

Analiza struktury geometrycznej powierzchni obszaru odkształcenia kształtowanego w procesie elektrodynamicznego formowania metali

Streszczenie. Technologia elektrodynamicznego formowania metali wywołuje zmiany właściwości w kształtowanym materiale. Proces odkształcenia wywołuje zmiany kształtu i wymiarów liniowych, struktury materiałowej i geometrycznej powierzchni. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań weryfikujących tezę jednorodności struktury geometrycznej powierzchni w obszarze odkształcenia plastycznego. Postawiona teza analizowana była pod kątem wybranego składnika struktury geometrycznej – chropowatości powierzchni.

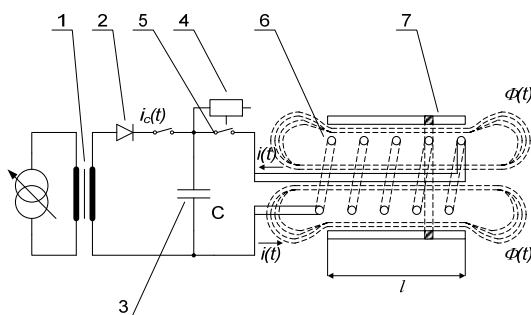
Abstract. The technology of electrodynamic forming of metals causes changes in properties in the shaped material. The deformation process causes changes in the shape and linear dimensions, material structure and geometric surface. The article presents the results of the conducted research verifying the thesis of the homogeneity of the geometrical structure of the surface in the area of plastic deformation. The thesis was analyzed in terms of a selected component of the geometric structure - surface roughness. (**Analysis of the geometrical structure of the surface of the shaped deformation area in the process of electrodynamic forming of metal**).

Słowa kluczowe: formowanie polem elektromagnetycznym, odkształcenie, struktura geometryczna powierzchni, chropowatość powierzchni.

Keywords: electromagnetic forming, strain, geometrical surface structure, roughness.

Wstęp

Obróbka elektrodynamiczna jest nowoczesną metodą formowania plastycznego metali, w której nie występują ruchome narzędzia oddziałujące bezpośrednio na powierzchnie kształtowanych wsadów [1]. Opiera się na następujących prawach elektrodynamiki: Foucaulta (indukowanie prądów wirowych), Lenza (kierunek prądów wirowych) i Laplace'a (elektrodynamiczne oddziaływanie między prądami) - niestabilne pole magnetyczne indukujące w materiale przewodzącym prądy wirowe, które oddziałując z zewnętrznym polem magnetycznym powodują powstanie sił ponderomotorycznych i w konsekwencji ciśnienia magnetycznego. Ciśnienie to odkształca formowany wsad [2, 3]. Schemat ideowy urządzenia do elektrodynamicznego kształtowania metali (rozpęczanie powierzchni), przedstawiono na rysunku 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

W procesie elektrodynamicznego formowania metali, kształtowana powierzchnia (wsad rurowy) umieszczona jest w niewielkiej odległości od usztywnionego mechanicznie induktora, a wywierane na nią ciśnienie wykorzystuje się do swobodnego lub wymuszonego jej odkształcenia, (rys.1). W

czasie formowania następują przemiany różnych rodzajów energii. Energia zgromadzona w kondensatorze jest przekształcana podczas jego wyładowania w energię pola magnetycznego w układzie induktor – powierzchnia wsadu, a ta z kolei zostaje zamieniona na energię ruchu kształtowanej powierzchni oraz pracę niezbędną do jej plastycznego odkształcenia, które realizowane jest najczęściej przy udziale matrycy kształtującej, umieszczonej na drodze ruchu odkształcającej się powierzchni materiału [4, 5].

Niestabilne tłumione pole magnetyczne powstające w głowicy roboczej (cewce obrabiającej) jest wynikiem przepływu przez nią niestabilnego 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⁻¹. 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 oraz natężenie pola magnetycznego rzędu $H = 10^7$ A·m⁻¹ o częstotliwości około 10 kHz [1, 2]. Tak silne pola magnetyczne 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⁻¹. Ciśnienie to w bardzo krótkim czasie, rzędu 10-500 μs, powoduje gwałtowne przemieszczenie elementów wsadu, które na krótkim odcinku uzyskują prędkość rzędu 100-500 m·s⁻¹ (prawie jak przy odkształceniu wybuchowym) i są znacznie większe niż prędkości przy formowaniu za pomocą prasy hydraulicznej (1-10 m·s⁻¹) [6, 7]. Powstała w ten sposób energia kinetyczna, o gęstości objętościowej rzędu $W_k = 10^3$ J·m⁻³ zostaje zamieniona na pracę odkształcenia wykorzystywaną do plastycznej obróbki wsadu.

Założenia badawcze i metodyka pomiarów

Intensywny rozwój przemysłu (samochodowego, lotniczego, kosmicznego, mechaniki precyzyjnej i innych zaawansowanych technologii) wykazał, że wpływ struktury geometrycznej powierzchni (SGP) na właściwości użytkowe elementów maszyn jest niezwykle istotny. Doświadczalnie stwierdzono, że SGP wykazuje znaczny wpływ m.in. na:

procesy tarcia i zużycia, odkształcenia i wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję, szczelność połączeń, rezystancję stykową, stykowe przewodnictwo ciepła, właściwości magnetyczne, promieniowanie – odbicie – pochłanianie – przenikanie fal (światlnych, elektromagnetycznych), jakość nanoszenia (przyczepność i wytrzymałość) powłok, właściwości aero- i hydrodynamiczne. Wpływ SGP na właściwości użytkowe elementów maszyn charakteryzuje się dużą złożonością i wielowątkowością analityczną. Stąd też współczesna metrologia coraz częściej wymaga wnikliwego ujęcia tego zagadnienia, w dającym pełny obraz wymiarze 3D. Analizy w wymiarze liniowym są często niewystarczające w zakresie kompleksowej oceny struktury powierzchni [8]. Ponadto stosowane współcześnie praktyki badawcze mają silne podłoże w zmieniającej się kulturze, w ramach której coraz większego znaczenia nabiera ten wymiar, który nazywany jest kulturą wizualną (w świecie nasyconym obrazami patrzenie na obrazy staje się czynnością częstszą niż np. czytanie testów, interpretacja danych itp.), [9,10]. Warunkiem koniecznym dla tych praktyk badawczych jest jednak możliwość wykorzystania profesjonalnego sprzętu pomiarowego i oprogramowania wspomagającego procesy obliczeń i analizy badawcze [11].

Badania wstępne dotyczące analizy porównawczej właściwości struktury geometrycznej – powierzchni odkształconej w procesie elektrodynamycznego formowania, w stosunku do powierzchni wyjściowej aluminiowego wsadu rurowego (rys.2), wykazały istotne statystycznie zmiany ilościowe i funkcjonalne [12]. Jednak przyjęte wówczas założenie jednorodności właściwości całych porównywanych obszarów powierzchni stanowiło analityczne uproszczenie. Stąd też przedstawione poniżej wyniki badań stanowią weryfikację postawionej tezy zakładającej, że odkształcona w procesie elektrodynamycznego formowania powierzchnia, nie wykazuje jednorodnej struktury geometrycznej.

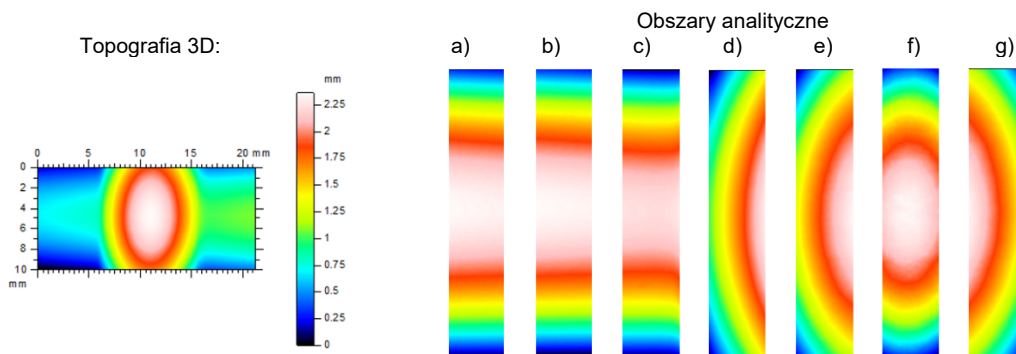
Uwzględniając uwarunkowania i zarazem możliwości badawcze, przedstawione w artykule analizy oparto na topografiach 3D powierzchni zarejestrowanych na

profilometrze New Form TalySurf 2D / 3D (Taylor Hobson), z wykorzystaniem oprogramowania Taylor Ultra Surface. Proces obliczeniowy i analityczny prowadzony został przy wykorzystaniu programu Taylor Talymap Platinum.

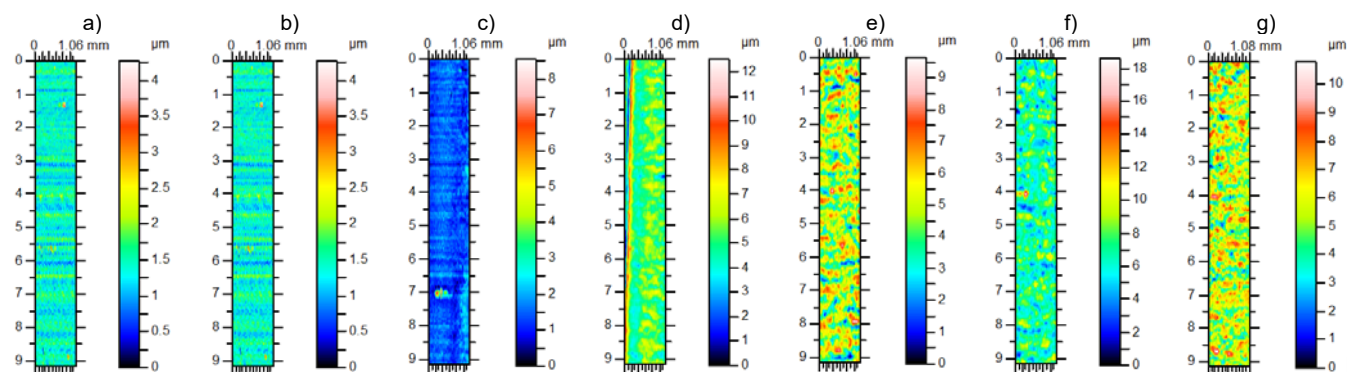


Rys.2. Detal przed i po operacji rozpęczania

Weryfikacja postawionej tezy prowadzona była na wydzielonych obszarach powierzchni. Zarejestrowana topografia 3D powierzchni podzielona została na siedem jednakowych pod względem powierzchni i kształtu obszarów analitycznych, (rys.3). Uwzględniając fakt, że rejestrowane topografie obejmują składowe kształtu, falistości oraz chropowatości [13], analiza stanu powierzchni rozpatrywana pod kątem jedynie jej chropowatości, poprzedzona została operacją filtrowania składowych SGP. Wynik przeprowadzonej za pomocą programu Talymap Platinum operacji filtrowania składowej chropowatości przedstawiono na rysunku 4. Ograniczenie obszaru analizy do połowy zmierzonego obszaru odkształcenia – topografii 3D (obszary analityczne „a” ÷ „g”, rys.3) uzasadniono faktem zdiagnozowanej symetrii właściwości struktury geometrycznej powierzchni, weryfikowanej funkcją obrazowej autokorelacji (operacja analityczna programu TalymapPlatinum).



Rys.3. Podział topografii 3D powierzchni na obszary analityczne



Rys.4. Chropowatość powierzchni w wydzielonych obszarach analitycznych

Analiza struktury geometrycznej powierzchni

Właściwości struktury geometrycznej powierzchni w wydzielonych obszarach analitycznych opisano za pomocą zestawu wybranych parametrów chropowatości, z ich podziałem na:

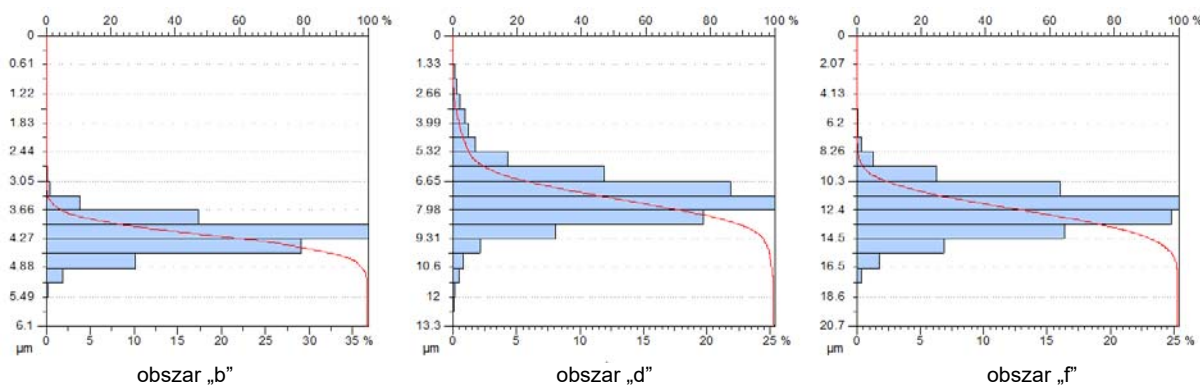
- parametry amplitudowe (wysokościowe),
- parametry funkcyjne opisujące nośność powierzchni,
- parametry przestrzenne, hybrydowe i cech.

Wstępną analizę stanu powierzchni przeprowadzono na podstawie parametrów amplitudowych (w standardzie

normy ISO 25178 [14, 15]), takich jak: Sz – maksymalna wysokość powierzchni, Sa – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni, Sq – wysokość średniokwadratowa powierzchni, Ssk - asymetria powierzchni oraz Sku - kurtoza powierzchni. Ich wartości liczbowe przedstawiono w tabeli 1. Analitycznym ich dopełnieniem i zarazem wizualizacją statystycznych zależności są rozkłady rzędnych SGP przedstawione na rysunku 5 (obszary analityczne: „b”, „d” i „f”). Skumulowane wartości rozkładu rzędnych (jego dystrybuanta) stanowią krzywą opisującą nośność powierzchni (tzw. krzywa Abbotta – Firestone’a).

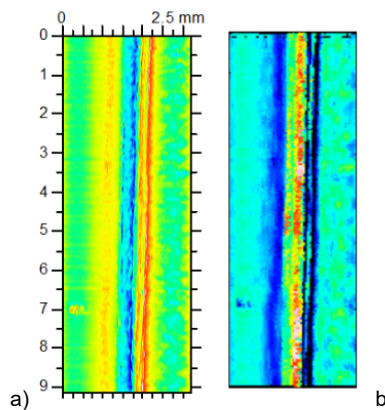
Tabela 1. Parametry amplitudowe chropowatości powierzchni

Parametr amplitudowy	Obszar analityczny						
	„a”	„b”	„c”	„d”	„e”	„f”	„g”
Sz [μm]	8,61	6,10	9,65	13,30	11,40	20,70	10,8
Sa [μm]	0,250	0,252	0,325	0,910	1,10	1,23	0,988
Sq [μm]	0,341	0,329	0,467	1,25	1,38	1,57	1,25
Ssk	1,92	0,53	2,77	0,75	-0,24	0,25	-0,06
Sku	28,9	8,39	32,5	5,85	3,11	4,82	3,14



Rys.5. Rozkłady rzędnych chropowatości powierzchni dla wybranych obszarów analitycznych

Wizualna ocena obszarów pod kątem ukształtowania geometrycznego powierzchni (kierunkowość, okresowość i izotropia, rys.4), wskazuje na brak jednorodności struktury geometrycznej odkształconej powierzchni w obszarze odkształcenia. Analiza ilościowa parametrów amplitudowych (Sz, Sa i Sq) wskazuje na systematyczny wzrost chropowatości w obszarze odkształcenia, z maksimum wartości wyznaczonych dla obszaru „f”, zorientowanego w zakresie maksymalnych odkształceń kształtowanej powierzchni. Wartości parametrów Sa i Sq wyznaczone na obszarze maksymalnego odkształcenia są ok. 5 razy większe w stosunku do powierzchni wyjściowej (obszary analityczne „a” i „b”). Z kolei momenty statystyczne 3-go i 4-go rzędu (asymetria i kurtoza powierzchni) wskazują na stabilność rozkładu rzędnych w obszarze odkształcenia (obszary „d” ÷ „g”). Zauważalne dla obszaru „c” istotne odstępstwo od statystycznej normy rozkładu wydaje się być bezpośrednio powiązane z występowaniem, wyznaczonej położeniem matrycy kształtującej, granicy obszaru odkształcenia, (rys.6). Stabilizacja stopnia skupienia rzędnych SGP może mieć związek ze zjawiskami zachodzącymi w strukturze materiałowej podczas odkształcenia (mechanizmy procesu te same, równice ich intensywności). Odstępstwa „od normy” parametrów Ssk i Sku opisujących obszar analityczny „a” interpretować można w kategoriach ryzyka badawczego związanego z dużą wrażliwością obu parametrów na nietypowe miejscowe anomalie powierzchni.

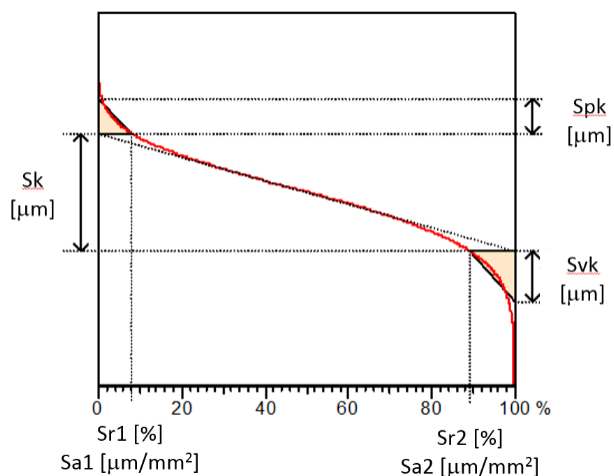


Rys.6. Granica obszaru odkształcenia: a) topografia 3D obszarów „c” i „d”, b) zdiagnozowana bruzda (krawędź przejścia)

Analiza ilościowa nośności powierzchni prowadzona została na podstawie wyznaczonych metodą ekstrapolacji (z liniowych krzywych udziału materiałowego), parametrów funkcyjnych (w standardzie normy ISO 13565 [16, 17]), takich jak: Sk – głębokość chropowatości rdzenia, Spk – zredukowana wysokość wierzchołków, Svk – zredukowana głębokość wgłębień, Sr1 (Sr2) – górna (dolna) powierzchnia nośna oraz Sa1 (Sa2) – prognoza objętości zredukowanych wierzchołków (wgłębień). Wartości parametrów funkcyjnych zamieszczono w tabeli 2, zaś ich znaczenie analityczne przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 2. Parametry funkcyjne (udziału nośnego) powierzchni

Parametr funkcyjny	Obszar analityczny						
	„a”	„b”	„c”	„d”	„e”	„f”	„g”
Spk [μm]	0,367	0,343	0,640	2,16	1,05	1,48	1,13
Sk [μm]	0,775	0,781	0,965	2,65	3,59	3,99	3,19
Svk [μm]	0,325	0,331	0,394	1,35	1,54	1,54	1,30
Sr1 [%]	10,6	10,0	10,7	11,5	8,03	9,38	9,75
Sr2 [%]	89,8	89,6	89,5	91,3	89,0	90,3	89,9
Sa1 [$\mu\text{m}/\text{mm}^2$]	19,4	17,1	34,1	124,0	42,1	69,6	55,2
Sa2 [$\mu\text{m}/\text{mm}^2$]	16,6	18,8	20,8	58,9	84,5	74,5	65,2



Rys.7. Krzywa Abbotta – Firestone'a

Parametry opisujące nośność powierzchni wskazują, iż dla każdego obszaru analitycznego udziały nośne wierzchołków Sr1 i wgłębień Sr2 powierzchni są w przybliżeniu stałe i wynoszą odpowiednio 10% i 90% (tab. 3). Również charakter krzywej nośności nie ulega zmianie (kształt litery „S”). Zmiennymi są jedynie parametry wysokościowe udziału nośnego (Sk, Spk i Svk) z zachowaniem względnie stałych relacji względem amplitudowych parametrów chropowatości (np. Sa i Sq).

Wzrost ich wartości dla obszarów o większym stopniu odkształcenia, przy zachowanym charakterze krzywej nośności wskazywać może na różną intensywność procesu odkształcenia w poszczególnych obszarach analitycznych. Wzrostowi wartości parametrów Spk i Svk towarzyszą wzrastające objętości wyznaczone przez zredukowane wierzchołki nierówności powierzchni oraz jej zredukowane wgłębienia.

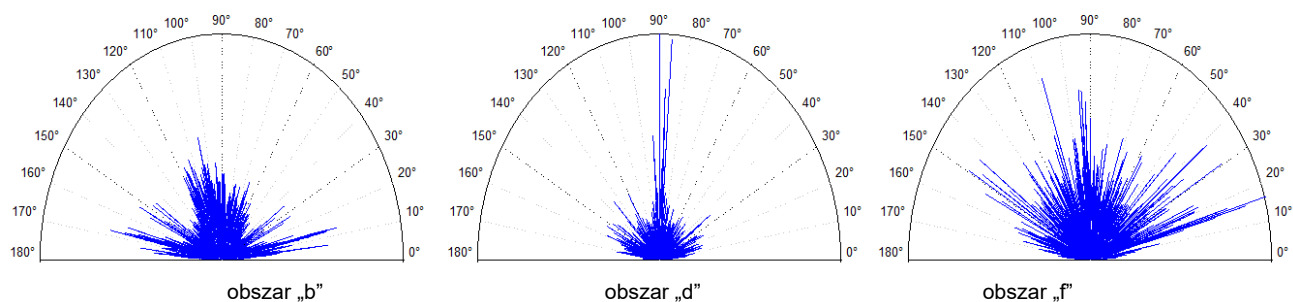
Pogłębieniem prowadzonych badań była analiza ukształtowanie geometrycznego powierzchni prowadzona pod kątem stopnia złożoności powierzchni, jej kierunkowości oraz stopnia izotropii. Analiza prowadzona została na podstawie parametrów (standard normy ISO 12178 [14]):

- przestrzennych – opisujących kierunek struktury (Std) oraz stopień tekstury powierzchni (Str),
- hybrydowych – charakteryzujących nachylenie wierzchołków nierówności (Sdq) oraz stopień złożoności powierzchni (Str),
- cech – wyznaczających gęstość pików (Spd) oraz średnią arytmetyczną krzywizny piku powierzchni (Spc).

Parametry wykorzystane do oceny ukształtowania geometrycznego powierzchni przedstawia tabela 3. Uzupełnieniem danych liczbowych są obrazy funkcji autokorelacji (tzw. róże morfologiczne) przedstawiające kierunkowość i stopień izotropowości powierzchni przedstawia rysunek 8 (obszary analityczne: „b”, „d” i „f”).

Tabela 3. Parametry oceny ukształtowania geometrycznego powierzchni

Parametr	Obszar analityczny						
	„a”	„b”	„c”	„d”	„e”	„f”	„g”
Spd [$1/\text{mm}^2$]	22,9	54,7	28,1	71,9	86,2	12,8	95,1
Spc [$1/\text{mm}$]	1502	1500	1290	3309	2729	1581	2731
Std [$^\circ$]	0 (90)	0 (90)	86,2	89,9	16,3	156	24,4
Str	0,101	0,045	0,715	0,0138	0,574	0,542	0,649
Sdq	0,212	0,212	0,219	0,619	0,559	0,308	0,555
Sdr [%]	1,84	1,84	1,95	15,4	12,6	3,88	12,4



Rys.8. Obrazy funkcji autokorelacji (tzw. róże morfologiczne) wybranych obszarów analitycznych

Wyniki pomiarów wskazują na istotne zmiany w stopniu złożoności sub-obszarów odkształconych względem siebie oraz w stosunku do powierzchni wyjściowej. Parametry hybrydowe oraz cech wskazują na dużą złożoność geometryczną powierzchni w obszarach „d”, „e” i „g”. Analiza kierunku zmian wskazuje, że płaskowyżowe nierówności powierzchni wyjściowej (obszary „a” i „b”) zostają przekształcone w złożony kompleks powierzchniowych motywów. Z kolei wzrost wartości parametrów przestrzennych wskazuje na zmiany w kierunkowości struktury powierzchniowej oraz stopnia izotropii powierzchni. Powodów powyższych transformacji szukać należy w mechanizmach odkształceń plastycznych oraz w procesach towarzyszących takich jak np. zjawiska tribologiczne zachodzące pomiędzy odkształcaną powierzchnią a powierzchnią matrycy kształtującej.

Proces odkształcenia plastycznego powoduje wzrost izotropii oraz zmianę kierunkowości struktury powierzchni. Wywołane odkształceniem zmiany w strukturze materiałowej wywołują zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni, co skutkuje zwiększeniem jej izotropowości (analiza parametru Str - tab.3). Anizotropowy stan powierzchni wyjściowej (obszary „a” i „b” - o krotności symetrii L^2) przekształcony zostaje w stany izotropii mieszanej – o charakterze quasi-losowym (obszary „e”, „f” i „g”). Zmianie ulega także kierunkowość struktury powierzchni (analizowany w badaniach kierunek główny określony parametrem Std), wskazując na kierunek oddziaływania siłowego w czasie odkształcenia i jego modyfikacje wynikające ze zjawisk towarzyszących (np. wyznaczony kształtem matrycy kierunek „płynięcia” materiału, zjawiska tribologiczne w czasie odkształcenia).

Wnioski

Przyjęcie założenia jednorodności geometrycznej powierzchni w całym obszarze odkształcenia, w świetle przedstawionych wyników badań i prowadzonych analiz, wydaje się dużym uproszczeniem. Wykazano istotne różnice właściwości struktury geometrycznej (chropowatości powierzchni) w analizowanych obszarach analitycznych formowanej powierzchni. Wykazane różnice odnoszą się do wszystkich prowadzonych analiz cząstkowych, tzn. analiz parametrów amplitudowych, udziału nośnego oraz ukształtowania geometrycznego powierzchni.

Wyniki badań wskazują, iż analiza właściwości mechanicznych materiału odkształconego plastycznie w ujęciu struktury geometrycznej powierzchni (chropowatości) wydaje się zasadną. Składowe struktury geometrycznej, a zwłaszcza chropowatość powierzchni, wydają się „wrażliwym” wskaźnikiem opisującym nie tylko zjawiska związane bezpośrednio z analizowanym procesem (np. wywołany przez formowanie elektromagnetyczne proces odkształcenia plastycznego), potencjalnymi procesami towarzyszącymi (np. zjawiska tribologiczne) lub potencjalnym zjawiskami zakłócającymi.

Autorzy: dr inż. Borys Borowik, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, E-mail: borys.borowik@pcz.pl
dr inż. Marek Kęsy, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Katedra Technologii i Automatykacji, E-mail: marek.kesy@pcz.pl

LITERATURA

- [1] Dobrogowski J., Kołaczkowski Z., Tychowski F., *Tłoczenie metali impulsowym polem magnetycznym*, PWN, Warszawa, 1979
- [2] Borowik B., *Odształcenie wsadów rurowych wybranych materiałów w procesie elektrodynamicznego formowania metali*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12b (2011), 19-21
- [3] Borowik B., *Ściskanie wsadów rurowych w procesie elektrodynamicznego formowania metali – analiza numeryczna*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12 (2015), 56-58
- [4] Bednarczyk J., *Distributions of forces in the inductors used in metal processing in the pulse magnetic field*, *Journal of Materials Processing Technology*, 133 (2003), 340-347
- [5] Bednarczyk J., Załuski T., *Analiza numeryczna elektrodynamicznej obróbki blach z wykorzystaniem pośredniego elementu sprężystego*, *Mechanik*, 7 (2010), 477-483
- [6] Borowik B., *Zastosowanie zmodyfikowanej metody Monte Carlo do obliczenia mocy strat cieplnych w przewodzącym wsadzie rurowym formowanym elektrodynamicznie*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2017), 249-252
- [7] Borowik B., *Wizualizacja procesów fizycznych w procesie elektrodynamicznego ściskania metali*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 3 (2018), 147-150
- [8] Ocoś K., Liubimov V., *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych*, OW PRZ, Rzeszów 2003
- [9] Kęsy M., *Technologie informacyjne w świetle praktyk czytelnicych*, *Dydaktyka Informatyki*, 13 (2018), 24-31
- [10] Sztompka P., *Socjologia. Analiza społeczeństwa*, Wyd. Znak, Kraków 2012
- [11] Kęsy M., *Nowoczesność środków dydaktycznych w kształceniu technicznym*, *Edukacja - Technika – Informatyka*, 3 (2012), 190 – 197
- [12] Borowik B., Kęsy M., *Rozpęczanie wsadów rurowych w procesie elektrodynamicznego formowania metali w ujęciu chropowatości i topografii powierzchni*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6 (2014), 222-226
- [13] *Exploring Surface Texture. A , fundamental guide to the measurement of Surface finish*. Taylor Hobson Limited, Leicester LE49JQ, England, 2011
- [14] ISO 25178. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Area – Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, International Organisation for Standardization, Geneva, 2012
- [15] Marinello F., Pezzuolo A., *Application of ISO 25178 standard for multiscale 3D parametric assessment of surface topographies*, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 275 (2019)
- [16] ISO 13565-2:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method – Surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve*
- [17] Franco L.A., Sinatora A., *3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp*, *Precision Engineering*, 40 (2015), 106-111