

# Analiza porównawcza struktur geometrycznych powierzchni (SGP) po procesie kulowania stali 42CrMo4 ze strukturą odniesienia żelaza armco

Comparative analysis of the surface texture of alloy steel 42CrMo4 and the ARMCO pure iron subjected to the shot peening process

## Streszczenie

W artykule podano metodę porównywania struktur geometrycznych powierzchni SGP stali ze strukturą odniesienia żelaza armco na przykładzie procesu kulowania. Opracowanie wykonano na przykładzie porównania SGP stali 42CrMo4, z żelazem armco uzyskanych w takich samych warunkach obróbki.

**Słowa kluczowe:** metoda porównawcza; żelazo armco; chropowatość powierzchni; proces kulowania

## Abstract

In this paper, a method was presented for comparing the surface texture of material obtained in the shot peening process with the reference texture of the Armco pure iron. The comparative investigation was carried out for the surface of the alloy steel 42CrMo4 and the Armco pure iron, while both materials had been treated the same way.

**Keywords:** comparative method; Armco pure iron; surface roughness; shot peening process

## Wstęp

Metoda porównywania struktur geometrycznych powierzchni SGP stali ze strukturą odniesienia żelaza armco polega na wykonaniu badań porównywanych materiałów w takich samych warunkach. Badania doświadczalne wykonuje się dla dwóch gatunków materiałów, tj. materiału modelowego, którym jest żelazo armco oraz stali, której określone parametry struktury geometrycznej należy porównać. Przykład takiego porównania przeprowadzono dla stali 42CrMo4. Materiał modelowy jest materiałem odniesienia. W celu określenia wartości zmian parametrów struktury geometrycznej powierzchni dla określonego procesu obróbki, należy zbudować doświadczalny model matematyczny danego procesu dla obu porównywanych struktur. Badania doświadczalne wykonuje się najczęściej wykorzystując technikę planowania eksperymentów. Uzasadnieniem takiego wyboru jest zwykle złożoność zjawisk fizycznych w danym procesie [1]. W eksperymencie zastosowano próbki o grubości 2 mm. Do badań zastosowano trójpoziomowy plan eksperymentu dla dwóch zmiennych niezależnych typu 2<sup>3</sup> [2,3]. Wybrano następujące zmienne niezależne (wejściowe):  
L [mm] – odległość dyszy od powierzchni kulowanej,  
t [s] – czas trwania obróbki.

Zakresy zmienności zmiennych niezależnych ustalono na podstawie badań wstępnych w następujących granicach:

$L \in <150 - 250>$  mm,  
 $t \in <30 - 50>$  s.

Układ wartości zmiennych niezależnych zastosowanych w doświadczeniach zgodnie z wymaganiami planu eksperymentu przedstawiono w tabelicy I.

Jako zmienne zależne (parametry użytkowe) badano następujące wielkości struktury geometrycznej powierzchni (SGP):

Ra [μm] – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej,  
Rq [mm] – średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości od linii średniej,  
Rz [mm] – dziesięciopunktową wysokość wierzchołków chropowatości (wg DIN) [9],  
Rt [mm] – największą wysokość nierówności profilu na odcinku pomiarowym,  
Sm [mm] – średni odstęp chropowatości mierzony na linii średniej.

Badanie procesu umacniającego warstwę wierzchnią poprzez zastosowanie obróbki powierzchniowej kulowaniem pneumatycznym jest poszukiwaniem metod doskonalenia konstituowania własności warstwy wierzchniej części maszyn w zależności od wymagań technicznych. Proces ten należy do technologii specjalnych, wykończeniowych,

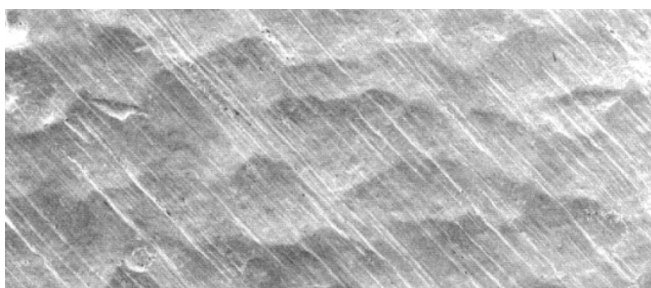
Dr inż. Robert Piekarski, dr hab. inż. Józef Zawora – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: rpie@meil.pw.edu.pl

w których własności użytkowe obrabianych powierzchni są kształtowane przez zjawiska fizyczne zachodzące podczas obróbki zgniotem. Główne cele stosowania kulowania pneumatycznego mogą być następujące:

- umocnienie przeciwwmęczeniowe przez zgniot,
- wytworzenie struktury punktowej w celu rozwinięcia powierzchni pod powłoki lakierowane, rysunek 1 [4],
- wytworzenie struktury bezkierunkowej (punktowej) rozpraszającej światło, która jest stosowane w elementach przyrządów pomiarowych oraz elementach narzędzi chirurgicznych,
- umocnienie przeciwwmęczeniowe przez zgniot przy jednoczesnym rozwinięciu powierzchni,
- umocnienie przeciwwmęczeniowe przez zgniot oraz wytworzenie struktury rozpraszającej światło.

Ze względu na koszty i ograniczenia stanowiska badawczego badania wykonano przy stałej wielkości kulek stalowych o średnicy  $\varphi = 0,3$  mm i stałym ciśnieniu zasilania  $p = 0,6$  MPa. Eksperyment powtórzono trzykrotnie w celu zwiększenia dokładności.



**Rys. 1.** Przykład struktury geometrycznej rozwiniętej powierzchni po kulowaniu pneumatycznym

**Fig. 1.** An example of the texture for the stretched surface obtained in the shot peening process

**Tablica 1.** Plan eksperymentu z kodowanym i rzeczywistym układem wartości zmiennych niezależnych,  $Y_{ij}$  – zmienne zależne (wejściowe), gdzie:  $i = Ra, Rq, Rz(DIN), Rt, Sm, j=1,2,3, \dots, N$  ( $N = 9$  – liczba doświadczeń)

**Table 1.** The experimental design using the coded and natural system of independent variables,  $Y_{ij}$  – the dependent (output) variables:  $i = Ra, Rq, Rz(DIN), Rt, Sm, j=1,2,3, \dots, N$  ( $N = 9$  – number of the experiments)

Lp.	L[mm]	t[s]	L[mm]	t[s]	Y
1	-1	-1	150	30	Y
2	0	-1	200	30	Y
3	+1	-1	250	30	Y
4	-1	0	150	40	Y
5	0	0	200	40	Y
6	-1	0	150	40	Y
7	0	+1	200	50	Y
8	-1	+1	150	50	Y
9	+1	+1	250	50	Y

## Model matematyczny struktury geometrycznej powierzchni żelaza armco i stali 42CrMo4

Wykorzystując standardowy program krokowej regresji wielokrotnej wyznaczono doświadczalne modele matema-

tyczne dla wybranych parametrów struktur geometrycznych żelaza armco i stali 42CrMo4 wg [2,3]. Istotność równań regresji była testowana testem Fischera Snedecora, natomiast istotność poszczególnych współczynników regresji testem  $t$  – Studenta. W obu przypadkach testy wykonano na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Doświadczalny model matematyczny procesu kulowania dla wybranych parametrów SGP żelaza armco podano poniżej:

$$\begin{aligned} Ra &= 19,45 - 0,0158 \cdot L - 0,433 \cdot t + 0,0001 \cdot L^2 + 0,0063 \cdot t^2 - 0,0004 \cdot L \cdot t \\ Rq &= 21,227 - 0,5105 \cdot t + 0,00011 \cdot L^2 + 0,00856 \cdot t^2 - 0,00089 \cdot L \cdot t \\ Rt &= 132,308 - 0,88366 \cdot L + 0,00328 \cdot L^2 + 0,02661 \cdot t^2 - 0,00988 \cdot L \cdot t \\ R_z \text{ (wg DIN)} &= 39,188 - 3,42222 \cdot t + 0,00172 \cdot t^2 \\ Sm &= 583,527 + 0,00007 \cdot L^2 + 0,2756 \cdot t^2 - 0,03671 \cdot L \cdot t \end{aligned}$$

Model matematyczny stali 42CrMo4 jest następujący:

$$\begin{aligned} Ra &= 26,455 - 0,0735 \cdot L - 0,534 \cdot t + 0,00018 \cdot L^2 + 0,00622 \cdot t^2 \\ Rq &= 37,35417 - 0,118875 \cdot L - 0,74722 \cdot t + 0,0002925 \cdot L^2 + 0,008722 \cdot t^2 \\ Rt &= 548,139 - 2,603 \cdot L - 11,68 \cdot t + 0,00535 \cdot L^2 + 0,11722 \cdot t^2 + 0,00933 \cdot L \cdot t \\ R_z \text{ (wg DIN)} &= 109,94 - 3,42 \cdot t + 0,043 \cdot t^2 - 0,0005 \cdot L \cdot t \\ Sm &= 1063,36 - 37,072 \cdot t - 0,00049 \cdot L^2 + 0,436 \cdot t^2 \end{aligned}$$

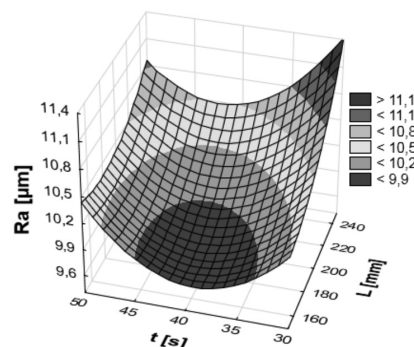
## Analiza porównawcza własności użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4

Modele doświadczalne wykorzystano do analizy porównawczej własności użytkowych dotyczących struktury geometrycznej powierzchni (SGP) procesu kulowania stali 42CrMo4 z własnościami użytkowymi żelaza armco, tj. materiału odniesienia. Porównania dokonano dla tych samych warunków obróbki kulowaniem, na tym samym stanowisku badawczym. Wyniki porównania badanych wielkości procesu w postaci różnic uzyskanych wartości wielkości wyjściowych przedstawiono na wykresach przestrzennych. Porównanie wykonano w całej przestrzeni pomiarowej eksperymentu. Wyniki porównania badanych wielkości procesu w postaci różnic  $\Delta Y_i$  uzyskanych wartości wielkości wyjściowych przedstawiono na wykresach przestrzennych. Różnice  $\Delta Y_i$  dla wszystkich wielkości wyjściowych procesu obliczono dla wszystkich kombinacji parametrów wejściowych  $L$  i  $t$  następująco:

$$\Delta Y_i = Y_i(42CrMo4) - Y_i(\text{armco})$$

gdzie:  $i = Ra, Rq, Rz(DIN), Rt, Sm$

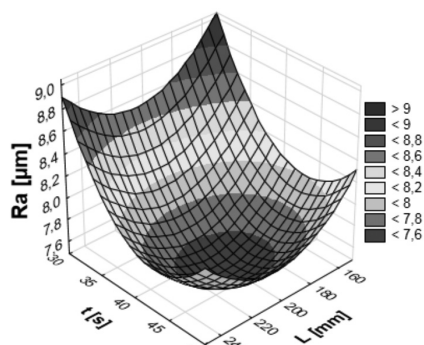
Przebiegi określonych parametrów struktury geometrycznej powierzchni w zależności od odległości dyszy od powierzchni kulowanej  $L$  [mm] oraz czasu obróbki  $t$  [s] w całym zakresie



**Rys. 2.** Zmiana parametru chropowatości  $Ra$  na powierzchni żelaza armco w funkcji odległości dyszy od powierzchni oraz czasu obróbki –  $t$   
**Fig. 2.** Variation of the  $Ra$  parameter for the surface roughness of the Armco pure iron vs the nozzle distance from the surface –  $L$  and the machining time –  $t$  subjected to shot peening

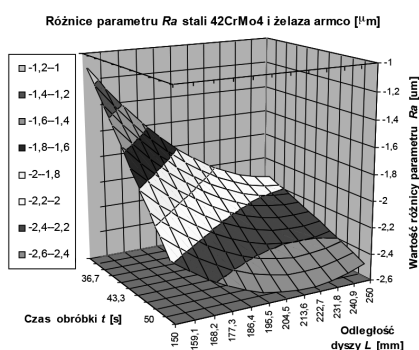
pomiarowym dla żelaza armco (rys. 2) i stali 42CrMo4 (rys. 3) podano na wykresach przestrzennych. Różnicę wartości parametru Ra dla stali 42CrMo4 i żelaza armco podano na rysunek 4. Pozostałe różnice zmian wartości następujących istotnych wielkości struktury geometrycznej procesu w zależności od parametrów wejściowych przedstawiono na rysunkach w następującej kolejności:

$\Delta Rq$  - (rys. 5) – różnice parametrów średniego kwadratowego odchylenia profilu od linii średniej profilu chropowatości pomiędzy badaną stalą i żelazem armco,  $\Delta Rz$  (wg DIN) – (rys. 6) - różnice parametrów Rz,  $\Delta Rt$  – (rys. 7) – różnice parametrów Rt,  $\Delta Sm$  – (rys. 8) – różnice parametrów Sm.



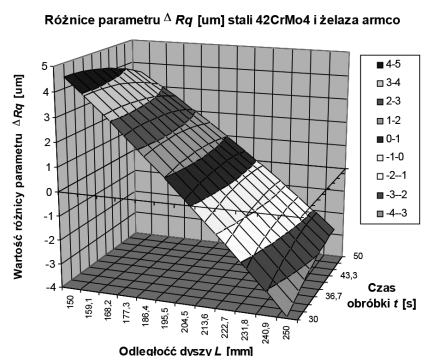
**Rys. 3.** Zmiana parametru chropowatości Ra na powierzchni stali 42CrMo4 w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej – L i czasu obróbki – t

**Fig. 3.** Variation of the Ra parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 vs the nozzle distance from the surface - L and the machining time – t subjected to shot peening



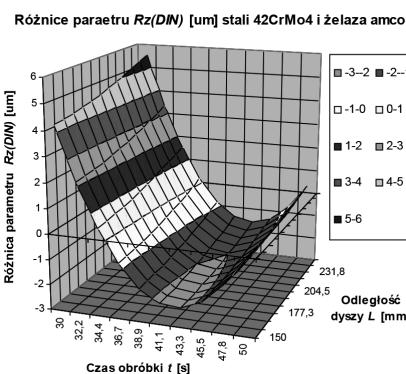
**Rys. 4.** Różnice  $\Delta Ra$  parametru chropowatości Ra stali 42CrMo4 w porównaniu do żelaza armco po kulowaniu w takich samych warunkach obróbki

**Fig. 4.** The difference  $\Delta Ra$  in the Ra parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron after the shot peening process carried out the same way



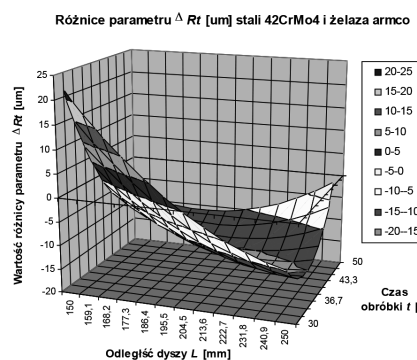
**Rys. 5.** Różnice  $\Delta Rq$  parametru chropowatości Rq stali 42CrMo4 w porównaniu do żelaza armco po kulowaniu w takich samych warunkach obróbki

**Fig. 5.** The difference  $\Delta Rq$  in the Rq parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron after the shot peening process carried out the same way



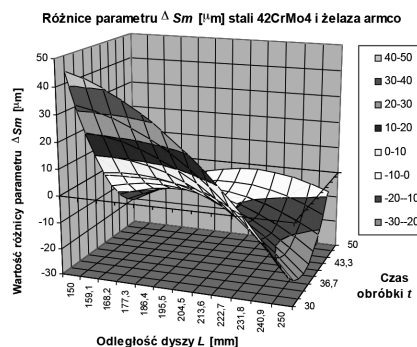
**Rys. 6.** Różnice  $\Delta Rz(DIN)$  parametru chropowatości Rz(DIN) stali 42CrMo4 w porównaniu do żelaza armco po kulowaniu w takich samych warunkach obróbki

**Fig. 6.** The difference  $\Delta Rz$  (DIN standard) in the Rz (DIN) parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron after the shot peening process carried out the same way



**Rys. 7.** Różnice  $\Delta Rt$  parametru chropowatości Rt stali 42CrMo4 w porównaniu do żelaza armco po kulowaniu w takich samych warunkach obróbki

**Fig. 7.** The difference  $\Delta Rt$  in the Rt parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron after the shot peening process carried out the same way



**Rys. 8.** Różnice  $\Delta Sm$  parametru chropowatości Sm w porównaniu do żelaza armco po kulowaniu w takich samych warunkach obróbki

**Fig. 8.** The difference  $\Delta Sm$  in the Sm parameter for the surface roughness of the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron after the shot peening process carried out the same way

Doświadczalne modele matematyczne były podstawą do przeprowadzenia optymalizacji jedno i wielokryterialnej (polioptymalizacji) badanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni po obróbce kulowaniem. Optymalizację jednokryterialną przeprowadzono dla wszystkich podstawowych parametrów chropowatości powierzchni obu procesów kulowania badanych materiałów. Natomiast optymalizację wielokryterialną przeprowadzono dla stali 42CrMo4 dla trzech przykładowych zestawów wielkości wyjściowych dla których określono kryteria jednostkowe. W każdym zestawie zadano odmienne wymagania odnośnie wymagań dla poszczególnych kryteriów cząstkowych. Obliczenia przeprowadzono dla następujących wariantów:



1.  $(Ra, Sm)_{max}, (Rq, Rz, Rt)_{min} - W_i = 1, (i = 1, 2, \dots, 5)$
2.  $(Ra, Rq)_{max}, (Rz, Rt, Sm)_{min} - W_i = 1, (i = 1, 2, \dots, 5)$
3.  $(Ra, Rq)_{max}, (Rz, Rt, Sm)_{min} - W(Rz, Sm) = 2, W(Ra, Rq, Rt) = 1$

Do obu rodzajów optymalizacji zastosowano metodę systematycznego przeszukiwania [6+9]. W optymalizacji wielokryterialnej uwzględniono możliwość zastosowania wag dla poszczególnych kryteriów cząstkowych reprezentujących określone wielkości użytkowe. Wyniki optymalizacji jednokryterialnej podano w tablicach II i III.

W celu wyznaczenia optymalnych parametrów procesu kulowania dla wielu zmiennych użytkowych zastosowano wielokryterialną optymalizację korelacyjno wagową wykorzystując pojęcie bezwymiarowej oceny wielkości OPT, opisanej zależnością:

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

gdzie:

$W_i$  – waga każdego z poszczególnych kryteriów cząstkowych ( $i = 1, 2, \dots, n$ )

$\alpha$  – współczynnik:  $\alpha = +1$  dla wielkości maksymalizowanej,  $\alpha = -1$  dla wielkości minimalizowanej, przy czym  $Y_{min,i}$  w liczniku należy zastąpić wielkością  $Y_{max,i}$ ,  $Y_{max,i}$  ( $Y_{min,i}$ ) – maksymalna i minimalna wartość optymalizowanego parametru

$Y_i$  – aktualna wartość parametru użytkowego

$n$  – liczba optymalizowanych parametrów (wielkości użytkowych)

Wartość globalnej oceny OPT może zmieniać się w granicach:

$$0 < OPT < \sum_{i=1}^n W_i$$

Poszukiwany optymalny zbiór parametrów obróbki:  $L$ , przy określonym wariancie realizacji celów jednostkowych, to taki, przy którym wyrażenie OPT osiąga wartość maksymalną (tablica IV – wartości optymalne dla poszczególnych wariantów wymagań cząstkowych w optymalizacji wielokryterialnej: zbiory  $\langle L, t \rangle$  - optymalne parametry procesu, zbiory

**Tablica II.** Wartości parametrów użytkowych żelaza armco uzyskanych w optymalizacji jednokryterialnej

**Table II.** Performance parameters for the Armco pure iron obtained in the single criterion optimization process

Optymalne wartości wielkości użytkowych i odpowiadające im parametry obróbki			
Lp.	Wartości maksymalne	L [mm]	t [s]
1	Ra = 11,027 mm	249,0	30,0
2	Rq = 13,786 μm	249,0	30,0
3	Rz = 41,998	150,0	49,8
4	Rt = 65,730 μm	249,0	30,0
5	Sm = 328,989 μm	249,0	30,0
Lp.	Wartości minimalne	L [mm]	t [s]
1	Ra = 9,639 mm	169,0	39,2
2	Rq = 11,590 μm	153,0	37,8
3	Rz = 36,516	249,0	30,0
4	Rt = 49,651 μm	187,0	34,8
5	Sm = 261,815 μm	198,0	41,4

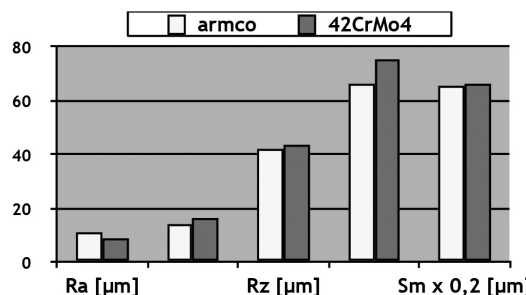
$(Ra, Rq, Rz(DIN), Rt, Sm)$  – wartości optymalne parametrów struktury geometrycznej możliwe do uzyskania). Zbiór parametrów nieoptymalnych – najgorszych to taki przy którym wartość wyrażenia OPT jest możliwie najmniejsza, a więc wymagania ustalone dla kryteriów cząstkowych mogą być spełnione w możliwie najmniejszym stopniu.

**Tablica III.** Wartości optymalne parametrów użytkowych stali 42CrMo4 uzyskanych w optymalizacji jednokryterialnej

**Table III.** Performance parameters for the alloy steel 42CrMo4 obtained in the single criterion optimization process

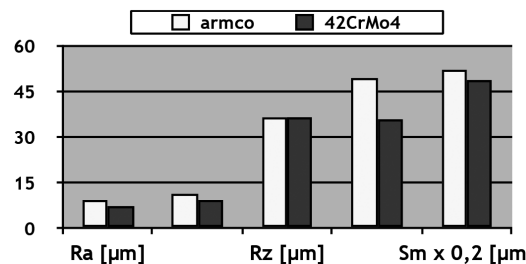
Optymalne wartości wielkości użytkowych i odpowiadające im parametry obróbki			
Lp.	Wartości maksymalne	L [mm]	t [s]
1	Ra = 9,045 mm	150,0	30,0
2	Rq = 16,706 mm	150,0	30,0
3	Rz = 43,530	150,0	30,0
4	Rt = 75,178 mm	150,0	30,0
5	Sm = 332,109 mm	150,0	30,0
Lp.	Wartości minimalne	L [mm]	t [s]
1	Ra = 7,472 μm	204,0	43,0
2	Rq = 9,420 mm	249,0	39,4
3	Rz = 36,433	249,0	41,4
4	Rt = 35,821 mm	207,0	41,6
5	Sm = 243,958 mm	249,0	42,6

Porównanie maksymalnych wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni stali 42CrMo4 i żelaza armco po kulowaniu w tych samych warunkach obróbki przedstawiono na rysunku 9. Natomiast porównanie minimalnych wartości przedstawiono na rysunku 10.



**Rys. 9.** Porównanie wartości maksymalnych struktury geometrycznej powierzchni (SGP) stali 42CrMo4 i żelaza armco

**Fig. 9.** Comparing maximum values of the parameters featuring the surface texture for the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron



**Rys. 10.** Porównanie wartości minimalnych struktury geometrycznej powierzchni (SGP) stali 42CrMo4 i żelaza armco

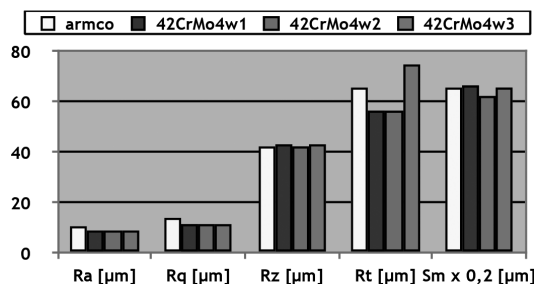
**Fig. 10.** Comparing minimum values of the parameters featuring the surface texture for the alloy steel 42CrMo4 and Armco pure iron

Z uwagi na możliwość przedstawienia porównywalnych wielkości na jednym rysunku, za pomocą jednej skali wartości, odległość między wierzchołkami chropowatości Sm przedstawiono w pomniejszeniu pięciokrotnym  $\times 0,2$ . Większa twardość stali powoduje większe umocnienie warstwy wierzchniej, a więc umożliwia uzyskanie mniejszej chropowatości powierzchni.

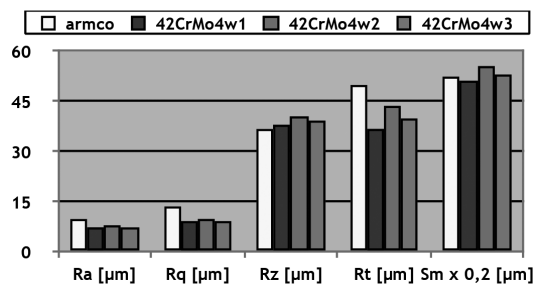
**Tablica IV.** Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla stali 42CrMo4 uzyskanych w optymalizacji wielokryterialnej dla następujących wariantów: 1.  $(Ra, Sm)_{max}, (Rq, Rz, Rt)_{min}, Wi = 1$ , 2.  $(Ra, Rq)_{max}, (Rz, Rt, Sm)_{min}, Wi = 1$ , 3.  $(Ra, Sm)_{max}, (Ra, Rz, Rt)_{min}, Wagi: W(Rz, Sm) = 2, W(Ra, Rq, Rt) = 1$

**Table IV.** Multi-criterion optimization process results for the alloy steel 42CrMo4, obtained for the following parameter combination: 1.  $(Ra, Sm)_{max}, (Rq, Rz, Rt)_{min}, Wi = 1$ , 2.  $(Ra, Rq)_{max}, (Rz, Rt, Sm)_{min}, Wi = 1$ , 3.  $(Ra, Sm)_{max}, (Ra, Rz, Rt)_{min}, Wagi: W(Rz, Sm) = 2, W(Ra, Rq, Rt) = 1$

Parametr	Wariant 1 (42CrMo4)	Wariant 2 (42CrMo4)	Wariant 3 (42CrMo4)
Wartości optymalne			
L, mm	150	249	150
t, s	30,0	30,0	30,0
Ra, $\mu\text{m}$	9,045	8,879	9,045
Rq, $\mu\text{m}$	11,537	11,323	11,537
Rz, $\mu\text{m}$	43,530	42,045	43,530
Rt, $\mu\text{m}$	75,164	56,475	75,164
Sm, $\mu\text{m}$	332,115	312,651	328,989
Wartości nieoptymalne – najgorsze			
L, mm	203	199	198
t, s	44,0	49,8	47,2
Ra, $\mu\text{m}$	7,479	7,768	7,591
Rq, $\mu\text{m}$	9,284	9,701	9,4476
Rz, $\mu\text{m}$	37,723	40,659	39,050
Rt, $\mu\text{m}$	36,582	43,561	39,572
Sm, $\mu\text{m}$	255,125	277,861	264,596



**Rys. 11.** Porównanie parametrów SGP po kulowaniu stali 42CrMo4 optymalizowanych wielokryterialnie wg warunków przyjętych w wariantach 1, 2 i 3 z maksymalnymi parametrami i żelaza armco  
**Fig. 11.** Comparing texture parameters of the surface after the shot peening for the Armco pure iron and the alloy steel 42CrMo4, subjected to multi-criterion optimization process according to the combinations 1, 2 and 3., assuming maximum parameter values



**Rys. 12.** Porównanie parametrów SGP po kulowaniu stali 42CrMo4 optymalizowanych wielokryterialnie wg warunków przyjętych w wariantach 1, 2 i 3 z minimalnymi parametrami i żelaza armco  
**Fig. 12.** Comparing texture parameters of the surface after the shot peening for the Armco pure iron and the alloy steel 42CrMo4, subjected to multi-criterion optimization process according to the combinations 1., 2 and 3., assuming minimum parameter values

Wyniki obliczeń optymalizacji wielokryterialnej dla nadrzędnych kryteriów optymalizacji przyjętych w wariantach: 1, 2 i 3 dla określonych kryteriów cząstkowych przedstawiono w tablicy VI.

Na podstawie wyników obliczeń wg programu optymalizacji wielokryterialnej dla trzech wariantów przyjętych kryteriów cząstkowych wykonano graficzne porównanie optymalnych wartości określonych parametrów struktury geometrycznej powierzchni procesu z wartościami maksymalnymi i minimalnymi możliwymi do uzyskania dla żelaza armco. Wyniki przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

## Wnioski

Struktura geometryczna powierzchni ma zasadnicze znaczenie na własności użytkowe i eksploatacyjne powierzchni części maszyn, a mianowicie:

- Warunki techniczne dotyczące wymagań odnośnie struktury geometrycznej powierzchni określone przez konstruktora zależą od warunków pracy części.
- Parametry struktury geometrycznej powierzchni są związane z własnościami użytkowymi struktury warstwy wierzchniej procesu kulowania pneumatycznego zależnymi od parametrów procesu.
- Optymalne wartości wielkości użytkowych warstwy wierzchniej charakteryzujących zgniot oraz SGP leżą na ogół w różnych punktach przestrzeni parametrów wejściowych procesu.
- Powyższy fakt oznacza, że w optymalizacji wielokryterialnej nie można znaleźć takich parametrów optymalnych, które odpowiadałyby wartościom maksymalnym możliwym do uzyskania w optymalizacji jednokryterialnej.
- Koniecznym jest przyjęcie kompromisu, w którym parametry maksymalizowane będą możliwie największe, natomiast parametry minimalizowane możliwie najmniejsze.
- Porównanie maksymalnych i minimalnych wartości parametrów SGP stali 42CrMo4 z żelazem armco uzyskanych w procesie optymalizacji jednokryterialnej różnią się w zakresie od kilku do kilkunastu procent i są większe dla wartości maksymalnych, wyjątkiem parametru Ra. Natomiast dla wartości minimalnych są mniejsze w tym samym zakresie.

- Porównanie maksymalnych i minimalnych wartości parametrów SGP stali 42CrMo4 z żelazem armco uzyskanych w procesie optymalizacji wielokryterialnej różnią się w zakresie od kilku do prawie 20% w zależności od przyjętego wariantu optymalizacji. Natomiast następuje większe zróżnicowanie znaków przyrostów poszczególnych parametrów, zarówno dla parametrów maksymalizowanych, jak i minimalizowanych.

## Podsumowanie

Uzyskane w procesie kulowania parametry SGP są związane prawami fizycznymi ze sobą oraz z własnościami użytkowymi warstwy wierzchniej umocnionej przez zgniot [10]. Optymalizacja wielokryterialna umożliwia uzyskanie rozsądnego kompromisu pomiędzy wartościami optymalizowanych kryteriów cząstkowych zgodnie z wymaganiami warunków technicznych, które zapewniają możliwie najlepszą współpracę części.

## Literatura

- [1] Przybylski W.: Podstawy Obróbki Nagniataniem, WNT, Warszawa 1987.
- [2] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.
- [3] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu, WNT, Warszawa 1976.
- [4] Humienny Z., Osanna P. H., Weckenmann A., Blunt L., Jakubiec W.: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS), WNT, Warszawa 2004.
- [5] PN-EN ISO 11124-3:2000. Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo-ściernej. Kulisty i ostrokątny śrut z wysokowęglowego staliwa.
- [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] Piekarski R., Zawora J., Analiza porównawcza własności użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 po procesie kulowania z własnościami odniesienia żelaza armco, Mechanik nr 1/2016.