

Analiza porównawcza własności użytkowych warstw wierzchnich stali 42CrMo4 i żelaza armco po kulowaniu

Comparative analysis of performance of alloy steel 42CrMo4 and the Armco pure iron surface layers after shot peening treatment

ROBERT PIEKARSKI
JÓZEF ZAWORA*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.3

Zaprezentowano metodę porównywania własności użytkowych materiałów uzyskanych w procesie kulowania z własnościami modelowymi żelaza armco. Jej ideę wyjaśniono na przykładzie porównania własności warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 i żelaza armco, uzyskanych w takich samych warunkach obróbki. **SŁOWA KLUCZOWE:** metoda porównawcza, żelazo armco, warstwa wierzchnia, proces kulowania

A method is presented to compare performance of the surface material layers subjected to the shot peening treatment with reference to the model properties of Armco pure iron. The concept of the method is explained on the exemplary alloy steel 42CrMo4 grade compared with Armco pure iron, with both materials treated in the same way.

KEYWORDS: comparative method, Armco pure iron, surface layer, shot peening process

Badania doświadczalne przeprowadzono na dwóch gatunkach materiałów: materiale odniesienia (modelowym), tj. żelazie armco, oraz stali 42CrMo4. Własności materiałów konstrukcyjnych porównuje się między sobą przez ich odniesienie do materiału modelowego. W celu określenia zmian stanu warstwy wierzchniej po procesie kulowania wykorzystano technikę planowania eksperymentów ze względu na złożoność zjawisk fizycznych w tym procesie [1]. Kulowaniu poddano próbki Almena wykonane z obu materiałów. Do badań zastosowano trójpoziomowy plan eksperymentu dla dwóch zmiennych niezależnych typu 2^3 [2, 3]. Przyjęto następujące zmienne niezależne (wejściowe): L – odległość dyszy od powierzchni kulowanej w mm, t – czas trwania obróbki w s.

Zakresy zmienności zmiennych niezależnych ustalono na podstawie badań wstępnych w następujących granicach: $L \in (150 \div 250)$, $t \in (30 \div 50)$.

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

Jako zmienne zależne (parametry użytkowe) badano następujące wielkości:

- σ_c – maksymalne naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej, MPa;
- a_{\max} – odległość zalegania maksymalnej wartości naprężeń ściskających od powierzchni przedmiotu, μm ;
- f – ugięcie próbki (strzałka ugięcia), mm;
- $\Delta m/A$ – ubytek masy odniesiony do jednostki powierzchni obrabianej przedmiotu, g/cm^2 ;
- $\Delta h/h_p$ – względną zmianę grubości przedmiotu po kulowaniu, %;
- Ra – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, μm .

TABLICA I. Plan eksperymentu z kodowanym i rzeczywistym układem wartości zmiennych niezależnych

| j | L , mm | | t , s | | Y_{ij} |
|-----|----------|-----|---------|----|-----------|
| 1 | -1 | 150 | -1 | 30 | $Y_{i,1}$ |
| 2 | 0 | 200 | -1 | 30 | $Y_{i,2}$ |
| 3 | +1 | 250 | -1 | 30 | $Y_{i,3}$ |
| 4 | -1 | 150 | 0 | 40 | $Y_{i,4}$ |
| 5 | 0 | 200 | 0 | 40 | $Y_{i,5}$ |
| 6 | -1 | 150 | 0 | 40 | $Y_{i,6}$ |
| 7 | 0 | 200 | +1 | 50 | $Y_{i,7}$ |
| 8 | -1 | 150 | +1 | 50 | $Y_{i,8}$ |
| 9 | +1 | 250 | +1 | 50 | $Y_{i,9}$ |

Objaśnienia: Y_{ij} – zmienne zależne (wyjściowe), $i = (\sigma_c, a_{\max}, a_0, f, \Delta m/A, \Delta h/h_p, R_a)$, $j = (1, 2, \dots, N)$, $N = 9$ – liczba doświadczeń

Aby zwiększyć dokładność, eksperyment przeprowadzono trzykrotnie. Celem badania procesu umacniającego warstwę wierzchnią przez zastosowanie obróbki powierzchniowej kulowaniem jest poszukiwanie i doskonalenie metod kształtowania 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 obróbki zgniotem dzięki uderzaniu powierzchni kulkami o małej średnicy i z odpowiednią prędkością.

Proces kulowania ma na celu przede wszystkim podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej wysoko obciążonych części maszyn. Badania prowadzi się również z uwagi na coraz częstsze dążenie w przemyśle do stosowania automatyzacji oraz upraszczania i standaryzacji procesów technologicznych. Ze względu na koszty i ograniczenia stanowiska badawczego eksperymenty wykonano przy stałej wielkości kulek stalowych o średnicy $\varnothing 0,3$ mm i stałym ciśnieniu zasilania $p = 0,6$ MPa (rys. 1).



Rys. 1. Kulowanie pneumatyczne koła zębatego

* Dr inż. Robert Piekarski (rpie@meil.pw.edu.pl), dr hab. inż. Józef Zawora (jzawora@meil.pw.edu.pl) – Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

Modele matematyczne własności warstwy wierzchniej

Wykorzystując standardowy program krokowej regresji wielokrotnej [2, 3], zbudowano doświadczalne modele matematyczne procesów obróbki kulowaniem żelaza armco i stali 42CrMo4. Równania regresji, stanowiące doświadczalny model matematyczny wybranych wielkości reprezentujących własności użytkowe **żelaza armco**, miały postać:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= -312,8 + 1,46 \cdot L - 0,0044 \cdot L^2 + 0,0108 \cdot L \cdot t \\ a_{\max} &= 198,08 - 0,71 \cdot L - 2,42 \cdot t + 0,00135 \cdot L^2 + 0,006 \cdot t^2 \\ a_0 &= 675,7 - 2,35 \cdot L - 1,44 \cdot t + 0,004 \cdot L^2 + 0,014 \cdot L \cdot t \\ f &= 2,35 - 0,0062 \cdot L + 0,0107 \cdot t \\ \Delta m/A &= 0,024 - 0,00013 \cdot L + 0,0000014 \cdot L^2 + 0,000000175 \cdot t^2 \\ \Delta h &= -9,25 + 0,15 \cdot t - 0,00006 \cdot t^2 \\ Ra &= 19,45 - 0,016 \cdot L - 0,43 \cdot t + 0,0001 \cdot L^2 + 0,0063 \cdot t^2 - \\ &\quad - 0,0004 \cdot L \cdot t\end{aligned}$$

Równania regresji stanowiące doświadczalny model matematyczny wybranych wielkości reprezentujących własności użytkowe **stali 42CrMo4** były następujące:

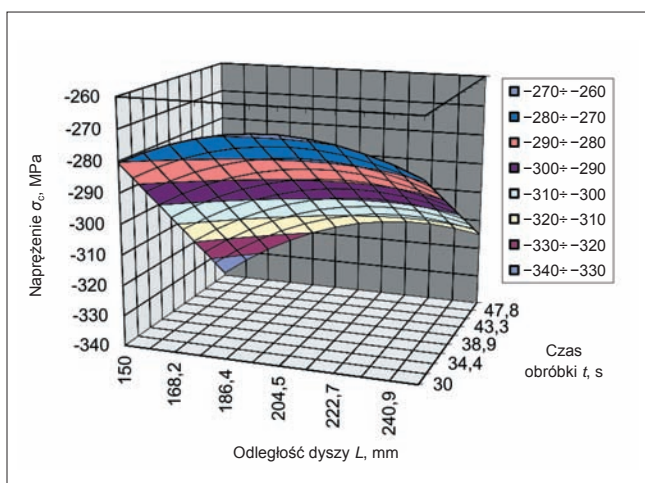
$$\begin{aligned}\sigma_c &= -928,3 + 4,2 \cdot L - 0,079 \cdot t^2 - 0,0101 \cdot L^2 + 0,023 \cdot L \cdot t \\ a_{\max} &= 86,9 + 0,22 \cdot L - 1,69 \cdot t + 0,058 \cdot L^2 - 0,0087 \cdot L \cdot t \\ a_0 &= 1003,6 - 3,5 \cdot L - 8,26 \cdot t + 0,012 \cdot L^2 + \\ &\quad + 0,012 \cdot t^2 - 0,0425 \cdot L \cdot t \\ f &= 2,475 - 0,0035 \cdot L + 0,00008 \cdot t^2 \\ \Delta m/A &= 0,021 - 0,000090 \cdot L + 0,00000061 \cdot L \cdot t \\ \Delta h &= 0,118 + 0,000013 \cdot L^2 + 0,00026 \cdot t^2 - 0,00011 \cdot L \cdot t \\ Ra &= 26,5 - 0,0735 \cdot L - 0,53 \cdot t + 0,00018 \cdot L \cdot t + 0,0062 \cdot L \cdot t\end{aligned}$$

Istotność równań regresji weryfikowano testem Fischera-Snedecora, natomiast istotność poszczególnych współczynników regresji – testem t-Studenta. W obu przypadkach testy wykonano na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Analiza porównawcza własności użytkowych warstwy wierzchniej

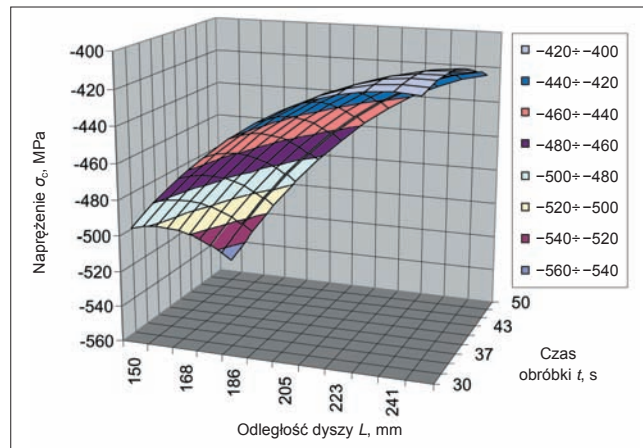
Modele doświadczalne wykorzystano do analizy porównawczej własności użytkowych stali 42CrMo4 z własnościami użytkowymi żelaza armco – po kulowaniu tych materiałów w identycznych warunkach i na tym samym stanowisku badawczym. Wyniki porównania badanych parametrów procesu w postaci różnic ΔY_i otrzymanych wartości wielkości wyjściowych przedstawiono na wykresach przestrzennych. Różnice ΔY_i obliczono dla wszystkich kombinacji parametrów wejściowych L i t w następujący sposób:

$$\Delta Y_i = Y_{i,42CrMo4} - Y_{i,armco}$$

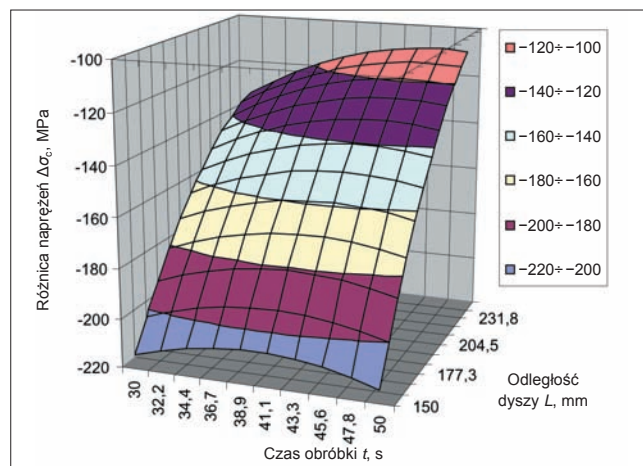


Rys. 2. Przebieg maksymalnych naprężeń własnych σ_c w żelazie armco w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej L i czasu obróbki t

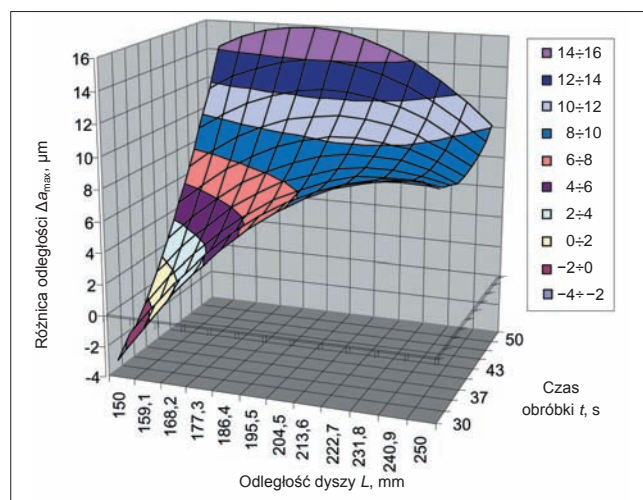
Porównania dokonano w całej przestrzeni pomiarowej eksperymentu. Przebieg maksymalnych wartości naprężeń ściskających w zależności od odległości dyszy od powierzchni kulowanej L oraz czasu obróbki t w całym zakresie pomiarowym dla żelaza armco i stali 42CrMo4 pokazano odpowiednio na rys. 2 i 3. Na kolejnych wykresach przedstawiono różnice wartości maksymalnych naprężeń ściskających (rys. 4) oraz różnice pozostałych wartości istotnych dla procesu w zależności od parametrów wejściowych (rys. 5÷10).



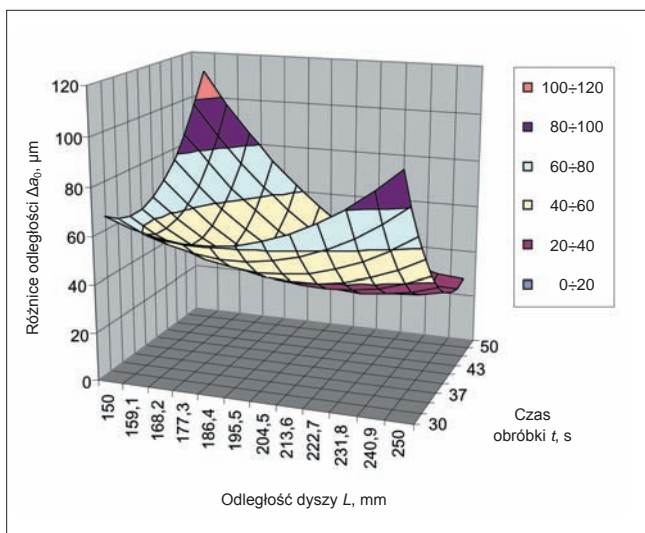
Rys. 3. Przebieg maksymalnych naprężeń własnych σ_c w funkcji odległości dyszy od powierzchni kulowanej L i czasu obróbki t dla stali 42CrMo4



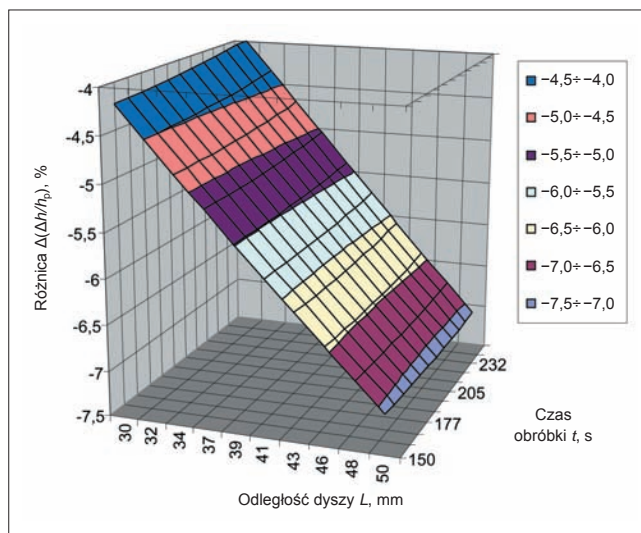
Rys. 4. Różnice w wartościach naprężeń wewnętrznych $\Delta \sigma_c$ uzyskanych dla warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 i dla żelaza armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



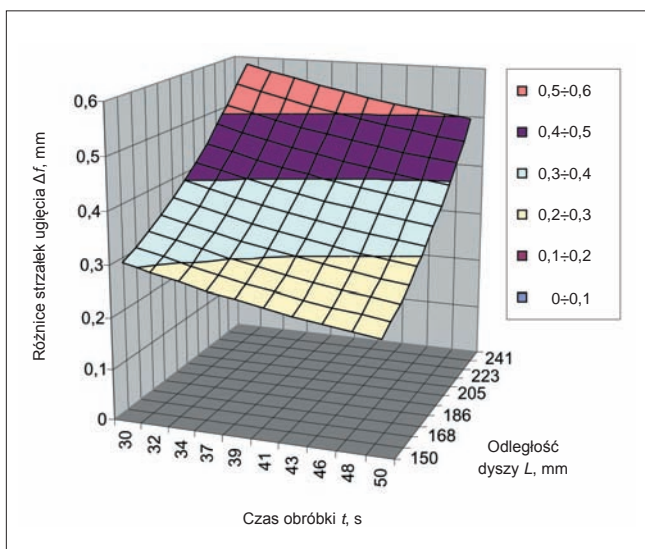
Rys. 5. Różnice odległości wystąpienia największych naprężeń wewnętrznych Δa_{\max} uzyskanych w warstwie wierzchniej stali 42CrMo4 w porównaniu z żelazem armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



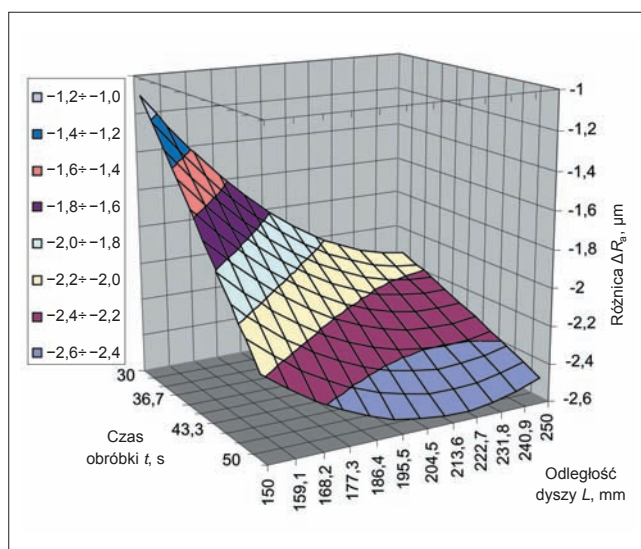
Rys. 6. Różnice odległości zmiany znaku naprężeń ściskających $\Delta\sigma_0$ uzyskanych w warstwie wierzchniej stali 42CrMo4 w porównaniu z żelazem armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



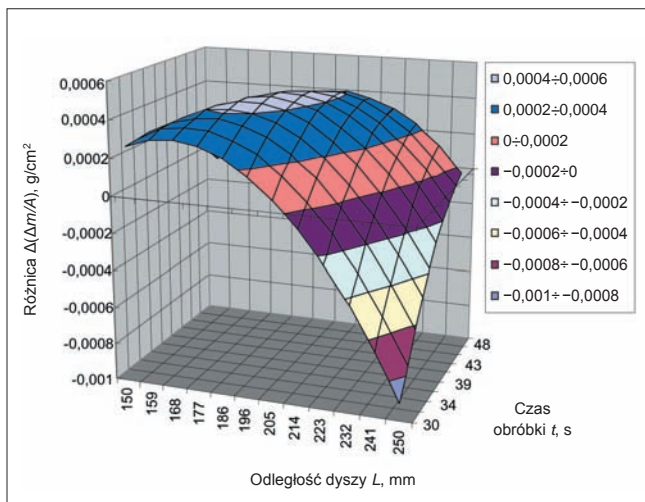
Rys. 9. Różnice parametru $\Delta h/h_0$ stali 42CrMo4 i żelaza armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



Rys. 7. Różnice strzałek ugięcia Δf próbek ze stali 42CrMo4 w porównaniu z żelazem armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



Rys. 10. Różnice parametru R_a stali 42CrMo4 i żelaza armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach



Rys. 8. Różnice parametru $\Delta m/A$ stali 42CrMo4 i żelaza armco – po kulowaniu obu materiałów w takich samych warunkach

Jedno- i wielokryterialna optymalizacja badanych procesów

Doświadczalne modele matematyczne stanowiły podstawę do przeprowadzenia jedno- i wielokryterialnej optymalizacji (polioptymalizacji) badanych procesów obróbki powierzchniowej przez kulowanie. Optymalizację jednokryterialną przeprowadzono z uwzględnieniem wszystkich podstawowych wielkości użytkowych warstwy wierzchniej obu procesów, a optymalizację wielokryterialną – dla trzech przykładowych zestawów wielkości wyjściowych dla każdego badanego materiału. We wszystkich zestawach przyjęto odmienne wymagania odnośnie do wymagań dotyczących poszczególnych kryteriów cząstkowych. Obliczenia przeprowadzono dla następujących wariantów:

1. $(\sigma_c)_{\max}, (a_{\min}, a_0, f, \Delta m/A, Ra)_{\min} - W_i = 1, (i = 1, 2, \dots, 6)$,
2. $(\sigma_c, a_{\min}, a_0)_{\max}, (f, \Delta m/A, Ra)_{\min} - W_i = 1, (i = 1, 2, \dots, 6)$,
3. $(\sigma_c, a_{\min}, a_0)_{\max}, (f, \Delta m/A, Ra)_{\min} - W(\sigma_c, a_0, Ra) = 2,$
 $W(a_{\min}, f, \Delta m/A) = 1.$

W przypadku obu rodzajów optymalizacji zastosowano metodę systematycznego przeszukiwania [4÷9]. W optymalizacji wielokryterialnej wzięto pod uwagę możliwość zastosowania wag dla poszczególnych kryteriów cząstkowych reprezentujących określone wielkości użytkowe. Wyniki optymalizacji

jednokryterialnej podano w tabl. II i III, a wielokryterialnej (dla nadrzędnych kryteriów optymalizacji przyjętych w wariantach 1, 2 i 3 dla określonych kryteriów cząstkowych) – w tabl. IV.

Porównanie maksymalnych wartości parametrów użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 po kulowaniu z parametrami maksymalnymi możliwymi do uzyskania w warunkach badań przedstawiono na rys. 11. Wyższa twardość stali powoduje większe umocnienie warstwy wierzchniej, a więc umożliwia wprowadzenie większego naprężenia ściskającego. Odległość, w której występują maksymalne naprężenia ściskające, zmniejsza się, natomiast zwiększa się odległość położenia punktów zmiany znaku naprężeń a_0 .

Na podstawie wyników obliczeń według programu optymalizacji wielokryterialnej dla trzech wariantów przyjętych kryteriów cząstkowych graficznie porównano optymalne wartości określonych parametrów użytkowych procesu z wartościami maksymalnymi możliwymi do uzyskania dla żelaza armco (rys. 12).

TABLICA II. Wartości parametrów użytkowych żelaza armco uzyskane w optymalizacji jednokryterialnej oraz odpowiadające im parametry obróbki

| Parametr użytkowy | Wartość maksymalna | L, mm | t, s |
|----------------------------------|--------------------|-------|------|
| σ_c , MPa | -338,385 | 150 | 49,8 |
| a_{max} , μm | 191,547 | 150 | 49,8 |
| a_0 , μm | 444,630 | 150 | 49,8 |
| f, mm | 1,948 | 150 | 49,8 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,012 | 150 | 49,8 |
| Δh , % | 0,333 | 249 | 30,0 |
| Ra, μm | 11,027 | 249 | 30,0 |
| Parametr użytkowy | Wartość minimalna | L, mm | t, s |
| σ_c , MPa | -268,334 | 203 | 30,0 |
| a_{max} , μm | 68,210 | 249 | 30,0 |
| a_0 , μm | 399,568 | 240 | 30,0 |
| f, mm | 1,122 | 249 | 30,0 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,004 | 249 | 30,0 |
| Δh , % | 0,146 | 150 | 32,0 |
| Ra, μm | 9,639 | 169 | 39,2 |

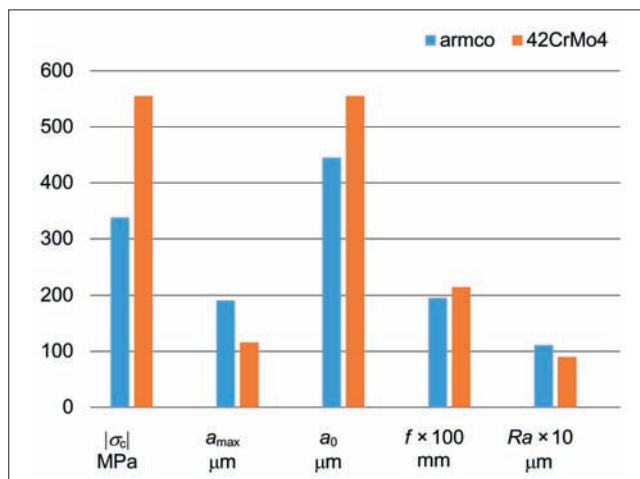
TABLICA III. Wartości parametrów użytkowych stali 42CrMo4 uzyskane w optymalizacji jednokryterialnej oraz odpowiadające im parametry obróbki

| Parametr użytkowy | Wartość maksymalna | L, mm | t, s |
|----------------------------------|--------------------|-------|------|
| σ_c , MPa | -552,265 | 150 | 49,8 |
| a_{max} , μm | 115,554 | 150 | 49,8 |
| a_0 , μm | 554,683 | 150 | 49,8 |
| f, mm | 2,147 | 150 | 49,8 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,012 | 150 | 49,8 |
| Δh , % | 0,333 | 249 | 30,0 |
| Ra, μm | 9,045 | 150 | 30,0 |
| Parametr użytkowy | Wartość minimalna | L, mm | t, s |
| σ_c , MPa | -52,265 | 247 | 35,6 |
| a_{max} , μm | 78,009 | 249 | 33,0 |
| a_0 , μm | 449,238 | 241 | 40,6 |
| f, mm | 1,703 | 249 | 30,0 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,003 | 249 | 30,0 |
| Δh , % | 0,146 | 150 | 32,0 |
| Ra, μm | 7,472 | 204 | 43,0 |

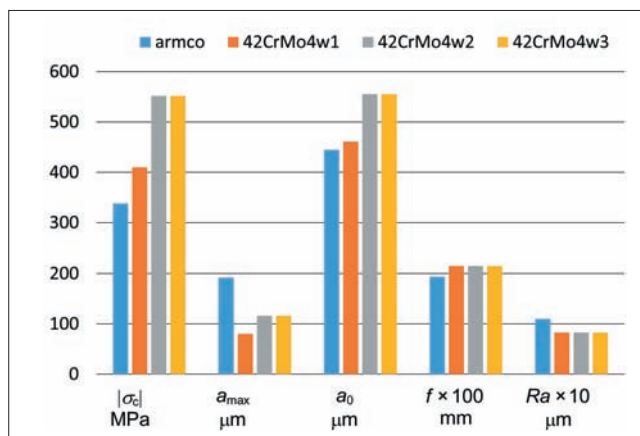
TABLICA IV. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla stali 42CrMo4 uzyskane dla trzech wariantów:

- $(\sigma_c)_{max}, (a_{min}, a_0, f, \Delta m/A, Ra)_{min} - W_i = 1$
- $(\sigma_c, a_{min}, a_0)_{max}, (f, \Delta m/A, Ra)_{min} - W_i = 1$
- $(\sigma_c, a_{min}, a_0)_{max}, (f, \Delta m/A, Ra)_{min} - W(\sigma_c, a_0, Ra) = 2, W(a_{min}, f, \Delta m/A) = 1$

| Parametr | Wariant 1 | Wariant 2 | Wariant 3 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|------------------|
| Wartości optymalne | | | |
| L, mm | 249 | 150 | 150 |
| t, s | 39,2 | 49,8 | 49,8 |
| σ_c , MPa | -410,140 | -552,265 | -552,265 (W = 2) |
| a_{max} , μm | 80,264 | 115,554 | 115,554 |
| a_0 , μm | 460,690 | 554,683 | 554,683 (W = 2) |
| f, mm | 2,150 | 2,150 | 2,150 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,012 | 0,012 | 0,012 |
| Ra, μm | 8,291 | 8,291 | 8,291 (W = 2) |
| Wartości nieoptymalne – najgorsze | | | |
| L, mm | 150 | 216 | 150 |
| t, s | 49,8 | 30,0 | 49,8 |
| σ_c , MPa | -552,265 | -494,802 | -441,631 |
| a_{max} , μm | 115,554 | 82,550 | 81,106 |
| a_0 , μm | 554,683 | 501,262 | 472,442 |
| f, mm | 2,150 | 2,026 | 1,902 |
| $\Delta m/A$, g/cm ² | 0,012 | 0,010 | 0,008 |
| Ra, μm | 8,291 | 9,045 | 8,577 |



Rys. 11. Graficzne porównanie własności użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 z własnościami żelaza armco



Rys. 12. Graficzne porównanie własności użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 optymalizowanych wielokryterialnie (zgodnie z warunkami przyjętymi w wariantach 1, 2 i 3) z własnościami żelaza armco

Wnioski

Z przeprowadzonych badań porównawczych z żelazem armco (rys. 11) wynika, że w przypadku stali 42CrMo4:

- możliwe do uzyskania naprężenia ściskające są o 214 MPa większe, co stanowi ok. 63% wartości uzyskanej dla materiału odniesienia;
- odległość od powierzchni obrobionej, przy której występuje maksymalne naprężenia ściskające, jest mniejsza o ok. 76 μm , tj. o prawie 40%;
- odległość od powierzchni obrobionej, przy której występuje zmiana znaku naprężenia, jest większa o ok. 110 μm , co stanowi prawie 23% wielkości odniesienia;
- strzałka ugięcia próbki jest większa o ok. 0,2 mm, co odpowiada 10%;
- jednostkowy ubytek masy jest mniejszy o 0,009 g/cm² (75%), natomiast zmniejszenie grubości próbki jest niezauważalne;
- parametr chropowatości Ra zmniejsza się o ok. 1,4 μm , co stanowi prawie 13% wartości odniesienia.

W zakresie optymalizacji wielokryterialnej parametrów procesu kulowania według założonych trzech wariantów wymagań odnośnie do kryteriów cząstkowych i przyjętych wartości współczynników wagowych można stwierdzić, że:

- Optymalne parametry określone przez kryteria cząstkowe ustalone w kolejnych trzech wariantach wymagań optymalizacyjnych zapewniają uzyskanie następujących wartości parametrów użytkowych warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 w porównaniu z żelazem armco:
 - naprężeń ściskających σ_c większych o 72 MPa (21%), 214 MPa (63%), 214 MPa (63%) od wartości odniesienia,
 - odległości a_{max} mniejszej o 112 μm (58%), 76 μm (40%), 76 μm (40%),
 - odległości a_0 większej o 16 μm (4%), 112 μm (25%), 112 μm (25%),
 - strzałki ugięcia f większej o 0,17 mm (8,5%) we wszystkich wariantach,
 - parametru Ra mniejszego o 3,7 μm (30%) we wszystkich wariantach.

- Wprowadzenie współczynników wagowych $W = 2$ dla wielkości wyjściowych σ_c , a_0 i Ra praktycznie nie wpływa na zmianę wartości parametrów optymalnych, natomiast ma wpływ na wartości parametrów nieoptymalnych.
- Celowe jest dalsze analizowanie wpływu współczynników wagowych na istotne wielkości wyjściowe procesu.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda pozwala na wizualną obserwację zmian wartości wielkości użytkowych w przestrzeni parametrów w stosunku do wartości odniesienia. Obserwacja tych zmian umożliwia ich ocenę i ułatwia podejmowanie właściwych decyzji dotyczących kryteriów cząstkowych optymalizacji wielokryterialnej oraz współczynników wagowych (współczynniki te z założenia pozwalają nadać odpowiednią rangę wpływu poszczególnym parametrom użytkowym danego procesu [4, 5]).

LITERATURA

1. Przybylski W. „Podstawy obróbki nagniataniem”. Warszawa: WNT, 1987.
2. Polański Z. „Planowanie doświadczeń w technice”. Warszawa: PWN, 1984.
3. Mańczak K. „Technika planowania eksperymentu”. Warszawa: WNT, 1976.
4. Pogorzelski W. „Teoria systemów i metody optymalizacji”. Warszawa: OWPW, 1996.
5. Pogorzelski W. „Metoda wagowo-korelacyjna określania użyteczności kompromisowej wytworów przy wielu kryteriach”. *Zeszyty Naukowe WSI Koszalin*. Nr 8, cz. II, seria WM (1986): s. 252+268.
6. Stadnicki J. „Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych”. Warszawa: WNT, 2006.
7. Tarnowski W. „Modelowanie systemów”. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2004.
8. Grzesik W. „Podstawy projektowania optymalizacji ekologicznych procesów obróbki skrawaniem”. *Mechanik*. Nr 3 (2013).
9. Stwora A. „Optymalizacja procesu selektywnego spiekania laserowego w celu zmniejszenia chropowatości powierzchni wykonanych części”. *Mechanik*. Nr 12 (2014). ■