

Dynamika elektrodynamicznego kształtowania metali w ujęciu falistości odkształconej powierzchni

Streszczenie. Impulsowy charakter oddziaływania siłowego w czasie elektrodynamicznego kształtowania metali stanowi podstawę dla przyjęcia tezy występowania drgań w układzie obróbkowym. Efektem powyższego zjawiska jest m.in. falistość kształtowanych powierzchni. Właściwości odkształconych powierzchni zależą od rodzaju i intensywności zjawisk występujących w czasie procesu, te z kolei są efektem możliwości kształtowania swobodnego lub wymuszonego z zastosowanym oprzyrządowaniem technologicznym – matrycą kształtującą.

Abstract. The impulsive nature of the force interaction during the electrodynamic shaping of metals is the basis for adopting the thesis of the occurrence of vibrations in the machining system. The effect of the above phenomenon is, among others, waviness of shaped surfaces. The properties of the deformed surfaces depend on the type and intensity of the phenomena occurring during the process, which in turn are the result of the possibility of free shaping or forced shaping with the use of technological equipment - a shaping die. (**Dynamics of electrodynamic metal shaping taking into account the waviness of surface deformation**).

Słowa kluczowe: obróbka elektrodynamiczna, dynamika procesu, falistość powierzchni.
Keywords: electrodynamic machining, process dynamics, surface waviness

Wstęp

Konwencjonalne sposoby plastycznego kształtowania metali polegają na wykorzystaniu ruchomych narzędzi (np.: stemple, walce, tłoczniaki, wyoblaki), które działają bezpośrednio na powierzchnie formowanych półwyrobów. Dopełnieniem procesowym jest wymuszana mechanicznie kinematyka procesu warunkująca ruchy liniowe lub obrotowe narzędzia względem kształtowanych powierzchni [1]. W odróżnieniu od klasycznych sposobów obróbki plastycznej, elektrodynamiczne kształtowanie metali jest metodą formowania, w której wykorzystuje się siłę Lorentza, działającą bezkontaktowo na umieszczone w impulsowym polu magnetycznym przewodniki, przez które przepływa prąd elektryczny [1, 2, 3].

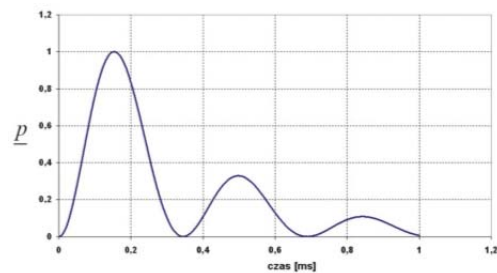
W procesie elektrodynamicznego formowania metali, kształtowana powierzchnia umieszczona jest w niewielkiej odległości od usztywnionego mechanicznie induktora, a wywierane na nią ciśnienie wykorzystuje się do swobodnego lub wymuszonego jej odkształcenia [1, 4, 5, 6]. W zależności od ich wzajemnego względnego usytuowania, wywierane na półwyrob ciśnienie jest wykorzystywane do wykonywania operacji wymagających ściskania lub rozpęczania profili zamkniętych, a także przemieszczania elementów płaskich [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 – półwyrob, a ta z kolei zostaje zamieniona na energię ruchu kształtowanej powierzchni oraz pracę niezbędną do jej plastycznego odkształcenia. Odbywa się to najczęściej przy udziale matrycy kształtującej umieszczonej na drodze ruchu odkształcającej się powierzchni materiału [1-6].

Proces elektrodynamicznego formowania metali należy do metod obróbki dużymi mocami. Należy zaznaczyć, że ze względu na impulsowy charakter siły Lorentza – wartość wytworzonego przez nią ciśnienia, o charakterze pulsacyjnym (rys.1), zdecydowanie maleje po pierwszym okresie pulsacji [4, 5].

Założenia i tezy badawcze

Dynamika elektrodynamicznego formowania metali, w powiązaniu z krótkotrwałym czasem i pulsacyjnym charakterem siły Lorentza [1, 4, 7], stanowią podstawę dla przyjęcia tezy występowania drgań w układzie

obróbkowym. Podstawowymi elementami są, w analizowanym przypadku przedstawiony na rysunku 2 formowany aluminiowy wsad rurowy oraz matryca kształtująca.



Rys.1. Czasowy przebieg ciśnienia p działającego na półwyrob podczas elektrodynamicznego formowania bezpośredniego [4]



Rys.2. Formowany aluminiowy wsad rurowy – półwyrob

Analizy teoretyczne weryfikowane praktyką metrologiczną wskazują, iż prowadzony w powyższych warunkach proces odkształcenia wywoływać powinien w kształtowanej strukturze geometrycznej powierzchni (SGP) składową falistość [8, 9, 10].

Falistość powierzchni stanowi zbiór nierówności zbliżonych do postaci okresowej z różnym nasileniem zaburzeń składowej losowej. Nierówności te charakteryzują się zazwyczaj łagodnym, zbliżonym do przebiegu sinusoidalnego profilem. Przyczyną jej powstawania są najczęściej drgania układu obróbkowego lub inne okresowe zaburzenia procesu. Przyczyną falistości mogą być np.: nierównomierność pracy przekładni mechanicznych, drgania przenoszone z innych obiektów, drgania własne generowane np. przez procesy tarcia, niejednorodność

struktury obrabianego materiału. [9]. Zaznaczyć należy, iż w budowie maszyn falistość jest błędem wykonawczym.

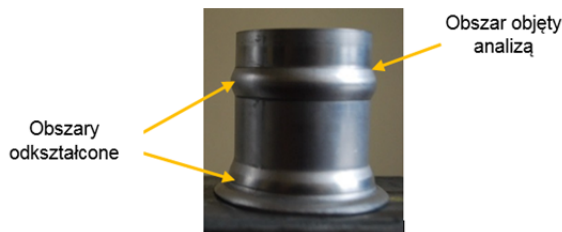
Istotność poruszanego zagadnienia uzasadnić można m.in. tym, że w projektowaniu inżynierskim ważne są nie tylko tolerancje wymiarów i dokładność odwzorowania kształtu. Uwzględniane być muszą również zależności pomiędzy funkcjonalnością powierzchni a jej stanem geometrycznym. Zauważyć należy, że falistość powierzchni ma wpływ na wiele właściwości funkcjonalnych wyrobu, jak np.: właściwości smarne, szczelność mechaniczną, tolerancje montażowe, odkształcenia stykowe, przewodność cieplną i elektryczną, własności cierne [11].

Zestawienie powyższych informacji i zależności pozwala na przyjęcie tezy, iż kształtowane w procesie elektrodynamicznej obróbki aluminiowe wsady rurowe wykazywać powinny SGP z silną składową falistości. Ponadto analiza procesu prowadzona pod kątem właściwości SGP obszaru odkształcenia [12, 13] pozwala przyjąć dodatkowe założenie, że bezpośredni kontakt powierzchni zewnętrznej wsadu z powierzchnią matrycy kształtującej w czasie odkształcenia wywołuje procesy wpływające na odmienne właściwości powierzchni w stosunku do odkształconych obszarów powierzchni wewnętrznej, w których brak jest fizycznego kontaktu z powierzchnią matrycy. Odmienność właściwości obu analizowanych powierzchni tłumaczyć można kontekstem procesów kontaktowych towarzyszących odkształceniu plastycznemu, które może wywoływać i intensyfikować wiele zjawisk w strefach kontaktu. Jednym z nich jest zjawisko tarcia.

Tarcie jest jednym z podstawowych zjawisk ograniczających stopień odkształcenia materiału oraz uzyskanie określonej chropowatości powierzchni. Tarcie występujące w warunkach dużych nacisków istotnie różni się od tarcia przebiegającego w warunkach małego obciążenia lub występującego w węzłach kinematycznych maszyn. Towarzysząc procesowi odkształcenia plastycznego, tarcie wywiera istotny wpływ m.in. na przebieg płynięcia materiału, wielkość odkształcenia, rozkłady temperatury w strefie kontaktu, jakość uzyskiwanej powierzchni a także stopień zużycia narzędzi [14].

Metodyka pomiarów i badań

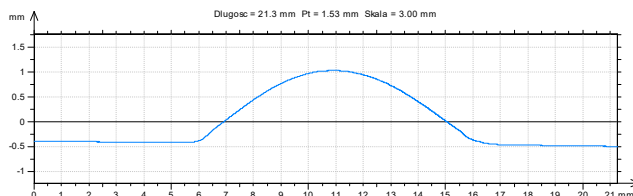
Proces elektrodynamicznego formowania aluminiowych wsadów rurowych wywołuje odkształcenie plastyczne obszarów wyznaczonych ukształtowaniem matrycy kształtującej, (rys.3).



Rys.3. Aluminiowy wsad rurowy po procesie elektrodynamicznego rozciągania

Wyodrębniony na potrzeby badań obszar odkształconej powierzchni prezentuje przedstawiony na rysunku 4 profil pierwotny 2D wyznaczony jako przekrój zarejestrowanej topografii 3D powierzchni zewnętrznej.

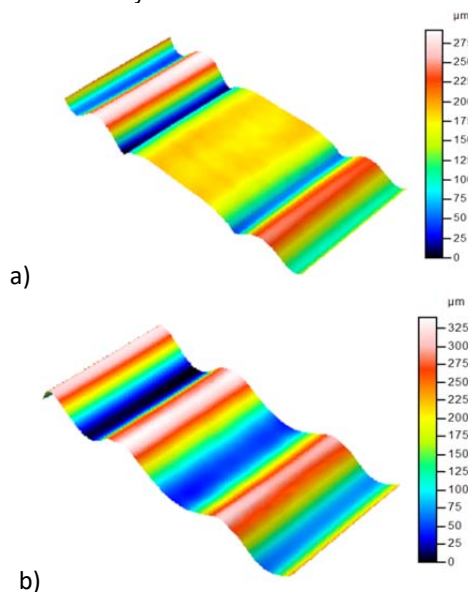
Weryfikacja postawionych problemów badawczych przeprowadzona została na podstawie rejestrowanych na profilometrze firmy Taylor Hobson TaluSurf 2D/3D topografii 3D powierzchni, które poddano operacji filtrowania składowych SGP. Proces pomiarowy, obliczeniowo i analityczny prowadzony został przy zastosowaniu oprogramowania Ultra Surface oraz Talymap Platinum.



Rys.4. Przekrój (profil pierwotny 2D) obszaru odkształconej powierzchni zewnętrznej

Ocena falistości powierzchni

Ponieważ zarejestrowane topografie 3D powierzchni obszaru odkształcenia zawierają składowe zarysy kształtu oraz falistość i chropowatość powierzchni, badania i analizy poprzedzone zostały operacjami filtrowania danych pomiarowych. Wynikiem filtrowania składowych SGP prowadzonej pod kątem analiz falistości były topografie przedstawione na rysunku 5.



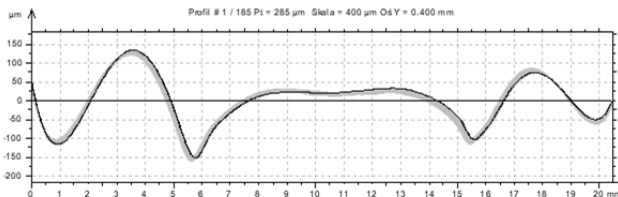
Rys.5. Widok 3D składowej falistości: a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna

Filtrowanie składowych SGP stanowiło podstawę dla wygenerowania serii 92 równoległych względem siebie osiowych profili falistości (rys.6 i rys.7), na podstawie których wyznaczono zestaw parametrów statystycznych (amplitudowych i rozmieszczenia) opisujących falistość analizowanych powierzchni, (tabela 1).

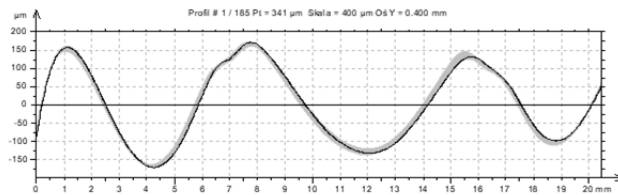
Analiza falistości oraz danych pomiarowych prowadzona została w standardzie normy ISO 21920 : 2022 [15]. Przedstawione profile falistości (rys.6 i rys.7) oraz zestawienie parametrów statystycznych (tabela 1) uwidaczniają różnice w zakresie ukształtowania i regularności przebiegów falowych. Profil falistości wyznaczony dla powierzchni zewnętrznej (rys.6) posiada w środkowej części przebieg o charakterze płaskowyzu. Ten wycinek profilu może być oznaką występowania zjawisk tłumiących procesy determinujące powstawanie falistości. Z kolei profil falistości opisujący powierzchnię wewnętrzną (rys.7), wykazuje dużą regularność przebiegu falowego na całej długości zmierzonego obszaru.

Drugą widoczną różnicą jest wysokość rejestrowanych przebiegów falistości. Różnice wysokości fal w wymiarze ilościowym przedstawiają zależności parametrów amplitudowych. Relacje wartości liczone w grupie parametrów wyznaczanych na podstawie wysokości i głębokości pojedynczych wzniesień i wgłębień profilu pierwotnego (Wp, Wv, Wz, Wt) wskazują, że parametry

opisujące falistość powierzchni wewnętrznej są średnio o 30% większe od swoich odpowiedników wyznaczonych dla powierzchni zewnętrznej. W grupie parametrów amplitudowych wyznaczanych na podstawie wartości średnich rzędnych profilu (W_a , W_q) powyższa zależność osiąga wartość 50%.



Rys.6. Seria profili falistości dla powierzchni zewnętrznej



Rys.7. Seria profili falistości dla powierzchni wewnętrznej

Tabela 1: Zestawienie parametrów falistości dla analizowanych powierzchni

Parametr	Jednostka miary	Powierzchnia zewnętrzna		Powierzchnia wewnętrzna	
		Średnia	Odch_std	Średnia	Odch_std
Parametry amplitudy					
Wp	μm	24.0	0.285	32.1	0.429
Wv	μm	21.8	0.357	32.0	0.412
Wz	μm	45.9	0.615	64.1	0.839
Wt	μm	264	4.84	327	3.38
W _a	μm	48.0	0.952	90.0	1.35
W _q	μm	50.4	0.990	92.6	1.32
Wsk		-0.344	0.0509	0.0986	0.0108
Wku		5.51	0.342	2.18	0.0415
Parametry rozmieszczenia					
WSm	mm	7.21	0.0196	7.29	0.418
Wdq	°	3.73	0.0404	4.91	0.0625

Analiza parametru Wsk dla powierzchni zewnętrznej wskazuje na korzystne z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych przesunięcie masy materiałowej w kierunku wierzchołków nierówności. To zjawisko statystyczne jest wynikiem występującego w centralnej części profilu płaskowyzu. Korzystny rozkład masy materiału nie koreluje jednak z niekorzystnym rozkładem rzędnych opisanych parametrem Wku. Wartość parametru wyznaczona dla powierzchni zewnętrznej $Wku \approx 5,5$, wskazuje na występowanie smukłej krzywej rozkładu amplitudy rzędnych profilu falistości, która interpretowana jest w kategoriach dużej ostrości wierzchołków i rowków, co stanowi zaprzeczenie istnienia płaskowyzu. W analizie powyższego parametru należy uwzględnić jego dużą wrażliwość na niejednokrotnie pojedyncze odstępstwa od statystycznej reguły, które w przypadku falistości powierzchni zewnętrznej mają miejsce.

Analiza parametru Wdq wskazuje na statystycznie uśrednioną większą stromość przebiegów falowych powierzchni wewnętrznej. Z kolei analiza parametru poziomego WSm, interpretowanego w kategoriach uśrednionej długości fali przebiegu falistości, wykazuje dla obu powierzchni podobieństwo wartości (7,21 – 7,29 mm). Wykazane podobieństwo wartości parametru WSm wskazuje na fakt, iż obie powierzchnie stanowią granice odkształcanego cienkiego wycinka materiału. Źródłem powstającej falistości obu powierzchni był ten sam proces,

zaś różnice w wymiarach i regularności przebiegów falowych mogą być efektem np. mechaniki i stanów odkształcenia wynikającej z krzywizny odkształconej powierzchni lub występowania zjawisk i procesów towarzyszących (np. tribologicznych), będących wynikiem kontaktu (lub jego braku) powierzchni odkształcanej z matrycą kształtującą.

Analiza harmoniczna przebiegów falistości powierzchni

Uwzględniając fakt, że rejestrowane przebiegi falistości wykazują okresową powtarzalność (bardziej widoczną w przypadku powierzchni wewnętrznej, przypadek powierzchni zewnętrznej jest mniej wyrazisty), badania podstawowe poszerzono o analizę harmoniczną. Podstawą dla analizy było modelowanie uśrednionych przebiegów rzeczywistych (średnia z 92 profili falistości dla każdej powierzchni) za pomocą składowych harmonicznych.

Składowe harmoniczne są w postaci przebiegów sinusoidalnych [9, 16] opisanych przez parametry: amplitudę fali A_k , długość fali λ_k oraz przesunięcie fazowe składowej harmonicznej φ_{ok} . Przyjęta zależność modelująca rzeczywisty przebieg falistości przyjmuje postać:

$$(1) \quad y = \sum_{k=1}^n A_k \cdot \sin\left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_k}\right) \cdot x + \varphi_{ok}\right)$$

gdzie: k – numer składowej harmonicznej, n – liczba przyjętych składowych harmonicznych

Przyjętym kryterium akceptacji składowej harmonicznej k do zbioru modelującego była wartość amplitudy fali A_k . Przyjęty poziom akceptacji wyznaczono progiem 5% wartości parametru Wt. Składowe harmoniczne o amplitudzie większej lub równej wartości granicznej przyjmowane są do zbioru przebiegów modelujących. Jakość dokładność modelu do danych pomiarowych weryfikowana została przez współczynnik determinacji R^2 oraz wizualną ocenę wykresu dopasowania. Przyjęte składowe harmoniczne spełniające kryterium akceptacji oraz statystyczny opis dokładności odwzorowania przedstawiają dane zamieszczone w tabeli 2.

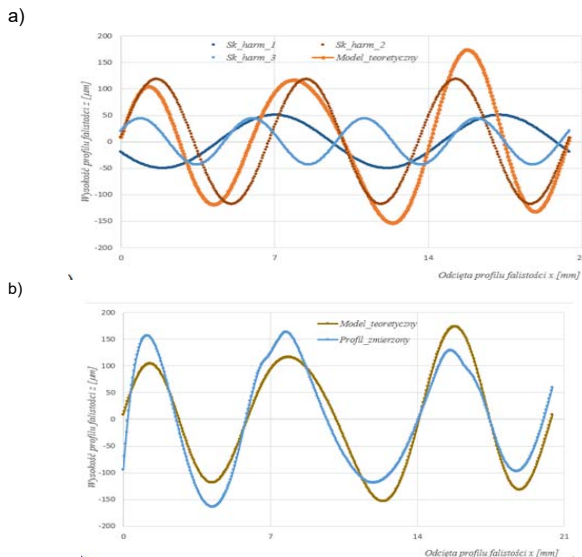
Tabela 2. Składowe harmoniczne opisujące przebiegi falistości analizowanych powierzchni

Składowa harmoniczna (k)	Powierzchnia zewnętrzna			Powierzchnia wewnętrzna		
	A_k [μm]	λ_k [mm]	φ_{ok} [deg]	A_k [μm]	λ_k [mm]	φ_{ok} [deg]
1	51,46	6,28	224	50,25	10,23	203
2	53,71	5,11	247	118,00	6,82	4
3	16,48	4,09	376	43,60	5,11	27
4	28,59	3,41	58	-	-	-
R^2	0,703			0,866		

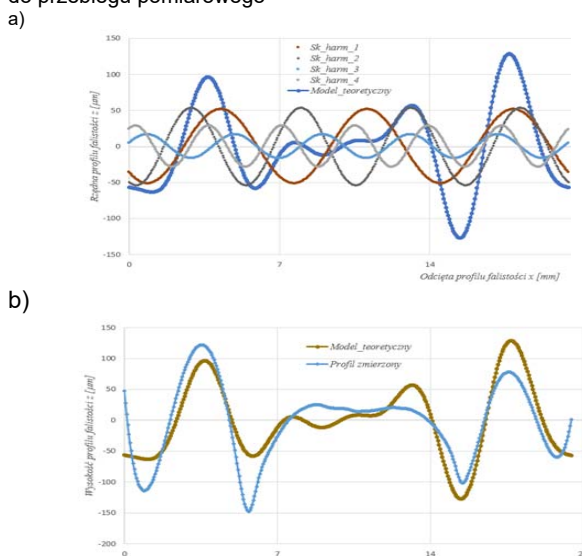
Próby modelowania przebiegów falistości za pomocą składowych harmonicznych wykazały, że przebieg opisujący falistość powierzchni wewnętrznej (rys.8), to przypadek względnie prosty. Przyjęcie trzech składowych harmonicznych wykazuje dobre dopasowanie przebiegu modelowego do przebiegu pomiarowego, przy zadawalającym poziomie współczynnika $R^2 = 0,866$. Z kolei złożony przebieg falistości powierzchni zewnętrznej powoduje trudności modelowe (rys.9). Przyjęcie czterech spełniających kryterium akceptacji składowych daje możliwość warunkowej akceptacji modelu ($R^2 = 0,703$). Zwiększenie liczby przebiegów modelujących o dwa kolejne przebiegi ($A_k \approx 4\% Wt$), w minimalnym stopniu zwiększa dokładność opisu modelowego ($R^2 = 0,712$).

Oceniając wyniki modelowania w kategoriach złożoności zjawisk determinujących powstawanie falistości, można przyjąć tezę, iż w przypadku powierzchni wewnętrznej występują trzy istotne procesowo źródła wymuszające

falistość kształtowanej powierzchni. W przypadku powierzchni zewnętrznej można założyć, że liczba potencjalnych przyczyn powstawania falistości jest większa. Uwzględniając fakt, że w czasie odkształcenia powierzchnia zewnętrzna ma bezpośredni kontakt z powierzchnią roboczą matrycy kształtującej, to większa liczba przyczyn oraz różnorodność procesów wydaje się oczywista. Analiza parametrów opisujących składowe harmoniczne modelujące falistość powierzchni zewnętrznej świadczyć może nie tylko o liczbie procesów towarzyszących procesowi odkształcenia plastycznego, ale także o braku procesowej wyrazistości.



Rys.8. Modelowanie falistości powierzchni wewnętrznej: a) składowe harmoniczne i ich suma, b) wykres dopasowania modelu do przebiegu pomiarowego



Rys.9. Modelowanie falistości powierzchni zewnętrznej: składowe harmoniczne i ich suma, b) wykres dopasowania modelu do przebiegu pomiarowego

Wnioski

Prowadzone badania wykazały istnienie falistości powierzchni w obszarze odkształcenia formowanych elektrodynamicznie aluminiowych wsadów rurowych. Wykazano pośrednio dynamiczny charakter obróbki.

Analiza właściwości odkształconego plastycznie materiału w ujęciu falistości powierzchni wydaje się zasadna. Analiza SGP prowadzona pod kątem falistości powierzchni daje możliwość wykazania dynamicznego

charakteru obróbki oraz diagnozy zjawisk i procesów towarzyszących odkształceniu plastycznemu.

Odmienność przebiegów falistości dla powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wsadu rurowego wydaje się weryfikować postawione założenie o istotnym wpływie zjawisk i procesów będących efektem fizycznego kontaktu odkształcanej powierzchni z powierzchnią zastosowanej matrycy kształtującej.

Wykazywana zaleta obróbki elektrodynamicznej – brak pozostających w kontakcie z formowanym materiałem narzędzi – nie eliminuje problemów wynikających ze zjawiskiem tarcia. Te są efektem m.in. zastosowanej matrycy kształtującej.

Problem tarcia w czasie obróbki, wskazuje na istotę smarowania strefy kontaktu i właściwego doboru środka smarowego.

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

LITERATURA

- [1] Bednarczyk J., Elektrodynamiczna obróbka metali, UWND AGH, Kraków 2007
- [2] Bednarczyk J., Obróbka metali w polu magnetycznym i możliwości jej automatyzacji, PAK 12 (2002), 19-21
- [3] Bednarczyk J., Stress and deformation states in single-coil inductors used for pipe calibration by means of electromagnetic method, The Archive of Mechanical Engineering, 4 (2007),
- [4] Bednarczyk J., Załuski T., Analiza numeryczna elektrodynamicznej obróbki blach z wykorzystaniem pośredniego elementu sprężystego, *Mechanik*, 7 (2010), 477-483
- [5] Borowik B., Odkształcenie wsadów rurowych wybranych materiałów w procesie elektrodynamicznego formowania metali, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12b (2011), 19-21
- [6] Dobrogowski J., Kołaczkowski Z., Tychowski F., Tłoczenie metali impulsowym polem magnetycznym, PWN, Warszawa, 1979
- [7] Borowik B., Moc odkształcenia wsadów rurowych z matrycą przewodzącą w procesie elektrodynamicznego ściskania metali, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2018), 5-8
- [8] Górecka R., Polański Z., Metrologia warstwy wierzchniej, WNT, Warszawa 1983
- [9] Nowicki B., Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa 1991
- [10] Oczóś K., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych, OW PRz, Rzeszów 2003
- [11] Grzesik W., Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn, *Mechanik*, 8-9 (2015), 587-593
- [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] Borowik B., Kęsy M., Analiza struktury geometrycznej powierzchni obszaru odkształcenia kształtowanego w procesie elektrodynamicznego formowania metali, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12 (2022), 200-204
- [14] Nowotyńska I., Trzepieciński T., Możliwości zastosowania technik kształtowania impulsem magnetycznym w przemyśle motoryzacyjnym, *Autobusy* 6 (2016), 1057-1060
- [15] ISO 21920:2022, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [16] Xinkuan W., Qiao X., Baorui W., Lianxin Z., Hong Y., Zhike P., Effect of surface waviness on the static performance of aerostatic journal bearings, *Tribology International* 103 (2016), 394-405