

## Rozpęczanie wsadów rurowych w procesie elektrodynamicznego formowania metali w ujęciu analizy chropowości i topografii powierzchni

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy dotyczącej zmian stanu struktury powierzchni uzyskanej w procesie rozpęczania wsadów rurowych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów powierzchni w wymiarze liniowym 2D oraz przestrzennym 3D zaprezentowano analizę wpływu procesu elektrodynamicznego kształtowania przedmiotów metalowych na właściwości powierzchni, rozpatrywane z punktu widzenia chropowości, kierunkowości i izotropii struktury powierzchniowej.

**Abstract.** In the paper the results of an analysis concerning the changes in surface structure of a tubular charge subject to electrodynamic forming process are presented. On the basis of surface measurements in 2d and 3d an analysis concerning the influence of electrodynamic shaping process parameters on surface properties, with respect to roughness, directional properties and texture isotropy, has been carried out. (**Recompression of the tubular charges in the electrodynamic forming process – an analysis of the surface structure and roughness**)

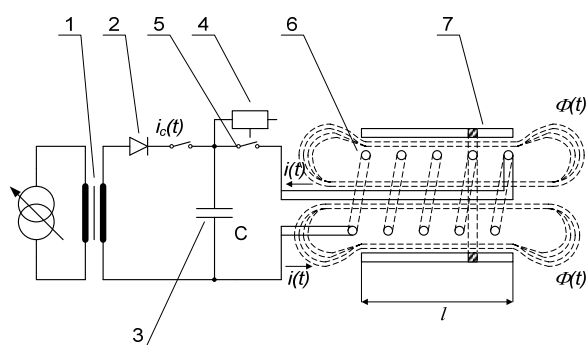
**Słowa kluczowe:** formowanie polem magnetycznym, pole elektromagnetyczne, odkształcenie, analiza powierzchni, struktura geometryczna powierzchni, chropowość powierzchni.

**Keywords:** electromagnetic forming, electromagnetic field, strain, surface analysis, geometrical surface structure, roughness.

doi:10.12915/pe.2014.06.42

### Wstęp

Obróbka elektrodynamiczna jest nowoczesną metodą formowania plastycznego metali, w której nie występują ruchome narzędzia oddziaływujące bezpośrednio na powierzchnie kształtowanych wsadów [1]. Metoda elektrodynamicznego formowania metali jest bardzo skuteczna przede wszystkim w przypadku wsadów o dużej wartości kondukcyjności elektrycznej. Opiera się na następujących prawach elektrodynamiki: Foucaulta (indukowanie prądów wirowych), Lenza (kierunek prądów wirowych) i Laplace'a (elektrodynamiczne oddziaływanie między prądami) - niestalone pole magnetyczne indukuje we wsadzie przewodzącym prądy wirowe, które oddziaływując z zewnętrznym polem magnetycznym powodują powstanie sił elektrodynamicznych i w konsekwencji ciśnienia magnetycznego. Ciśnienie to odkształca formowany wsad [2-4]. Schemat ideowy urządzenia do elektrodynamicznego kształtowania metali (rozpęczanie) przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat ideowy urządzenia do elektrodynamicznego formowania metali; 1- transformator podwyższający napięcie, 2 – prostownik wysokonapięciowy, 3 – bateria kondensatorów, 4 – układ komparatorowy sterujący pracą komutatora, 5 – komutator, 6 – cewka (głowica obrabiająca, induktor), 7 – wsad,  $l$  – długość wsadu,  $i_c(t)$  – prąd ładowania kondensatora,  $i(t)$  – prąd induktora,  $\Phi(t)$  – strumień magnetyczny

Niestalone tłumione pole magnetyczne (rys.1) powstające w głowicy roboczej (cewce obrabiającej) jest wynikiem przepływu przez nią niestalonego tłumionego

prądu rozładowania kondensatora generatora udarów prądowych. W praktycznych zastosowaniach generatorów udarowych wartość maksymalna tego prądu jest rzędu  $I_{max} = 100-400$  kA z szybkością narastania około  $\Delta I/\Delta T = 10^{11}$  A·s<sup>-1</sup>. Moc generatorów zawiera się w granicach  $W = 10-250$  kJ, skąd przy napięciu rzędu  $U = 5-20$  kV i pojemności kondensatora  $C = 300 - 400$  μF uzyskuje się ładunek elektryczny  $Q = 2-6$  C. Stosując dodatkowo koncentratory pola magnetycznego uzyskuje się natężenie pola magnetycznego rzędu  $H = 10^7$  A·m<sup>-1</sup> o częstotliwości około 10 kHz [1-2]. Tak silne pola magnetyczne, w zależności od kondukcyjności wsadu, wywołują w nim ciśnienie o wartości osiągającej  $p = 5 \cdot 10^7$  Pa z szybkością narastania rzędu  $\Delta p/\Delta t = 2 \cdot 10^{12}$  Pa·s<sup>-1</sup>. Ciśnienie to, niezbyt duże z punktu widzenia mechanicznego, w bardzo krótkim czasie, rzędu 10-500 μs, powoduje gwałtowne przemieszczenie elementów wsadu, które na krótkim odcinku uzyskują prędkość rzędu 100-500 m·s<sup>-1</sup> (prawie jak przy odkształceniu wybuchowym) i są znacznie większe niż prędkości przy formowaniu za pomocą prasy hydraulicznej (1-10 m·s<sup>-1</sup>) [5-6]. Powstała w ten sposób energia kinetyczna, o gęstości objętościowej rzędu  $W_k = 10^3$  J·m<sup>-3</sup> zostaje zamieniona na pracę odkształcenia wykorzystywaną dla plastycznej obróbki wsadu.

### Analiza struktury geometrycznej powierzchni

Każdy proces obróbki wywołuje zmiany właściwości przedmiotu obrabianego, zmieniając jego stan początkowy  $S_p$  w stan końcowy  $S_k$ . Realizowany proces powoduje transformację zbioru cech opisujących przedmiot obrabiany z punktu widzenia m.in.: dokładności wymiarowej, błędów kształtu, właściwości fizycznych, geometrii powierzchni [7]. Sposobem badawczym w zakresie oceny właściwości odkształconych powierzchni mogą być walidacyjne analizy stanów odkształceń lub rozkładów naprężeń lub badania eksperymentalne [8-11]. Jednym z często uwzględnianych praktycznie parametrów użytkowych charakteryzujących wyroby są właściwości struktury geometrycznej powierzchni, rozpatrywane z punktu widzenia wad, błędów kształtu, falistości i chropowości powierzchni.

W rozpatrywanym przypadku elektrodynamiczne formowanie wsadów rurowych powoduje odkształcenie plastyczne, wyznaczonych ukształtowaniem wewnętrznym matrycy kształtującej, obszarów powierzchni. Odkształcenie

plastyczne wywołuje zmiany w strukturze materiału, wskaźników mechanicznych, właściwości geometrycznych powierzchni.

W artykule przedstawiono wyniki prowadzonej analizy porównawczej stanu powierzchni uzyskanej w procesie elektrodynamicznego rozpęczania aluminiowego wsadu rurowego, w stosunku do powierzchni wyjściowej uzyskanej w procesie ciągnięcia, (rys.2).



Rys.2. Detal przed i po operacji rozpęczania wykonany na AGH w Krakowie

Analizę porównawczą przeprowadzono na podstawie wybranych parametrów chropowatości rozpatrywanych w ujęciu liniowym 2D oraz wielkości opisujących topografię powierzchni 3D, uzyskanych podczas pomiarów prowadzonych na profilometrze firmy Taylor Hobson Talysurf 2D/3D, (rys.3).



Rys.3. Profilometr Taylor Hobson Talysurf 2D/3D - stanowisko do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni

Wstępną analizę stanów porównywanych powierzchni: przedmiotu po obróbce oraz wyjściowej, przeprowadzono na podstawie zarejestrowanych profili liniowych 2D oraz wyznaczonych w programie Taylor Ultra Surface wartości parametrów chropowatości. Przykładowy profil liniowy 2D zarejestrowany podczas pomiarów prezentuje rys.4.



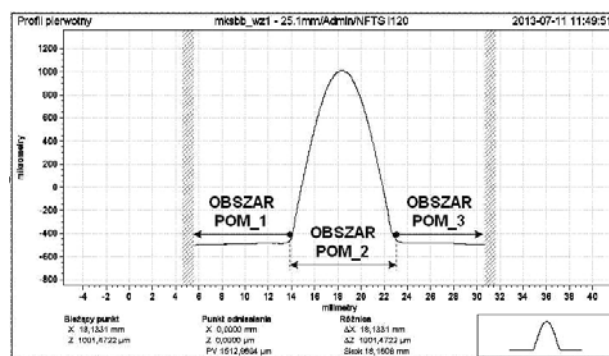
Rys.4. Przykładowy profil liniowy 2D powierzchni wyjściowej

Analizę stanu powierzchni przeprowadzono na podstawie zestawu wybranych wartości parametrów chropowatości [12, 13], tzn.:

- pionowych, dotyczących wartości średnich rzędnych profilu chropowatości:
  - ✓  $Ra$  – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,
  - ✓  $Rq$  – średnia kwadratowa rzędnych profilu,
  - ✓  $Rsk$  – współczynnik asymetrii profilu,
  - ✓  $Rku$  – współczynnik nachylenia profilu;
- poziomego (odległościowego) – średnia szerokość rowków elementów profilu  $RSm$ ;
- hybrydowego – średni kwadratowy wznios profilu  $Rdq$ .

Rejestracja profili liniowych, będących podstawą wyznaczanych parametrów chropowatości, prowadzona była na długości odcinka pomiarowego  $ln = 4$  mm, przy założonej długości odcinka elementarnego  $lr = 0.80$  mm ( $ln = 5 \times lr$ ). Wartości długości odcinków elementarnego i pomiarowego dobrano na podstawie spodziewanych wartości parametru  $Ra$  zawartych w przedziale  $0.1 - 2$   $\mu$ m. Każda z analizowanych powierzchni poddana została procesowi pomiarowemu prowadzonemu w 10-ciu losowo wybranych obszarach. Uzyskane wartości parametrów stanowiły podstawę oceny stanu powierzchni oraz statystycznej istotności różnic wyznaczonych średnich arytmetycznych. W ocenie statystycznej istotności różnic średnich analizowanych parametrów wykorzystano test t-Studenta, przyjmując hipotezę zerową  $H_0$  zakładającą równość ich wartości oraz jednostronną hipotezę alternatywną  $H_1$  zakładającą pogorszenie jakości powierzchni odkształconych plastycznie obszarów (wzrost wartości analizowanych parametrów). Wartość krytyczną testu t wyznaczono dla deklarowanej wartości poziomu istotności  $\alpha = 0.01$ , która dla liczby stopni swobody  $s = 18$ , wynosi  $t_{2,\alpha;s} = t_{0.02;18} = 2.552$  [14].

Z uwagi na fakt „lokalnego” umiejscowienia odkształcenia plastycznego, powierzchnia przedmiotu obrabowanego podzielona została na wyodrębnione obszary pomiarowe, których orientacyjne granice prezentuje rys.5. Zaproponowane wyodrębnienie obszarów pomiarowych spowodowane jest specyfiką ukształtowania matrycy kształtującej, która daje możliwość odkształcenia materiału w wyznaczonych obszarach wsadu rurowego.



Rys.5. Położenie obszarów pomiarowych w zakresie oceny stanu powierzchni

Przyjęto tezę, iż obszary pomiarowe nieobjęte procesem odkształcenia plastycznego (obszary pomiarowe 1 i 3) charakteryzować będą parametry chropowatości porównywalne z parametrami opisującymi powierzchnię wyjściową. Z kolei w obszarze pomiarowym obejmującym strefę odkształcenia plastycznego (obszar pomiarowy 2) wyznaczone różnice parametrów chropowatości będą statystycznie istotne.

Wartości średnich arytmetycznych wyznaczonych z 10-ciu zarejestrowanych profili liniowych, wariancji a także testu  $t$  wraz z oceną statystycznej istotności różnic porównywanych parametrów chropowatości, prezentuje poniższe zestawienie (tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie analizy istotności różnic wartości średnich wybranych parametrów chropowatości

Parametr chropow.	Przed obróbką	Po obróbce		
		O pom.1	O pom.2	O pom.3
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,12	0,13	0,87	0,13
	0,00127	0,0031	0,0101	0,0057
	x	<b>0,365</b>	<b>22,340</b>	<b>0,308</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
Rq [ $\mu\text{m}$ ]	0,172	0,205	1,084	0,180
	0,008	0,014	0,016	0,016
	x	<b>0,704</b>	<b>18,872</b>	<b>0,158</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
Rsk	0,847	1,301	0,715	0,824
	1,897	2,824	0,138	0,917
	x	<b>0,662</b>	<b>-0,2931</b>	<b>-0,0428</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Nie</b>	<b>Nie</b>
Rku	6,886	11,251	3,157	6,238
	51660	81,906	0,481	6,532
	x	<b>1,1942</b>	<b>-1,633</b>	<b>-0,2687</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Nie</b>	<b>Nie</b>
RSm [mm]	268,0	308,0	528,9	238,2
	7568,0	15934,1	29890,3	6845,4
	x	<b>0,864</b>	<b>4,2135</b>	<b>-0,7841</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
Rdq [ $^{\circ}$ ]	0,36	0,38	1,02	0,36
	0,021	0,016	0,012	0,038
	x	<b>0,3934</b>	<b>11,6003</b>	<b>0,0784</b>
	x	<b>Nie</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>

Analiza parametrów chropowatości oraz uzyskane wyniki testowania statystycznego różnic ich wartości średnich potwierdziły zasadniczo przyjętą tezę badawczą, że zmiany właściwości powierzchni dotyczą jedynie obszaru odkształconego plastycznie. Obszar pomiarowy 2, tzn. obszar deformacji plastycznej, charakteryzują parametry chropowatości wskazując na pogorszenie jakości stanu powierzchni w stosunku do powierzchni wyjściowej (wsadu rurowego) oraz powierzchni przedmiotu nieobjętych procesem rozpęczania (obszary pomiarowe 1 i 3). Statystycznie istotny wzrost wartości parametrów  $Ra$ ,  $Rq$  oraz  $Rdq$  świadczy jednoznacznie o pogorszeniu charakterystyk użytkowych odkształconego obszaru powierzchni. Brak statystycznej istotności różnic dla średnich parametrów  $Rsk$  i  $Rku$  tłumaczyć można „charakterem” nierówności powierzchni, który wobec zastosowanej metody kształtowania nie został istotnie zmodyfikowany. Istotny statystycznie wzrost parametru poziomego  $RSm$  wskazywać może na zmiany zachodzące w strukturze materiałowej, które mogą wynikać z faktu zwiększenia wymiarów liniowych odkształconej powierzchni, co odbywa się „kosztem” m.in. zmniejszenia grubości ich ścianek.

Wyniki prowadzonej analizy wydają się potwierdzać założenie, iż proces odkształcenia plastycznego wsadu rurowego powoduje zmiany w strukturze materiału, które z kolei wywołują przeobrażenia geometryczne powierzchni.

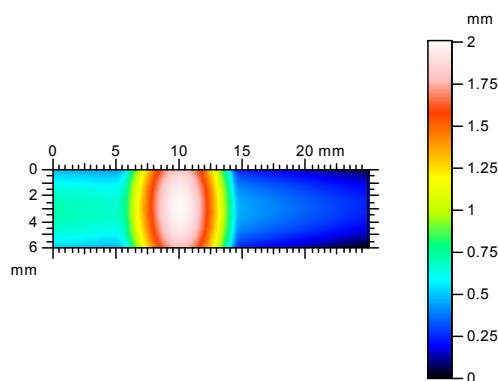
Współczesna metrologia geometrii powierzchni coraz częściej wymaga ujęcia tego zagadnienia, w dającym pełny obraz struktury powierzchni, wymiarze przestrzennym 3D. Analiza stanu powierzchni w wymiarze liniowym (profile 2D) często jest niewystarczająca w zakresie kompleksowej analizy i oceny struktur powierzchniowych [13], stąd też prowadzone badania poszerzono o wyniki pomiarów w wymiarze przestrzennym 3D.

Charakter zmian stanu powierzchni oraz intensywność zjawisk powierzchniowych analizowane zostały na podstawie zarejestrowanych topografii powierzchni 3D obszarów pomiarowych. W prowadzonej analizie uwzględniono:

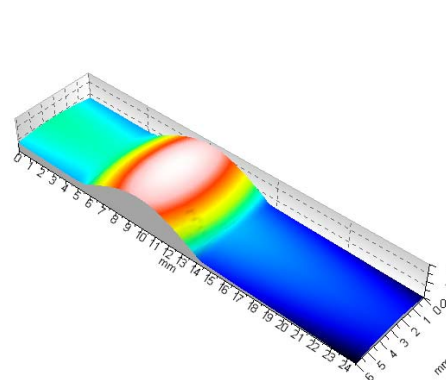
- wartości podstawowych stereometrycznych parametrów chropowatości [12, 13], oraz
- wskaźniki opisujące kierunkowość i izotropię powierzchni [13, 15].

W analizie uwzględniono obszary: zewnętrzny oraz wewnętrzny powierzchni odkształconej plastycznie w stosunku do powierzchni zewnętrznej wsadu rurowego. Konieczność analizy obu stron odkształconego plastycznie obszaru powoduje fakt, iż zachodzą tam odmienne jakościowo stany odkształcenia materiału.

Widok zarejestrowanej topografii 3D obszaru odkształconego plastycznie oraz obraz stereometrii powierzchni przedstawiono na rys.6 i rys.7.



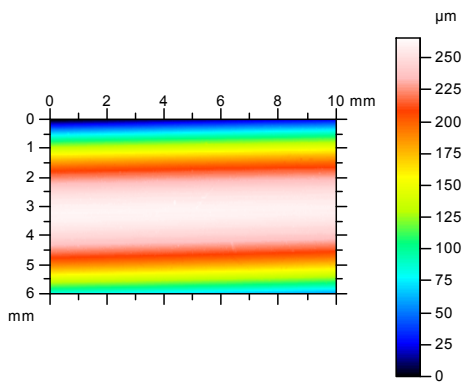
Rys.6. Widok zarejestrowanej topografii powierzchni 3D



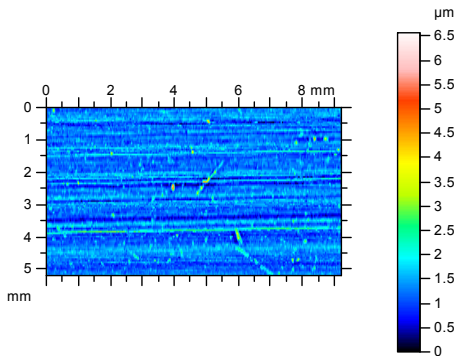
Rys.7. Obraz stereometrii powierzchni

Ponieważ zarejestrowana topografia 3D obejmuje składowe błędów kształtu, falistości oraz chropowatości, właściwa analiza poprzedzona została procesem ich filtrowania. Proces filtrowania składowych struktury geometrycznej powierzchni, prowadzony przy pomocy oprogramowania Taylor Talymap Platinum, daje możliwość rozpatrywania zmian jakościowych powierzchni w ujęciu przyjętych do analizy parametrów chropowatości. Wynik procesu filtrowania składowych struktury geometrycznej dla powierzchni wyjściowej (wsadu rurowego) prezentuje rys.8, z kolei proces filtrowania prowadzony dla powierzchni zewnętrznej przedmiotu po formowaniu przedstawia rys.9.

Proces filtrowania spowodował uwidocznienie dwóch odmiennych charakterystyk chropowatości powierzchni. Obraz chropowatości powierzchni wyjściowej (rys.8b), wskazuje widoczną kierunkowość struktury powierzchni. Z kolei struktura powierzchniowa obszaru odkształconego (rys.9b) wykazuje kierunkową quasi-izotropię.

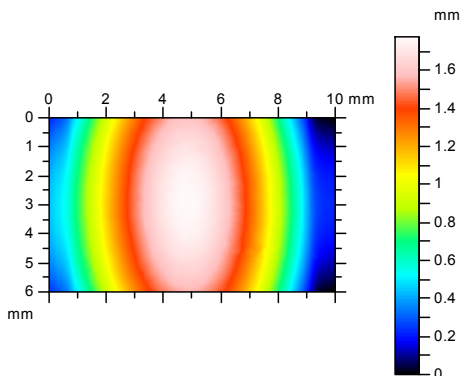


a)

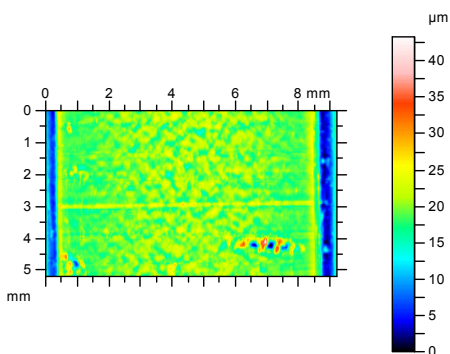


b)

Rys.8. Proces filtrowania danych powierzchni wyjściowej (wsadu rurowego): a) topografia wyjściowa, b) składowa chropowatości



a)



b)

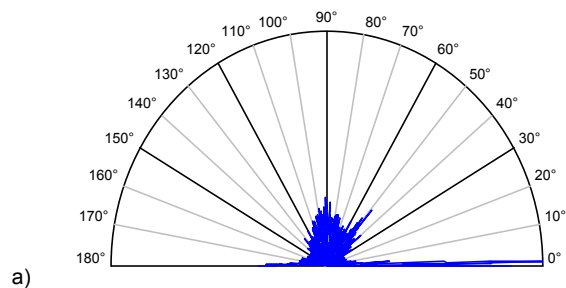
Rys.9. Proces filtrowania danych zewnętrznej powierzchni przedmiotu obrobionego: a) topografia wyjściowa, b) składowa chropowatości

Opis ilościowy stanów chropowatości w ujęciu parametrów stereometrycznych prezentuje tabela 2.

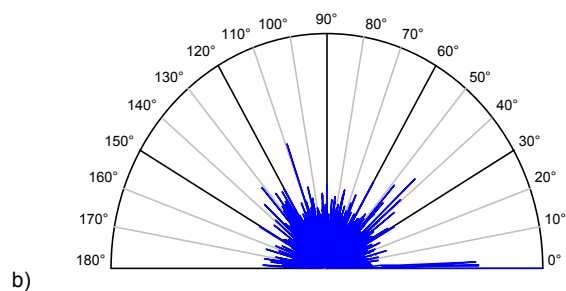
Tabela 2. Wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni w ujęciu 3D

Parametr chropow.	Powierzchnia badana		
	Wyjściowa	Obrobiona zewnętrzna	Obrobiona wewnętrzna
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,259	2,58	2,06
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,353	4,07	2,58
Ssk	1,10	-1,76	0,678
Sku	9,42	7,49	3,15
Sal [mm]	0,0315	0,674	1,61
Sdq	0,0143	0,0478	0,0287

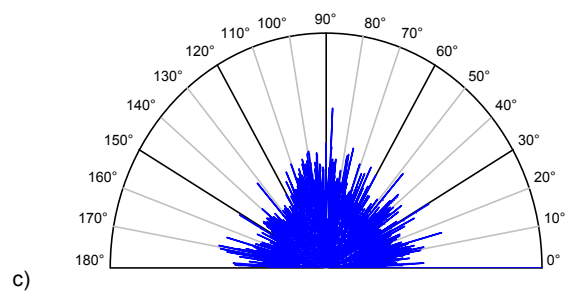
Wstępna analiza zaprezentowanych w tabeli 2 wartości parametrów stereometrycznych potwierdza wnioski z badań wstępnych, przeprowadzonych na podstawie profilu 2D, wskazując zasadniczo na pogorszenie jakości powierzchni odkształconych plastycznie (zarówno warstw zewnętrznych i wewnętrznych), w stosunku do powierzchni wyjściowej. Ponadto wyznaczone parametry stereometryczne wskazują, iż lepsze jakościowo właściwości wykazują warstwy wewnętrzne odkształconych plastycznie powierzchni.



a)



b)



c)

Rys.10. Obrazy funkcji autokorelacji analizowanych powierzchni: a) wsad rurowy, b) odkształcona – zewnętrzna, c) odkształcona – wewnętrzna

Tabela 3. Wartości wybranych parametrów opisujących kierunkowość i izotropię powierzchni

Parametr struktury powierzchni	Powierzchnia badana		
	Wyjściowa	Obrobiona zewnętrzna	Obrobiona wewnętrzna
Izotropia	1,34 %	24,8 %	52,3 %
1 kierunek	1,32°	0,144°	0,191°
2 kierunek	48,6°	109°	87,8°
3 kierunek	91,4°	43,3°	15,8°
Periodyczność	17,8 %	12,5 %	14,7 %
Okres	0,860 mm	1,89 mm	2,14 mm
Kierunek okresu	89,4°	147°	123°



Obrazy składowych chropowości (rys.8b i rys.9b) stanowiły podstawę analizy kierunkowości oraz izotropii struktur powierzchniowych. Wybrane parametry oceny ilościowej struktury powierzchni prezentuje tabela 3. Obrazy funkcji autokorelacji dla analizowanych powierzchni prezentuje rys. 10.

Dane tabeli 3 oraz analiza obrazu funkcji autokorelacji (rys.11a) wskazuje na istotną anizotropię powierzchni wyjściowej, przy dominującym (wiodącym) ukierunkowaniu struktury powierzchni nachylnym pod kątem ok.  $1^\circ$  (1-szy kierunek) w stosunku do tworzącej powierzchni walcowej. Powierzchnię wyjściową charakteryzuje periodyczność struktury o okresie 0,86 mm i ukierunkowaniu bliskim  $90^\circ$  (w stosunku do tworzącej powierzchni walcowej).

Proces odkształcenia plastycznego powoduje wzrost izotropii powierzchni, przy czym jednorodność struktur powierzchniowych bardziej widoczna jest dla warstw wewnętrznych odkształconych plastycznie obszarów powierzchni. Wywołuje również istotne zmiany periodyczności struktur powierzchniowych. Powierzchnie odkształcone charakteryzuje periodyczność struktury o istotnie większym okresie (odpowiednio: 1,89 i 2,14 mm) oraz zmienionym ukierunkowaniu ( $147^\circ$  i  $123^\circ$ ).

### Wnioski

Proces elektrodynamicznego formowania aluminiowych wsadów rurowych powoduje odkształcenie plastyczne obszarów powierzchni, których położenie oraz wymiary liniowe wyznacza kształt matrycy kształtującej. Proces odkształcenia plastycznego wyznaczonych obszarów powierzchni wywołuje zmiany w strukturze materiału, które z kolei powodują zmiany właściwości mechanicznych. Istotnym więc wydaje się analiza sposobu ukształtowania matrycy kształtującej rozpatrywanej z punktu widzenia procesu odkształcenia plastycznego i właściwości formowanych obszarów powierzchni.

Wyniki badań wskazują, iż analiza właściwości mechanicznych materiału odkształconego plastycznie w ujęciu struktury geometrycznej powierzchni (chropowości) wydaje się zasadną. Składowe struktury geometrycznej, a zwłaszcza chropowość powierzchni, wydają się „wrażliwym” wskaźnikiem opisującym nie tylko zjawiska związane z bezpośrednio oddziałującą na nią obróbką mechaniczną, ale również zmianami jej stanu wywołanymi pośrednio (np. przez procesy odkształcenia plastycznego wpływającymi na strukturę materiałową). Właściwe wnioski z prowadzonych pomiarów są jednak możliwe po wnikliwej

analizie przyczynowo – skutkowej zachodzących zjawisk, oraz „wychwycenie” określonych zależności procesowych.

### LITERATURA

- [1] Borowik B., Pole elektromagnetyczne, siły ponderomotoryczne, ciśnienie, energia i moc w rurowych wsadach przewodzących w procesie kształtowania impulsowym polem magnetycznym, *Rozprawa doktorska*, Częstochowa 2006
- [2] Batygin Y., Daehn., The pulse magnetic fields for progressive technologies. *Ohio State University.*, Kharkov – Columbus 1999
- [3] Piątek Z., Baron B., Pasko M., Borowik B., Power emitted inside a conducting cylinder placed in longitudinal uniform magnetic field of a character an attenuated sinusoid, *Przegląd Elektrotechniczny.*, 2/2005 pp. 94-98
- [4] Piątek Z., Borowik B., Electromagnetic field in a cylindrical conductor in the process of metal forming using impulse magnetic field., *XXVII IC SPETO*, 2005 pp. 43-46
- [5] Borowik B., Odkształcenie wsadów rurowych wybranych materiałów w procesie elektrodynamicznego formowania metali, *Przegląd Elektrotechniczny.*, 12b/2011 pp. 19-21
- [6] Leroy M, Renaud J. Y., Formage electromagnetique, *Techniques de l' Ingenieur, Traite Mecanique et Chaleur*, B 7282 (0) 1980
- [7] Feld M., Projektowanie procesów technologicznych typowych części maszyn, *WNT*, Warszawa 2000
- [8] Bednarczyk J., Obróbka metali w polu magnetycznym i możliwości jej automatyzacji, *PAK*, 2002 pp.19-21
- [9] Bednarczyk J., Distributions of forces in the inductors used in metal processing in the pulse magnetic field, *Journal of Materials Processing Technology*, 133(2003), pp.340-347
- [10] Bednarczyk J., Elektrodynamiczna obróbka metali, *Wydawnictwa AGH*, Kraków 2007
- [11] Bednarczyk J., Załuski T., Analiza numeryczna elektrodynamicznej obróbki blach z wykorzystaniem pośredniego elementu sprężystego, *Mechanik*, 7/2010, pp. 477-483
- [12] Adamczak S., Pomiar geometryczny powierzchni. Zarys kształtu, falistość i chropowość, *WNT*, Warszawa 2008.
- [13] Ocoś K., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych, *OW PRZ*, Rzeszów 2003
- [14] Luszniwicz A., Słaby T., Statystyka. Teoria i zastosowanie, *Wyd. C.H. Beck*, Warszawa 2003
- [15] Górecka R., Polański Z., Metrologia warstwy wierzchniej, *WNT*, Warszawa 1983

**Autorzy:** dr inż. Borys Borowik, dr inż. Marek Kęsy, *Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Technologii Mechanicznych, Zakład Automatykacji Produkcji i Technologii, ul. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,*  
E-mail: [borys\\_b@poczta.fm](mailto:borys_b@poczta.fm), [kesy@itm.pcz.pl](mailto:kesy@itm.pcz.pl)