

## Proces elektrodynamicznego kształtowania aluminiowych wsadów rurowych w ujęciu błędów kształtu odkształconej powierzchni

**Streszczenie.** Technologia elektrodynamicznego formowania metali wywołuje zmiany właściwości w kształtowanym materiale. Proces odkształcenia wywołuje zmiany: kształtu, wymiarów liniowych, struktury materiałowej i struktury geometrycznej powierzchni. W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych pod kątem błędów kształtu odkształconej powierzchni. Ich podstawą były rejestrowane zarysy okrągłości oraz wybrane parametry oceny takie jak: odchyłka okrągłości, bicie promieniowe oraz odchyłka niewspółosiowości.

**Abstract.** The technology of electrodynamic metal forming causes changes in the properties of the formed material. The deformation process causes changes in shape and linear dimensions, material structure and geometric structure of the surface. The article presents the results of research conducted in terms of shape errors of the deformed surface. They were based on recorded roundness contours and selected assessment parameters such as: roundness deviation, radial runout and misalignment deviation. (**The process of electrodynamic shaping of aluminum pipe charges concerning the errors in shaping the deformed surface**)

**Słowa kluczowe:** obróbka elektromagnetyczna, błędy kształtu, zarys okrągłości, bicie promieniowe, niewspółosiowość.  
**Keywords:** electromagnetic forming, shape errors, roundness, radial runout, misalignment deviation.

### Wstęp

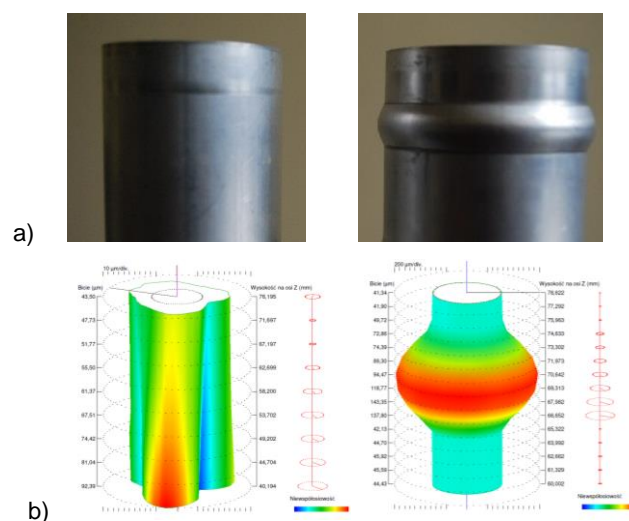
W procesie elektrodynamicznego formowania metali, kształtowana powierzchnia (wsad rurowy) umieszczona jest w niewielkiej odległości od usztywnionego mechanicznie induktora, a wywierane na nią ciśnienie wykorzystuje się do swobodnego lub wymuszonego jej odkształcenia. W czasie formowania następują przemiany 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 ciśnienie niezbędne do jej plastycznego odkształcenia. Najczęściej odbywa się to przy udziale matrycy kształtującej, umieszczonej na drodze ruchu odkształcanego wsadu. [1-5].

Nieustalane tłumione pole magnetyczne powstające w głowicy roboczej (cewce obrabiającej) jest wynikiem przepływu przez nią nieustalonego 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 oraz natężenie pola magnetycznego rzędu  $H = 10^7$  A·m<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>. 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<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>) [4, 5]. 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 do plastycznej obróbki wsadu. Należy pamiętać o wyłączeniu generatora po pierwszym udarze prądowym, aby uniknąć efektu odsprężynowania.

### Założenia badawcze i metodyka pomiarów

Struktura geometryczna powierzchni wytwarzanych wyrobów jest uwarunkowana kształtem, wymiarami oraz jakością uzyskiwanych powierzchni. Jak wykazują doświadczenia produkcyjne, zapewnienie odpowiedniej jakości wyrobów odnosi się szczególnie do problemów dotyczących zapewnienia dokładności wymiarowo – kształtowej i odpowiedniej jakości powierzchni [6, 7, 8]. Powyższy problem szczególnie dotyczy powierzchni obrotowo – symetrycznych (w tym walcowych), w których dokładność odwzorowania kształtu oceniana jest głównie na podstawie odchyłek zarysów okrągłości w wybranych przekrojach poprzecznych. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych często wyznacznikiem jakości współpracy elementów maszyny jest dokładność całej powierzchni. Z tego też względu współczesne procesy produkcyjne wymagają kontroli całej powierzchni [6, 7].

Przedstawione w artykule badania prowadzone były na bazie zarejestrowanych kształtów powierzchni wsadu rurowego (rys.1a) oraz powierzchni odkształconej w procesie elektrodynamicznego formowania, (rys.1b).



Rys.1. Widok i pomiarowa reprezentacja kształtu: a) wsad rurowy (materiał wyjściowy), b) powierzchnia odkształcona (wyoblona)

Rejestracja kształtów powierzchni prowadzona była na przyrządzie pomiarowym firmy Taylor Hobson - Talyrond 365, z obrotowym stołem i zastosowaną kulistą końcówką pomiarową o średnicy  $d = 2$  mm, (rys.2).

W pomiarowej rejestracji kształtów powierzchni wykorzystano strategię pomiarów zarysów okrągłości w wybranych przekrojach pomiarowych. Pomiar zarysów okrągłości prowadzone były przy zastosowaniu bezodniesieniowej metody pomiaru zmian promienia. Podstawową zaletą zastosowanej strategii jest duża gęstość rejestrowanych punktów pomiarowych wzdłuż obwodu przedmiotu w stosunku do względnie małej ich gęstości wzdłuż tworzącej powierzchni. Dzięki temu można uzyskać ocenę zarysów okrągłości, przy zastosowaniu większej liczby składowych harmonicznych [6, 10].



Rys.2. Widok przyrządu pomiarowego firmy Taylor Hobson – Talyrond 365

Podczas rejestracji kształtów powierzchni zastosowano, zalecany w praktyce przemysłowej, dolnoprzestrupowy filtr o częstotliwości granicznej 50 upr (upr – liczba fal zarysu okrągłości na 1 obrót rejestrowanej powierzchni). W zakresie statystycznego przetwarzania rejestrowanych zarysów zastosowano metodę Gaussa, a w procedurze wyznaczenia okręgu odniesienia - metodą najmniejszych kwadratów [12].

### Badania zasadnicze

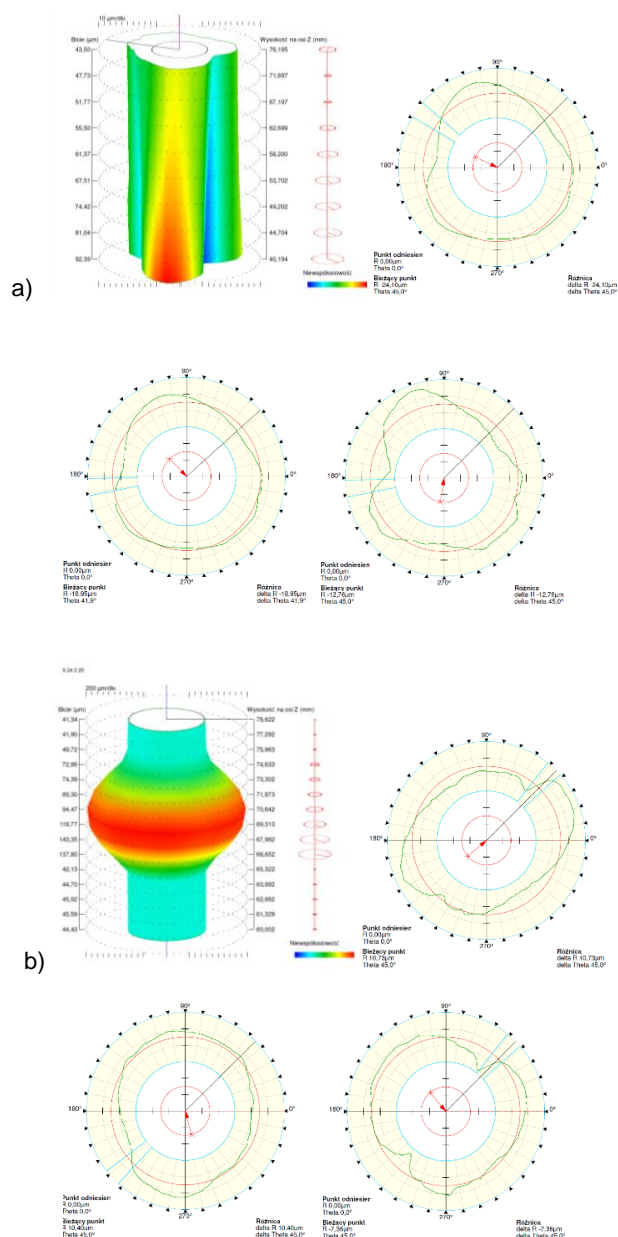
Uwzględniając, że zaobserwowana powierzchnia w obszarze wyoblonym istotnie odbiega swoim kształtem od kształtu walcowego (rys.1a), w badaniach zrezygnowano z analizy i oceny „wprost” zarysów walcowości. Przyjętą podstawą badań były więc wyodrębniane z rejestrowanego kształtu powierzchni zarysy okrągłości wyznaczone w przekrojach poprzecznych. Prowadzone badania oparto na analizie podstawowych parametrów opisujących rozkłady okrągłości tj. odchyłki okrągłości RONT (wraz z parametrami składowymi RONp i RONv), odchyłce niewspółosiowości (niewycentrowania) oraz bicia promieniowego (zestaw przyjętych parametrów uwzględnia wpracowane przez praktykę przemysłową procedury walidacyjne). Badania o charakterze ilościowym rozszerzone zostały o analizę jakościową – ocenę i kwantyfikację kształtów zarysów okrągłości.

W wymiarze praktycznym, szczególnie przydatnym w ocenie zarysów okrągłości jest parametr amplitudowy – odchyłka okrągłości RONT. Parametr ten jest zdefiniowany jako suma największej dodatniej wartości RONp i bezwzględnej wartości największej ujemnej wartości RONv, lokalnej odchyłki okrągłości ustalonej dla dowolnego okręgu odniesienia (najczęściej jest to okrąg ustalony metodą najmniejszych kwadratów) [11].

Parametr niewspółosiowości, określane jest jako odległość wyznaczana w płaszczyźnie pomiaru, i mierzona pomiędzy punktem przecięcia osi obrotu przyrządu a wyznaczonym środkiem zarysu mierzonego elementu [7].

Parametr bicia promieniowego określa bicie dowolnej części obwodu (w wybranym przekroju poprzecznym) w czasie ruchu obrotowego elementu.

Przedstawione parametry wykorzystane zostały do analizy porównawczej powierzchni odkształconej w procesie elektrodynamicznego formowania z powierzchnią materiału wyjściowego (wsadem rurowym). Rys. 3 przedstawia widoki zarejestrowanych kształtów oraz przykładowe zarysy okrągłości wsadu rurowego (rys.3a) oraz dla powierzchni przedmiotu po obróbce (rys.3b). Zestawienia wartości parametrów opisujących rozkłady okrągłości w przekrojach poprzecznych przedstawia tabela 2 (wsad rurowy) oraz tabela 3 (powierzchnia po procesie elektrodynamicznego formowania).



Rys.3. Widok rejestrowanych kształtów powierzchni oraz przekroje poprzeczne przedstawiające zarysy okrągłości: a) powierzchnia wyjściowa (Lp.: 2,5,8 – tabela 2), b) powierzchni odkształcona (Lp.: 3,9,14 – tabela 3)

Tabela 2. Zestawienie przyjętych do analiz parametrów opisujących rozkład zarysu okrągłości (powierzchnia wyjściowa – wsad rurowy)

Lp.	Poziom przekroju Z [mm]	RONp [μm]	RONv [μm]	RONt [μm]	Bicie promieniowe [μm]	Niewspółosiowość [μm]
1	40,194	47,25	43,79	91,04	92,39	4,35
2	44,704	40,13	39,70	79,83	81,04	3,75
3	49,202	36,84	36,83	73,67	74,42	3,42
4	53,702	33,44	34,19	67,63	67,51	3,32
5	58,200	30,18	31,45	61,63	61,37	2,75
6	62,699	27,44	28,52	55,96	55,50	2,10
7	67,197	25,43	26,12	51,55	51,77	1,85
8	71,697	23,09	23,87	46,96	47,73	1,73
9	76,195	20,51	21,57	42,08	43,50	2,23

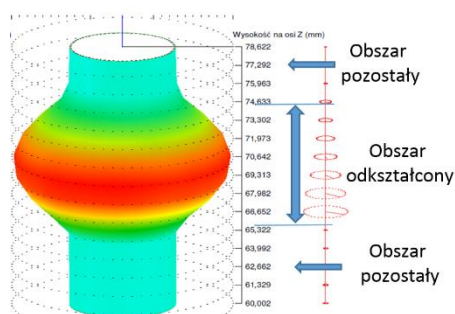
Tabela 3. Zestawienie przyjętych do analiz parametrów opisujących rozkład zarysu okrągłości (powierzchnia odkształcona)

Lp.	Poziom przekroju Z [mm]	RONp [μm]	RONv [μm]	RONt [μm]	Bicie promieniowe [μm]	Niewspółosiowość Nw [μm]
1	60,002	21,60	14,53	36,13	44,43	6,29
2	61,329	21,37	15,01	36,38	45,59	7,17
3	62,662	21,94	15,89	37,83	45,92	7,07
4	63,992	22,54	16,21	38,75	44,70	6,09
5	65,332	22,60	17,64	40,24	42,13	3,10
6	<b>66,652</b>	<b>27,22</b>	<b>22,59</b>	<b>49,81</b>	<b>137,80</b>	<b>65,05</b>
7	<b>67,982</b>	<b>35,79</b>	<b>27,81</b>	<b>63,60</b>	<b>143,35</b>	<b>58,74</b>
8	<b>69,313</b>	<b>39,96</b>	<b>35,87</b>	<b>75,83</b>	<b>118,77</b>	<b>44,34</b>
9	<b>70,642</b>	<b>39,42</b>	<b>35,49</b>	<b>74,91</b>	<b>94,47</b>	<b>32,85</b>
10	<b>71,973</b>	<b>35,08</b>	<b>29,07</b>	<b>64,15</b>	<b>89,30</b>	<b>26,43</b>
11	<b>73,302</b>	<b>28,76</b>	<b>16,64</b>	<b>45,40</b>	<b>74,39</b>	<b>93,30</b>
12	<b>74,633</b>	<b>38,88</b>	<b>22,68</b>	<b>61,56</b>	<b>72,86</b>	<b>16,88</b>
13	75,963	15,29	31,62	46,91	49,72	4,57
14	77,292	11,66	26,73	38,39	41,90	3,50
15	78,622	17,13	21,85	38,98	41,34	1,62

Punktem wyjścia dla badań było przyjęte założenie, że jednym z podstawowych parametrów eksploatacyjnych charakteryzujących elementy obrotowo-symetryczne jest bicie promieniowe. Jego wartość zależna jest od geometrycznej nieregularności zarysu okrągłości oraz od wartości błędów współosiowości zarysu względem osi obrotu. Błędy zarysu okrągłości w wymiarze wartości granicznych opisuje parametr RONt, z kolei błąd współosiowości opisany jest parametrem niewspółosiowości.

Warto zaznaczyć jest to, że obszar odkształconej (wyoblonętej) powierzchni wykazuje istotne różnice ilościowe w stosunku do obszarów nieodkształconych. Szczególnie widoczna jest powyższa prawidłowość w odniesieniu do parametrów: bicia promieniowego oraz niewspółosiowości, (tab. 3).

Wykazaną odmienność zweryfikowano procedurą statystyczną, prowadzoną pod kątem istotności różnic średnich arytmetycznych dwóch różnych prób wartości parametrów (dla obszaru odkształconego oraz obszarów pozostałych – rys.4).



Rys.4. Powierzchnia wyrobu z wyszczególnionym obszarem odkształcenia plastycznego

Przyjęta hipoteza zerowa  $H_0: E(X_1) = E(X_2)$  - zakłada równość wartości oczekiwanych analizowanego parametru (np. niewspółosiowości) w obszarze odkształconym i poza

obszarem odkształcenia. Przyjęta jednostronna hipoteza alternatywna  $H_1: E(X_1) > E(X_2)$  - na podstawie uzyskanych danych pomiarowych, wskazuje, że wartość oczekiwana analizowanego parametru w obszarze odkształcenia jest istotnie większa od wartości oczekiwanej w obszarze nieodkształconym. [9]

Przyjętym testem statystycznym w zakresie weryfikacji przyjętych hipotez jest test t-Studenta, wyznaczony zależnością (1). Przedział odrzuceń hipotezy zerowej  $H_0$ , przy postawionej prawostronnej hipotezie alternatywnej  $H_1$  określony jest jako:  $[t_{\alpha, s}, \infty)$ . Wykorzystane w procedurze weryfikacji wartości błędów D wyznacza się z zależności (2).

$$(1) \quad t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{D_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}}$$

$$(2) \quad D_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} \approx \sqrt{\left( \frac{S_{X_1}^2 (n_1 - 1) + S_{X_2}^2 (n_2 - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)} \right) \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}$$

gdzie:  $X_i$  – parametr „i” poddany procedurze statystycznej (tabela 4),  $\bar{X}_i$  – średnia arytmetyczna parametru „i”,  $D$  – przeciętny błąd losowy różnicy dwóch średnich arytmetycznych,  $S_{X_i}^2$  – wariancja zmiennej  $X_i$ ,  $n_i$  – liczność próby parametru „i”.

Procedura weryfikacyjna przeprowadzona została dla dwóch parametrów opisujących rozkłady okrągłości: niewspółosiowości oraz bicia promieniowego (tab. 4). Wartość krytyczną testu weryfikującego  $t_{\alpha, 2s}$  przyjęto dla deklarowanego poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  oraz liczby stopni swobody  $s = n_1 + n_2 - 2$ .

Tabela 4. Procedura statystyczna weryfikująca istotność różnic wybranych parametrów okrągłości w wyodrębnionych obszarach analitycznych powierzchni ( $\alpha = 0,01$ ,  $t_{0,01, s} = 2,62$ )

Lp.	Niewspółosiowość		Bicie promieniowe	
	Obszar odkształcony	Obszar pozostały	Obszar odkształcony	Obszar pozostały
1	65,05	6,29	137,80	44,43
2	58,74	7,17	143,35	45,59
3	44,34	7,07	118,77	45,92
4	32,85	6,09	94,47	44,70
5	26,43	3,10	89,30	42,13
6	19,87	4,57	74,39	49,72
7	16,88	3,50	72,86	41,90
8		1,62		41,34
średnia	<b>37,74</b>	<b>4,93</b>	<b>104,42</b>	<b>44,47</b>
$S_{X_i}^2$	<b>356,08</b>	<b>4,16</b>	<b>843,32</b>	<b>7,56</b>
$T_{0,02,14} =$	<b>4,911</b>		<b>5,841</b>	

Weryfikacja statystyczna jednoznacznie potwierdza przyjętą hipotezę alternatywną  $H_1$ , wskazując iż wartości analizowanych parametrów niewspółosiowości i bicia promieniowego, są istotnie większe w obszarze odkształconym (wyoblonym) w stosunku do obszarów nieodkształconych.

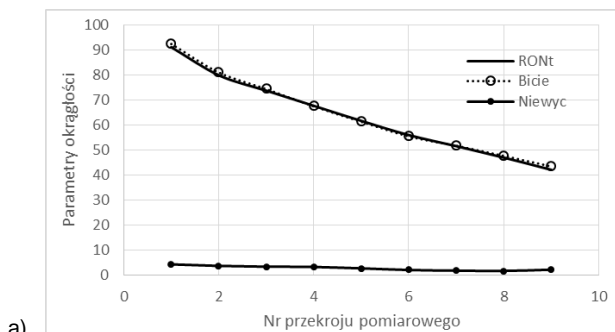
Rys. 5 przedstawia przebiegi przyjętych do analizy parametrów w funkcji poziomu przekroju poprzecznego Z (numeru przekroju pomiarowego – Lp.: tab. 2 i 3), odpowiednio dla powierzchni wyjściowej (rys. 5a) oraz odkształconej (rys. 5b).

Analiza przedstawionych na rysunku 5a przebiegów wykazuje tożsamościową współzależność bicia promieniowego oraz odchyłki okrągłości RONt. Analiza korelacyjna w wymiarze korelacji liniowej pomiędzy biciem promieniowym a oboma parametrami przyjętymi za czynniki je wymuszające, wykazuje w obu przypadkach silną zależność korelacyjną. Siła korelacji wyznaczona za pomocą współczynnika korelacji liniowej wynosi  $r_1^0 = 0,998$  dla parametru RONt, oraz  $r_2^0 = 0,96$  dla parametru niewspółosiowości. Jednak realne oddziaływanie parametru niewspółosiowości, pomimo dużej siły korelacyjnej, jest

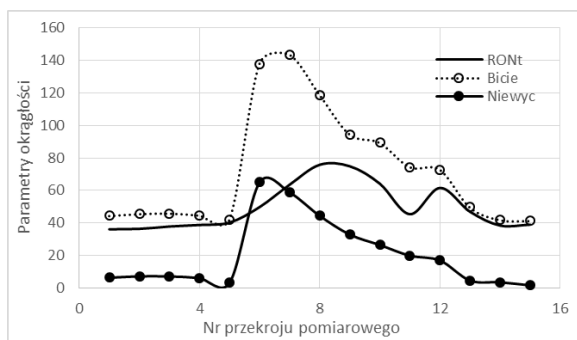
małe. W wymiarze ilościowym jego oddziaływanie decyduje o ok. 5% wartości bicia promieniowego.

Z kolei analiza przebiegów analizowanych parametrów prowadzona dla powierzchni odkształconej plastycznie wskazuje, że w samym obszarze wyoblenia zauważa się istotny wzrost bicia promieniowego, którego istotną składową (obok odchyłki okrągłości RONt) jest tym razem również odchyłka niewspółosiowości, (Rys.5b).

Analiza korelacyjna parametrów okrągłości prowadzona tylko dla obszaru wyoblonego wykazuje brak silnych zależności korelacyjnych. Siła korelacji między biciem promieniowym a odchyłką okrągłości RONt, wyrażona wartością współczynnika korelacji wynosi  $r_{1W} = 0,10$ . Równie nieskorelowana jest wartość bicia promieniowego w stosunku do niewspółosiowości ( $r_{2W} = 0,23$ ).



a)

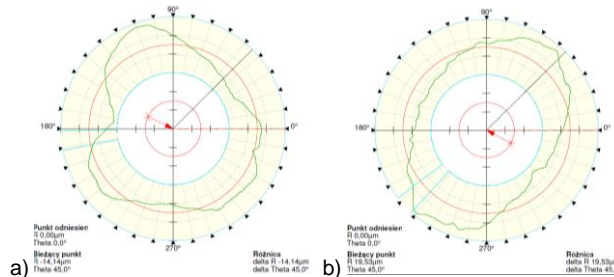


b)

Rys.5. Przebiegi parametrów okrągłości w wyszczególnionych przekrojach poprzecznych zarejestrowanych kształtów: a) powierzchni materiału wyjściowego – wsadu rurowego, b) powierzchni odkształconej (obszar wyobloni – przedział 6 ÷ 12)

Analiza korelacyjna prowadzona dla tzw. obszarów pozostałych (rys.4), jest niejednoznaczna. Wyznaczone wartości współczynnika korelacji, w obu przypadkach, na poziomie ok. 0,55, świadczą o braku systematycznych zależności. Ponadto zauważyć można modyfikacje ich właściwości w stosunku do powierzchni wyjściowej. Wyraźna odmienność w stosunku do obszaru powierzchni odkształconej - wyobloni pozwala przypuszczać, że przedstawiony stan jest wynikiem pośredniego wpływu procesu odkształcenia. Pośredni wpływ obróbki wynikać może m.in. z faktu, że są to powierzchnie ustalające przedmiot w przyrządzie obróbkowym, ponadto powierzchnie te wykazują powiązanie strukturalne (materiałowe) z obszarem odkształcenia.

Co istotne, w obszarze odkształcenia plastycznego nastąpiły również zmiany w kształcie profilu okrągłości. Dominujący w przypadku materiału wyjściowego kształt graniasty - trójgraniasty (C3) ulega transformacji w kształt owalny (C2), rys.6.



Rys.6. Kształty zarysu okrągłości: a) materiał wyjściowy – zarys trójgraniasty C3, b) obszar odkształcenia – zarys owalny C2

## Wnioski

Pomiary zarysów okrągłości jak i całych zarysów walcowości są ważnym czynnikiem walidacyjnym w ocenie użyteczności eksploatacyjnej wytwarzanych wyrobów. Przeprowadzone badania i analizy wykazały, iż proces elektrodynamicznego formowania aluminiowych wsadów rurowych w sposób niekorzystny wpływa na dokładność uzyskiwanego kształtu oraz generuje duże błędy wzajemnego położenia osi powierzchni względem ustalonej bazy odniesienia. Powyższe niekorzystne zjawiska tłumaczyć można dynamiką procesu odkształcenia. Impulsowy charakter procesu plastycznego odkształcenia, prowadzony w warunkach ograniczonej sztywności oprzyrządowania technologicznego wymusza drgania w układzie obróbkowym, których jednym z wyników są błędy kształtu i błędy wzajemnego położenia.

**Autorzy:** dr inż. Borys Borowik, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, borys.borowik@pcz.pl; dr inż. Michał Tagowski, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Katedra Technologii i Automatykacji, michal.tagowski@pcz.pl; dr inż. Marek Kęsy, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Katedra Technologii i Automatykacji, marek.kesy@pcz.pl

## LITERATURA

- [1] Dobrogowski J., Kołaczkowski Z., Tychowski F., Tłoczenie metali impulsowym polem magnetycznym, PWN, Warszawa, 1979
- [2] Borowik B., Odkształcenie wsadów rurowych wybranych materiałów w procesie elektrodynamicznego formowania metali, Przegląd Elektrotechniczny, 12b (2011), pp 19-21
- [3] 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
- [4] Borowik B., Kęsy M. Analiza struktury geometrycznej powierzchni obszaru odkształcenia kształtowanego w procesie elektrodynamicznego formowania metali, Przegląd Elektrotechniczny, 12 (2022), pp 200-204
- [5] Borowik B., Kęsy M. Dynamika elektrodynamicznego kształtowania metali w ujęciu falistości odkształconej powierzchni, Przegląd Elektrotechniczny, 4 (2024), pp 273-276
- [6] Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarys kształtu, falistość i chropowatość. WNT, Warszawa 2008.
- [7] Adamczak S., Metrologia geometryczna powierzchni technicznych. PWN, Warszawa 2024.
- [8] Oczóś K., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych, OW PRZ, Rzeszów 2003
- [9] Luszniewicz A., Słaby T., Statystyka. Teoria i zastosowania. Wyd. C.H. Beck, Warszawa 2003
- [10] PN-EN ISO 12180-1:2012. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Walcowość – Cz.1. Słownik i parametry kształtu walcowego.
- [11] PN-EN ISO 12181-1:2012. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Okrągłość – Cz.1. Terminologia i parametry okrągłości
- [12] PN-EN ISO 12181-2:2012. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Okrągłość – Cz.2. Operatory specyfikacji.