

*ściernica, spoiwo galwaniczne,
szlifowanie, docieranie,
pomiar, chropowatość*

Mariusz DEJA¹

OCENA STANU CZYNNEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY ZE SPOIWEM GALWANICZNYM W SZLIFOWANIU Z KINEMATYKĄ DOCIERANIA

Proces szlifowania z kinematyką docierania łączy zalety szlifowania i docierania, pozwalając na uzyskanie dużych dokładności wymiarowo-kształtowych i małych wartości parametrów chropowatości, przy zachowaniu dużej wydajności procesu. Wielkość zagłębienia ziaren w spoiwie galwanicznym wpływa na osiągnięte efekty technologiczne oraz na intensywność zużycia czynnej powierzchni ściernicy (CPS). Mniejsza głębokość osadzenia ziaren pozwala na uzyskanie mniejszej chropowatości, przy łatwiejszym wykruszaniu ostrzy ze spoiwa. W przeprowadzonych badaniach określano wpływ zagłębienia ziaren diamentowych i z regularnego azotku boru w spoiwie galwanicznym na trwałość ich właściwości skrawnych. Zmiana zagłębienia ziaren wynikała z wysokości spoiwa wynoszącej 65%, 50% (typowe zagłębienie) i 35% wymiaru charakterystycznego ziaren. Zużycie i stan czynnej powierzchni ściernicy określano z zastosowaniem komputerowej analizy obrazu mikro i makroskopowego.

1. WPROWADZENIE

Szlifowanie z kinematyką docierania charakteryzuje się tym, że w miejsce docieraków stosuje się specjalne ściernice lub tarcze pokryte warstwą ścierniwa [1],[7]. Czynna powierzchnia narzędzia (ciągła lub nieciągła) utworzona zostaje przez segmentowe elementy ściernic o różnym zarysie i wielkości. Małe ściernice o przekroju sześciokątnym lub okrągłym mogą tworzyć czynną powierzchnię o dowolnej średnicy. Stosowane są również narzędzia z ziarnami diamentowymi lub z regularnego azotku boru ze spoiwem metalowym, nałożonym metodą galwaniczną oraz spoiwem elastycznym na bazie tworzyw sztucznych, jak również z warstwą diamentu wytworzoną metodą gęstej plazmy oraz z elektrolitycznym kondycjonowaniem czynnej powierzchni.

Narzędzia trwale zbrojone ziarnami ściernymi (ze spoiwem galwanicznym) mogą być stosowane w obróbce bardzo dokładnej w zmodyfikowanym układzie kinematycznym docierarki jednotarczowej [1]. Zastosowanie narzędzi ze spoiwem wykonanym metodą galwaniczną eliminuje nadmierne dawkowanie ścierniwa. Warstwa ziaren ściernych może być nałożona na jednolitym korpusie lub w przypadku większych narzędzi, na pojedynczych segmentach. Narzędzia ze spoiwem galwanicznym znajdują najszerze

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji,
E-mail: mdeja@pg.gda.pl

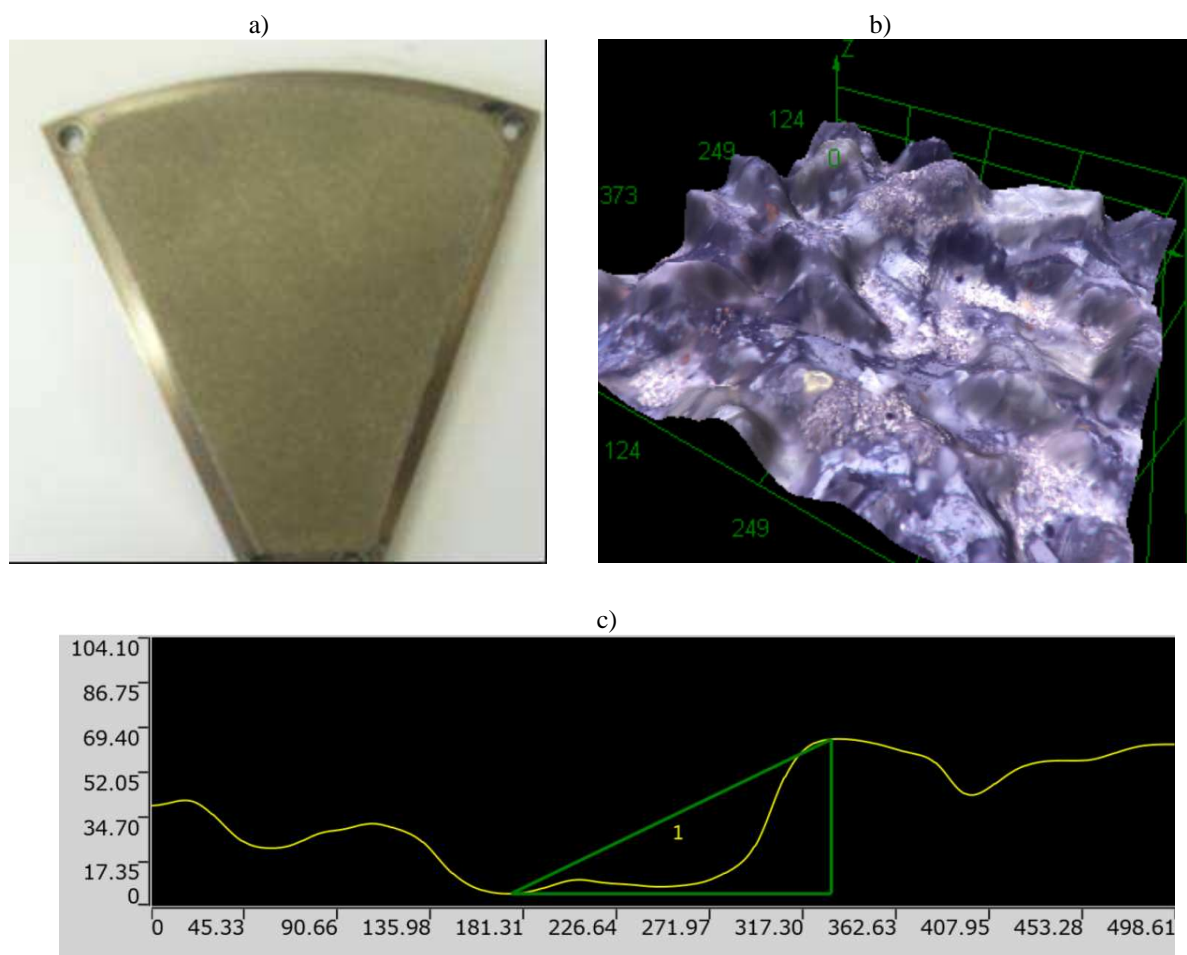
zastosowanie w obróbce powierzchni kształtowych oraz w przecinaniu materiałów trudnoobrabialnych, np. z zastosowaniem strun zbrojonych trwale ziarnami ściernymi. Wszechstronność zastosowania narzędzi galwanicznych w szlifowaniu, wynika z możliwości pokrycia warstwą ziaren ściernych korpusów narzędziowych o dowolnych kształtach. Narzędzia ze spoiwem galwanicznym zbudowane są z warstwy ziaren ściernych, wiązanych warstwą spoiwa (najczęściej niklu), tworzących strukturę z dużymi wolnymi przestrzeniami, umożliwiającymi swobodne odprowadzanie wiórów oraz skuteczne dostarczanie chłodziwa do strefy obróbki [8],[9]. Coraz częściej tego typu narzędzia wykorzystywane są do obróbki bardzo dokładnej i wydajnościowej. W pracy [6] proces szlifowania wzdłużnego otworów narzędziami galwanicznymi z ziarnami CBN wymieniony został jako jedno z ważniejszych, aktualnych wyzwań przemysłowych, obok zastosowania taśm ściernych oraz szlifowania szybkościowego z kinematyką planetarną. W przedstawionych w pracy [6] badaniach z zastosowaniem narzędzi galwanicznych osiągnięto wydajność większą niż w toczeniu przedmiotów w stanie utwardzonym oraz jakość powierzchni jak po szlifowaniu konwencjonalnym. Zużycie i trwałość ściernic ze spoiwem galwanicznym i z warstwą ziaren diamentowych, podczas szlifowania krzemkowej ceramiki technicznej z dużymi wartościami prędkości skrawania, badane było w pracy [5]. Eksperymenty przeprowadzone zostały dla dwóch prędkości szlifowania: 85 i 149 m/s. Przeciwnie do oczekiwań, większe wartości prędkości nie poprawiły ani chropowatości ani objętościowego współczynnika szlifowania (G) oraz nie zmieniły właściwości skrawnych ziaren ściernych. Obserwacje czynnej powierzchni ściernicy (CPS) ujawniły zużycie ziaren ściernych przez stępienie wierzchołków i krawędzi. Powodowało to zwiększenie sił i energii szlifowania, aż do praktycznego zakończenia procesu szlifowania w wyniku zużycia CPS. Wyrwanie ziaren i ich kruszenie nie zostało zaobserwowane, jako zjawisko charakterystyczne dla tego procesu. Zastosowanie ściernic z jednowarstwową powłoką galwaniczną z ziarnami CBN do obróbki stalowych powierzchni płaskich i walcowych wewnętrznych, zostało przedstawione w pracy [8]. Analiza zużycia CPS wykazała dodatkowo, w porównaniu z poprzednimi badaniami, usuwanie ziaren ściernych zwłaszcza w początkowej fazie procesu. W kolejnej fazie, w tzw. stanie ustalonym, dominowało pęknięcie ziaren i ich stępienie. Zużyciu CPS towarzyszył analogicznie jak w pracach [5] progresywny wzrost liczby czynnych ziaren i odpowiadające temu zjawisku zmniejszenie chropowatości powierzchni.

W ramach realizowanych badań własnych zastosowano narzędzia z warstwą ziaren diamentowych i z regularnego azotku boru w zmodyfikowanym układzie docierarki jednotarczowej bez kontaktu pierścienia prowadzącego z CPS [2],[3]. Ilościowa i jakościowa ocena stanu CPS związana jest najczęściej z analizą dwuwymiarowych obrazów optycznych, wykorzystywanych również do oceny cech stereometrycznych badanych obiektów. Nowoczesne mikroskopy stereoskopowe, konfokalne i skaningowe pozwalają na szybki pomiar wielkości geometrycznych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. Stosunkowo duża średnica narzędzia ($\phi 380$) ograniczyła możliwości oceny i obserwacji topografii ściernicy bezpośrednio na stanowisku badawczym. W pracy przedstawiono możliwości oceny stanu czynnej powierzchni ściernic ze spoiwem galwanicznym z wykorzystaniem automatycznej analizy obrazów mikro i makroskopowych.

2. OCENA STANU CZYNNEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY

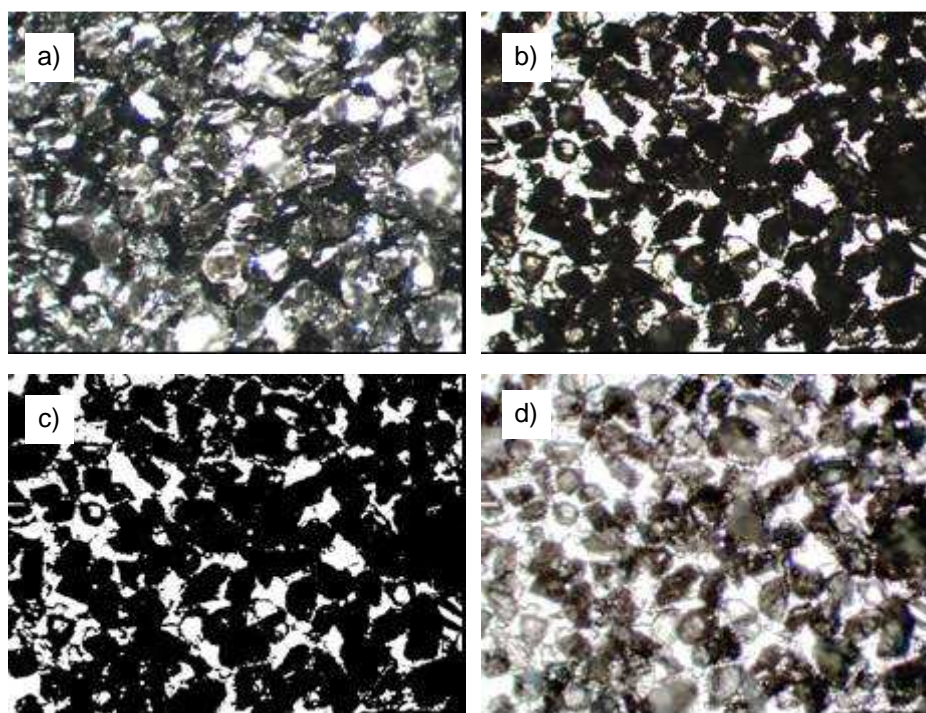
2.1. ZASTOSOWANIE MIKROSKOPII STEREOSKOPOWEJ

Obserwacja powierzchni narzędzia ze spoiwem galwanicznym na optyczno-cyfrowym mikroskopie stereoskopowym Olympus DSX500 umożliwiła dokonywanie pomiarów topografii CPS w dowolnych przekrojach analizowanych obszarów (rys. 1). Odzworowanie struktury przestrzennej ściernicy pozwala na pomiar wysokości odsłonięcia ziaren ściernych i wyznaczenie koncentracji powierzchniowej ziaren czynnych (biorących udział w obróbce) oraz biernych. Zastosowanie tego typu aparatury pomiarowej ograniczone jest wymiarami badanych obiektów oraz miejscem pomiarów, realizowanych poza stanowiskiem badawczym po demontażu ściernicy.



Rys. 1. Obraz czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem galwanicznym na optyczno-cyfrowym mikroskopie stereoskopowym Olympus DSX500: a) segment ścierny, b) odwzorowana topografia ściernicy, c) przykładowy przekrój analizowanej powierzchni z pomiarem maksymalnego odsłonięcia ziarna ściernego
Fig. 1. Image of the active surface of the grinding electroplated tool with the use of an optical-digital stereoscopic microscope Olympus DSX500: a) the abrasive segment, b) the topography of a grinding wheel, c) cross-section of the analyzed sample surface with the measurement of the maximum abrasive grain exposure

Z uwagi na dużą średnicę badanych jednolitych ściernic ($\varnothing 380$), do oceny zużycia CPS zastosowano głównie mikroskop stereoskopowy NIKON SMZ-2T. Wymiary i masa mikroskopu pozwalały na przeprowadzenie analiz bezpośrednio na stanowisku badawczym bez konieczności demontażu ściernicy. Prawidłowe oświetlenie ma decydujący wpływ na jednoznaczność i powtarzalność prowadzonych analiz mikroskopowych, zwłaszcza w przypadku odbijających światło obiektów. Takimi obiektami, trudnymi do obserwacji z zastosowaniem mikroskopu stereoskopowego, są właśnie ziarna ściernic umieszczone na metalowym, również refleksyjnym podłożu (rys. 2a). W wyniku prowadzonych obserwacji i analiz, w badaniach zastosowano dodatkowe oświetlenie poprzez obiektyw mikroskopu. Pozwoliło to na wyraźne rozróżnienie obszarów podłoża i ziaren ściernic, w wyniku wstępnej filtracji obrazu będącej następstwem zastosowanego oświetlenia, przy jednocześnie małej wrażliwości na zmianę kierunku i natężenia światła. Na rejestrowanych tą metodą zdjęciach ciemne obszary odpowiadają standardowo ziarnom ściernym, a jasne metalowemu podłożu (rys. 2b). Kolejnym etapem analizy była binaryzacja obrazu (rys. 2c). Ciekawym efektem urealistycznienia obrazu ziaren ściernic przedstawionym na rys. 2d, skutkowało zastosowanie funkcji wyrównania histogramu na zdjęciu przedstawionym na rys. 2a, wykonanym z dodatkowym, filtrującym i "spłaszczającym" badany obiekt, oświetleniem przez obiektyw.



Rys. 2. Widoki CPS z ziarnami diamentowymi D107: a) światło odbite, b) dodatkowe oświetlenie przez obiektyw, c) binaryzacja przy progu 128, d) zastosowanie funkcji wyrównania histogramu

Fig. 2. Views of the active surface of the electroplated tool with diamond grains D107: a) reflected light, b) additional lighting through the lens, c) binarization with threshold 128, d) application of histogram equalization function

Wyznaczany współczynnik AC określający zużycie CPS, w wyniku zmniejszenia jej wypełnienia ścierniwem, liczony był jako stosunek powierzchni odpowiadającej ziarnom

ściernym (ciemne piksele) do powierzchni metalowego spoiwa (jasne piksele), wg zależności:

$$AC = L_c/L_j, \quad (1)$$

gdzie: L_c – aktualna liczba ciemnych pikseli, L_j – aktualna liczba jasnych pikseli.

Wraz z usuwaniem ziaren ściernych z CPS malała odpowiadająca im ciemna powierzchnia, co pogarszało właściwości ściernic i obniżało wartość współczynnika AC . Ocenę zużycia z wykorzystaniem tej metody oraz innych parametrów opartych na jasności oryginalnych zdjęć i na liczebności ziaren ściernych, przedstawiono m.in. w pracach [1],[4]. Większą powtarzalność i jednoznaczność pomiarów uzyskano przy dodatkowym oświetleniu przez obiektyw mikroskopu, w porównaniu z analizą jasności oryginalnych zdjęć bez filtracji. Metoda pomiaru zużycia CPS na podstawie liczby ziaren ściernych jest bardziej czasochłonna i nie uwzględnia różnicy w rozmiarach liczonych ziaren. Główną jej zaletą jest mały wpływ oświetlenia na powtarzalność pomiarów. Ten rodzaj analizy powinien być zastosowany w przypadku zanieczyszczenia ściernicy zawiesiną z cząstkami ubytku materiałowego, co ma miejsce przy bezpośredniej obserwacji na stanowisku badawczym.

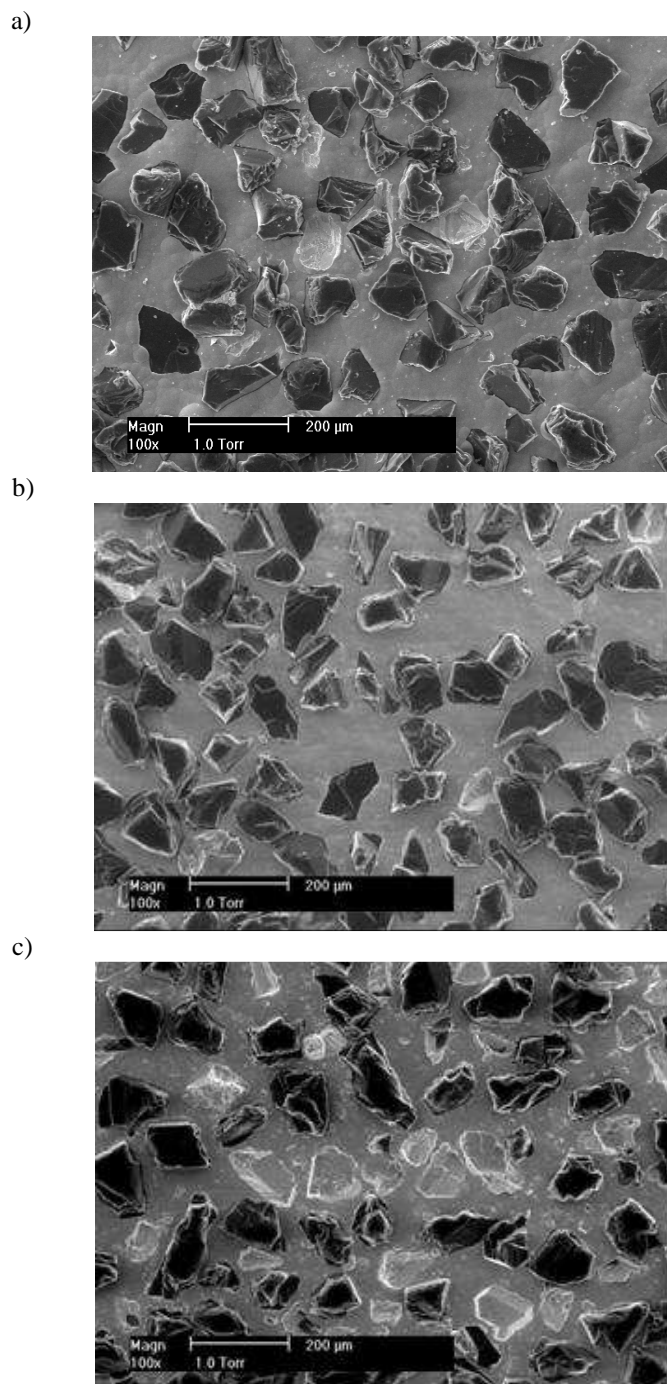
2.2. ZASTOSOWANIE MIKROSKOPII SKANINGOWEJ

Do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy w aspekcie trwałości utwierdzenia ziaren ściernych w spoiwie galwanicznym, wykorzystano środowiskowy elektronowy mikroskop skaningowy Philips-FEI XL 30 ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope). We wcześniejszych badaniach własnych [4] dominującym zużyciem CPS okazało się wyłupywanie ziaren z podłoża. Poddane badaniom i analizowane w pracy [2] ściernice, charakteryzowały się stosunkowo dużą trwałością utwierdzenia ostrzy w spoiwie, malejącą wraz ze zmniejszeniem głębokości ich osadzenia. Głębokość utwierdzenia ziaren w spoiwie określał procentowy współczynnik wysokości spoiwa do wymiaru nominalnego zastosowanych ziaren diamentowych lub z regularnego azotku boru.

Na CPS z ziarnami diamentowymi D107 o współczynniku wysokości spoiwa 65% i 50% zauważalne są pojedyncze miejsca po wyłupanych ziarnach w podłożu niklowym (rys. 3a i rys. 3b). Niewielka liczba wykruszeń świadczy o dominacji stopienia wierzchołków i krawędzi ziaren ściernych w procesie zużycia. Dla najcieńszego spoiwa (współczynnik wysokości 35%) zauważalne są liczne wykruszenia ziaren (rys. 3c), co wpłynęło na uzyskiwane efekty technologiczne prezentowane w pracy [2]. Na zdjęciach mikroskopowych, zwłaszcza w przypadku najcieńszego spoiwa, można zaobserwować ziarna oblepione cząstkami usuniętego materiału z brakiem wyraźnych ostrych krawędzi oraz ziarna lub ich fragmenty po rozłupaniu, zagłębione w spoiwie i nie biorące udziału w szlifowaniu (rys. 3c).

Porównując efekty technologiczne oraz obserwacje mikroskopowe można stwierdzić, że narzędzia z ziarnami CBN charakteryzowały się większym zużyciem CPS, wynikającym m.in. z mniej trwałego utwierdzenia ziaren w spoiwie galwanicznym. Również rodzaj

materiału przedmiotu obrabianego miał znaczenie dla osiągniętych efektów technologicznych. Mniej trwałe osadzenie ziaren CBN w spoiwie nie wpłynęło negatywnie na obróbkę ceramiki SiC, przy negatywnym wpływie na obróbkę stali hartowanej 40H w badanym układzie wykonawczym szlifowania.



Rys. 3. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego CPS z ziarnami diamentowymi D107 dla różnych wysokości spoiwa:

a) 65%, b) 50%, c) 35%

Fig. 3. SEM images of an active surface of the grinding tool with diamond grains D107 for different bond height:

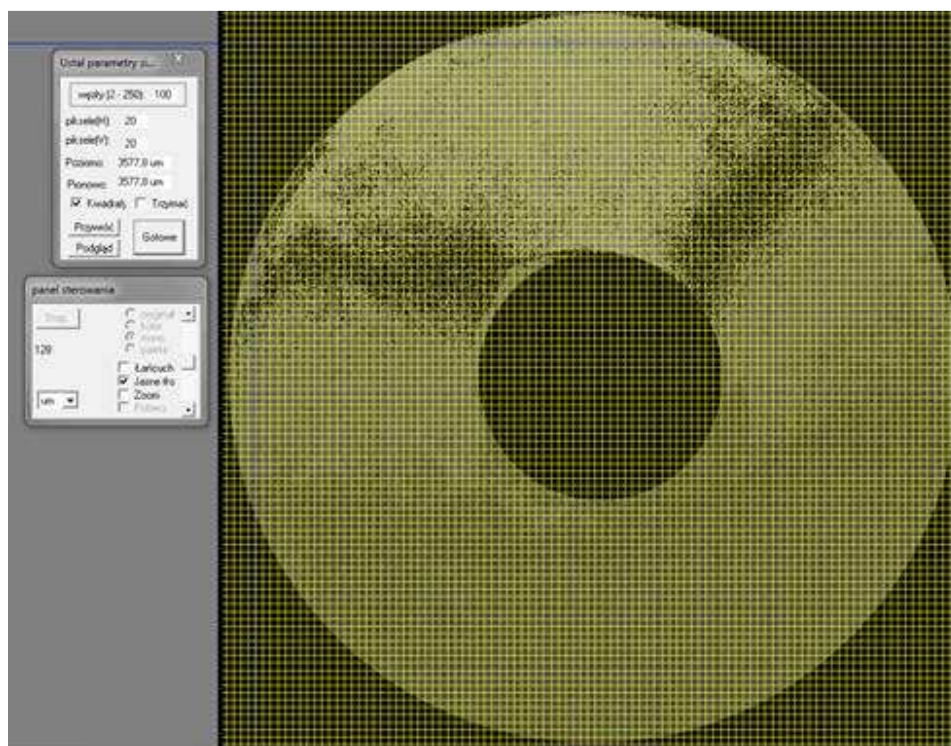
a) 65%, b) 50%, c) 35%

2.3. ANALIZA MAKROSKOPOWA

Duże wymiary ściernic z ciągłą powierzchnią czynną, były przyczyną powstawania wad powierzchniowych i równocześnie dużym wyzwaniem dla ich wytwórców. Głównymi wadami, jakie powstały zwłaszcza w początkowej fazie wytwarzania badanych ściernic ze spoiwem galwanicznym były:

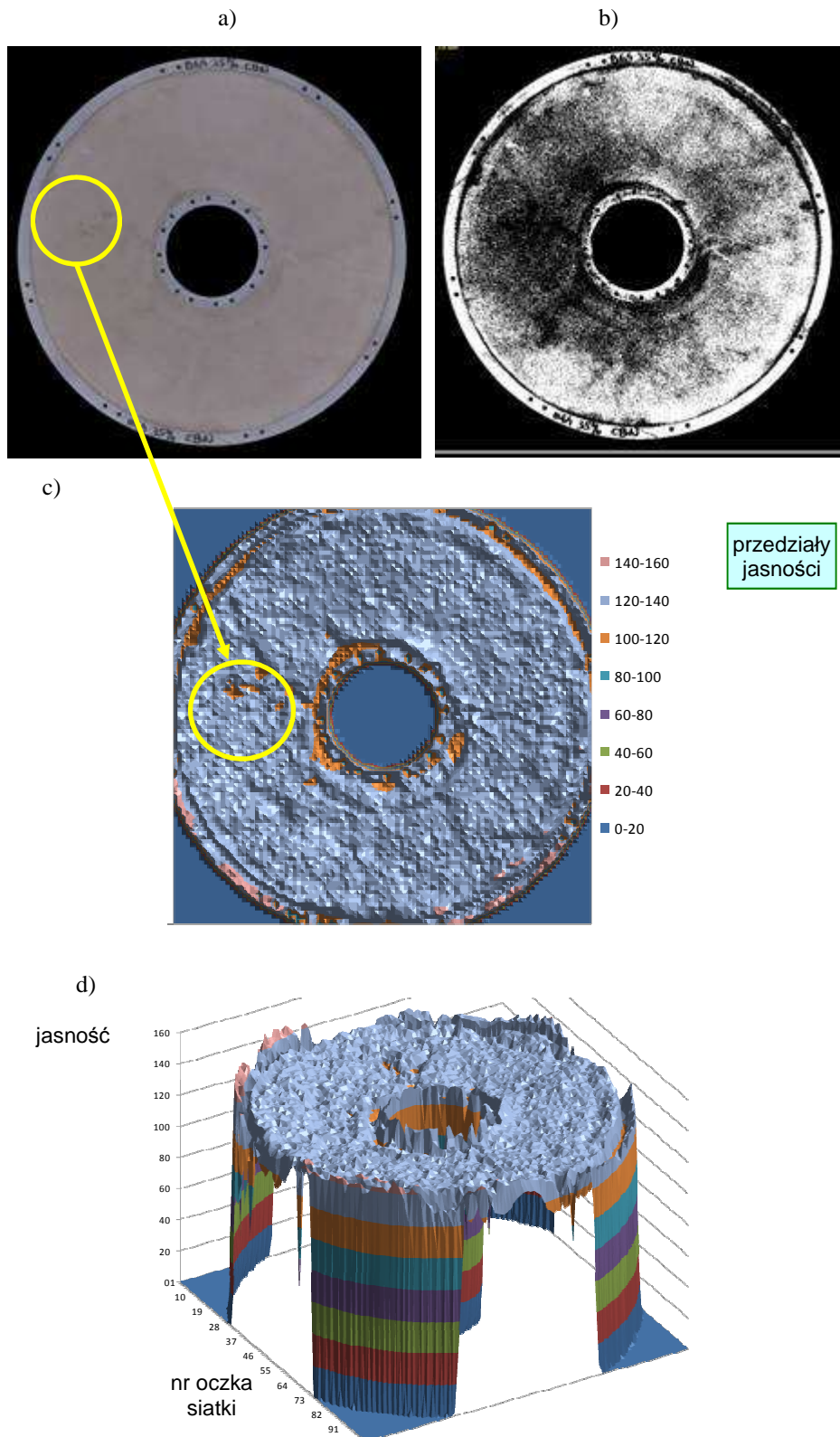
- nierównomierne rozmieszczenie ziaren ściernych na CPS,
- powstanie pęcherzy spoiwa niklowego.

Do oceny i automatycznego identyfikowania wad powierzchniowych zastosowano analizę makroskopową. Zdjęcia czynnej powierzchni ściernicy poddawano analizie jasności po nałożeniu siatki o odpowiednio dobranym zagęszczeniu węzłów, stosowanej w mikroskopowych badaniach stereologicznych (rys. 4). Przy prawidłowym nałożeniu ziaren uzyskiwano równomierny rozkład jasności obliczany z obszarów ograniczonych bokami oczek siatki. Binaryzacja zdjęć ściernic również pokazuje nierównomierność rozłożenia ziaren ściernych, przy kluczowym wpływie równomierności i rodzaju oświetlenia na jakość obrazów oraz analiz, podobnie jak w obserwacjach z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego. Równomierne oświetlenie na specjalnie przygotowanym profesjonalnym stanowisku fotograficznym umożliwiło przeprowadzenie oceny porównawczej badanych ściernic oraz automatyczne zlokalizowanie wad powierzchniowych, co pokazano na przykładzie ściernicy z ziarnami B64 o współczynniku wysokości spoiwa 35% (rys. 5).



Rys. 4. Siatka stereologiczna nałożona na zdjęcie CPS - ściernica z ziarnami B64

Fig. 4. The image of the active tool surface with stereological grid - grinding tool with grains B64



Rys. 5. Ściernica z ziarnami B64: a) zdjęcie oryginalne, b) zdjęcie po binaryzacji przy progu 128, c) wykres jasności w oczkach siatki stereologicznej, d) przestrzenny wykres jasności

Fig. 5. Grinding tool with grains B64: a) original image, b) image after binarization with threshold 128, c) brightness of an image in the mesh of a stereological grid, d) brightness in a 3-D chart

Wpływ nierównomierności rozmieszczenia ziaren ściernych na efekty obróbkowe uzyskane w badaniach prezentowanych w monografii [2] okazał się niewielki, najprawdopodobniej z uwagi na zastosowaną kinematykę docierania i tworzenie zawiesziny ścierniej równomiernie rozprowadzanej przez obrabiane przedmioty na CPS. Duże, nieliczne wady eliminowały zastosowanie ściernicy, natomiast mniejsze, np. pojedyncze pęcherze świadczące o słabym przyleganiu spoiwa do podłoża wpływały na osiągane efekty obróbkowe. Zmniejszeniu uległa wydajność oraz nastąpiło intensywniejsze usuwanie spoiwa niklowego z ziarnami, zwłaszcza w przypadku mniejszych ziaren B64 z regularnego azotku boru.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wysokość warstwy spoiwa galwanicznego wpływa na głębokość i trwałość utwierdzenia ziaren ściernych, a w konsekwencji na liczbę luźnych i czynnych ziaren w procesie szlifowania. Zużycie czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem galwanicznym skutkuje, w wyniku m.in. zmniejszenia wypełnienia spoiwa ziarnami ściernymi, zmniejszeniem wydajności oraz mniejszymi wartościami parametrów chropowatości i falistości. Dominującym zużyciem ściernic ze spoiwem galwanicznym było stępienie ziaren utwierdzonych w spoiwie o współczynniku wysokości 65% i 50%. Przy utwierdzeniu ziaren w najniższym spoiwie (35%) dominowało ich wykruszanie z CPS. Wykruszone oraz rozdrobnione ziarna tworzyły razem z podawanym płynem obróbkowym zawieszinę ścierną, podobną do stosowanej w procesie docierania. Umożliwiło to uzyskanie mniejszych wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) warstwy wierzchniej powierzchni obrabianej, po określonym czasie szlifowania. Największe wartości analizowanych parametrów SGP uzyskiwano w początkowej fazie obróbki. Zdjęcia mikroskopowe CPS, przy zaproponowanej metodzie oświetlenia światłem przechodzącym przez obiektyw, mogą być wykorzystane do oceny stanu CPS poprzez wyznaczanie koncentracji powierzchniowej ziaren ściernych lub obliczanie współczynników właściwości ściernych CPS na podstawie jasności analizowanych obszarów z wykorzystaniem automatycznej analizy obrazów. Analiza obrazów makroskopowych może być stosowana do oceny równomierności rozmieszczenia ziaren ściernych oraz do identyfikacji wad powierzchniowych na etapie wytwarzania ściernic.

LITERATURA

- [1] BARYLSKI A., DEJA M., 2009, *Microgrinding of flat surfaces on single-disc lapping machine*, International Journal of Machining and Machinability of Materials, 5/2-3, 245–267.
- [2] DEJA M., 2013, *Wybrane problemy szlifowania powierzchni płaskich z kinematyką docierania*, Monografia nr 143, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- [3] DEJA M., 2012, *Correlation between shape errors in flat grinding*, Journal of Vibroengineering, 14/2, 520-527.
- [4] DEJA M., 2012, *Zużycie narzędzi ze spoiwem galwanicznym w mikroszlifowaniu powierzchni płaskich z kinematyką docierania*, Problemy i tendencje rozwoju obróbki ścierniej, Red. Cichosz P., Politechnika Wrocławska, Wrocław, 177-184, ISBN 978-83-917677-6-4.

-
- [5] HWANG T.W., EVANS C.J., WHITENTON E.P., MALKIN S., 2000, *High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels, part 1: wear and wheel life*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122/1, 32-41.
 - [6] OLIVEIRA J.F.G., SILVA E.J., GUO C., HASHIMOTO F., 2009, *Industrial challenges in grinding*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/2, 663-680.
 - [7] SANCHEZ L.E.A., JUN N.Z.X, FIOCCHI A.A., 2011, *Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors*, Precision Engineering, 35/2, 355-363.
 - [8] SHI Z., MALKIN S., 2003, *An investigation of grinding with electroplated CBN wheel*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 52/1, 267-270.
 - [9] UPADHYAYA R.P., FIECOAT J.H., 2007, *Factors affecting grinding performance with electroplated CBN wheels*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 56/1, 339-342.

ESTIMATION OF THE ACTIVE SURFACE CONDITION OF THE ELECTROPLATED TOOL IN GRINDING WITH LAPPING KINEMATICS

Grinding with lapping kinematics combines the advantages of both conventional processes (grinding and lapping), allowing to obtain high dimensional accuracy and low surface roughness while maintaining high process efficiency. Grain size exposure, due to the different height of the nickel bond in relation to the grains nominal dimension, affects the technological effects, as well as the intensity of the wear of the active surface of the tool. Smaller grain embedment depth allows for a better surface finish, but with the shorter tool life. Grinding tools were made for three values of the binder height coefficient: 35%, 50% i 65%. The wear of the grinding wheels with the use of the stereoscopic and scanning microscopy observations as well as with the computer analysis of taken macro images are presented in the paper.