



Organizator:  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:  
Lucjan Dąbrowski  
ld@meil.pw.edu.pl  
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

**SNOE**

Artykuły naukowe z 2015 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

## Optymalizacja wielokryterialna własności użytkowych warstwy wierzchniej w procesie kulowania żelaza armko jako materiału modelowego

Multi criterion optimization of the superficial layer performance in the shot peening process of the Armco pure iron as a reference material

ROBERT PIEKARSKI  
JÓZEF ZAWORA\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.537

W artykule scharakteryzowano budowę modelu matematycznego procesu kulowania żelaza armko oraz optymalne nadawanie własności warstwie wierzchniej poprzez zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej, jako podejścia modelowego. Przedstawiono model matematyczny procesu kulowania próbek z żelaza armko i podano przykłady optymalizacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** żelazo armko, optymalizacja wielokryterialna, warstwa wierzchnia.

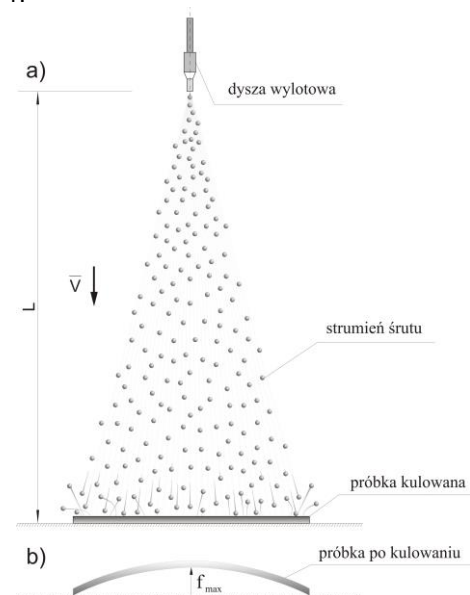
*The mathematical development of a model describing processes of the Armco pure iron has been discussed in this paper. It was aimed at optimizing condition of the obtained of surface layer using multi criterion optimization. The influence of machining parameters selection on surface condition and typical results of optimization have been presented.*

**KEYWORDS:** armco, multi criterion optimization, superficial layer.

Badanie procesu umacniającego warstwę wierzchnią poprzez zastosowanie obróbki powierzchniowej kulowaniem jest poszukiwaniem metod doskonalenia konstituowania własności warstwy wierzchniej części maszyn obciążonych zmęczeniowo. Proces ten należy do technologii specjalnych, wykończeniowych, w których własności użytkowe obrabianych powierzchni są kształtowane przez zjawiska fizyczne zachodzące podczas różnych odmian kulowania. Istotą badanego procesu przedstawiono na rys. 1.

Celem procesu kulowania jest w głównej mierze podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej wysoko obciążonych części maszyn. Badania prowadzi się również z uwagi

na coraz częstsze dążenie w przemyśle do stosowania automatyzacji, upraszczania i standaryzacji procesów technologicznych. Dążenie do uzyskania możliwie najlepszych własności użytkowych rozważanego procesu może być zrealizowane poprzez zastosowanie wielocelowej optymalizacji parametrów obróbki. Z uwagi na złożoność przebiegu zjawisk fizycznych występujących w tym procesie przeprowadzono badania doświadczalne według planowanego eksperymentu [1, 2]. Zastosowano trójpoziomowy plan typu  $3^2$ , tab. 1.



Rys. 1. Schemat kulowania pneumatycznego próbek a) próbka w trakcie kulowania, b) ugięcie próbki spowodowane zgniotem

\* Dr inż. Robert Piekarski (rpie@meil.pw.edu.pl),  
Dr hab. inż. Józef Zawora (jzawora@meil.pw.edu.pl)

Celem tych działań było zbudowanie statystycznego modelu matematycznego procesu niezbędego do sterowania własnościami użytkowymi warstwy wierzchniej. Eksperyment wykonano na trzech poziomach zmiennych niezależnych. Ze względu na koszty i ograniczenia stanowiska badawczego badania wykonano przy stałej wielkości kulek stalowych o średnicy  $\phi = 0.3$  mm i stałym ciśnieniu zasilania  $p = 0.6$  MPa, ograniczając liczbę zmiennych niezależnych  $X_i$  (parametrów obróbki;  $X_1 = L$ ,  $X_2 = t$  do dwóch wielkości, a mianowicie:

$L$  [mm] – odległość dyszy od powierzchni kulowanej,  
 $t$  [s] – czas trwania obróbki.

Tabela 1. Trójpoziomowy plan eksperymentu typu  $3^2$  dla dwóch zmiennych niezależnych

Lp.	t	L	$y_i$
1	-1	-1	$Y_1$
2	0	-1	$Y_2$
3	+1	-1	$Y_3$
4	-1	0	$Y_4$
5	0	0	$Y_5$
6	-1	0	$Y_6$
7	-1	+1	$Y_7$
8	0	+1	$Y_8$
9	-1	+1	$Y_9$

Jako zmienne zależne (parametry użytkowe) badano następujące wielkości:

$\sigma_c$  [Mpa] – maksymalne naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej,

$a_{max}$  [ $\mu\text{m}$ ] – odległość zalegania maksymalnej wartości naprężeń ściskających od powierzchni przedmiotu,

$a_0$  [ $\mu\text{m}$ ] – odległość punktu od powierzchni w którym następuje zmiana znaku naprężeń ujemnych na dodatnie,

$f$  [mm] – ugięcie przedmiotu (strzałka ugięcia),

$\Delta m/A$  [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ] – ubytek masy odniesiony do jednostki powierzchni obrabianej przedmiotu,

$\Delta h/h_p$  [%] – względna zmiana grubości przedmiotu po kulowaniu,

$Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości,

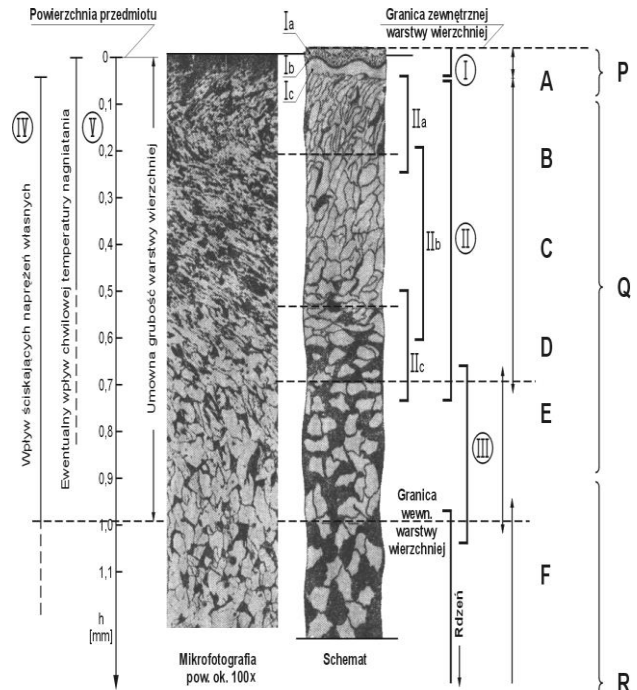
Charakterystykę procesu kulowania opracowano na podstawie pracy [3, 4, 5]. Proces kulowania strumieniowego jest dynamiczną obróbką umacniającą, polegającą na przekazywaniu materiałowi obrabianemu części energii kinetycznej rozprężonych pod działaniem ciśnienia roboczego kulek nagniatających, co powoduje powstawanie pola naprężeń i odkształceń powierzchniowych. Celem kulowania jest wytworzenie nowego stanu warstwy wierzchniej w materiale obrabianym, nadającego jej zgniot o odpowiedniej głębokości oraz uzyskanie korzystnego rozkładu naprężeń własnych, głównie o charakterze ściskającym. Istotą procesu kulowania jest zjawisko uderzenia sprężysto-plastycznego, które następuje w punkcie kontaktu materiał śrutujący przedmiot obrabiany. W trakcie kulowania występuje częściowa zamiana energii kinetycznej śrutu na pracę, prowadzącą do wywołania odkształcenia plastycznego oraz związanego odkształcenia sprężystego w przedmiocie obrabianym. Warstwa wierzchnia po kulowaniu charakteryzuje się znacznymi odkształceniami plastycznymi, występującymi na powierzchni i występującymi poniżej nich odkształceniami sprężystymi. Odkształcenia sprężyste, występujące pod uplastycznioną warstwą powierzchniową, są możliwe wskutek częściowej blokady ich odprężenia, z powodu oddziaływań warstw górnych odkształconych plastycznie.

Charakterystyczna struktura warstwy wierzchniej wg [1] po obróbce nagniataniem przedstawiona jest na rys. 2.

I – strefa rozdrobnienia, II – strefa odkształceń plastycznych, III – strefa odkształceń sprężystych, IV – strefa wynikowych ściskających naprężeń własnych, V – strefa efektów cieplnych; A – cząsteczki absorbowane, tlenki i inne związki chemiczne metali, krystality zniszczone przez narzędzie, lub strefa rozluźnienia materiału; B – rozdrobnione ziarna perlitu lub martenzytu, włóknistość; C – tekstura, przemiany fazowe ziaren ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) i austenitu szczątkowego w martenzyt; D – odkształcenia plastyczne ziaren; E – odkształcenia sprężyste ziaren; F – struktura pozbawiona śladów obróbki powierzchniowej; P – wpływ na smarowanie; Q – wpływ na własności użytkowe przedmiotu (zmęczenie, ścieralność, korozyjność); R – wpływ na wytrzymałość postaciową przedmiotu.

Warstwę wierzchnią poddaną nagniataniu można podzielić na następujące strefy:

- strefa rozdrobnienia I:
  - strefa zewnętrzna  $I_a$ , zawierająca dipolowe cząstki pochodzenia organicznego z otoczenia,
  - strefa  $I_b$ , zawierająca tlenki metali,
  - strefa  $I_c$ , zawierająca drobne i twarde cząsteczki, o charakterze najczęściej bezpostaciowym, pochodzące z rozbitych ziaren perlitu, austenitu szczątkowego lub



Rys. 2. Schemat budowy nagniatanej warstwy wierzchniej [1]:

- strefa odkształceń plastycznych II:
  - strefa ukierunkowana  $II_a$ , wytworzona na skutek tarcia elementu nagniatającego o powierzchnię obrabianą,
  - strefa  $II_b$ , mająca teksturę i zawierająca grupy krystalitów o jednorodnie zorientowanych elementach sieciowych, takich jak np. płaszczyzny krystalograficzne,
  - strefa  $II_c$ , charakteryzująca się odkształceniami plastycznymi bez tekstury krystalitów,
- strefa odkształceń sprężystych III:
  - strefa pośrednia pomiędzy zgniecioną warstwą wierzchnią, a nieodkształconym rdzeniem, mająca naprężenia własne wywołane wzajemnym oddziaływaniem strefy z odkształceniami plastycznymi i rdzenia oraz wskutek wpływu chwilowych efektów cieplnych, uzyskanych w procesie nagniatania,
- strefa naprężeń własnych IV:

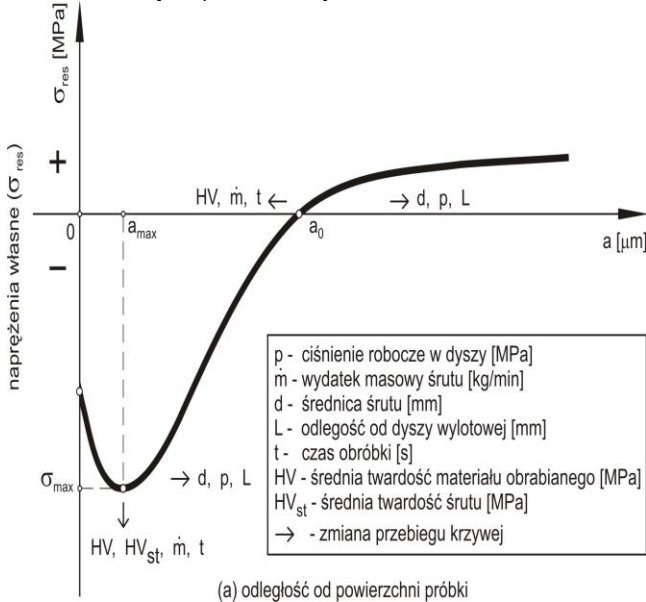
- strefa z naprężeniami własnymi, zależna ściśle od materiału i parametrów nagniatania, przebiegająca często poniżej strefy zgniotu i odkształceń sprężystych i decydująca o grubości warstwy wierzchniej po nagniataniu,
- strefa efektów cieplnych V:
  - strefa poddana wpływowi efektów termicznych, pochodzących od intensywnego działania elementów nagniatających.

Ważne parametry charakteryzujące własności warstwy wierzchniej i niezbędne do jej projektowania przedstawiono na rys. 3.

Doświadczenia polegające na kulowaniu standardowych próbek z żelaza armco o grubości 2 mm wykonano na stanowisku badawczym zgodnie z przyjętym planem eksperymentu podanym w tablicy 1. Zastosowano zmienne niezależne w następującym zakresie:

- $L \in < 150 - 250 >$  mm – odległość dyszy,
- $t \in < 30 - 50 >$  s – czas obróbki.

Głównym celem zbudowania modelu matematycznego oraz optymalizacji procesu kulowania żelaza armco jest opracowanie danych odniesienia do porównywania rezultatów osiągniętych podczas kulowania innych materiałów. Żelazo armco jest podstawowym materiałem odniesienia.



Rys. 3. Wielkości reprezentujące stan warstwy wierzchniej po procesie kulowania

**Model matematyczny**

Wykorzystując standardowy program krokowej regresji wielokrotnej zbudowano doświadczalny model matematyczny procesu obróbki kulowaniem, który wykorzystano w programie wielokryterialnej (wielocelowej, polioptymalizacji) optymalizacji z możliwością uwzględnienia wag poszczególnych wielkości użytkowych [6, 7]. Model ten ujmuje następujące zależności wielkości wyjściowych:

$$\sigma_c = -312,847 + 1,459 \cdot L - 0,0044 \cdot L^2 + 0,0108 \cdot L \cdot t$$

$$a_{max} = 198,083 - 0,713 \cdot L - 2,422 \cdot t + 0,00135 \cdot L^2 + 0,006 \cdot t^2$$

$$a_0 = 675,681 - 2,348 \cdot L - 1,439 \cdot t + 0,004 \cdot L^2 + 0,0137 \cdot L \cdot t$$

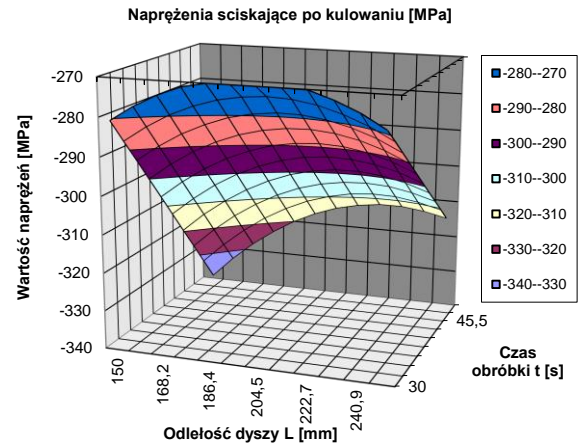
$$f = 2,348 - 0,0062 \cdot L + 0,0107 \cdot t$$

$$\Delta m = 0,0243 - 0,0001295 \cdot L + 0,000001355 \cdot L^2 + 0,000000175 \cdot t^2$$

$$\Delta h = -9,252 + 0,154 \cdot t - 0,00006 \cdot t^2$$

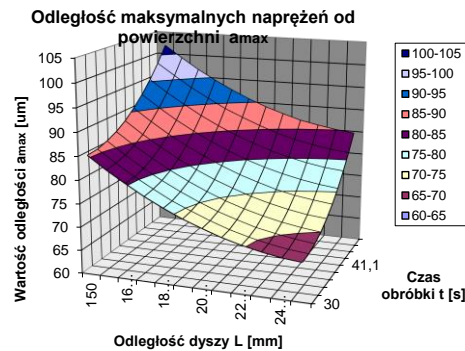
$$Ra = 19,45 - 0,0158 \cdot L - 0,433 \cdot t + 0,0001 \cdot L^2 + 0,0063 \cdot t^2 - 0,0004 \cdot L \cdot t$$

Wybrane zależności przedstawiono na rysunkach przestrzennych (rys. 4 - 7) w celu uwidocznienia wpływu odległości dyszy od powierzchni kulowanej i czasu obróbki na wielkości wyjściowe charakteryzujące proces.

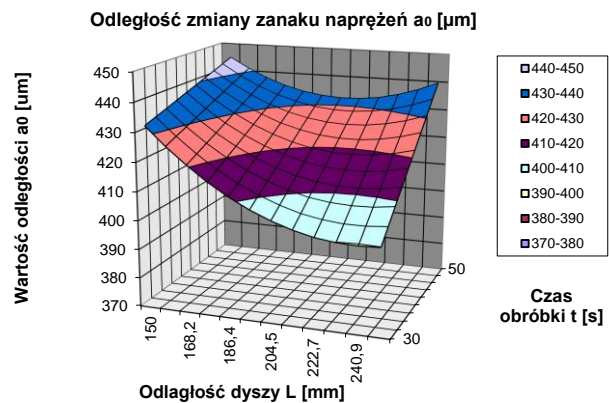


Rys. 4. Przebieg maksymalnych naprężeń własnych  $\sigma_c$  w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej – L i czasu obróbki – t.

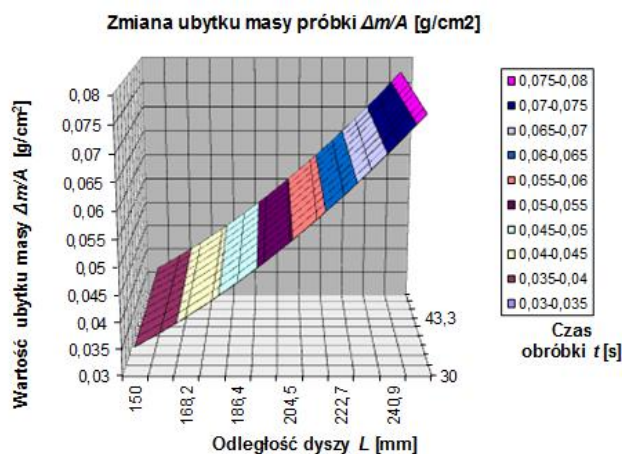
Istotność funkcji regresji była testowana testem Fishera Snedecora, natomiast istotność współczynników regresji testem t – Studenta na poziomie istotności  $\alpha = 0,005$ .



Rys. 5. Zmiana odległości maksymalnych naprężeń własnych  $a_{max}$  w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej – L i czasu obróbki – t.



Rys. 6. Zmiana odległości zerowej wartości naprężeń własnych  $a_0$  w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej – L i czasu t.



Rys. 7. Zmiana ubytku masy z kulowanej powierzchni próbki  $\Delta m/A$  [g/cm<sup>2</sup>] w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej –  $L$  i czasu obróbki –  $t$ .

### Optymalizacja jedno i wiele - kryterialna

W zastosowaniach technicznych na ogół najczęściej oczekuje się rezultatów optymalizacji wielokryterialnej z ograniczeniami, zwanej również często optymalizacją wielocelową lub polioptymalizacją. Zagadnienia optymalizacji tego typu ujmuje między innymi literatura: [1, 6, 7, 8, 9].

W praktyce najczęściej nadrzędne kryterium optymalizacji wielokryterialnej zastępuje się zastępczym zbiorem zadań jednokryterialnych. W rozwiązywaniu zadań tego typu wykorzystuje się między innymi: ważne kryterium zbiorcze, programowanie celowe, leksykograficzne porządkowanie kryteriów, ograniczanie kryteriów], metodę korelacyjno-wagową metodą docelową itp.

Do wyznaczenia wartości nadrzędnego kryterium optymalizacji wielokryterialnej niezbędna jest znajomość wartości optymalnych pojedynczych funkcji celów w sensie maksimum i minimum. To oznacza, że realizacja optymalizacji wielokryterialnej wymaga przeprowadzenia najpierw optymalizacji jednokryterialnej dla poszczególnych funkcji składowych. Do tego celu opracowano własny program optymalizacji jednokryterialnej, którego algorytm zaprogramowano w języku Fortran.

Tablica 2. Wartości optymalne parametrów użytkowych

<b>Optymalne wartości wielkości użytkowych i odpowiadające im parametry obróbki</b>			
Lp.	Wartości maksymalne	$L$ [mm]	$t$ [s]
1.	$\sigma_c = -338,385$ MPa	150,0	49,8
2.	$a_{max} = 191,547$ $\mu\text{m}$	150,0	49,8
3.	$a_0 = 444,630$ $\mu\text{m}$	150,0	49,8
4.	$f = 1,948$ mm	150,0	49,8
5.	$\Delta m = 0,012$ g/cm <sup>2</sup>	150,0	49,8
6.	$\Delta h = 0,333$ %	249,0	30,0
7.	$Ra = 11,027$ $\mu\text{m}$	249,0	30,0
Lp.	Wartości minimalne	$L$ [mm]	$t$ [s]
1.	$\sigma_c = -268,334$ MPa	203,0	30,0
2.	$a_{max} = 68,210$ $\mu\text{m}$	249,0	30,0
3.	$a_0 = 399,568$ $\mu\text{m}$	240,0	30,0
4.	$f = 1,122$ mm	249,0	30,0
5.	$\Delta m = 0,004$ g/cm <sup>2</sup>	249,0	30,0
6.	$\Delta h = 0,146$ %	150,0	32,0
7.	$Ra = 9,639$ $\mu\text{m}$	169,0	39,2

Wyniki obliczeń wartości optymalnych w sensie maksimum i minimum użytkowych parametrów obróbki wymienionych powyżej zamieszczono w tablicy 2. Obliczenia wykonano metodą systematycznego przeszukiwania w zakresie wszystkich możliwych kombinacji parametrów obróbki z krokiem dyskretyzacji równym jednej setnej wartości zakresów ich zmienności.

Z technicznego punktu widzenia mogą mieć sens różne docelowe zestawy optymalnych parametrów obróbki w zależności od warunków pracy części, które wymuszają określone wymagania techniczne przy konstytuowaniu warstwy wierzchniej.

Wyniki przedstawione w tablicy 2 wykazują, że optima jednokryterialne są osiągnięte w różnych punktach zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Nie istnieje taki zestaw parametrów, który spełniałby wszystkie mające sens techniczny optymalne wartości kryteriów pojedynczych funkcji celu. Wobec tego celem pracy jest określenie takiego optymalnego zestawu parametrów obróbki kulowaniem, który zapewniałby w miarę potrzeby następujące szczegółowe cele jednostkowe:

- wprowadzenie możliwie największej wartości naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej –  $\sigma_c$  [MPa],
- maksymalna wartość naprężeń ściskających powinna znajdować się jak najbliżej powierzchni zewnętrznej przedmiotu obrabianego –  $a_{max}$  [ $\mu\text{m}$ ] (największy gradient przyrostu naprężeń ściskających),
- odległość punktu zmiany znaku naprężeń (ściskających) ujemnych na dodatnie powinna być możliwie najmniejsza –  $a_0$  [ $\mu\text{m}$ ],
- odkształcenie przedmiotu (strzałka ugięcia) powinna być jak najmniejsza –  $f$  [ $\mu\text{m}$ ],
- ubytku masy z kulowanej powierzchni odniesiony do jednostki powierzchni przedmiotu powinien być jak najmniejszy –  $\Delta m/A$  [g/cm<sup>2</sup>],
- zmiana grubości przedmiotu po kulowaniu w stosunku do grubości początkowej powinna być jak najmniejsza –  $\Delta h/h_p$  [%],
- chropowatość powierzchni określona średnią arytmetyczną wartością odchylenia profilu od linii średniej  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] powinna być jak najmniejsza,

Wymienione cele jednostkowe stanowią jeden z możliwych wariantów realizacji warunków technicznych, których głównym zadaniem jest zapewnienie możliwie jak największej wartości naprężeń ściskających umiejscowionych jak najbliżej powierzchni zewnętrznej i zapewnienie możliwie najmniejszej chropowatości po jej kulowaniu. Taki stan określa możliwie największy gradient wzrostu naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej. W pewnych warunkach pracy taki stan może być niekorzystny i może powodować zmęczeniowe oddzielanie się warstwy umocnionej od materiału. W takim przypadku należy sformułować inny sposób realizacji określonych celów jednostkowych, a mianowicie: zachowując zasadnicze wymaganie uzyskania możliwie największej wartości naprężeń ściskających  $\sigma_c$ , tym razem przy możliwie największej odległości  $a_{min}$  od powierzchni umacniającej i możliwie największej odległości punktu zmiany znaku naprężeń ściskających na rozciągające  $a_0$ . Pozostałe cele jednostkowe pozostają niezmiennione. Utworzony inny wariant (drugi) wymagań realizacji warunków technicznych ma w głównej mierze zapewnić osiągnięcie możliwie największych naprężeń ściskających przy możliwie najmniejszym gradientie ich zmiany i możliwie najmniejszej chropowatości. W miarę potrzeb można tworzyć dowolne uzasadnione technicznie warianty realizacji celów jednostkowych, które wprowadzone do programu

optymalizacji wielocelowej pozwalają na wyznaczenie optymalnych parametrów obróbki realizującej określone wymagania. Warto zwrócić uwagę, że pewne parametry chropowatości są na ogół ze sobą związane. Upoważnia to w praktyce do zmniejszenia liczby formułowanych celów jednostkowych odnośnie poszczególnych parametrów chropowatości. Wystarczy wprowadzić najważniejszy parametr chropowatości, np.  $R_a$  do określenia jednostkowego celu realizującego wymagania, a podobne cele jednostkowe odnośnie innych związanych z parametrem  $R_a$  parametrów, takich jak:  $R_z$  ( $R_z$  wg DIN),  $R_q$  lub  $R_t$  zostaną również praktycznie z zadowalającą dokładnością osiągnięte.

W celu wyznaczenia optymalnego zestawu parametrów obróbki procesu kulowania zastosowano wielokryterialną optymalizację korelacyjno wagową wykorzystując pojęcie bezwymiarowej oceny wielkości  $OPT$ , opisanej zależnością:

$$OPT = \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \frac{\alpha_i \cdot |Y_{\max,i} - Y_i|}{Y_{\max,i} - Y_{\min,i}} \right\}_{\max}$$

gdzie:

$W_i$  – waga każdego z poszczególnych jednocelowych kryteriów optymalizacyjnych ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

$\alpha$  – współczynnik;  $\alpha = +1$  – dla wielkości maksymalizowanej,  $\alpha = -1$  – dla wielkości minimalizowanej,

$Y_{\max,i}$  ( $Y_{\min,i}$ ) – maksymalna (minimalna) wartość optymalizowanego parametru użytkowego procesu w zakresie dopuszczalnych wartości parametrów obróbki,

$Y_i$  – bieżąca wartość parametru użytkowego procesu do obróbki kwantowana z określonym przyrostem parametrów obróbki,  
 $n$  – liczba optymalizowanych użytkowych parametrów procesu.

Wartość globalnej oceny  $OPT$  może zmieniać się w granicach:

$$0 < OPT < W_j,$$

gdzie:  $W_j = \sum_{i=1}^n W_i$ .

Poszukiwany optymalny zbiór parametrów obróbki  $L$  oraz  $t$  przy określonym wariacie realizacji celów jednostkowych, to taki, przy którym wyrażenie  $OPT$  osiąga wartość maksymalną.

Zakładając, że wszystkie wielkości użytkowe obróbki kulowaniem są równoprawne (jednocenne) i są tak samo ważne, co jest równoznaczne z nadaniem im wag  $W_j = 1$ , gdzie  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  otrzymano następujący zbiór parametrów optymalnych dla obróbki kulowaniem, tablica 3 i 4. Analiza wyników wykazuje, że w przypadku wariantu pierwszego (wariant 1 –  $\sigma_c$  maksymalizowane, natomiast:  $a_{\max}$ ,  $a_0$ ,  $f$ ,  $\Delta m$ ,  $R_a$  minimalizowane), kiedy formułuje się cele jednostkowe z wymaganiem uzyskania możliwie największych naprężeń ściskających przy pozostałych parametrach użytkowych o możliwie najmniejszych wartościach uzyskanie największego gradientu naprężeń jest możliwe przy  $\sigma_c = -287,729$  MPa, leżących w odległości minimalnej  $a_{\min} = 69.429$  [ $\mu\text{m}$ ]. Natomiast w drugim wariacie (wariant 2 –  $\sigma_c$ ,  $a_{\max}$ ,  $a_0$  maksymalizowane natomiast:  $f$ ,  $\Delta m$ ,  $R_a$  minimalizowane), w którym cele jednostkowe zostały określone poprzez wymaganie możliwie największych naprężeń ści-

skających przy możliwie największej odległości od powierzchni kulowanej oraz możliwie największej odległości punktu zmiany znaku naprężeń ściskających na rozciągające i pozostałych parametrach użytkowych możliwie najmniejszych uzyskano  $\sigma_c = -314,337$  MPa w odległości maksymalnej  $a_{\max} = 84,311$   $\mu\text{m}$  i  $a_0 = 437,527$   $\mu\text{m}$ .

Tablica 3. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla wariantu pierwszego.

Wariant 1: ( $\sigma_c$ ) <sub>max</sub> , ( $a_{\min}$ , $a_0$ , $f$ , $\Delta m$ , $R_a$ ) <sub>min</sub> Parametry optymalne; $L = 249,0$ mm, $t = 35,4$ s	
Lp.	Wartości optymalne
1.	$\sigma_c = -287,729$ MPa
2.	$a_{\max} = 69,429$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 409,590$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,179$ mm
5.	$\Delta m = 0,005$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$R_a = 5,124$ $\mu\text{m}$
Parametry nieoptymalne; $L = 150,0$ mm, $t = 49,8$ s	
Lp.	Wartości nieoptymalne (najgorsze)
1.	$\sigma_c = -338,385$ MPa
2.	$a_{\max} = 101,532$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 443,879$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,948$ mm]
5.	$\Delta m = 0,012$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$R_a = 7,268$ $\mu\text{m}$

W tym przypadku gradient wzrostu naprężeń jest najmniejszy. Program optymalizacji wielocelowej umożliwia znalezienie optymalnych parametrów obróbki kulowaniem dla dowolnie sformułowanej grupy celów jednostkowych mających sens fizyczny. W wyniku otrzymuje się parametry optymalne obróbki tj. odległość dyszy od powierzchni i czas obróbki przy stałej, określonej prędkości przemieszczania się dyszy względem powierzchni obrabianej oraz wartości wszystkich parametrów użytkowych procesu. Wyniki obliczeń dla wariantu 2 podano w tablicy 4. Przedstawione przykłady były obliczone przy założeniu, że wszystkie kryteria cząstkowe są jednocenne, a więc wszystkie współczynniki wag są równe  $W_i = 1$ , gdzie, ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ).

Tablica 4. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla wariantu drugiego.

Wariant 2: ( $\sigma_c$ , $a_{\max}$ , $a_0$ ) <sub>max</sub> , ( $f$ , $\Delta m$ , $R_a$ ) <sub>min</sub> Parametry optymalne; $L = 249,0$ mm, $t = 49,8$ s	
Lp.	Wartości optymalne
1.	$\sigma_c = -314,337$ MPa
2.	$a_{\max} = 84,311$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 437,527$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,333$ mm
5.	$\Delta m = 0,006$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$R_a = 7,268$ $\mu\text{m}$
Parametry nieoptymalne; $L = 216,0$ mm, $t = 30,0$ s	
Lp.	Wartości nieoptymalne (najgorsze)
1.	$\sigma_c = -269,108$ MPa
2.	$a_{\max} = 70,985$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 401,320$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,327$ mm
5.	$\Delta m = 0,006$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$R_a = 4,314$ $\mu\text{m}$

W trzecim wariancie przyjęto, że trzy wielkości wyjściowe procesu są ważniejsze od pozostałych i nadano im współczynniki wag  $W_j = 2$ , gdzie, ( $j = \sigma_c, a_0, Ra$ ) oraz założono, że powinny osiągnąć możliwie największe wartości, natomiast pozostałe wielkości użytkowe powinny być możliwie najmniejsze. Wyniki obliczeń podano w tablicy 5.

## WNOSKI

Porównując otrzymane rezultaty przy przyjętych założeniach należy stwierdzić, że uzyskane wartości optymalnych parametrów w wariancie drugim różnią się następująco: czas obróbki jest większy o 40,68 %, natomiast odległość dyszy jest taka sama. Wzrost czasu obróbki powoduje większe umocnienie przy tej samej maksymalnej odległości dyszy. Przy czym zwiększają się wszystkie wartości użytkowe procesu: naprężenia ściskające o 9,94 %, odległość ich występowania 21,43 %, odległość punktu zmiany znaku naprężeń 6,82 %, strzałka ugięcia 12,55 %, ubytek masy 20 % i parametr chropowatości  $Ra$  41,84 %. Wyniki wartości nieoptymalnych (najgorszych) z punktu widzenia przyjętego kryterium globalnego dają pewne informacje o kierunku wpływów kryteriów cząstkowych.

Tablica 5. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla wariantu trzeciego z wagami  $W(\sigma_c, a_0, Ra) = 2$ .

Wariant 3: : $(\sigma_c, a_0, Ra)_{max}, (a_{min}, f, \Delta m)_{min}$ Parametry optymalne; $L = 249,0$ mm, $t = 33,8$ s	
Lp.	Wartości optymalne
1.	$\sigma_c = -284,773$ MPa
2.	$a_{max} = 68,814$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 406,486$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,162$ mm
5.	$\Delta m = 0,004$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$Ra = 4,884$ $\mu\text{m}$
Parametry nieoptymalne; $L = 150,0$ mm, $t = 49,8$ s	
Lp.	Wartości nieoptymalne (najgorsze)
1.	$\sigma_c = -338,532$ MPa
2.	$a_{max} = 101,879$ $\mu\text{m}$
3.	$a_0 = 443,320$ $\mu\text{m}$
4.	$f = 1,948$ mm
5.	$\Delta m = 0,012$ g/cm <sup>2</sup>
6.	$Ra = 7,268$ $\mu\text{m}$

Rozpatrując zagadnienie z technicznego punktu widzenia nie można bezkrytycznie stosować obliczonych optymalnych parametrów obróbki w praktyce obliczonych o dowolnie ustalone kryteria cząstkowe. W konkretnych warunkach technicznych wykonania części może być zadana określona wartość określonego parametru użytkowego np.: chropowatości powierzchni  $Ra$ ,  $Ra_{max}$  lub dolna i górna granica tego parametru [10]. W warunkach technicznych może być również wymagana wartość innego parametru chropowatości lub innej wielkości, np. głębokość umocnienia, wartość naprężeń, mikrotwardość itp. W programie optymalizacji przewidziano taką możliwość. Podając rodzaj i wartość określonego parametru wraz z jego odchyłkami tolerancji można uzyskać wartości optymalnych parametrów obróbki dla zadanych warunków.

## PODSUMOWANIE

Uzyskane przykładowe rozwiązania powinny być wykorzystane do dalszych badań procesu, doskonalenia opracowanego programu optymalizacji wielokryterialnej z ograniczeniami oraz zastosowania innych rodzajów optymalizacji

wielokryterialnej opracowanych przez innych znanych autorów w celu znalezienia najlepszego rozwiązania problemów występujących w badanych procesach. Uzyskane wyniki dla żelaza armco mogą być wynikami odniesienia do porównywania własności charakterystycznych wielkości warstwy powierzchni innych materiałów poddanych obróbce powierzchniowej umacniającej kulowaniem.

## LITERATURA

1. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984
2. Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu, WNT, Warszawa 1976
3. Przybylski W.: Podstawy Obróbki Nagiataniem, WNT, Warszawa 1987
4. Waissman I. L., Phillips A.: Simplified Measurment of Residual Stresses, Proc. of the Society Experimental Stress Analisys, t. XI, 1952, nr 2, str. 102
5. Adamczyk J.: Metaloznawstwo teoretyczne, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1993
6. Pogorzelski W.: Teoria systemów i metody optymalizacji. OWPW, Warszawa 1996.
7. Pogorzelski W.: Metoda wagowo-korelacyjna określania użyteczności kompromisowej wytworów przy wielu kryteriach, Zeszyty Naukowe WSI Koszalin, 1986, nr 8, część II, seria WM, s. 252-268.
8. Stadnicki J.: Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji - z przykładami zastosowań technicznych, WNT, Warszawa 2006.
9. Tarnowski W.: Modelowanie systemów, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004.
10. Humienny Z., Osanna P. H., Weckenmann A., Blunt L., Jakubiec W.: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS), WNT, Warszawa 2004.