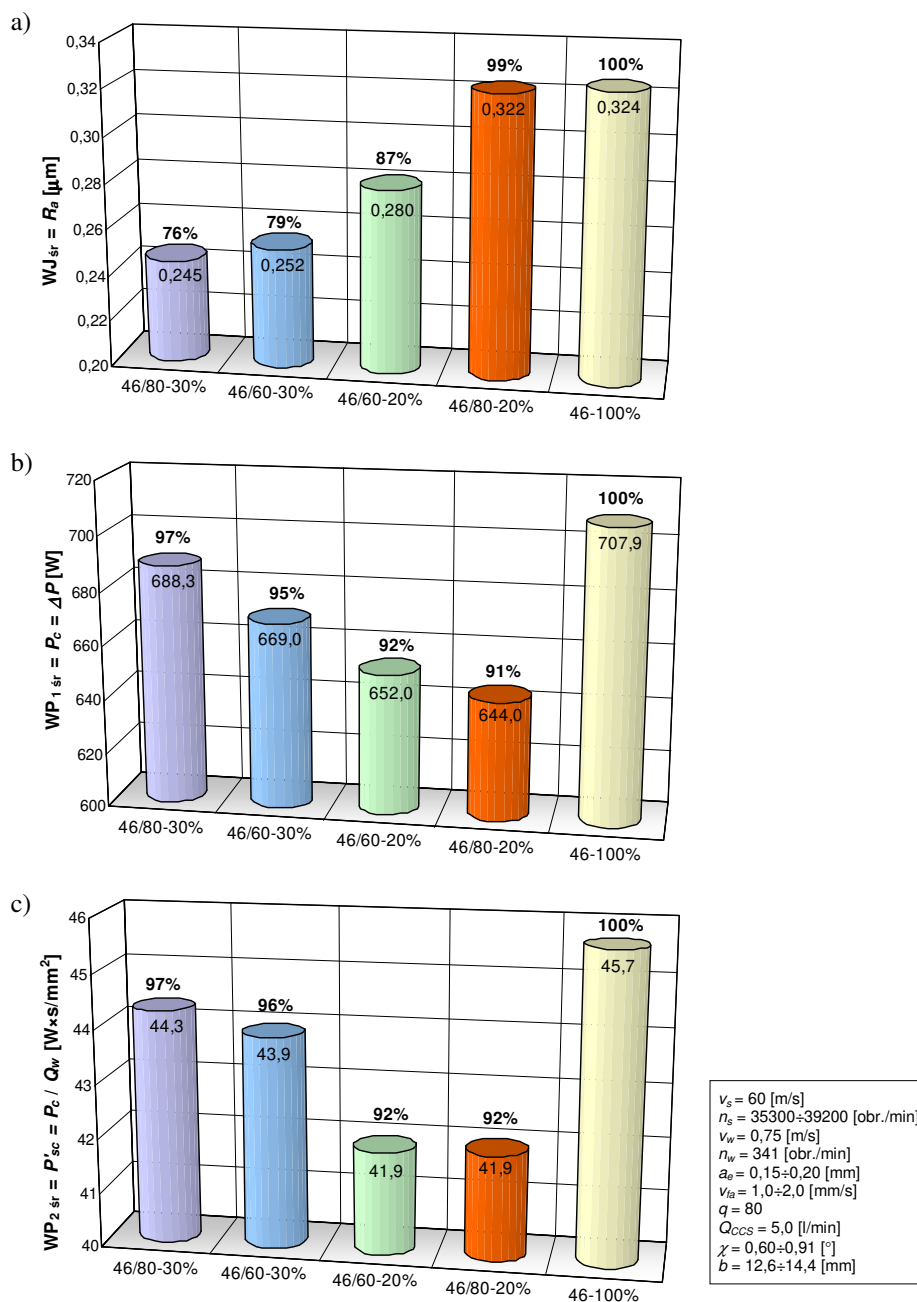
Wynika z tego, że przy zwiększonej wydajności ubytkowej proces szlifowania należy prowadzić z obciążaniem ściernicy po każdym przejściu. Nie stanowi to wyraźnego ograniczenia dla opisywanego procesu, ponieważ tego typu rozwiązania stosowane są powszechnie w przemyśle dla zachowania pełnej powtarzalności efektów obróbki.

5.10.3 Ocena efektywności szlifowania

Ocenę efektywności jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie przeprowadzono w oparciu o kryteria zdefiniowane w punkcie 5.2. Ponieważ w trakcie badania okresu trwałości narzędzi ściernych nie zarejestrowano zużycia objętościowego ściernic poprzedzającego ich zniszczenie, nie można było wyznaczyć utraconej objętości materiału ściernicy V_s oraz zależnego od niej wskaźnika szlifowania G (WS_1) i efektywności szlifowania E_s (WS_2). Ocenę efektywności przeprowadzono zatem w oparciu o pozostałe kryteria: $WJ=R_a$, $WW=Q_w$, $WP_1=P_c$, $WP_2=P'_{sc}$, $WS_3=K$. Zestawienie średnich¹⁰ wartości kryterium jakościowego WJ i kryteriów przebiegu procesu WP_1 , WP_2 , wraz z wyrażonym w procentach

¹⁰ Podane wartości stanowią średnią arytmetyczną z wyników uzyskanych dla wszystkich punktów planu badań wpływu zmian styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego v_{fa} na rezultaty opisywanego procesu.

porównaniem do wyniku narzędzia ściernego zbudowanego wyłącznie z ziaren SG o rozmiarze 46 zawiera rys. 5-86.



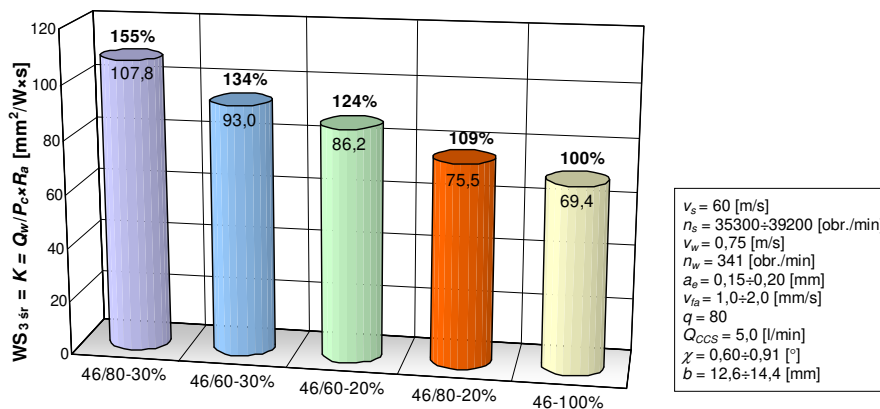
Rys. 5-86. Średnie wartości kryteriów oceny efektywności szlifowania oraz ich procentowe odniesienie do wyniku ściernicy 46-100%: a) wskaźnik jakościowy $WJ=R_a$; b) wskaźnik przebiegu procesu $WP_1=P_c$; c) wskaźnik przebiegu procesu $WP_2=P'_{sc}$

Na wykresie przedstawiającym średnie wartości parametru R_a opisującego chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego (rys. 5-86a) widać, że najlepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu w badanym procesie narzędzia ściernego ze strefą szlifowania wykończeniowego o wysokości 30%. Zarówno ściernica z ziarnem 80, jak i 60 spowodowała znaczne obniżenie chropowatości, odpowiednio o 24 i 21% w porównaniu do narzędzia 46-100%. Zmniejszenie udziału wysokości drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego T_2 z 30 do 20% całkowitej wysokości ściernicy T pozwoliło na co najwyżej 13% poprawę gładkości szlifowanych pierścieni w przypadku narzędzia 46/60-20%.

Dla ściernicy z 20% udziałem strefy zbudowanej z ziaren o rozmiarze 80 średnia wartość parametru R_a różniła się jedynie o 1%.

Kolejne dwa wskaźniki charakteryzujące przebieg procesu WP_1 i WP_2 (rys. 5-86b i c), uwidaczniają odmienne warunki pracy narzędzi ściernych z różną wysokością strefy szlifowania wykończeniowego. Najmniejszym zapotrzebowaniem na moc charakteryzowały się ściernice ze stosunkiem $T_1/T_2=80/20$. Zarejestrowana różnica dla obu narzędzi wyniosła 8% w stosunku do ściernicy 46-100% która, mimo że nie posiadała w ogóle strefy drobnoziarnistej, charakteryzowała się najwyższym średnim poborem mocy $WP_{1\text{sr}}=707,9$ W. Narzędzia wykonane z 30% udziałem strefy szlifowania wykończeniowego 46/60-30% i 46/80-30% szlifowały z tylko nieznacznie niższym poborem mocy, kształtującym się na poziomie odpowiednio o 5 i o 3% niższym niż ściernica 46-100%.

Wyznaczone wartości syntetycznego wskaźnika zdolności skrawnej narzędzi ściernych K (rys. 5-87) ujmują gładkość powierzchni szlifowanych oraz pobór mocy w trakcie realizacji obróbki z daną wydajnością ubytkową.

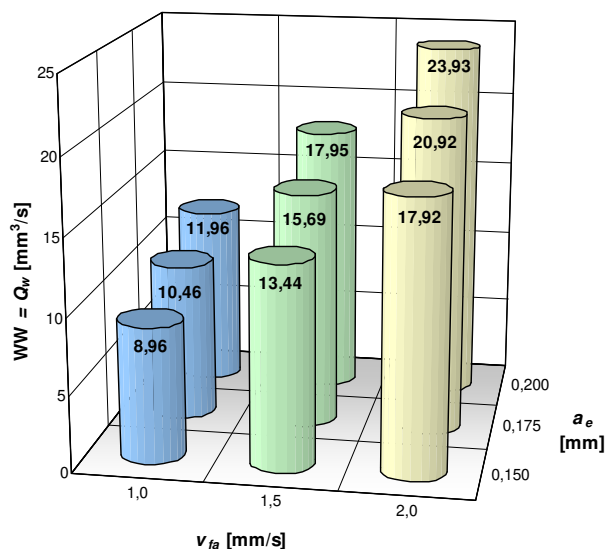


Rys. 5-87. Średnie wartości syntetycznego wskaźnika zdolności skrawnej narzędzia ściernego $WS_3=K$ oraz ich procentowe odniesienie do wyniku ściernicy 46-100%

W przypadku badanego procesu najmniejszą wartość K zapewniła ściernica 46-100%. Pozostałe narzędzia odznaczające się strefowo zróżnicowaną budową uzyskały wyniki od 9 do 55% lepsze. Najwyższą wartość wskaźnika $WS_{3\text{sr}}$ otrzymano podczas szlifowania ściernicą 46/80-30%. W przypadku ściernicy z ziarnem o rozmiarze 60 i tej samej wysokości $T_2=0,3 \cdot T$ w strefie walcowej wzrost opisywanego wskaźnika wyniósł 34%. Dla kolejnych dwóch narzędzi ściernych z wysokością $T_2=0,2 \cdot T$ różnica między ściernicą 46-100% była już mniejsza i wynosiła 24% dla narzędzia 46/60-20% oraz 9% przy obróbce narzędziem 46/80-20%.

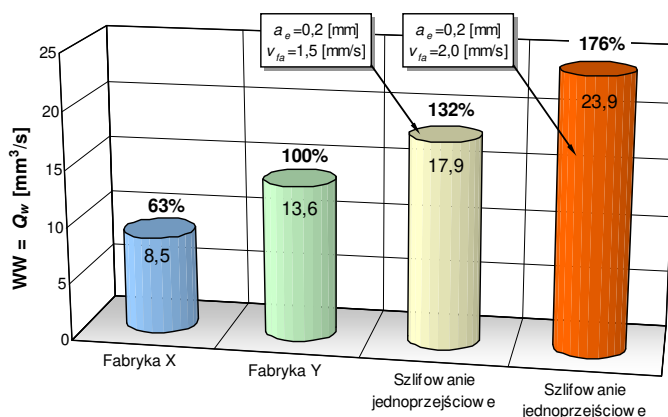
Ostatnim kryterium wykorzystanym do oceny efektywności badanego procesu był wskaźnik wydajnościowy $WW=Q_w$. Średnia wartość wydajności ubytkowej szlifowania dla przyjętego w badaniach właściwych zakresu zmienności parametrów a_e i v_{fa} wynosiła $Q_{w\text{sr}}=15,7$ mm³/s.

Ponieważ proces jednoprzęściowy, przy zadanej wartości styku roboczego i posuwu osiowego, charakteryzuje się stałą wydajnością ubytkową szlifowania (rys. 5-88), do oceny jego efektywności wg kryterium wydajnościowego $WW=Q_w$ posłużono się danymi uzyskanymi od fabryk produkujących łożyska toczne.



Rys. 5-88. Wartości wydajności ubytkowej szlifowania Q_w uzyskiwane dla przyjętego w badaniach właściwych zakresu zmienności parametrów v_{fa} i a_e

W porównaniu (rys. 5-89) uwzględniono wydajność ubytkową, z jaką szlifowane są walcowe powierzchnie wewnętrzne pierścieni łożyskowych w krajowych fabrykach przemysłu łożyskowego: Fabryka X¹¹, Fabryka Y¹². Zakłady te podały parametry technologiczne dotyczące obróbki w procesie wieloprześciowym pierścieni o takiej samej średnicy wewnętrznej (40 mm) i wykonanych z takiego samego materiału (100Cr6 o twardości 63 ± 2 HRC) jak przedmioty obrabiane wykorzystane w opisywanych badaniach.



Rys. 5-89. Porównanie wydajności ubytkowej procesu jednorzędziowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie i wydajności uzyskiwanych w procesach wieloprześciowych w fabrykach krajowego przemysłu łożyskowego – wartości procentowe stanowią odniesienie do najwyższej wydajności ubytkowej podanej przez Fabrykę Y

Z powyższego zestawienia wynika, że zastąpienie powszechnie stosowanego sposobu wieloprześciowego szlifowania prostoliniowo-zwrotnego procesem jednorzędziowym pozwala na wzrost wydajności ubytkowej nawet o 76%. Zaznaczyć należy, że w Fabryce Y stosowane są narzędzia ściernic wykonane z tego samego typu

¹¹ Obróbka prowadzona w procesie wieloprześciowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami elektrokorundowymi na automacie szlifierskim typu Novamatic Mikro ME

¹² Obróbka prowadzona w procesie wieloprześciowego szlifowania osiowego walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami Tyrolit Columbia (SG F80) na automacie szlifierskim typu SIW4 FM-NC.

ścierniwa (korund spiekany SG), co wykorzystane w badaniach. Oznacza to, że bez istotnego wzrostu kosztów narzędzi ściernych, na który decydujący wpływ ma rodzaj zastosowanego materiału ściernego, możliwe jest wyraźne podniesienie wydajności procesu szlifowania otworów, przy zachowaniu żądanej jakości przedmiotu obrabianego.

Na ostateczną ocenę efektywności badanego procesu istotny wpływ ma porównanie osiąganych wartości wskaźnika wydajnościowego z danymi z przemysłu (rys. 5-89). Wskazuje ono jednoznacznie na możliwość uzyskania tego samego ubytku materiału obrabianego w krótszym czasie, a więc znaczące podniesienie wydajności szlifowania Q_w . Zestawienie pozostałych kryteriów pozwala na ocenę zdolności skrawnej nowo opracowanych narzędzi ściernych w odniesieniu do ściernicy w całości wykonanej z ziaren jednej wielkości. Zarejestrowane wartości chropowatości powierzchni szlifowanej oraz maksymalnego przyrostu mocy elektrycznej wrzeczona ściernicy zestawiono w postaci wskaźników opisujących jakość i przebieg procesu w celu uzyskania sumarycznej oceny efektów obróbki. Ze sporządzonych wykresów (rys. 5-86) jednoznacznie wynika, że zastosowanie narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie, z odpowiednio ukształtowanym nakrojem stożkowym do realizacji jednoprzęściowego procesu osiowego szlifowania otworów, pozwala na znaczący wzrost efektywności tego procesu. W najkorzystniejszym przypadku zanotowanym dla ściernicy 46/80 30%, przy tej samej wydajności ubytkowej, uzyskano średnio 24% obniżenie chropowatości powierzchni obrabianej przy jednoczesnym nieznacznym (3%) spadku poboru mocy. W efekcie osiągnięto aż o 55% wyższą wartość wskaźnika K w porównaniu do narzędzia w całości wykonanego z ziaren SG o rozmiarze 46 (rys. 5-87).

5.11 Wnioski z badań właściwych

Badania właściwe procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie pozwoliły określić, jak na rejestrowane rezultaty procesu wpływa wielkość strefy szlifowania wykończeniowego oraz rozmiar ziaren zastosowanych do jej budowy. Wyznaczono w nich również możliwą do osiągnięcia w przyjętych warunkach obróbki wydajność ubytkową oraz zbadano zużycie nowych narzędzi. W celu ustalenia korzyści ze stosowania ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, uzyskane wyniki odniesiono do narzędzia w całości wykonanego z ziaren jednej wielkości (46-100%). Zarejestrowane wartości wydajności ubytkowej szlifowania porównano z parametrami stosowanymi w fabrykach produkujących łożyska toczne.

Wydajność ubytkowa szlifowania Q_w

Wyniki badań wpływu styku roboczego a_e i prędkości posuwu osiowego stołu v_{fa} wskazują na możliwość znacznego wzrostu wydajności ubytkowej poprzez zwiększanie wartości ww. parametrów.

W badanym procesie średnio najniższą chropowatość powierzchni obrabianej uzyskano przy szlifowaniu ściernicą 46/80-30%, a najmniej korzystną dla narzędzia 46-100%. Zmierzone parametry chropowatości powierzchni obrabianej wskazują, że zastosowanie strefowo zróżnicowanej budowy ściernicy może w najlepszym przypadku spowodować obniżenie wartości R_a nawet o połowę. Średnio, w przeprowadzonych próbach, parametr R_a zmierzony po szlifowaniu ściernicą 46/80-30% osiągnął o 24% niższy poziom niż dla ściernicy 46-100%. Narzędzia ścierne z największą wysokością drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego zapewniały zdecydowanie najbardziej korzystne wartości parametrów chropowatości powierzchni. Wpływ tego czynnika był bardziej istotny niż zmiana wielkości ziarna zastosowanego do budowy tej strefy.

Przy maksymalnej wydajności ubytkowej pogorszeniu ulega chropowatość szlifowanej powierzchni, osiągając przybliżone wartości parametru R_a dla wszystkich ściernic. Spowodowane jest to zmniejszającą się wraz ze skracaniem czasu obróbki liczbą przeszlifowań U . Można sądzić, że obniżenie chropowatości powierzchni możliwe jest do osiągnięcia poprzez zwiększenie prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s .

Z analizy zmian mocy szlifowania wynika, że podnoszenie Q_w poprzez zwiększanie styku roboczego w znacznie większym stopniu determinuje osiągnięte przyrosty mocy szlifowania niż zmiany prędkości posuwu osiowego stołu. Ponieważ przyjęta w badaniach właściwych grubość warstwy skrawanej ($a_e=0,15\div 0,20$ mm) odpowiada naddatkowi obróbkowemu pozostawianemu na szlifowanie w procesie technologicznym produkcji pierścieni łożyskowych (po toczeniu i obróbce cieplnej), nie ma potrzeby zwiększania wartości tego parametru dla opisywanych zastosowań. Natomiast sterowanie wydajnością ubytkową badanego procesu poprzez zmiany prędkości posuwu osiowego stołu, znacząco wpływa na uzyskiwaną chropowatość powierzchni oraz w mniejszym stopniu na wzrost mocy szlifowania.

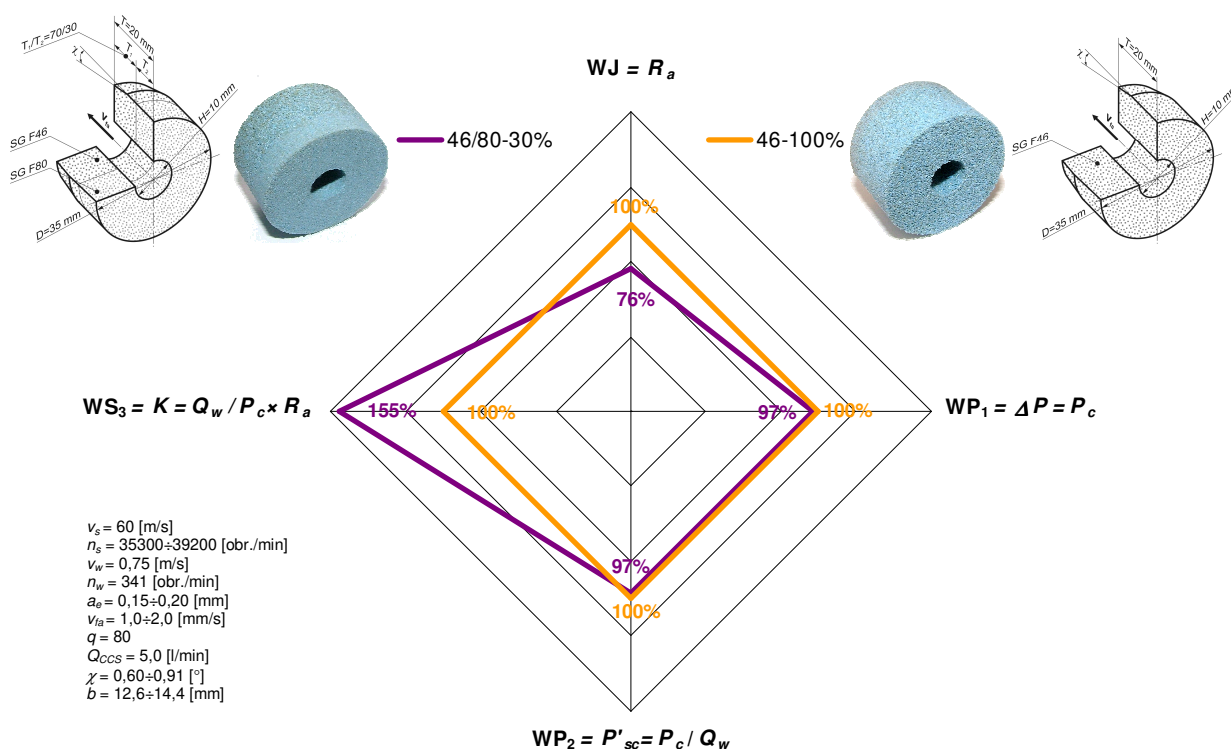
Nie zauważono wpływu zróżnicowania budowy narzędzi ściernych na wartości parametrów opisujących błędy kształtu przedmiotów po obróbce (Δ , rms).

Zużycie narzędzi ściernych

Wyniki badań okresu trwałości nowo opracowanych narzędzi ściernych wykazały ich bardzo ograniczoną odporność na zużycie. Wynika z tego, że konieczne jest stosowanie obciążania ściernicy w każdym przejściu. Tego typu rozwiązania stosowane są powszechnie w przemyśle dla zachowania pełnej powtarzalności efektów obróbki. Częste kształtowanie nakroju stożkowego wymaga jednak zmiany sposobu obciążania w celu skrócenia czasu tego zabiegu, który w warunkach przemysłowych powinien trwać zaledwie kilka sekund. Można to osiągnąć np. poprzez zastosowanie obciążacza rolkowego, pracującego z posuwem wglębny, jednocześnie kształtując strefę szlifowania zgrubnego i wykończeniowego.

Efektywność szlifowania

Realizacja opisywanego procesu z zastosowaniem narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie zapewnia osiągnięcie powierzchni o stosunkowo niskiej chropowatości przy znacznym podniesieniu efektywności szlifowania. Zestawienie procentowych wartości kryteriów oceny efektywności procesu dla ściernicy z najlepszymi wynikami (46/80-30%) w odniesieniu do narzędzia 46-100%, przedstawiono na rys. 5-90.



Rys. 5-90. Zestawienie procentowych wartości kryteriów oceny efektywności szlifowania dla narzędzia ściernego o strefowo zróżnicowanej budowie, które uzyskało najlepsze wyniki (46/80-30%) w odniesieniu do ściernicy 46-100%

Powyższy wykres nie uwzględnia kryterium wydajnościowego, ponieważ prezentowane wyniki uzyskane zostały dla takich samych wydajności ubytkowych szlifowania. Porównując osiągnięte wartości Q_w do danych z przemysłu, stwierdzono wzrost wydajności ubytkowej nawet o 76% podczas szlifowania z największymi wartościami parametrów a_e i v_{fa} (rys. 5-89). Oznacza to, że zastosowanie procesu jednaprzęściowego szlifowania otworów narzędziami ściernymi o strefowo zróżnicowanej budowie pozwoliło w znaczący sposób zwiększyć efektywność procesu poprzez obniżenie chropowatości powierzchni PO oraz zwiększenie wydajności ubytkowej.

Podsumowanie wyników badań właściwych

Najważniejsze wnioski wynikające z badań właściwych są następujące:

- strefowe zróżnicowanie budowy narzędzi ściernych pozwoliło uzyskać znacznie niższą chropowatość powierzchni obrobionej w porównaniu do ściernicy w całości wykonanej 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% niższą wartość parametru R_a dla narzędzia 46/60-30%;
- w przypadku zastosowania strefy wykończeniowej o wysokości $T_2 = 0,2 \cdot T$, nie zanotowano wyraźnej różnicy w chropowatości powierzchni po szlifowaniu, i to niezależnie od wielkości ziaren zastosowanych do jej budowy;
- wielkość ziarna w strefie wykończeniowej odgrywała mniejszą rolę niż udział stref T_1/T_2 . Dla ściernic z $T_2 = 0,3 \cdot T$ obniżenie rozmiaru ziaren z 60 do 80 pozwoliło na kilkuprocentową redukcję średniej wartości R_a powierzchni po szlifowaniu;

- prowadzenie procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów z zastosowaniem opracowanych ściernic umożliwia, w najbardziej korzystnym przypadku, wzrost wydajności ubytkowej szlifowania nawet o 76% w porównaniu do wydajności osiągniętych w przemyśle;
- zwiększenie wydajności ubytkowej Q_w o 33% poprzez zmianę styku roboczego z 0,15 do 0,20 mm spowodowało średnio 45% wzrost poboru mocy w badanym procesie, natomiast podwojenie Q_w , wywołane zwiększeniem prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki z 1,0 do 2,0 mm/s, wpłynęło na zwiększenie mocy szlifowania jedynie o około 65%;
- podnoszenie wydajności ubytkowej prowadzi do zmniejszenia pozytywnego wpływu drobnoziarnistej strefy szlifowania wykończeniowego na chropowatość powierzchni PO, wynikającego z malejącej liczby przeszlifowań. Obniżenia chropowatości pierścieni po obróbce należy się spodziewać poprzez podniesienie prędkości szlifowania v_s ;
- zastosowany do oceny efektywności badanego procesu syntetyczny wskaźnik zdolności skrawnej narzędzi ściernych (uwzględniający zmiany mocy oraz chropowatości powierzchni obrobionej z daną wydajnością ubytkową), wyznaczony dla ściernicy 46/80-30% charakteryzował się aż o 55% wyższą wartością w porównaniu do narzędzia 46-100%;
- zastosowanie strefowo zróżnicowanych narzędzi ściernych w badanym procesie nie powoduje zmian błędów kształtu szlifowanych wewnętrznych powierzchni walcowych;
- wyniki badań okresu trwałości narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie wskazują na ich ograniczoną żywotność przy stosowaniu dużych wartości wydajności ubytkowej. Konieczne wydaje się zatem stosowanie zabiegu obciążania po wykonaniu każdego przejścia ściernicy.

6 WNIOSKI KOŃCOWE

Analiza opisywanych w literaturze rozwiązań pozwalających na usuwanie całkowitego nadmiaru obróbkowego w jednym przejściu narzędzia ściernego podczas realizacji procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych pozwoliła na określenie tezy pracy. Zakłada ona, że zastosowanie narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie, charakteryzujących się nakrojem stożkowym pozwoli na realizację procesu jednoprzeciowego szlifowania otworów z większą efektywnością niż w przypadku szlifowania konwencjonalnego, i to przy wykorzystaniu ziaren korundowych do budowy ściernicy. Dotychczas znane rozwiązania opierały się bowiem na zastosowaniu w takiej odmianie kinematycznej procesu drogich ziaren regularnego azotku boru.

Wyniki przeprowadzonych prac badawczych, uzyskane zarówno w fazie projektowania narzędzi ściernych z wykorzystaniem modelu symulacyjnego obróbki, jak i podczas szeroko zakrojonych badań doświadczalnych, pozwoliły na potwierdzenie postawionej tezy.

W pierwszej części badań doświadczalnych ustalono najkorzystniejsze warunki realizacji szlifowania jednoprzeciowego oraz kształtowania CPS przy relatywnie niskiej wydajności ubytkowej procesu, by w badaniach właściwych skupić się na możliwości intensyfikacji obróbki. Jednocześnie w oparciu o wyniki badań symulacyjnych wyznaczono rodzaj ścierniwa i wielkość ziaren w każdej strefie oraz udział danej części funkcjonalnej w całkowitej wysokości ściernicy, pozwalający uzyskać najwyższą efektywność badanego procesu. W rezultacie osiągnięto znaczący (dochodzący do 76%) wzrost wydajności ubytkowej szlifowania w porównaniu do parametrów stosowanych w przemyśle łóżykowym. Zastosowanie narzędzia ściernego z 30% udziałem strefy szlifowania wykończeniowego, zbudowanej z ziaren wielkości 80, pozwoliło na obniżenie wartości parametru R_a , średnio o 24%, a w najlepszym przypadku nawet o połowę. Najistotniejszy jest jednak fakt, że korzyści te zapewniły narzędzia ściernic zbudowane z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane SG. Dowodzi to postawionej tezy i wykazuje, że odpowiednio dobrana konstrukcja ściernicy wraz z precyzyjnym kształtowaniem kąta nakroju stożkowego pozwala na stosowanie w procesie jednoprzeciowego szlifowania otworów korundowych materiałów ściernych dużo tańszych w porównaniu z CBN.

6.1 Wnioski poznawcze

Realizacja wytyczonego zakresu prac pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków poznawczych:

- Wnioski dotyczące budowy ściernicy:

Rodzaj ziaren:

- Na podstawie wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych wykazano, że spośród uwzględnionych typów ziaren ściernych (elektrokorund szlachetny 99A i korund spiekany SG), najbardziej korzystny przebieg oraz wyniki opisywanego procesu obróbkowego można osiągnąć przy zastosowaniu ziaren SG, zarówno w strefie szlifowania zgrubnego, jak i wykończeniowego ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie.

Wysokość ściernicy:

- Na podstawie symulacji procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie określono, że całkowita wysokość ściernicy powinna być nie mniejsza niż $T=20$ mm. Taka wartość zapewnia uzyskanie czynnej powierzchni ściernicy z relatywnie dużą liczbą ziaren aktywnych, co prowadzi do obniżenia przekrojów poprzecznych warstw skrawanych pojedynczym wierzchołkiem.
- Całkowita wysokość ściernicy wynosząca 20 mm umożliwia również rozłożenie nadmiaru obróbkowego na relatywnie dużej powierzchni nakroju stożkowego.
- Podkreślić należy, że wysokość $T=20$ mm jest standardowym wymiarem stosowanym w procesach szlifowania otworów.

Udział wysokości stref T_1/T_2 :

- Uzyskane rezultaty badań symulacyjnych oraz doświadczalnych pozwalają sądzić, że znaczący wpływ na osiąganie niskiej chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego ma wysokość strefy szlifowania wykończeniowego T_2 . Zwiększanie wysokości T_2 odbywa się jednak kosztem wysokości strefy szlifowania zgrubnego, która w przypadku usuwania znacznych grubości warstwy skrawanej, dochodzących do $a_e=0,2$ mm, nie może być nadmiernie zredukowana.
- Z badań doświadczalnych wynika, że w przypadku zastosowania $T_2=0,3\cdot T$ można uzyskać średnio o 21÷24%, a w najbardziej korzystnym przypadku, nawet o 50% niższą wartość parametru R_a w porównaniu do zmierzonych chropowatości uzyskanych po obróbce narzędziem o budowie jednorodnej. Natomiast przy zastosowaniu niższej strefy wykończeniowej $T_2=0,2\cdot T$ nie zanotowano wyraźnej różnicy w otrzymanej chropowatości powierzchni po szlifowaniu, i to niezależnie od wielkości ziaren. Można zatem sądzić, że udział $T_1/T_2=80/20$ nie zapewnia wystarczającej wysokości walcowej strefy szlifowania wykończeniowego, i w efekcie zbyt mała liczba przeszlifowań drobnoziarnistym obszarem narzędzia nie pozwala na oczekiwane obniżenie wysokości nierówności powierzchni obrabianych przedmiotów.

Wielkość ziaren:

- Z badań symulacyjnych wynika, że do budowy strefy szlifowania zgrubnego należy stosować relatywnie duże ziarna (o wielkości 46), zapewniające znaczne przestrzenie międzyziarnowe, pozwalające na lepsze doprowadzenie cieczy chłodząco-smarującej (CCS) do strefy obróbki oraz zmniejszające prawdopodobieństwo zalepiania CPS produktami szlifowania. Natomiast obniżenie chropowatości powierzchni uzyskuje się w procesie szlifowania wykończeniowego realizowanym przez drobnoziarnistą strefę ściernicy.
- Z badań symulacyjnych wynika, że ziarna o wielkości 60 i 80 zapewniają relatywnie duże przestrzenie międzyziarnowe (pozwalające na transport wiórów poza strefę szlifowania oraz na skuteczne doprowadzenie CCS), wynikające z mniejszej liczby ziaren aktywnych N_a w porównaniu do wyników uzyskanych ściernicami z ziarnem wielkości 120 w walcowej strefie ściernicy.
- Wyniki badań doświadczalnych wskazują, że wielkość ziaren w strefie szlifowania wykończeniowego ma znacznie mniejszy wpływ na uzyskane wartości chropowatości szlifowanej powierzchni niż udział stref T_1/T_2 . Dla

ściernic z $T_2=0,3\cdot T$ zmniejszenie rozmiaru ziaren z 60 do 80 spowodowało jedynie kilkuprocentową redukcję średniej wartości parametru R_a zmierzonego na powierzchni przedmiotu obrobionego.

- Wnioski dotyczące wpływu parametrów procesu szlifowania:
 - Wzrost prędkości obwodowej narzędzia ściernego v_s w badanym procesie pozwala na obniżenie wartości zarówno parametrów opisujących chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego, jak i mocy szlifowania.
 - Badania wpływu zmian wartości prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w na chropowatość PO ujawniły istnienie wartości krytycznej v_{wkr} , stanowiącej granicę, przy której następuje zmiana trendu z malejącego na rosnący. Podczas realizacji procesu z $v_w=v_{wkr}$ uzyskano najkorzystniejsze wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej oraz nieznacznie większy pobór mocy szlifowania.
 - Zmiany głębokości szlifowania a_e oraz prędkości posuwu osiowego v_{fa} bezpośrednio wpływają na ilość usuwanego materiału w określonej jednostce czasu, czyli na wydajność ubytkową procesu. Zarówno wzrost wartości a_e , jak i v_{fa} , powoduje pogorszenie chropowatości powierzchni obrobionej oraz zwiększenie mocy szlifowania, przy czym w badanym procesie zarejestrowano znacznie większy wpływ zmian styku roboczego na ww. parametry niż prędkości posuwu osiowego.
- Wnioski dotyczące wpływu zmian parametrów geometrycznych CPS:
 - Zmniejszenie wartości kąta nakroju stożkowego χ powoduje równomierne rozłożenie naddatku obróbkowego na większej powierzchni szerszego nakroju stożkowego. Pozwala to na bardziej efektywne usuwanie materiału w strefie szlifowania zgrubnego i, mimo skrócenia walcowej części ściernicy, wpływa na zwiększenie gładkości szlifowanych powierzchni.
 - Szerokość nakroju stożkowego b powinna być tak dobrana, aby z jednej strony pozwalała na wykorzystanie szerokości strefy szlifowania zgrubnego ściernicy (zmniejszenie kąta χ), z drugiej natomiast pozostawiała margines na przesuwanie się końca nakroju w kierunku strefy walcowej spowodowane postępującym zużyciem kształtowym ściernicy. Z przeprowadzonych badań wynika, że przyjęta wartość $b=0,9\cdot T_l$ zapewnia spełnienie powyższych wymagań.
 - Zastosowany w badaniach zakres zmian wartości parametrów geometrycznych czynnej powierzchni ściernicy nie wpłynął znacząco na zarejestrowane zmiany mocy szlifowania.
- Wnioski dotyczące wpływu zmian parametrów kształtowania CPS:
 - Wykazano, że istnieje możliwość dostosowania stanu poszczególnych stref funkcjonalnych CPS do realizowanych przez nie rodzajów obróbki poprzez zróżnicowanie parametrów zabiegu obciążania każdej ze stref.
 - Poprawę zdolności skrawnej stożkowej części ściernicy można uzyskać przy zastosowaniu wielu przejść obciążacza z dużą prędkością posuwu ($k_d=0,10$).
 - Natomiast zmniejszenie prędkości posuwu, przy obciążaniu walcowej strefy narzędzia ściernego ($k_d=2,75$), pozwala na znaczne obniżenie chropowatości powierzchni obrobionej.

6.2 Wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy

Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac symulacyjnych oraz badań doświadczalnych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków użytkowych:

- Zastosowanie procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów prowadzonego z wykorzystaniem opracowanych narzędzi ściernych pozwala, w zależności od przyjętych parametrów, znacząco podwyższyć wydajność ubytkową procesu obróbkowego (wzrost do 76%) oraz obniżyć chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego (zmniejszenie wartości parametru R_a do 50%).
- Nowe narzędzia zbudowane zostały z ziaren korundu spiekane, dzięki czemu koszt ich wytworzenia jest znacząco niższy niż ściernic z regularnego azotku boru.
- Badania doświadczalne z powodzeniem prowadzono na szlifierce uniwersalnej do otworów, co dowodzi możliwości zastosowania opisywanego procesu zarówno na obrabiarkach sterowanych numerycznie, jak i konwencjonalnych szlifierkach.
- Konieczne jest zapewnienie wysokiej sztywności układu OUPN w celu wyeliminowania ewentualnych błędów kształtu obrabianych powierzchni.
- Stosowanie narzędzi ściernych o strefowo zróżnicowanej budowie w procesach szlifowania realizowanych z wysoką wydajnością ubytkową wymaga prowadzenia zabiegu obciążania po każdym przejściu ściernicy. Zauważyć należy, że jest to praktyka powszechnie stosowana w fabrykach wytwarzających łożyska toczne, dla zapewnienia pełnej powtarzalności procesu obróbkowego i zalecenie to nie wpłynie istotnie na wydłużenie czasu pomocniczego operacji szlifowania.

6.3 Wnioski dotyczące dalszych badań

Uzyskane wyniki badań stanowiły podstawę do sformułowania, pozytywnie rozpatrzonego, wniosku o finansowanie własnego projektu badawczego pt.: „Narzędzia ściernic z tlenku glinu o funkcjonalnym gradiencie strukturalnym w zastosowaniach do jednoprzęściowego szlifowania powierzchni wewnętrznych walcowych”, ze środków Komitetu Badań Naukowych. Pierwszoplanowym celem dalszych prac jest wdrożenie nowej technologii w warunkach przemysłowych.

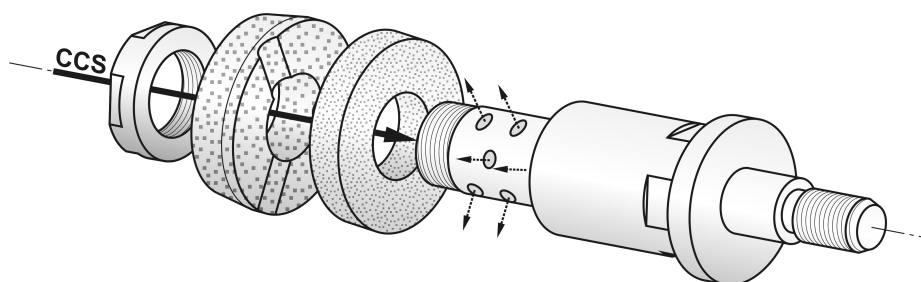
Z rezultatów przeprowadzonych dotąd badań wynikają kierunki rozwoju procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie:

- Opracowany przyrząd do kształtowania nakroju stożkowego podczas zabiegu obciążania ściernicy okazał się urządzeniem bardzo precyzyjnym i pozwolił na realizowanie wytyczonych celów badań doświadczalnych. Podstawową wadą stosowania takiego oprzyrządowania w warunkach przemysłowych jest jednak długi czas potrzebny do uzyskania zamierzonej mikro- i makrogeometrii CPS. W celu skrócenia zabiegu obciążania narzędzia ściernego należy w dalszych badaniach zastosować obciążacz rolkowy odwzorowujący kształt nakroju stożkowego na części atakującej ściernicy.
- Jednym z poważniejszych ograniczeń wzrostu wydajności ubytkowej w badanym procesie było zalepianie czynnej powierzchni ściernicy produktami obróbki, które nasilało się wraz ze skracaniem czasu obróbki. Zjawisko to spowodowane było przede wszystkim długą strefą styku ściernicy z materiałem obrabianym, charakterystyczną dla procesów szlifowania otworów. Długi kontakt uniemożliwia prawidłowe usuwanie wiórów oraz ogranicza docieranie cieczy chłodząco-smarującej (CCS) do strefy obróbki. Zjawiska te powodują szczególnie niekorzystne

skutki, doprowadzając, przy postępującym zużyciu ściernicy, do nadmiernego wzrostu obciążeń termicznych i pęknięcia narzędzia ściernego. Wynika z tego, że w przyszłych pracach należy doprowadzić CCS bezpośrednio do strefy szlifowania. Ponieważ opracowane ściernice charakteryzowały się bardzo otwartą strukturą, można sądzić, że doprowadzona od wewnątrz CCS przedostanie się przez pory ściernicy bezpośrednio w strefę szlifowania. Dodatkowo można zastosować kanały uformowane w tylnej części narzędzia wykonującej szlifowanie zgrubne, mające na celu doprowadzenie zwiększonej ilości chłodziwa w najbardziej obciążoną strefę ściernicy. Kanały te stanowiłyby jednocześnie nieciągłości CPS, które z kolei mogą się przyczynić do poprawy warunków obróbki w tej części strefy stożkowej.

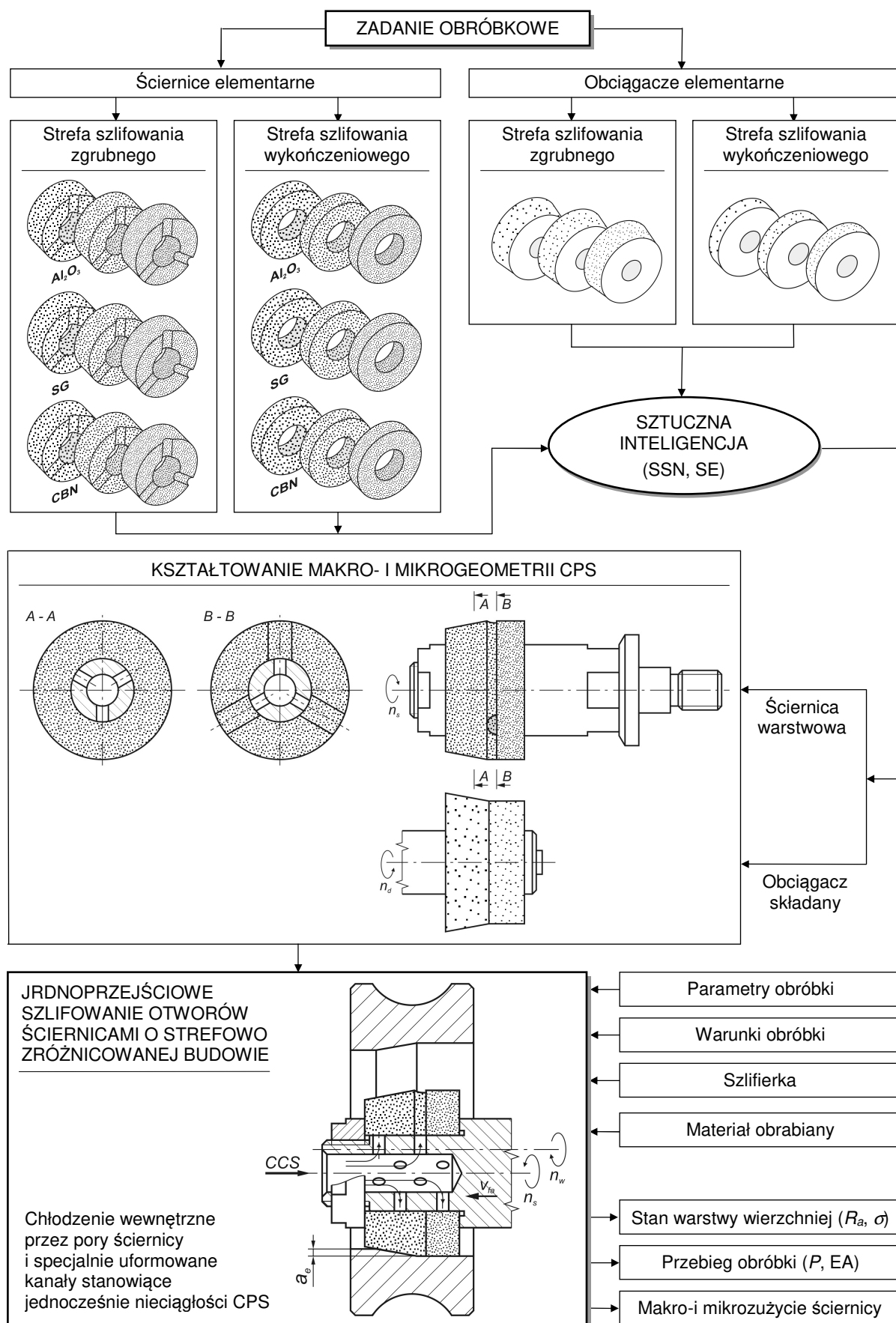
- W przeprowadzonych badaniach stosowano narzędzia ścierne o strefowo zróżnicowanej budowie wykonywane w całości w jednej formie z różnych rodzajów ziaren dla poszczególnych obszarów ściernicy. Inny sposób budowy narzędzia z odmienną charakterystyką stref funkcjonalnych polega na składaniu go ze ściernic elementarnych. Dobór poszczególnych części takiego narzędzia do konkretnego zadania obróbkowego mógłby być realizowany z wykorzystaniem modułu sztucznej inteligencji (np. sztucznej sieci neuronowej – SSN) lub systemu ekspertowego (SE).
- Zróżnicowane powinny być również elementy składowe obciążacza, aby zapewnić odpowiedni stan czynnej powierzchni strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego ściernicy. Składany obciążacz rolkowy zapewni również możliwość zmiany kąta nakroju poprzez wymianę elementu kształtującego strefę atakującą narzędzia ściernego. W zależności od żądanych rezultatów opisywanego procesu, wynikających z danego zadania obróbkowego, doбором elementów obciążacza sterować powinien moduł sztucznej inteligencji, uwzględniający informacje o budowie ściernicy.

Przykładowe rozwiązanie pozwalające na zastąpienie chłodzenia zalewowego o wiele bardziej efektywnym chłodzeniem wewnętrznym poprzez trzpień i pory składanych narzędzi ściernych, przedstawiono na rys. 6-1.



Rys. 6-1. Przykładowe rozwiązanie techniczne umożliwiające zastosowanie składanych narzędzi ściernych w procesie jednoprzęściowego szlifowania otworów oraz pozwalające na doprowadzenie cieczy chłodząco-smarującej (CCS) przez pory ściernicy i specjalne kanały (stanowiące jednocześnie nieciągłości CPS) bezpośrednio w strefę obróbki

Schemat ujmujący sumarycznie wszystkie wymienione kierunki dalszych badań przedstawiono na rys. 6-2.



Rys. 6-2. Schemat obrazujący kierunki dalszych badań nad procesem jednoprzęściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie

Wprowadzenie opisanych wyżej modyfikacji pozwoli na rozszerzenie potencjalnych zastosowań metody jednoprzęciowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. Umożliwi również dalszy wzrost wydajności ubytkowej procesu obróbki. Moduły sztucznej inteligencji wyposażone w odpowiednie kryteria pozwolą sterować zarówno wydajnością szlifowania, jak i jakością powierzchni obrobionych, poprzez odpowiedni dobór ściernic elementarnych i części składowych obciążacza.

BIBLIOGRAFIA

- [ANT91] ANTONIEWICZ, J.: Własności dielektryków. Tablice i wykresy. WNT, Warszawa, 1991.
- [BAŁ03] BAŁASZ, B.: Analiza kształtowania topografii powierzchni przedmiotu i obciążenia ziaren aktywnych w procesie szlifowania. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, 2003.
- [BAR82] BARNETT, V.: Elementy teorii pobierania prób. PWN, Warszawa, 1982.
- [BOR74] BORKOWSKI, J.; KUBIK, K.: Badanie własności skrawnych narzędzi ściernych. Materiały konferencji Naukowo-Technicznej Technologia obróbki ścierniej, SPTM-PAN, SIMP, Rzeszów, 1974.
- [BOR79] BORKOWSKI, J.: Podstawy stosowania monokrystalicznych ziaren węgla krzemu w obróbce ścierniej. Monografie, WSIInż. w Koszalinie, 1979.
- [BOR82] BORKOWSKI, J.; WOŹNIAK, K.: Techniczne aspekty zastosowania monokrystalicznych ziaren węgla krzemu w obróbce ścierniej. Monografie, WSIInż. w Koszalinie, 1982.
- [BRO97] BROKSTEIN, I.N.; SIEMIENDIAJEW, K.A.: Matematyka. Poradnik encyklopedyczny. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
- [CHE96] CHEN, X.; ROWE, W.B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface. Int.J.of Mach.Tools a.Manuf., 36(1996)8, 871÷882.
- [CHE96A] CHEN, X.; ROWE, W.B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. Int.J.of Mach.Tools a.Manuf., 36(1996)8, 883÷896.
- [CHE96B] CHEN, X.; ROWE, W.B.; MILLS, B.; ALLANSON, D.R.: Analysis and simulation of the grinding process. Part III: Comparison with experiment. Int.J.of Mach.Tools a.Manuf., 36(1996)8, 897÷906.
- [CHE98] CHEN, X.; ROWE, W.B.; MILLS, B.; ALLANSON, D.R.: Analysis and simulation of grinding process, Part IV: Effects of wheel wear. Int.J.of Mach.Tools a.Manuf., 38(1998)1-2, 41÷49
- [CHI93] CHIU, N.; MALKIN, S.: Computer Simulation for Cylindrical Glunge Grinding. Annals of the CIRP 42(1993)1, 383÷387.
- [CHM02] CHMIELEWSKI, K.; BERCZYŃSKI, S.: Statystyka matematyczna. Ćwiczenia laboratoryjne z wykorzystaniem pakietu Statystyka Pl. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2002.
- [COO00] COOPER, W.L.; LAVINE, A.S.: Grinding Process Size Effect and Kinematics Numerical Analysis. Trans.ASME, J.of Manuf.Sci.a.Eng., 122(2000)1, 59÷69.
- [DĄB01] DĄBROWSKI, L.; MARCINIAK, M.: Ocena efektywności szlifowania na podstawie zalepiania ściernicy. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Łopuszna, 2001, 153÷162.
- [DĄB02] DĄBROWSKI, L.; MARCINIAK, M.; NOWICKI, B.; PRACKI, M.: Niekonwencjonalne procesy obróbki ścierniej. Materiały XXV Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Wrocław - Duszniki Zdrój, 2002, 33÷54.

- [DER95] Der schnelle Punkt. Quickpoint spart Mehrmaschinen-Bedienung. *Masch.u.Werkz.*, 97(1995)3, 60.
- [DOB05] DOBRZAŃSKI, L.A.: Leksykon materiałoznawstwa. Praktyczne zestawienie norm polskich, zagranicznych i międzynarodowych. Tom IV. Wydawnictwo Verlag Dashöfer, 2005.
- [DUB03] DUBISZ, J.: Uniwersalny słownik języka polskiego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003 r.
- [EIN95] Eine für alles. Zeitsparende Schleifbearbeitung. *Masch.u.Werkz.*, 96(1995)9, 91.
- [EXC95] EXCELL, M.: Grinding process creeps forward. *Metalworking Production*, 139(1995)10, 67÷70.
- [FRI04] FRICK, W.: Glatter Rundschliff. *Maschinenmarkt*, 110(2004)13, S34÷S37.
- [GLI79] GLIWIŃSKI, J.: Metody sprawdzania narzędzi do pomiarów długości i kąta. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1979.
- [GOŁ04] GOŁĄBCZAK, A.: Metody kształtowania właściwości użytkowych ściernic. Politechnika Łódzka, Monografie, Łódź, 2004.
- [GRI97] Grinding - the state of the art. *Mach.a.Prod.Eng.*, 155(1997)3942, 44÷45, 47÷48.
- [GÓR98] GÓRECKA, R.: Teoria i technika eksperymentu. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1998.
- [GUO04] GUO, C.; CAMPOMANES, M.; MCINTOSH, D.; BECZE, C.: Model-Based Monitoring and Control of Continuous Dress Creep-Feed Form Grinding. *Annals of the CIRP*, 53(2004)1.
- [HEG00] HEGENER, G.: In einem Zug geschliffen. Wellenförmige Werkstücke flexibel und mit hoher Leistung schleiftechnisch bearbeiten. *Maschinenmarkt*, 106(2000)16, 38÷43.
- [HER93] HERMAN, D.: Narzędzia ściernicze ze spoiwem szklanokrystalicznym. *Materiały XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniczej*, Koszalin, 1993, 43÷49.
- [HER95] 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.
- [HER97] HERMAN, D.; PLICHTA, J.; KARPIŃSKI, T.: Effects of glass-crystalline and amorphous binder application to abrasive tools made of microcrystalline alumina grains type SG. *Wear*, 209(1997)1-2, 213÷218.
- [HER03] 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.
- [HER04] 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), 511÷522,

- [HER05] 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, 68.
- [HMC05] HMCs deliver grinding dimension. Toughest metals machined in one setup. Tooling & Production, (2005)1.
- [HUG98] HUG, J.-L.: Rectification dans la masse: la bone taille. Mach.Prod., (1998)682, 47÷50.
- [HUM04] HUMIENNY, Z.: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podręcznik europejski. WNT, Warszawa, 2004.
- [INA96] INASAKI, I.: Grinding Process Simulation based on The Wheel Topography Measurement. Annals of the CIRP 45(1996)1, 347÷350.
- [ISO82] ISO 468-1982 (E) – Surface roughness – Parameters, their values and general rules for specifying requirements.
- [ISO96] ISO 13565-1: 1996 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Surface having stratified functional parameters.
- [JAK04] JAKUBIEC, W.; MALINOWSKI, J.: Metrologia wielkości geometrycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [JIN03] JIN, T.; STEPHENSON, D. J.: Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding. Machine Tools & Manufacture, 43(2003), 1129÷1134.
- [JUN85] JUNKER, E.: Verfahren und Vorrichtung zum Hochgeschwindigkeits-Profilschleifen von rotations-symmetrischen Werkstücken. Europäisches Patent, Nr. 0176654, 1985.
- [KAC78] KACALAK, W.; KAPŁONEK, S.; SŁOWIŃSKI, B.: Problemy wyboru kryteriów oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Postępy w technice wytwarzania, WSIInż. w Koszalinie, NOT, Kołobrzeg, 1978.
- [KAC85] KACALAK, W.: Własności eksploatacyjne narzędzi ściernych i problemy ich oceny. Materiały VIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin, 1985, 113÷133.
- [KAC85A] KACALAK, W.; POMIRSKI, a.: Stanowisko do szybkiej oceny właściwości skrawnych ściernic. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej NASS'85, WSI w Koszalinie, GOBiEN, Lubnieszewice, 1985, 4÷12.
- [KAC93] KACALAK, W.: Kierunki prac nad metodami intensyfikacji procesów szlifowania materiałów trudnoobrabialnych. Materiały XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin, 1993, 297÷300.
- [KAC94] KACZMAREK, J.; KLIMCZAK, T.: Porównanie dwuwymiarowej oceny chropowatości powierzchni z oceną trójwymiarową. Materiały V Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej – Forum Prac Badawczych. Metrologia w procesach wytwarzania, Kraków, 1994.
- [KAC99] KACZMAREK, J.: Zastosowanie metody SCGC do oceny technologii i prognozy użytkowania powierzchni obrabianych skrawaniem. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, seria „Konferencje”, (1999)74 zeszyt 34, 5÷19.

- [KAC99A] KACZMAREK, J.: New Approach of the Characteristics of Surface Microstereometry on the Basis of Facing. *Postępy Technologii Maszyn i Automatykacji*, 23(1999)4, 55÷70.
- [KAC01] KACZMAREK, J.; KULAWIK, E.: Wysokościowe parametry przestrzeni chropowatości powierzchni po szlifowaniu. *Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Łopuszna, 2001, 203÷214.
- [KAC03] KACZMAREK, J.: Charakteryzowanie mikrosterometrii powierzchni stalowych dla technologii ulepszających i eksploatacji. Wydawnictwo okolicznościowe z okazji doktoratu honoris causa prof. J. Kaczmarka, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2003.
- [KAR95] KARPIŃSKI, T.; HERMAN, D.; PLICHTA, J.: Efekt zastosowania spoiw szklanokrystalicznych i amorficznych w narzędziach ściernych z ziaren mikrokryształicznego tlenku glinu typu SG. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, seria "Konferencje", (1995)59 zeszyt 24, 235÷240.
- [KLO96] KLOCKE, F.; BÜCKER, C.: Quickpoint-Schleifen: Baustein einer flexiblen Produktion. *Komplettbearbeiten in nur einer Aufspannung*. *Ind.Anz.*, 118(1996)43-44, 48÷49.
- [KLO96A] KLOCKE, F.; HEGENER, G.; DEACU, L.: Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen. *Innovatives Fertigungsverfahren vereint hohe Flexibilität und Produktivität*. *ZWF*, 91(1996)4, 164÷167.
- [KLO97] KLOCKE, F.; BRINKSMEIERS, E.; EVANS, C.; HOWES, T.; INASAKI, I.; MINKE, E.; TÖNSHOFF, H.K.; WEBSTER, J.A.; STUFF, D.: High-Speed Grinding – Fundamentals and state of the art in Europe, Japan, and the USA. *Annals of the CIRP*, 46(1997)2, 715÷724.
- [KLO99] KLOCKE, F.; HEGENER, G.: Schnell, gut und flexibel: Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen. *IDR*, 33(1999)2, 153÷160.
- [KOC89] KOCHANIEWICZ, P.: Analiza wybranych wielkości metrologicznych charakteryzujących powierzchnie techniczne. *Zbiór prac XI Międzynarodowego Sympozjum Naukowego studentów i młodych pracowników nauki pt. Mechanika – technika biomedyczna i biocybernetyka*, Zielona Góra, 1989.
- [KOC90] KOCHANIEWICZ, P.: Podstawy analizy komputerowej oceny parametrów chropowatości powierzchni. *Zbiór prac Sympozjum Makro- i Mikrogeometrii Powierzchni*, Gdańsk, 1990.
- [KOC00] KOCHANIEWICZ, P.: Kształtowanie mikrogeometrii wewnętrznych powierzchni walcowych szlifowanych ściernicami z regularnego azotku boru. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Koszalińska, 2000.
- [KOZ79] KOZIARSKI, A.; BOGOŁĘBSKI, J.; KACZMAREK, J.: Ocena skrawności ściernicy. *Materiały V MKNT Postępy w teorii i technice obróbki materiałów*, KBM PAN, IOS, SIMP, Kraków, 1979, 52÷54.
- [KOZ84] KOZIARSKI, A.; KACZMAREK, J.: Ocena skrawności ściernicy w wybranych odmianach szlifowania. *Postępy Maszyn i Urządzeń*. Zeszyt 4/1984, Warszawa, 1984, 75÷91.
- [KOZ84A] KOZIARSKI, A.; BOGOŁĘBSKI, J.; FIKS, W.; URBANIAK, M.: Kompleksowa metoda oceny właściwości użytkowych ściernic – część I. Opis

- metody. Materiały VII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk, 1984, 75÷87.
- [KÖN78] KÖNIG, W.; LAUER-SCHMALTS, H.: Loading of the grinding wheel phenomenon and measurement. *Annals of the CIRP*, 27(1978)1, 217÷220.
- [KÖN82] KÖNIG, W.; STEFFENS, K.: A numerical method to describe the kinematics of grinding. *Annals of the CIRP*, 31(1982)1, 201÷204.
- [KRU95] KRUSZYŃSKI, B.: Model of Gear-Grinding Process. *Annals of the CIRP* 44(1995)1, 321÷324.
- [KRZ04] KRZOS, J.: Nowoczesne spoiwo ściernic ceramicznych. *Narzędzia elektronnarzędzia*, 39(2004)5, 74÷78.
- [KUB98] KUBIK, L.T.: Zastosowanie elementarnego rachunku prawdopodobieństwa do wnioskowania statystycznego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- [KUK00] KUKIEŁKA, L.: Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2000.
- [KUK02] KUKIEŁKA, S.: Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań. Praca magisterska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2002.
- [LUE04] LUETJENS, P.; MUSHARDT, H.: Grinding out hardened parts. *American Mechanist*, 148(2004)3, 52÷59
- [LÜT01] LÜTJENS, P.: Hard turning or grinding – which is the more economical alternative? *IDR*. 61(2001)1, 22÷26.
- [MAŃ76] MAŃCZAK, Z.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa, 1976.
- [MAR88] MARKUL, J.: Orientacja ziarna ściernego o określonej budowie geometrycznej jako czynnik kształtujący wybrane wielkości procesu skrawania. Rozprawa doktorska. Gdańsk 1988.
- [MAR95] 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, 111÷120.
- [MAS93] MASON, F.: First US high-efficiency deep grinding (HEDG) machine. *Amer.Mach.*, 137(1993)5, 37÷40.
- [MAT93] MATSUO, T.: Recent researches on high efficiency and heavy duty grinding. *Int.J.of Japan Soc.Prec.Eng.*, 27(1993)4, 303÷306.
- [MEL89] MELDNER, B.; KRUSZYŃSKI, B.: Wybrane problemy modelowania procesu szlifowania i ich adaptacja przy kształtowaniu kół zębatych. *Materiały XII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Poznań, 1989, 291÷296.
- [MIN04] MINIKINA, W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [MUS97] MUSHARDT, H.: Modern machines and technologies for cylindrical and surface grinding. *Materiały XX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Poznań-Błażejewko, 1997, 317÷330.

- [MÜC00] MÜCKE, K.: Quickpoint-Schleifmaschine mit wendbarer Spindel. Umspannen des Werkstücks erübrigt sich. *Ind.Anz.*, 122(2000)42-43, 51.
- [NAD03] NADOLNY, K.: Modifications of Axial Internal Cylindrical Grinding process. *Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 33, Modern Techniques and Technologies, Koszalin 2003*, 237-246.
- [NAD03A] NADOLNY, K.; PLICHTA, J.: Badania procesu szlifowania otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej charakterystyce. *Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 2003*, 153-158.
- [NAD04] 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*, 319-324.
- [NAD04A] NADOLNY, K.; BAŁASZ, B.: Modeling of zonal diversified structure grinding wheels surface. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 5(2005)4.
- [NAD05] NADOLNY, K.: Wpływ wartości kąta nakroju stożkowego ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie na rezultaty procesu jednoprzęściowego procesu szlifowania otworów. *Obróbka ścierna w technikach wytwarzania*, pod redakcją Lucjana Dąbrowskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, 78-83.
- [NAD05A] 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 Lucjana Dąbrowskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, 83-89.
- [NAD05B] NADOLNY, K.; PLICHTA, J.: Jednoprzęściowy proces szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 25(2005)2, 31-40.
- [NAK84] 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*.
- [NIŻ96] NIŻANKOWSKI, C.: Właściwości skrawne ściernic z korundu spiekanego. *Monografia Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1996*.
- [NIŻ02] NIŻANKOWSKI, C.; PRZYBYLSKI, L.: Materiały i narzędzia ściernic - trendy rozwoju w XXI wieku. *Materiały XXV Jubileuszowej Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław - Duszniki Zdrój, 2002*, 17÷32.
- [NOA93] NOAKER, P.M.: Creep Feed Grains Ground. *Manufacturing Engineering*, 110(1993)2, 66÷69.
- [NOW91] NOWICKI, B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1991*.
- [OCZ86] OCZOŚ, K.E.; PORZYCKI, J.: Szlifowanie – podstawy i technika. *WNT, Warszawa, 1986*.

- [OCZ91] OCZOŚ, K.E.: Obrabiarki do obróbki ścierniej i erozyjnej na 9. Wystawie Obrabiarek EMO '91 w Paryżu. *Mechanik*, 64(1991)11, 375÷394.
- [OCZ94] OCZOŚ, K.E.: Narzędzia i obrabiarki do obróbki ścierniej na 10. Wystawie Obrabiarek EMO '93 w Hanowerze. *Mechanik*, 67(1994)1, 15÷20 i 40.
- [OCZ96] OCZOŚ, K.E.: Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1996.
- [OCZ97] OCZOŚ, K.E.; WEISS, E.: Technika szlifowania na 12. Światowych Targach Obróbki Metali EMO '97 w Hanowerze. *Mechanik*, 70(1997)12, 563÷573.
- [OCZ00] OCZOŚ, K.E.: Charakterystyka trendów rozwojowych szlifowania ściernicowego. *Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Rzeszów-Myczkowce, 2000, 13÷62.
- [OCZ02] OCZOŚ, K.E.: Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. II. Szlifowanie. *Mechanik*, 75(2002)10, 627÷637.
- [OCZ03] OCZOŚ, K.E.; LIUBIMOV, V.: Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2003.
- [OCZ05] OCZOŚ, K.E.: Doskonalenie techniki szlifowania. Część II. *Mechanik*, 78(2005)10, 745÷750.
- [OFF00] Offensive gegen das Hartdrehen. HSP-Schleifen erobert Märkte zurück. *Masch.u.Werkz.*, 101(2000)6, 26÷28.
- [OPT92] Optimierte Technologie ermöglicht genauer und wirtschaftlich zu schleifen. *Werkst.u.Betr.*, 125(1992)5, 327÷328.
- [PAN82] PANDIT, S.M.; SATHYANARAYANAN, G.: A Model for Surface Grinding Based on Abrasive Geometry and Elasticity. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104/1982, 349÷357.
- [PAN84] PANDIT, S.M.; SATHYANARAYANAN, G.: Data-Dependent Systems Approach to Surface Generation in Grinding. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106/1984, 205÷211.
- [PIK-1A] Instrukcja stanowiska do pomiaru odchyłek kształtu PIK-1A.
- [PLI84] PLICHTA, J.: Ocena trwałości ściernicy metodą fotometrycznego pomiaru stopnia ściernego zużycia jej powierzchni roboczej. *Materiały VII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Gdańsk, 1984.
- [PLI97] PLICHTA, J.: Kierunki rozwoju procesów szlifowania. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji*, 1997, 159÷162.
- [PN87] PN-87/M-04251 – Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.
- [PN87A] PN-87/M-04256/02 – Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.
- [PN92] PN-92/M-01002/05 – Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Terminologia podstawowa w procesach szlifowania ściernicami.
- [PN92A] PN-92/M-01002/04 – Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Siły, energia i moc.
- [PN01] PN-ISO 525 Narzędzia ściernie spojone. Wymagania ogólne. Czerwiec, 2001.

- [POL81] POLAŃSKI, Z.: *Metodyka badań doświadczalnych*. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1981.
- [POL84] POLAŃSKI, Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa, 1984.
- [PRZ79] PRZYBYLSKI, L.: *Powierzchnia robocza ściernicy kształtowana jednoziarnistym obciążaczem diamentowym*. Monografia nr 3. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1979.
- [QUI04] Quickpoint – Everything in One Clamping. Materiały informacyjne firmy Erwin Junker Maschinenfabrik GmbH, 1994.
- [RAY] Raytek ThermoView Ti30 User's Manual.
- [SAL93] SALMON, S.: Speedy creep-feed grinding. *Cutting Tool Engineering*, 45(1993)9, 22÷25.
- [SAL04] SALMON, S.: Creep-Feed Grinding Is Surprisingly Versatile. *Manufacturing Engineering*, 133(2004)5, 59÷64.
- [SAT85] SATHYANARAYANAN, G.; PANDIT, S.M.: Two wavelength characteristic grain model for grinding wheel. *Annals of the CIRP*, 34(1985)1, 297÷303.
- [SCH01] Schleifen oder was? Welche Vorteile haben moderne Schleifverfahren? *Masch.u.Werkz.*, 102(2001)1-2, 14÷16.
- [SNO74] SNOEYS, R.; PETERS, J.; DECNEUT, A.: The significance of chip thickness in grinding. *Annals of the CIRP*, 22(1974)2.
- [STE83] STEFFENS, K.; KÖNIG, W.: Closed loop simulation of grinding. *Annals of the CIRP*, 32(1983)1, 255÷259.
- [SUN01] SUNARTO; ICHIDA, Y.: Creep feed profile grinding of Ni-based superalloys with ultrafine-polycrystalline cBN abrasive grits. *Precision Engineering*, 25(2001), 274÷283.
- [SUT90] SUTO, T.; WAIDA, T.; NOGUCHI, H.; INOUE, H.: Wheel designs for grinding. *IDR*, 50(1990)3, 133÷136.
- [TAW90] TAWAKOLI, T.: *Hochleistungs-Flaschscheifen. Technologie Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz*. VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- [TAW92] TAWAKOLI, T.: *Hochleistungsschleifen (HEDG) von Inconel und anderen Werkstoffen*. VDI-Z., 134(1992)1, 48÷57.
- [TÖN98] 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, 651÷668.
- [WAN97] WANG, S-B.; KOU, H-S.: Cooling Effectiveness of Cutting Fluid in Creep Feed Grinding. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 24(1997)6, 771÷783.
- [WAR98] WARNECK, G.; ZITT, U.: Kinematic simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Process. *Annals of the CIRP* 47(1998)1, 265÷270.
- [WEI01] WEINERT, K.; FINKE, M.: *Innenrund-längsschleifen von Futterteilen – bohrungen in einem überschleiff fertig schleifen*. Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, 37÷44.

- [WEI03] WEINERT, K.; FINKE, M.; KÖTTER, D.: Wirtschaftliche Alternative zum Hartdrehen. Innenrund-Schälschleifen steigert Flexibilität beim Schleifen von Futterteilen. *Maschinenmarkt*, 109(2003)48, 44÷47.
- [WER94] WERNER, P.G.: Entwicklungsstand und Anwendung beim High-Efficiency-Deep-Grinding. HEDG - ein neues Verfahren im Bereich des WT, *Prod.u.Manag.*, 84(1994)7-8, 320÷324.
- [WER97] WERNER, G.: Schneller Abtrag und hohe Bearbeitungsgüte durch innovative HEDG-Schleifprozesse. *Maschinenmarkt*, 103(1997)36, 44÷46, 48÷51, 53÷54.
- [WOR94] WORSLEY, R.: CBN and software at the leading edge. *Metalwork. Prod.*, 138(1994)9, 33÷34.
- [XIN99] XINGAS, A.: Next generation grinding. *American Mechanist*, 143(1999)9, 58÷64.
- [YOO98] YOON, S.C; KRUEGER, M.: A killer combination for ideal grinding conditions. *American Mechanist*, 142(1998)11, 96÷102.
- [YOS68] YOSHIKAWA, H.; SATA, T.: Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method. *Annals of the CIRP*, 16(1968)1, 297÷301.
- [YOS70] YOSHIKAWA, H.; PEKLENIK, J.: Three dimensional Simulation Technique of the Grinding Process – II Effects Of Grinding Conditions and Wear on the Statistical Distribution of Geometrical Chip Parameters. *Annals of the CIRP*, 18(1970)1, 361÷365.
- [ZHA95] ZHANG, L.C.; SUTO, T.; NOGUCHI, H.; WAIDA, T.: A Study of Creep-Feed Grinding of Metallic and Ceramic Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1995), 267÷274.