

dr inż. Tomasz ŻARSKI^a, mgr Katarzyna KORZYŃSKA^b

^a Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno - Przyrodniczy
Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn, Centrum Innowacyjnych Technologii
University of Rzeszów, Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Centre for Innovative Technology

^b Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Rzeszow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics
Department of Manufacturing Processes and Production Engineering

MODEL LINIOWY KULKOWANIA STRUMIENIOWEGO STOPU AZ91

Streszczenie

Wstęp i cel: W pracy przedstawiono przykład planowania oraz realizacji eksperymentu technologicznego z wykorzystaniem planu badawczego umożliwiającego zminimalizowanie liczby doświadczeń przeprowadzanych na stanowisku badawczym.

Materiał i metody: Doświadczenia wykonywano na próbkach ze stopu AZ91, z trzykrotną powtarzalnością, według planu statycznego determinowanego dwupoziomowego PS/DK 2³. Badano wpływ parametrów kulkowania strumieniowego na wytrzymałość zmęczeniową.

Wyniki: Opracowano model matematyczny liniowy ujmujący wpływ wejściowych parametrów procesu kulkowania na granicę wytrzymałości zmęczeniowej i stwierdzono skuteczność tej metody obróbki.

Wnioski: Wykazano przydatność zastosowanej metodyki realizacji eksperymentu do badań technologicznych. Stwierdzono, że zastosowana procedura realizacji eksperymentu jest łatwa do przeprowadzenia i efektywna przy bardzo małej liczbie doświadczeń.

Słowa kluczowe: Kulkowanie strumieniowe, model liniowy, wytrzymałość zmęczeniowa.

(Otrzymano: 24.07.2016; Zrecenzowano: 29.07.2016; Zaakceptowano: 31.07.2016)

AN AZ91 ALLOY SHOT PEENING LINEAR MODEL

Abstract

Introduction and aim: The work is an example of the planning and realization of the technological experiment with the use of research plan that allows to minimize the number of experiments carried out on the test stand.

Material and methods: The investigation were realized using made of AZ91 samples, according to the static, determined, two-level plane PS/DK 2³. All the investigations and measurements were repeated at least three times. The influence of shot peening parameters on the fatigue strength was investigated.

Results: A linear mathematical model showing the shot peening input parameters influence on bending fatigue strength was obtained and the efficacy of this treatment was stated.

Conclusions: The usefulness of the used methodology for technological experiments was confirmed. It was stated that used procedure is easy for execute and effective with very small number experiments on the test stand.

Keywords: Shot peening, linear model, fatigue strength.

(Received: 24.07.2016; Revised: 29.07.2016; Accepted: 31.07.2016)

1. Wstęp i cele

Stopy magnezu ze względu na cechy jakie posiadają, to jest niewielką masę, dobrą obrabialność mechaniczną i dobre właściwości odlewnicze, są obecnie szeroko stosowane w przemyśle lotniczym. Stop AZ91 (MgAl₁₈ZnMn) jest stosowany m.in. na silnie obciążone części samolotów pracujących w temperaturze do 120°C, w tym na korpusy przekładni i inne elementy o kształtach nieregularnych. Ponieważ, tak jak większość elementów aparatów latających, pracują one w warunkach obciążeń zmiennych (drgań), to powinny mieć możliwie dobrą wytrzymałość zmęczeniową.

Kulkowanie strumieniowe jest procesem dynamicznego nagniatania, polegającym na uderzaniu powierzchni obrabianej strumieniem kulek poruszających się z dużą prędkością, nadawaną im mechanicznie przez wyrzutnik wirnikowy lub sprężone powietrze. Taka obróbka powoduje umocnienie powierzchniowe na zimno (skutkiem czego jest poprawa wytrzymałości zmęczeniowej) i nadaje się do elementów o kształtach nieregularnych. Obróbka ta, w odniesieniu do stali, jest szeroko stosowana a jej korzystne efekty potwierdzone w b. dużej liczbie publikacji [7].

Chociaż wśród tych publikacji, takich dotyczących kulkowania stopu AZ91 jest bardzo mało [2], [4], [5], to widać z nich, że kulkowanie dynamiczne jest metodą obiecującą i wartą do zastosowania w przypadku elementów wykonywanych z tego stopu – we wszystkich opisywanych przypadkach stwierdzono poprawę wytrzymałości zmęczeniowej. Tą tematykę podjęto w niniejszej pracy a stanowi ona próbę określenia wpływu parametrów wejściowych na wytrzymałość zmęczeniową stopu AZ91 w postaci modelu liniowego procesu kulkowania strumieniowego.

2. Materiał, próbki i stanowisko do badań

Badania przeprowadzono na próbkach ze stopu AZ91 wykonano z wałków odlanych i obrobionych cieplnie oraz sprawdzonych pod względem składu chemicznego i właściwości (Tab. 1 i 2). Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 1. Badania zmęczeniowe wykonywano na specjalnym stanowisku [2] przy użyciu wibratora elektrodynamicznego. Próbki były mocowane w uchwycie na stole wzbudnika, w wyniku wywołanych drgań poddawane były zginaniu wahadłowemu. Ich uszkodzenie następowało w ściśle zlokalizowanej strefie na powierzchni walcowej, w okolicach promienia, gdzie część chwytowa przechodzi w pióro. Taka lokalizacja miejsca pęknięcia zmęczeniowego pozwala na ocenę wpływu technologii obróbki powierzchni walcowej próbek na ich wytrzymałość zmęczeniową. Wytrzymałość zmęczeniową obliczano metodą Locati [3] za podstawę obliczeń przyjmując wyniki pomiarów wytrzymałości zmęczeniowej zamieszczone w [6].

Jako stan odniesienia (bazowe próbki w badaniach) przyjęto próbki toczone. Toczenie odbywało się z następującymi parametrami: $V_c \approx 1,2$ m/s (630 obr/min), $f = 0,078$ mm/obr, $a_p = 0,5$ mm. Po toczeniu wałków na średnicę 35 mm, pocięto je na kilka części, które następnie poddano dalszej obróbce w celu uzyskaniu odpowiedniego kształtu i wymiarów próbek. Następnie polerowano promień przejścia (R10) i ostre krawędzie po procesie skrawania.

Tab. 1. Skład chemiczny (zawartość pierwiastków % wagowych) badanego stopu
Tab. 1. Chemical composition (in mass %) of the AZ91 alloy used in this study

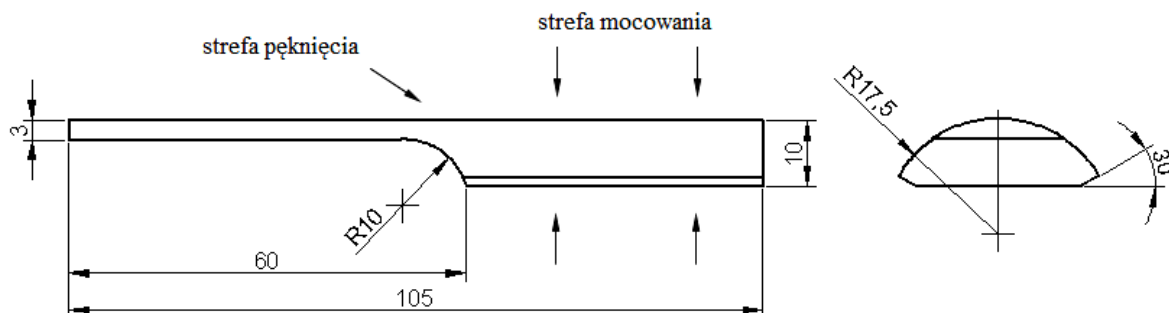
Cu	Si	Mn	Fe	Be	Ni	Zn	Zr	Al	Mg
0,01	0,04	0,23	0,003	< 0,002	< 0,002	0,7	< 0,002	8,8	reszta

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Authors

Tab. 2. Właściwości stopu AZ91
Tab. 2. Properties of AZ91 alloy

Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie A_5 [%]	Przewężenie Z [%]	Twardość HB [N/mm ²]	Gęstość ρ [g/cm ³]	Granica plastyczności $R_{0.2}$ [MPa]
235	5	12	83	1,81	175

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Authors



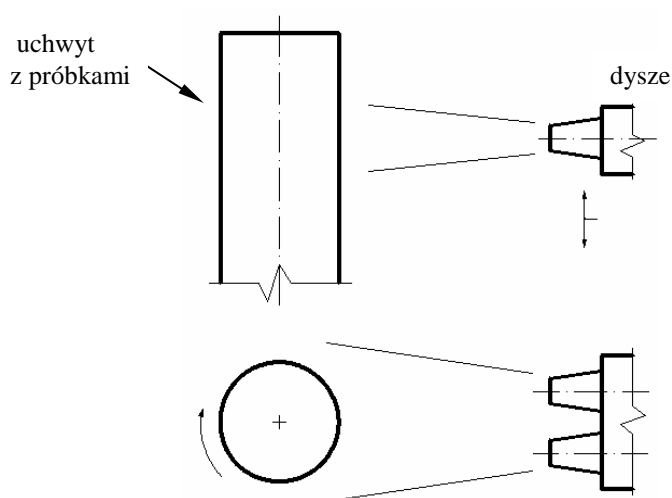
Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do badań

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. Shape and dimensions of tested samples

Source: Elaboration of the Authors

Kulkowanie próbek wykonywano na stanowisku (przemysłowej kulownicy) VAPOR BLAST 3576. Przebiegało ono zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2. Uchwyt (Rys. 3) wraz z trzema próbkami obracał się z prędkością 30 obr/min a dwie dysze o średnicy 10 mm połączone z ramieniem robota wykonywały w pionie ruch posuwisto zwrotny. Prędkość tego ruchu była dobrana tak, aby zapewnić obrabianym próbkom 100% pokrycie śladami obróbki. Odległość próbek od dyszy (dysz) wynosiła 120 mm a strumień śrutu skierowany był na powierzchnię próbek w sposób pokazany na rysunku 2. Stosowano drobinę śrutu o średnicy: 0,4 mm (oznaczenie S170) oraz 0,6 mm (oznaczenie S230) o kształtach pokazanych na rysunku 4.

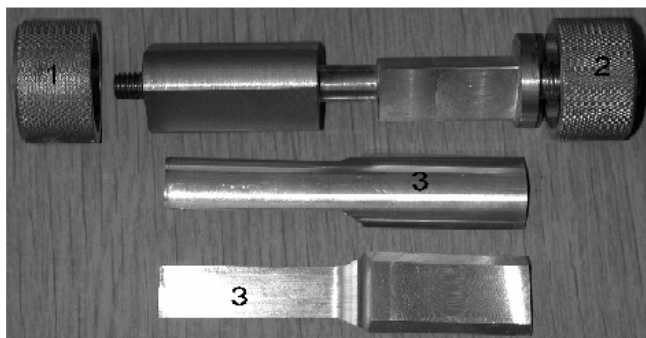


Rys. 2. Schemat przebiegu procesu kulkowania

Źródło: Opracowanie własne

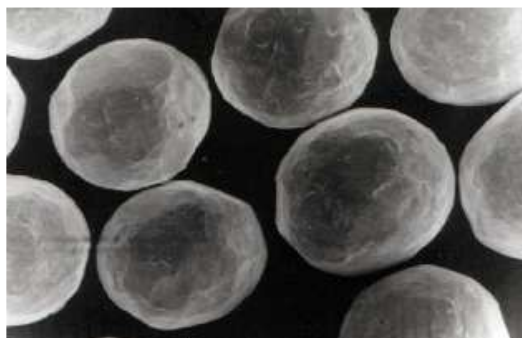
Fig. 2. A schematic diagram of the ball peening process

Source: Elaboration of the Authors



Rys. 3. Uchwyty specjalny do mocowania próbek: 1, 2 pierścienie mocujące nakręcane na końce uchwyty, 3 - próbki
 Źródło: Opracowanie własne

Fig. 3. Special fixture for samples clamping: 1, 2 - fixing rings screwed to the handle ends, 3 - samples
 Source: Elaboration of the Authors



Rys. 4. Śrut S230 (0,6 mm)
 Źródło: Opracowanie własne

Fig. 4. S230 shot (0.6 mm)
 Source: Elaboration of the Authors

3. Plan realizacji eksperymentu i parametry doświadczeń

Badania przeprowadzono z trzykrotną powtarzalnością według planu dwupoziomowego PS/DK 2^3 . Poziomy zmienności parametrów wejściowych przedstawiono w tabelicy 3, a macierz tego planu przedstawiono w tabelicy 4. W lewej części tabelicy 4 w odpowiednich kolumnach oznaczono (przez + lub -) poziomy parametrów zmiennych ustawiane dla każdego doświadczenia a w prawej części zmierzone lub obliczone wartości czynników wynikowych. Realizacja doświadczeń według tego planu umożliwia otrzymanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci równania liniowego, pod warunkiem odpowiedniego zakodowania czynników przed wykonaniem doświadczeń. Możliwe jest także otrzymanie modelu ujmującego i wpływ interakcji badanych parametrów wejściowych. Metodyka realizacji tego eksperymentu została szczegółowo opisana w [6].

Tab. 3. Przyjęte wartości parametrów wejściowych
 Tab. 3. Used input parameters values

Parametry (czynniki) wejściowe	Poziom górny (+)	Poziom dolny (-)
Średnica kulek (śrutu) [mm]	0,6	0,4
Ciśnienie zasilania [MPa]	0,90	0,45
Czas obróbki [s]	95	55

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Authors

Równania liniowe są często stosowane w technice do opisu procesów obróbkowych gdyż są łatwe do analizy i oceny charakteru i siły wpływu poszczególnych czynników wejściowych badanego procesu na czynnik wynikowy. Równania takie (po odkodowaniu) mają postać ogólną:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (1)$$

gdzie: x_1, x_2, x_3 , – zakodowane czynniki wejściowe, $b_0 \dots b_{123}$ – współczynniki regresji równania liniowego, y – zakodowana postać czynnika wynikowego (mierzonego).

3.1. Konkretnie, przyjęte w badaniach wartości jednostek zmienności były następujące:

➤ średnica kulek:

$$\Delta x_1 = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} = \frac{0,6 - 0,4}{2} = 0,1 [\text{mm}], \quad (2)$$

➤ ciśnienie zasilania:

$$\Delta x_2 = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2} = \frac{0,9 - 0,45}{2} = 0,22 [\text{MPa}], \quad (3)$$

➤ czas obróbki:

$$\Delta x_3 = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} = \frac{95 - 55}{2} = 20 [\text{s}]. \quad (4)$$

3.2. Wartości centralne czynników wejściowych:

➤ średnica kulek:

$$x_{10} = \frac{\varphi_{\max} + \varphi_{\min}}{2} = \frac{0,6 + 0,4}{2} = 0,5 [\text{mm}], \quad (5)$$

➤ ciśnienie zasilania:

$$x_{20} = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2} = \frac{0,9 + 0,45}{2} = 0,67 [\text{MPa}], \quad (6)$$

➤ czas obróbki:

$$x_{30} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} = \frac{95 + 55}{2} = 75 [\text{s}]. \quad (7)$$

3.3. Zakodowane wartości parametrów wejściowych wynosiły:

➤ średnica śrutu:

$$x_1 = \frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} = \frac{\varphi - 0,5}{0,1}, \quad (8)$$

➤ ciśnienie zasilania:

$$x_2 = \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} = \frac{p - 0,67}{0,22}, \quad (9)$$

➤ czas obróbki:

$$x_3 = \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} = \frac{t - 75}{20}. \quad (10)$$

Natomiast jako czynnik wynikowy przyjmowano wytrzymałość zmęczeniową charakteryzowaną przez granicę wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie wahadłowe:

$$y = Z_{gw} [\text{MPa}]. \quad (11)$$

Tab. 4. Matryca planu badań PS/DK2³ i wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej
 Tab. 4. Matrix of research plan and the results of fatigue strength limit tests

Lp.	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	y ₁	y ₂	\bar{y}	S ² (y) _i
1.	+	+	+	+	+	+	+	+	88,0	86,3	87,15	1,445
2.	+	+	+	-	+	-	-	-	80,0	81,5	80,75	1,125
3.	+	+	-	+	-	+	-	-	71,3	62,8	67,05	36,125
4.	+	+	-	-	-	-	+	+	66,3	66,1	66,20	0,020
5.	+	-	+	+	-	-	+	-	53,8	74,0	63,90	204,02
6.	+	-	+	-	-	+	-	+	44,8	69,0	56,90	292,82
7.	+	-	-	+	+	-	-	+	61,2	49,2	55,20	72,00
8.	+	-	-	-	+	+	+	-	57,1	53,8	55,45	5,445

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Authors

Dane zawarte w tablicy 4 stały się podstawą do wyznaczenia modelu procesu kulkowania opisującego wpływ parametrów procesu na wytrzymałość zmęczeniową.

4. Model liniowy procesu kulkowania strumieniowego

W celu określenia wpływu parametrów wejściowych a szczególnie ich interakcji na wytrzymałość zmęczeniową przeprowadzono obliczenia zgodnie z metodyką zaprezentowaną w [3]. W tym celu wykonano następujące kroki:

4.1. Obliczanie współczynników regresji równania liniowego:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{0i} \bar{y}_i = \quad (12)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 + 80,75 + 67,05 + 66,2 + 63,9 + 56,9 + 55,2 + 55,45) = 66,57 ;$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} \bar{y}_i = \quad (13)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 + 80,75 + 67,05 + 66,2 - 63,9 - 56,9 - 55,2 - 55,45) = 8,71 ;$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{2i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{2i} \bar{y}_i = \quad (14)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 + 80,75 - 67,05 - 66,2 + 63,9 + 56,9 - 55,2 - 55,45) = 5,60 ;$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{3i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{3i} \bar{y}_i = \quad (15)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 - 80,75 + 67,05 - 66,2 + 63,9 - 56,9 + 55,2 - 55,45) = 1,75 ;$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} x_{2i} \bar{y}_i = \quad (16)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 + 80,75 - 67,05 - 66,2 - 63,9 - 56,9 + 55,2 + 55,45) = 3,06 ;$$

$$b_{13} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{3i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} x_{3i} \bar{y}_i = \quad (17)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 - 80,75 + 67,05 - 66,2 - 63,9 + 56,9 - 55,2 + 55,45) = 0,06 ;$$

$$b_{23} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{2i} x_{3i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{2i} x_{3i} \bar{y}_i = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 - 80,75 - 67,05 + 66,2 + 63,9 - 56,9 - 55,2 + 55,45) = 1,60 ;$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i} x_{3i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} x_{2i} x_{3i} \bar{y}_i = \quad (19)$$

$$= \frac{1}{8} (87,15 - 80,75 - 67,05 + 66,2 - 63,9 + 56,9 + 55,2 - 55,45) = -0,21 .$$

4.2. Obliczanie wariancji błędów pomiarów:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(y)_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 S^2(y)_i = \quad (20)$$

$$= \frac{1}{8} (1,445 + 1,125 + 36,125 + 0,02 + 204,02 + 292,82 + 72 + 5,445) = 76,62 .$$

4.3. Sprawdzenie powtarzalności wyników doświadczeń:

- obliczenie wartości empirycznej współczynnika G

$$G = \frac{S^2(y)_{i_{\max}}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} = \frac{S^2(y)_{i_{\max}}}{\sum_{i=1}^8 S^2(y)_i} = \quad (21)$$

$$= \frac{292,82}{(1,445 + 1,125 + 36,125 + 0,02 + 204,02 + 292,82 + 72 + 5,445)} = 0,477 .$$

- obliczanie liczby stopni swobody

$$f_1 = N = 8 , \quad (22)$$

$$f_2 = r - 1 = 2 - 1 = 1 . \quad (23)$$

- określenie wartości krytycznej współczynnika G_{kr}

$$G_{kr} = G_{(\alpha; f_1; f_2)} = G_{(0,05; 8; 1)} = 0,679 . \quad (24)$$

Ponieważ $G < G_{kr}$, więc warunki realizacji doświadczenia należy uznać za powtarzalne.

4.4. Ocena istotności współczynników równania regresji:

- określenie liczby stopni swobody do testu t – Studenta

$$f = N(r-1) = 8 \cdot (2-1) = 8, \quad (25)$$

- określenie wartości krytycznej współczynnika t

$$t_{kr} = t_{(\alpha;f)} = t_{(0,05;8)} = 2,306, \quad (26)$$

- obliczenie wartości krytycznej dla współczynników regresji

$$b_{kr} = t_{(\alpha;f)} \cdot \sqrt{\frac{S^2(y)}{N \cdot r}} = 2,306 \cdot \sqrt{\frac{76,62}{8 \cdot 2}} = 5,046. \quad (27)$$

- porównanie współczynników regresji z wartością krytyczną

Ponieważ:

$$|b_0| > b_{kr}, \quad (28)$$

to współczynnik jest istotny,

$$|b_1| > b_{kr}, \quad (29)$$

to współczynnik jest istotny,

$$|b_2| > b_{kr}, \quad (30)$$

to współczynnik jest istotny,

$$|b_3| < b_{kr}, \quad (31)$$

to współczynnik jest nieistotny,

$$|b_{12}| < b_{kr}, \quad (32)$$

to współczynnik jest nieistotny,

$$|b_{13}| < b_{kr}, \quad (33)$$

to współczynnik jest nieistotny,

$$|b_{23}| < b_{kr}, \quad (34)$$

to współczynnik jest nieistotny,

$$|b_{123}| < b_{kr}, \quad (35)$$

to współczynnik jest nieistotny.

Równanie regresji po odrzuceniu współczynników nieistotnych przybiera postać:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 66,57 + 8,71x_1 + 5,6x_2. \quad (36)$$

4.5. Odkodowanie równania regresji

Po podstawieniu do (36) danych zakodowanych (8), (9), (10) otrzymano:

$$Z_g = 66,57 + 8,71 \left(\frac{\varphi - 0,5}{0,1} \right) + 5,6 \left(\frac{p - 0,67}{0,22} \right). \quad (37)$$

Po odkodowaniu czyli wykonaniu działań matematycznych oraz uporządkowaniu równania (37), otrzymano zależność opisującą wpływ poszczególnych czynników wejściowych kulkowania na wytrzymałość zmęczeniową:

$$Z_g = 6 + 87,1\phi + 25,42p, \quad [Z_g] = [\text{MPa}], \quad (38)$$

gdzie ϕ - średnica śrutu [mm], p - ciśnienie zasilania [MPa].

4.6. Ocena adekwatności równania (36)

- obliczanie wartości wariancji adekwatności

$$S_{\text{ad}}^2 = \frac{r \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1} = \frac{2 \sum_{i=1}^8 (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{8 - 3 - 1} = \quad (39)$$

$$= \frac{2 \cdot [(81,13 - 87,15)^2 + (81,13 - 80,75)^2 + (69,68 - 67,05)^2 + (69,68 - 66,2)^2 + (63,71 - 63,9)^2 + (63,71 - 56,9)^2 + (52,26 - 55,2)^2 + (52,26 - 55,45)^2]}{4} = 60,322;$$

- obliczanie empirycznej wartości współczynnika F

$$F = \frac{S_{\text{ad}}^2(y)}{S^2(y)} = \frac{60,322}{76,62} = 0,787; \quad (40)$$

- obliczanie liczby stopni swobody dla licznika

$$f_1 = f_1 = N - k - 1 = 8 - 3 - 1 = 4, \quad (41)$$

- obliczanie liczby stopni swobody dla mianownika

$$f_m = f_2 = N(r - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8, \quad (42)$$

- obliczanie krytycznej wartości współczynnika F (odczytane z tab.)

$$F_{\text{kr}} = F_{(\alpha; f_1; f_m)} = F_{(0,05; 4; 8)} = 3,837. \quad (43)$$

Ponieważ

$$F < F_{\text{kr}} \quad (44)$$

więc otrzymane równanie regresji (36) należy uznać za adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

5. Wnioski

- Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że zastosowanie dwupoziomego planu statycznego determinowanego umożliwiło określenie wzajemnych zależności pomiędzy najważniejszymi parametrami procesu kulkowania a wytrzymałością zmęczeniową stopu AZ91 w postaci modelu liniowego, który ułatwia dobór parametrów kulkowania. Procedura realizacji eksperymentu jest łatwa do przeprowadzenia i przydatna w badaniach technologicznych.
- Otrzymany model jest stosunkowo prosty gdyż w badaniach, w przyjętym zakresie parametrów wejściowych, nie stwierdzono istotnego wpływu interakcji badanych parametrów

wejściowych na wyniki obróbki. Najbardziej istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową stopu AZ91 wykazują zmiany średnicy kulek i ciśnienia zasilania.

- Proces kulkowania strumieniowego jest łatwy do sterowania poprzez zmianę parametrów wejściowych a uzyskane wyniki wskazują na jego skuteczność. Tę metodę można zatem polecić jako obróbkę przeciwmęczeniową elementów ze stopu magnezu AZ91 wstępnie obrobionych skrawaniem.

Literatura:

- [1] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu*. Warszawa: Wyd. Naukowo Techniczne, 2013.
- [2] Korzynski M., Żarski T., Korzynska K.: *Surface layer condition and the fatigue strength of an AZ91 alloy after ball peening*. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 12, pp. 1982-1988.
- [3] Locati L.: *Programmed fatigue test, variable amplitude*. Rotat Metallurgia Italiana 1952, 44, (4), pp. 135-44.
- [4] Ludian T., Hilpert M., Kiefer A., Wagner L.: *Shot Peening of Cast Magnesium Alloys*. Conf. Proc. ICSP– 8 (2002), pp. 375-379.
- [5] Muller C., Rodriguez R.: *Influence of Shot Peening on the Fatigue and Corrosion Behavior of the Die Cast Magnesium Alloy AZ91 HP*. Conf. Proc. ICSP – 8 (2002), pp. 271-277.
- [6] Żarski T.: *Wpływ kulkowania na wybrane właściwości elementów konstrukcyjnych ze stopu GA8*. Praca doktorska. Politechnika Rzeszowska, 2008.
- [7] <http://www.shotpeener.com>