

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

## Dwuzabiegowy sposób quasi-przestrzennego odwzorowywania obiektów techniką hydrostrumieniową

Dual-procedure method of quasi-spatial objects' imaging with hydro-jetting technique

PRZEMYSŁAW BORKOWSKI  
JÓZEF BORKOWSKI  
MICHAŁ BIELECKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.339

W artykule przedstawiono model dwuzabiegowego sposobu quasi-przestrzennego odwzorowywania obiektów erodowanych strugą wodno-ścierną (AWJ) o trajektoriach ortogonalnych. Określa on zależności występujące pomiędzy fotometrycznymi właściwościami dyskretnych elementów powierzchni obrazu 2D, w tym zwłaszcza ich luminancji, a parametrami takiego sposobu obróbki obiektu 3D. Przeprowadzone badania wskazują na istotną rolę kształtu punktowych mini-barrier powstających po wzajemnie prostopadłych przejściach strugi AWJ, dzięki czemu uzyskuje się bardzo szerokie spektrum kąтового postrzegania wyerodowanego obiektu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przestrzenne kształtowanie obiektów, model teoretyczny, właściwości fotometryczne, struga wodno-ścierna, sterowanie automatyczne

*The paper presents the model of dual-procedure method of quasi-spatial objects imaging with abrasive-water jet (AWJ), characterized by orthogonal trajectories. The model describes dependencies occurring between photometric properties of discrete elements of 2D image's surface (especially including its luminance) and parameters of such kind 3D machining method. The research point out an important role of punctual mini-barriers' shape occurring after perpendicular AWJ cut, enabling the same way to receive a wide spectrum of angular observation of eroded object.*

**KEYWORDS:** objects' spatial shaping, theoretical model, photometrical properties, abrasive-water jet (AWJ), automatic control

Szczególne cechy wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej (AWJ), w tym zwłaszcza jej elastyczność, stwarzają

szerokie możliwości zastosowania takiego specyficznego narzędzia. Badania procesów obróbki strugą AWJ [10], w tym zwłaszcza interakcji ziaren ściernych z materiałem obrabianym [4], umożliwiły określenie mechanizmu takiej erozji a nawet optymalizację warunków technologicznych obróbki [11] oraz opracowanie modelu „frezowania” materiału [13]. Osiągnięcia ostatnich lat sprawiły, że takie metody obróbki zaczęły skutecznie konkurować z konwencjonalnymi metodami przecinania materiałów czy frezowania przestrzennych kształtów [12, 15]. Obróbka strugą AWJ pozwala również na jednozabiegowe odtwarzanie quasi-przestrzennych obiektów na podstawie ich płaskiego obrazu [5]. Opublikowanie szczegółów tej metody spowodowało gwałtowny rozwój jej zastosowań [8, 9, 16], niekiedy realizowanych [14] nawet z naruszeniem naszych praw autorskich.

Dzięki własnym eksperymentom [4] opracowano zaautomatyzowaną metodę [3] przestrzennego kształtowania powierzchni różnych materiałów [2, 4]. Analiza teoretycznych podstaw [7] stosowanej dotychczas metody umożliwia przeprowadzanie jednozabiegowego odwzorowywania obrazu 2D jako specyficznej płaskorzeźby 3D w materiale oraz istotę takiej technologii [6] realizowanej przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej. Szczególną cechą tej obróbki jest zapewnienie odpowiedniej dokładności i jakości obrabianej powierzchni [1, 4], gdyż decydują one o postrzeganiu jakości rzeźbionego obiektu 3D. Jednak zasadniczą wadą jednozabiegowej metody odwzorowywania obrazu jest ograniczony obszar kątowy dobrego postrzegania szczegółów takiego sposobu rzeźbienia obiektu. Dla radykalnej poprawy takiego stanu nieodzowne jest zastosowanie dwuzabiegowego sposobu wykonywania takich płaskorzeźb.

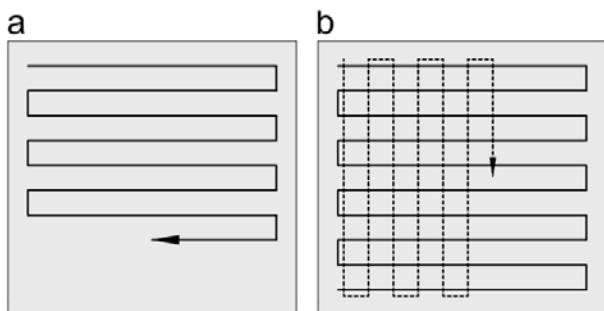
Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie teoretycznych podstaw i eksperymentalnych wyników dwuzabiegowego sposobu quasi-przestrzennego kształtowania obiektu na podstawie jego wirtualnego obrazu.

\* prof dr hab. inż. Przemysław Borkowski (pborkowski@cuprum.wroc.pl)  
prof. dr hab. inż. Józef Borkowski (jozef.borkowski@tu.koszalin.pl),  
dr inż. Michał Bielecki (michal.bielecki@tu.koszalin.pl),

## Istota dwuzabiegowego kształtowania materiału

Teoretyczne podstawy metody odwzorowywania obrazu 2D w postaci specyficznej płaskorzeźby 3D [7] oraz istotę jednozabiegowego procesu jej erodowania w materiale [6], oparto na selektywnym wyborze zmiennej głębokości wyerodowania przez strugę AWJ przemieszczającą się z odpowiednio zróżnicowaną prędkością posuwu. Przypomina to zasadę dyskretnego skanowania, w którym wszystkie punkty (piksele) ułożone jeden za drugim tworzą złożone wiersze, a te z kolei umieszczone obok siebie tworzą obraz. W metodzie tej uwzględniono zróżnicowanie luminancji występujące w poszczególnych obszarach obrazu rozpatrywanego jako bitmapa, w której poszczególnym kolorom piksela przypisuje się odpowiednią głębokość szarości wyliczaną z modelu przestrzeni barw RGB. Wykorzystanie zróżnicowania luminancji do sterowania prędkością przemieszczania się strugi AWJ, zapewnia odpowiednie zróżnicowanie zagłębień erodowanych w materiale, które decydują o docelowym kształcie rzeźbionego obiektu. W związku z podobieństwem działania tej metody do sposobu zapisu i odczytu odwzorowywanego obrazu, zastosowano bitmapę jako wzorzec dla docelowego kształtu płaskorzeźby.

Istotę takiej metody przestrzennego kształtowania materiału strugą AWJ zilustrowano na rys. 1a. Uwidoczniony tam schemat układu trajektorii ruchu strugi AWJ, przebiegający ze zróżnicowaną chwilową prędkością posuwu, jest identyczny z realizacją pierwszego zabiegu w dwuzabiegowym cyklu erodowania płaskorzeźby obiektu 3D, zamieszczony na rys. 1b.



Rys. 1. Schemat układów trajektorii ruchu strugi AWJ podczas a – jednozabiegowego, b - dwuzabiegowego procesu erodowania płaskorzeźby obiektu 3D

Taki dwuzabiegowy proces przestrzennego kształtowania powierzchni obiektu strugą AWJ, na podstawie jego obrazu, należy przeprowadzać w czterech następujących etapach:

1. Obraz obiektu przeznaczonego do wyerodowania jest skanowany w odpowiednich odcieniach szarości o zadawalającej rozdzielczości za pomocą skanera z określonego źródła, np. zdjęcia.
2. Odcienie szarości powstałego wirtualnego obrazu (w postaci pliku bitmapy) zostają przetworzone na prędkość posuwu głowicy, decydującą o czasie oddziaływania strugi na materiał obrabiany.
3. Dwuosiowy układ wykonawczy urządzenia roboczego (plotera) wykonuje „inteligentne wierszowanie” (poziome, według schematu przedstawionego na rys. 1a), zadawane przez program sterujący, powodując wzdłużne ruchy głowicy roboczej ze zróżnicowaną chwilową prędkością posuwu, co odpowiednio różnicuje głębokość erodowanego materiału.
4. Na poprzednio wyerodowanych rowkach poziomych układ roboczy plotera wykonuje analogiczne „wierszowanie skanujące” w kierunku prostopadłym do poprzedniego (tj. pionowe, według schematu przedstawionego na rys. 1b), które są zadawane przez program sterujący

ruchem głowicy roboczej w drugim zabiegu procesu erodowania płaskorzeźby obiektu 3D.

Dzięki odpowiedniemu sterowaniu prędkością przesuwu głowicy roboczej względem materiału obrabianego jej „skanujące” ruchy są realizowane ze zmiennymi prędkościami, co zapewnia analogicznie zmienne przedziały czasu dla oddziaływania strugi AWJ na materiał obrabiany. Przekłada się to na wykonywanie odpowiednio zróżnicowanych wgłębień rozłożonych wzdłuż wyerodowanego śladu przejścia strugi. W wyniku kolejnych, wierszujących przejść strugi wodno-ścierniej, przesuniętych o podziałkę odpowiadającą średnicy strugi, można otrzymać na materiale obrabianym mozaikę zagłębień rozmieszczonych analogicznie do wirtualnego obrazu.

## Model przestrzennego kształtowania materiału

W pewnym stopniu automatyczna metoda quasi-przestrzennego rzeźbienia obiektu na podstawie jego obrazu, wymaga określenia zależności występujących pomiędzy fotometrycznymi warunkami promieniowania światła widzialnego i parametrami erodowania strugą wodno-ścierną. Zatem z jednej strony należy rozpatrzyć istotne warunki fotometryczne odtwarzania obrazu, z drugiej zaś podstawowe zależności technologiczne kształtowania materiału strugą AWJ. Tego rodzaju analizę powiązania fotometrycznych warunków odtwarzania obrazu z parametrami jego hydrostrumieniowego erodowania w materiale obrabianym zrealizowano we wcześniejszych publikacjach własnych [1-5, 7].

Przykładowo, chwilową prędkość przemieszczania się strugi AWJ względem wybranej elementarnej komórki (i) kształtowanego obiektu (erodowanego materiału) w procesie jednozabiegowym, opisano we wcześniejszej własnej publikacji [7], następującą zależnością:

$$v_i = \frac{\Delta\omega \Delta S d_m}{K_m \Delta W} L_i \quad (1)$$

w której:  $\Delta\omega$  jest kątem bryłowym oświetlenia powierzchni obiektu wiązką światła,  $\Delta S$  jest powierzchnią wysyłającą promieniowanie,  $d_m$  jest średnicą dyszy mieszającej (ogniskującej),  $K_m$  jest fotometrycznym równoważnikiem promieniowania,  $\Delta W$  jest wyemitowaną porcją strumienia energii zaś  $L_i$  jest luminancją elementarnej komórki (i) wybranej z fotografii obiektu.

$$v_i = A L_i \quad (2)$$

w którym  $A = \frac{\Delta\omega \Delta S d_m}{K_m \Delta W}$  oznacza stałą uwzględniającą warunki fotometryczne i charakterystykę zastosowanej głowicy roboczej.

W omawianej metodzie przestrzennego kształtowania materiału przy użyciu wysokociśnieniowej strugi AWJ, zamiast stosowania kłopotliwej w realizacji dynamicznej kontroli procesu, wykorzystuje się odpowiedni model [4] bezpośredniego sprzężenia prędkości posuwu ( $v$ ) strugi z głębokością wyerodowania ( $h$ ) materiału obrabianego. Na podstawie badań ponad stu różnych warunków takiej obróbki stwierdzono, iż najbardziej adekwatny jest model opisywany następującym równaniem potęgowym:

$$h = b v^{-a} \quad (3)$$

w którym:  $a$  jest wykładnikiem potęgowym, zaś  $b$  - czynnikiem wzo-ru empirycznego.

Taki zapis modelu potwierdzają konkretne wzory opracowane dla ponad stu różnych przypadków wynikłych z przestrzennego kształtowania wybranych materiałów erodowanych w różnych warunkach obróbkowych [4]. O najwyższej dokładności zupełnego dopasowania tego modelu, świadczą bardzo wysokie wartości współczynnika determinacji, którego wartości dla wszystkich przebadanych powy-

żej przypadków zawierają się w zakresie wartości  $R^2 = 0,954 \div 1,0$ .

Z zależności takiego uniwersalnego modelu wynika, że głębokość wyerodowania materiału jest odwrotnie proporcjonalna do potęgowej funkcji prędkości posuwu strugi AWJ. Relacja taka sprawia, że najgłębsze wyerodowania występują przy najmniejszej prędkości przesuwu strugi wodno-ścierniej, a jej zwiększanie powoduje wypływanie tych zagłębień według zależności o charakterze zbliżonym do hiperboli. Oczywiście zależność określona powyższym wzorem obowiązuje także dla chwilowych wartości  $h_i, v_i$  odnoszących się do erodowania elementarnej komórki powierzchni obiektu (obrabanego materiału).

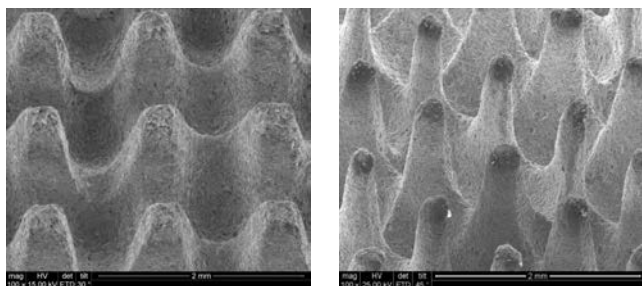
Przez podstawienie równania (2) do wzoru (3) uzyskuje się nową formułę zapisu chwilowych wartości modelu erodowania materiału:

$$h_i = B L_i^{-a}, \quad (4)$$

w którym  $B = b \left( \frac{\Delta W K_m}{\Delta \omega \Delta S d_m} \right)^a$  oznacza nową wartość stałą, uwzględniającą warunki fotometryczne i charakterystykę głowicy roboczej stosowanej w obróbce AWJ.

Podobnie jak poprzednio, zależność (4) tego uniwersalnego modelu ukazuje, że głębokość wyerodowania materiału jest odwrotnie proporcjonalna do potęgowej funkcji luminancji elementarnych komórek materiału obrabanego. Wskutek tego najbardziej zaciemnionym częściom wirtualnego obrazu odpowiada największe zagłębienie wyerodowane w materiale, natomiast wzrostowi luminancji obrazu towarzyszy quasi-hiperboliczne zmniejszanie się głębokości takiego wyerodowania.

Analogicznymi zależnościami można posługiwać się także odnośnie drugiego przejścia strugi AWJ, tj. względem ortogonalnego układu trajektorii występujących w dwuzabiegowym procesie erodowania obiektu, które są przedstawione na rys. 1b jako linie pionowe. Wówczas jednak pojawia się problem w obszarach przecinania się tych ortogonalnych trajektorii, gdyż powstają tam nadmierne wyerodowania materiału. Jest to wyraźnie widoczne na obrazach SEM (rys. 2).



Rys. 2. Obrazy SEM punktowych mini-barier (o kształtach: a – proporcjonalnych, b – smukłych) i nadmiernych zagłębień powstających w przydatnych miejscach przecięcia ortogonalnych trajektorii strugi AWJ

Mikroskopowy widok takich punktowych mini-barier uwiadcza nadmierne wyerodowania materiału powstające w przydatnych miejscach przecięcia ortogonalnych trajektorii strugi AWJ. Takie nadmierne zagłębienia powstają w warunkach erodowania takich mini-barier zarówno o kształtach proporcjonalnych (rys. 2a), jak i smukłych (rys. 2b). Te ostatnie powstają w warunkach zastosowania niedostatecznych relacji pomiędzy szerokościami podziałki pomiędzy poszczególnymi przejściami strugi a szerokościami nacinających rowków. Z jednej strony jest to korzystne, gdyż zmniejsza to wrażliwość takiej powierzchni na wspomniane powyżej niedowymiarowanie mini-barier, jednak z drugiej,

niekorzystnej strony, ich nadmierna smukłość prowadzi do obniżenia mechanicznej nośności takiej powierzchni.

Pojawia się więc potrzeba empirycznego określania odpowiedniej głębokości ortogonalnych rowków erodowanego materiału. Należy przy tym uwzględnić właściwości mechaniczne tegoż materiału. Aby przy tym zniwelować nadmierne zwiększoną głębokość przecinania się ortogonalnych trajektorii strugi AWJ należy nad tymi obszarami odpowiednio zwiększyć prędkość posuwową głowicy roboczej. Zależność opisującą taką właśnie prędkość określa następujący wzór:

$$v_i = (1 + c) \frac{\Delta \omega \Delta S d_m}{K_m \Delta W} L_i, \quad (5)$$

W powyższym wzorze empiryczny czynnik  $c < 1$  charakteryzuje zmniejszoną skuteczność erodowania materiału spowodowaną zwiększeniem odległości dyszy roboczej od powierzchni erodowanego materiału, w miejscu przecinania się trajektorii strugi AWJ ortogonalnych względem siebie, w którym już podczas pierwszego zabiegu został wyerodowany dość głęboki rowek. Powyższe równanie można także przedstawić w uproszczonym zapisie, bardziej przydatnym do przeprowadzania teoretycznej analizy:

$$v_i = C L_i, \quad (6)$$

w którym  $C = (1 + c) \frac{\Delta \omega \Delta S d_m}{K_m \Delta W}$  oznacza wartość stałą, uwzględniającą występujące warunki fotometryczne i charakterystykę głowicy roboczej stosowanej w obróbce AWJ.

Uwzględniając przy tym adekwatny model opisywany wcześniej równaniem potęgowym (3) łatwo stwierdzić przez analogię, że o dokładności tak udokumentowanego modelu, najlepiej świadczą bardzo wysokie wartości współczynnika determinacji, zbliżone do wartości  $R^2 = 1$ . Dlatego z tego uniwersalnego modelu wynika, że głębokość wyerodowania materiału jest odwrotnie proporcjonalna do potęgowej funkcji prędkości posuwu strugi AWJ. Relacja taka sprawia, że najgłębsze wyerodowania występują przy najmniejszej prędkości przesuwu strugi wodno-ścierniej, a jej zwiększanie powoduje wypływanie tych zagłębień według zależności o charakterze zbliżonym do hiperboli, co oczywiście obowiązuje również dla chwilowych wartości  $h_i, v_i$  związanych z erodowaniem elementarnej komórki powierzchni obiektu (obrabanego materiału).

Przez podstawienie powyższego równania (6) do wcześniejszego wzoru (3) uzyskuje się nową formułę zapisu chwilowych wartości modelu erodowania materiału w obszarach przecinania się ortogonalnych trajektorii:

$$h_i = K L_i^{-a}, \quad (7)$$

w którym  $K = \frac{b}{(1+c)^a} \left( \frac{\Delta W K_m}{\Delta \omega \Delta S d_m} \right)^a$  oznacza nową wartość stałą, uwzględniającą warunki fotometryczne i charakterystykę głowicy roboczej stosowanej w obróbce AWJ, co daje się również wyrazić w bardziej użytecznej postaci  $K = B (1 + c)^{-a}$ .

Uwzględnienie tej ostatniej postaci opisującej wyrażenie  $K$  w modelu erodowania materiału, ujętego wzorem (7) umożliwia nadanie temu modelowi następującej formuły:

$$h_i = B (1 + c)^{-a} L_i^{-a} \quad (8)$$

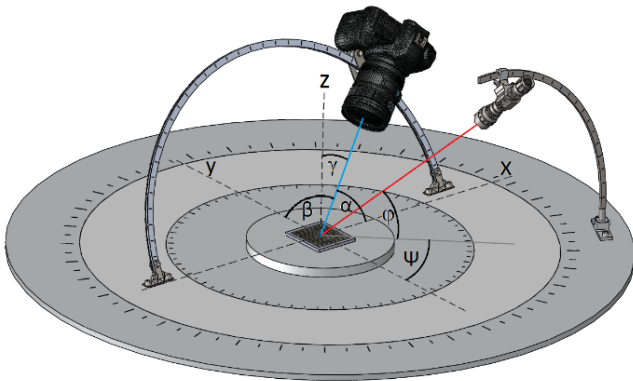
A zatem w miejscach wzajemnie prostopadłych przejść strugi AWJ, zależność (8) opisująca ten uniwersalny model ukazuje, że głębokość wyerodowania materiału została w nich bardzo wyraźnie spłycona i jest ona odwrotnie proporcjonalna do potęgowej funkcji luminancji elementarnych

komórek materiału obrabianego. Dzięki temu najbardziej zaciemnionym częściom wirtualnego obrazu odpowiada największe zagłębienie wyerodowane w materiale, natomiast wzrostowi luminancji obrazu towarzyszy quasi-hiperboliczne zmniejszanie się głębokości takiego wyerodowania.

### Metodyka pomiaru jakości wykonywanych płaskorzeźb

Badania metody quasi-przestrzennego kształtowania obiektów wykonywanych z różnych materiałów przy użyciu wysokociśnieniowej strugi AWJ erodującej materiał w procesie dwuzabiegowym pozwoliły na zgromadzenie interesujących danych. Taki sposób rzeźbienia obiektu na podstawie jego wirtualnego obrazu nie wymaga ani kłopotliwego nadzoru procesu ani też złożonego procesu jego sterowania. Specjalistyczne oprogramowanie takiego procesu obróbkowego, ma jedynie zapewniać możliwość doboru odpowiedniego „przełożenia” pomiędzy właściwościami materiału obrabianego a erozywnością strugi wodno-ścierniej i prędkością przesuwu głowicy roboczej. Dzięki temu można poniekąd automatycznie rzeźbić w konkretnym materiale quasi-przestrzenny obiekt na podstawie luminancji jego fotograficznego obrazu [3, 4]. Uzyskane wyniki umożliwiają weryfikację trafności doboru odpowiednich głębokości erodowania materiału oraz zapewniają dobry stan odtwarzania obiektu na podstawie wirtualnego obrazu płaskiego.

Jednak w poprzednio stosowanych rozwiązaniach jednozabiegowego kształtowania quasi-przestrzennych obiektów metodą hydrostrumieniowego erodowania materiału, wyraźnym niedostatkim był nazbyt wąski obszar poprawnego postrzegania wyerodowanego w ten sposób obiektu. Z powyższych względów dla dokonania precyzyjnej i obiektywnej oceny jakości i obszerności dobrego postrzegania obiektu wyerodowanego sposobem dwuzabiegowym, nieodzowne stało się opracowanie i wykonanie odpowiedniego przyrządu, którego schemat przedstawiony został na rys. 3.



Rys. 3. Schemat przyrządu do kątownego fotografowania płaskorzeźby obiektu wyerodowanego w materiale z zaznaczonym układem określania przestrzennego usytuowania kamery (kątownego postrzegania obiektu 3D)

Ten specjalistyczny przyrząd umożliwia fotografowanie wyerodowanego obiektu w przestrzennym układzie kątowym, mierzonym względem trzech osi układu kartezjańskiego. Ponadto zapewnia on dobre warunki oświetlenia badanego obiektu precyzyjnym oświetlaczem, o niezależnym ustawieniu kątowym względem dwóch głównych osi tegoż układu, co jest dość istotne dla jakości uzyskiwanych fotografii. Dzięki temu dowiedziono, że dobra jakość postrzegania wyerodowanych obiektów występuje praktycznie w całym obszarze kątowym przeprowadzanych obserwacji.

Ponadto podstawowym urządzeniem używanym do pomiaru topografii i jakości powierzchni wyerodowanego obiektu był profilografometr przestrzenny typu Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson, wyposażony w trzy rodzaje głowicy pomiarowych: indukcyjną o rozdzielczości 2 nm, laserową

wą o małej rozdzielczości 1  $\mu\text{m}$  oraz głowicę CLA confocal gauge o rozdzielczości 25nm. Zasadniczą część badań przeprowadzono przy użyciu laserowej głowicy pomiarowej (laser gauge single range). Z kolei do analizy specyfiki ukształtowania obiektu i morfologii jego powierzchni stosowano mikroskop skaningowy FEI Quanta 200 Mark II.

### Jakość wykonywanych płaskorzeźb

Typowym przykładem jakości i obszerności postrzegania quasi-przestrzennego obiektu, ukształtowanego w dwuzabiegowym sposobie hydrostrumieniowego erodowania materiału strugą AWJ, są obrazy zamieszczone na rys. 4.



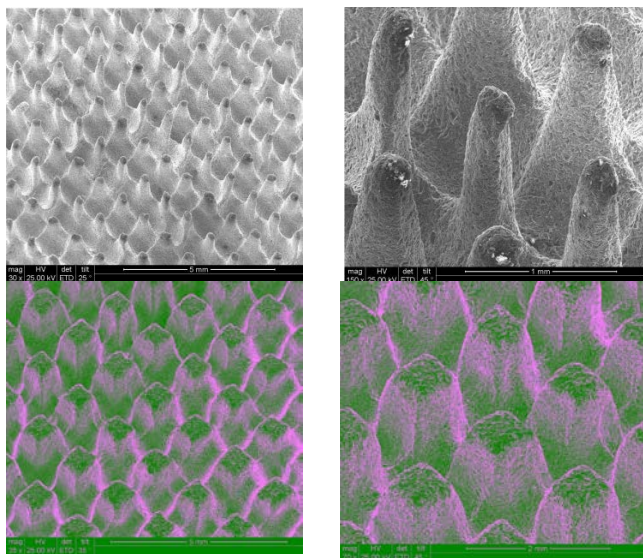
Rys. 4. Wizualne efekty postrzegania oddziaływania zmiany wartości kąta obserwacji  $\alpha$  na wizualne efekty postrzegania obrazów płaskorzeźby obiektu 3D (Mony Lisy) wyerodowanego w procesie dwuzabiegowym (dla stałych wartości kątów obserwacji:  $\beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$  oraz kątów oświetlenia  $\phi = 55^\circ$ ,  $\psi = 45^\circ$ )

Powyższe przykłady licznych obrazów wyerodowanego obiektu 3D (Mony Lisy) stanowią świadectwo poprawnych efektów takiej dwuzabiegowej obróbki hydrostrumieniowej.

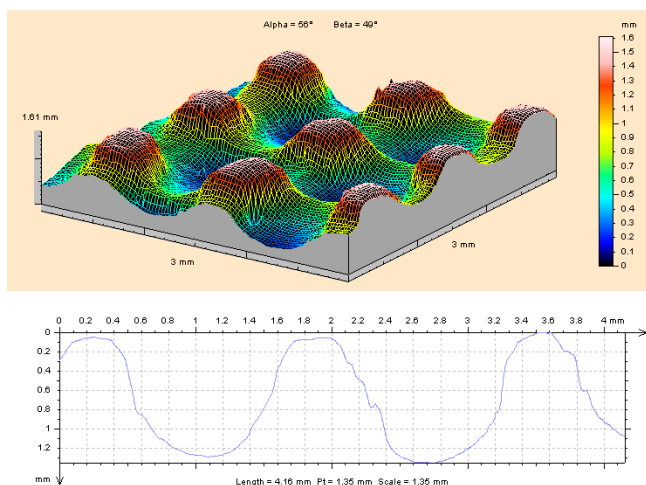
Przeprowadzone badania płaskorzeźb erodowanych w dwuzabiegowym sposobie hydrostrumieniowego kształtowania obiektu 3D wykazały jednoznacznie przydatność przyrządu zbudowanego w celu dokonywania precyzyjnej i obiektywnej oceny jakości obiektu erodowanego sposobem dwuzabiegowym. Dzięki tym pomiarom stwierdzono, że kształtowane w ten sposób obiekty są wyraźnie postrzegane z zupełnie dowolnego kąta obserwacji. Zatem taka metoda automatycznego kształtowania quasi-przestrzennych obiektów eliminuje praktycznie wszelkie ograniczenia, występujące dotychczas w metodzie erodowania jednozabiegowego, zwłaszcza zaś występujący wówczas wyraźny niedostatek nazbyt wąskiego obszaru poprawnego postrzegania wyerodowanego w ten sposób obiektu.

Jak to już wcześniej wspomniano pozostaje jeszcze tylko wyjaśnienie roli mini-barier rozgraniczających poszczególne przejścia strugi. Smukłość ich kształtu wprawdzie obniża mechaniczną nośność powierzchni lecz korzystnie wpływa na jakość postrzegania wyerodowanego obiektu. Z kolei brak tych mini-barier prowadzi do poważnego ograniczenia jakości postrzegania wykonanego obiektu. Okazuje się bowiem, że występowanie zjawiska układania się cieni w mikrostrefach sąsiadujących z tymi mini-barierami jest podstawową kwestią wyraźnego postrzegania rzeźbionego obiektu, niezależnie od kąta jego obserwacji. Najlepszym tego przykładem są odosobnione, punktowe mini-barierki

ukazane na rys. 5, które powstały po wzajemnie prostopadłych przejściach strugi kształtującej obraz SEM. W tym przypadku te punktowe bariery są wytworzone o kształtach zbliżonych do prostopadłościaków z zaokrąglonymi krawędziami, co ilustrują odpowiednie obrazy SGP (rys. 6).



Rys. 5. Obrazy SEM różnych punktowych mini-barier smukłych (a-b) i proporcjonalnych (c-d), powstających podczas dwuzabiegowego erodowania ortogonalnymi przejściami strugi AWJ



Rys. 6. Topograficzny kształt SGP punktowych mini-barier powstałych w przydennej części płaskorzeźby, po wzajemnie prostopadłych przejściach strugi AWJ dwuzabiegowo erodującej obiekt

## Podsumowanie

Analiza zależności występujących pomiędzy fotometrycznymi właściwościami obrazu 2D, w tym zwłaszcza fluktuacji zjawiska luminancji, a parametrami dwuzabiegowej obróbki obiektu 3D erodowanego strugą wodno-ścierną (AWJ), umożliwiła określenie dokładnego modelu quasi-przestrzennego kształtowania obiektów techniką hydrostrumieniową. O najwyższej dokładności zupełnego dopasowania tego modelu świadczą bardzo wysokie wartości współczynnika determinacji, którego wartości dla ponad stu przebadanych przypadków zawierają się w zakresie wartości  $R^2 = 0,954 \pm 1,0$ . Dzięki temu zamiast stosowania kłopotliwej w realizacji, dynamicznej kontroli takiego procesu kształtowania materiału przy użyciu kamer telewizyjnych, wykorzystuje się sterowanie oparte na modelu bezpośredniego sprzężenia głębokości erodowania materiału obrabianego z luminancją obrazu i prędkością posuwu strugi AWJ.

Zastosowanie takiego modelu upraszcza metodę sterowania i zwiększa dokładność rzeźbienia, gdyż w sposób

bezpośredni i niejako automatyczny umożliwia uzyskiwanie zadawanej głębokości erodowania, bez problematycznego nadzorowania procesu takiej obróbki.

Przestrzenne kształtowanie materiałów w warunkach stosowania dwuzabiegowej erozji hydrostrumieniowej, potwierdza słuszność wcześniejszych założeń i rozważań teoretycznych oraz przyjętych rozwiązań technicznych a także procedur zastosowanego oprogramowania kontrolno-sterującego. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można ogólnie uznać, że pomimo zastosowania stosunkowo niskiej rozdzielczości wzorca, występuje dość dobre odwzorowanie obrazu na próbkach materiałów metalowych. Zatem opracowana metoda przestrzennego kształtowania materiału przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej, spełnia pokładane w niej oczekiwania.

## LITERATURA

- Borkowski P., A novel technique for spatial objects shaping with high-pressure abrasive water jet. *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 56/5, 287-294, 2010.
- Borkowski P., Application of abrasive water jet technology for material sculpturing. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 34/3-4, 389-400, 2010.
- Borkowski P., Basis of technique of spatial objects shaping with high-pressure abrasive water jet controlled by virtual image luminance. *Journal of Jet Flow Engineering*, 27/2, 4-10, 2010.
- Borkowski P., Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych. Wydawn. Uczelniane PK (ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-207-1), Koszalin, 2010.
- Borkowski P., Borkowski J., Basis of novel technique for spatial objects shaping with high-pressure abrasive water jet. *Trans. ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132, 054501/1-3, 2010.
- Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M., Eksperymentalne podstawy quasi-przestrzennego kształtowania obiektów metodą hydrostrumieniową z wykorzystaniem luminancji ich obrazu. *Mechanik*, 8-9, 67-72/721, 2014.
- Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M., Teoretyczny model quasi-przestrzennego kształtowania obiektów metodą hydrostrumieniową z wykorzystaniem luminancji ich obrazu. *Mechanik*, 8-9, 77-79/721, 2014.
- Cutler V., Doolan S., Controlled depth surface abrasion for parquetry in glass. 20th Int. Conference Water Jetting, BHR Group. Graz, 91-108, 2010.
- Doolan S., The development of strategies for working with three-dimensional glass forms using two-dimensional waterjet cutting. 21th Int. Conference Water Jetting, BHR Group. Ottawa, 143-157, 2012.
- Groppetti R., Gutema T., di Lucchio A., A Contribution to the analysis of some kerf quality attributes for precision abrasive water jet cutting. 14th Int. Conf. on Jetting Technology, BHR Group. Brugge, 253-269, 1998.
- Hashish M., Optimization factors in abrasive-waterjet machining. *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, 113/1, 29-37, 1991.
- Lauand V. H., Hennies W. T., Stellin A. Jr., Glass and marble (Cachoeiro de Itapemirim) milling with abrasive water jetting. 19th Int. Conference Water Jetting, BHR Group. Nottingham, 121-139, 2008.
- Laurinat A., Louis H., Meier-Wiechert G., A model for milling with abrasive water jets. 7th American Water Jet Conference. Seattle, Washington. 8, 119-139, 1993.
- Webers N., Olsen C., Miles P., Henning A., Etching 3D patterns with abrasive waterjets. 20th Int. Conference Water Jetting, BHR Group. Graz, 51-64, 2010.
- Zhang S., Summers D.A., Shepherd J.D., Experimental investigation of rectangular pocket milling with abrasive water jet using specially designed tool. 17th International Conference on Water Jetting, BHR Group. Mainz, Germany, 435-447, 2004.
- Zhao J., Galecki G., Summers D. A., Texturing surfaces to generate artistic models. 20th Int. Conference Water Jetting, BHR Group. Graz, 65-76, 2010.