

mgr Katarzyna KORZYŃSKA<sup>a</sup>, dr inż. Tomasz ŻARSKI<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 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

<sup>b</sup> 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

## MODEL POTĘGOWY KULKOWANIA STRUMIENIOWEGO STOPU AZ91

### Streszczenie

**Wstęp i cel:** W pracy przedstawiono przykład planowania oraz realizacji eksperymentu technologicznego z wykorzystaniem planu badawczego umożliwiającego otrzymanie modelu potęgowego badanego procesu przy zminimalizowaniu liczby doświadczeń przeprowadzanych na stanowisku badawczym.

**Materiał i metody:** Badania przeprowadzono według planu statycznego determinowanego kompletnego typu  $2^3$  z przekształcaniem czynników wejściowych. Doświadczenia wykonywano na próbkach ze stopu AZ91, z trzykrotną powtarzalnością. Badano wpływ parametrów kulkowania strumieniowego na wytrzymałość zmęczeniową.

**Wyniki:** Uzyskano model matematyczny potęgowy ujmujący wpływ parametrów procesu śrutowania na wytrzymałość zmęczeniową na zginanie wahadłowe stopu magnezu AZ91 i stwierdzono możliwości wpływania na nią poprzez dobór parametrów kulkowania.

**Wnioski:** Wykazano przydatność zastosowanej metodyki do przeprowadzania eksperymentów technologicznych. Stwierdzono, że zastosowana procedura jest efektywna przy bardzo małej liczbie doświadczeń i pozwala na uzyskanie w prosty sposób modelu potęgowego.

**Słowa kluczowe:** Kulkowanie strumieniowe, model potęgowy, wytrzymałość zmęczeniowa.

(Otrzymano: 24.07.2016; Zrecenzowano: 28.07.2016; Zaakceptowano: 31.07.2016)

## AN AZ91 ALLOY SHOT PEENING POWER-LAW REGRESSION 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 allowing to obtain the power-law model of investigated process with minimum number of experiments carried out on the test stand.

**Material and methods:** An experiment carried out following the static, determined, complete plan of type  $2^3$  with the transformation of input factors. All the investigations and measurements were repeated at least three times. Complete calculation procedure has been presented. The influence of shot peening parameters on the fatigue strength was investigated.

**Results:** It was obtained a mathematical model of power-law endearing effect of shot peening process parameters on the bending fatigue strength magnesium alloy AZ91 and the opportunities to influence on it through the selection of parameters peening were stated.

**Conclusions:** The usefulness of the used methodology for technological research was confirmed. It was stated that used procedure is easy for execute and effective with very small number experiments on the test stand and allows to obtain in an easy manner the power-law mathematical model.

**Keywords:** Shot peening, power model, fatigue strength.

(Received: 24.07.2016; Revised: 28.07.2016; Accepted: 31.07.2016)

## 1. Wstęp i cele

Coraz wyższe wymagania stawiane przed wyrobami przemysłu elektromaszynowego wymuszają opracowywanie i stosowanie innowacyjnych metod obróbkowych części maszyn i urządzeń. Te metody, w odróżnieniu od metod konwencjonalnych, umożliwiają nie tylko uzyskanie odpowiedniej dokładności kształtowo-wymiarowej i gładkości powierzchni, ale także pozwalają na ukształtowanie warstwy wierzchniej obrabianych części o właściwościach takich, które są najlepsze przy pracy w danych warunkach obciążeń w maszynie.

Nowe technologie obróbkowe wymagają przeprowadzenia badań takich, które pozwoliłyby na określenie efektywności danej metody i na opracowanie wskazówek dla doboru parametrów obróbki konkretnych materiałów. Takie badania realizowane metodami tradycyjnymi, na ogół są kosztowne i pracochłonne a często trudne do realizacji z powodów technicznych (np. niemożliwe jest ustawienie na obrabiarce, wymaganej wartości prędkości obrotowej czy posuwu, ze względu na budowę skrzyni przekładniowej). W takich sytuacjach można przeprowadzać badania według specjalnych planów (dwupoziomowych lub trójpoziomowych) eksperymentu umożliwiających ustawianie parametrów wejściowych badanego procesu na poziomach jednakowo od siebie odległych (co jest bardzo łatwe i wygodne w przypadku badań wykonywanych na obrabiarkach) i umożliwiających (przy odpowiednim zakodowaniu czynników wejściowych i odpowiedniej obróbce matematycznej otrzymanych wyników) otrzymanie adekwatnych wyników przy stosunkowo małej liczbie fizycznie wykonywanych doświadczeń. W takim przypadku możliwe jest otrzymanie liniowego, wielomianowego lub potęgowego modelu matematycznego (równania regresji) badanego procesu [1]. Przykład zastosowania planu dwupoziomowego do badań technologicznych w celu uzyskania modelu potęgowego stanowi niniejsza praca.

W przypadku wykonywania niektórych części aparatów latających stosowana jest obróbka strumieniowa. Polega ona na skierowaniu na obrabianą powierzchnię strumienia cząstek (drobin) wyrzucanych mechanicznie lub za pomocą strumienia sprężonego powietrza. Jeśli drobinami są ziarna ścierna to jest to obróbka strumieniowo-ścierna, jeśli śrut to śrutowanie a jeśli kulki szklane (o średnicy 40 - 800  $\mu\text{m}$ ) to mikrokulkowanie. Obróbka strumieniowa znajduje dość częste zastosowanie w przemyśle samochodowym, lotniczym i maszynowym. Odmiana strumieniowo-ścierna jest stosowana jako metoda szlifowania powierzchni o kształtach nieregularnych, mikrokulkowanie do oczyszczania powierzchni przed obróbką galwaniczną a śrutowanie jako metoda umacniania powierzchniowego elementów o wysokiej twardości takich jak sprężyny, pióra resorów, itp. Obróbka ta może być wykonywana na urządzeniach wirnikowych lub pneumatycznych, takich jak przedstawiona na rysunku 1 kulownica, na której wykonywano doświadczenia dla potrzeb niniejszej pracy. Śrut może mieć postać drobin ciętych z drutu, drobin o zaokrąglonych krawędziach i kształcie zbliżonym do kulistego lub kulek stalowych.

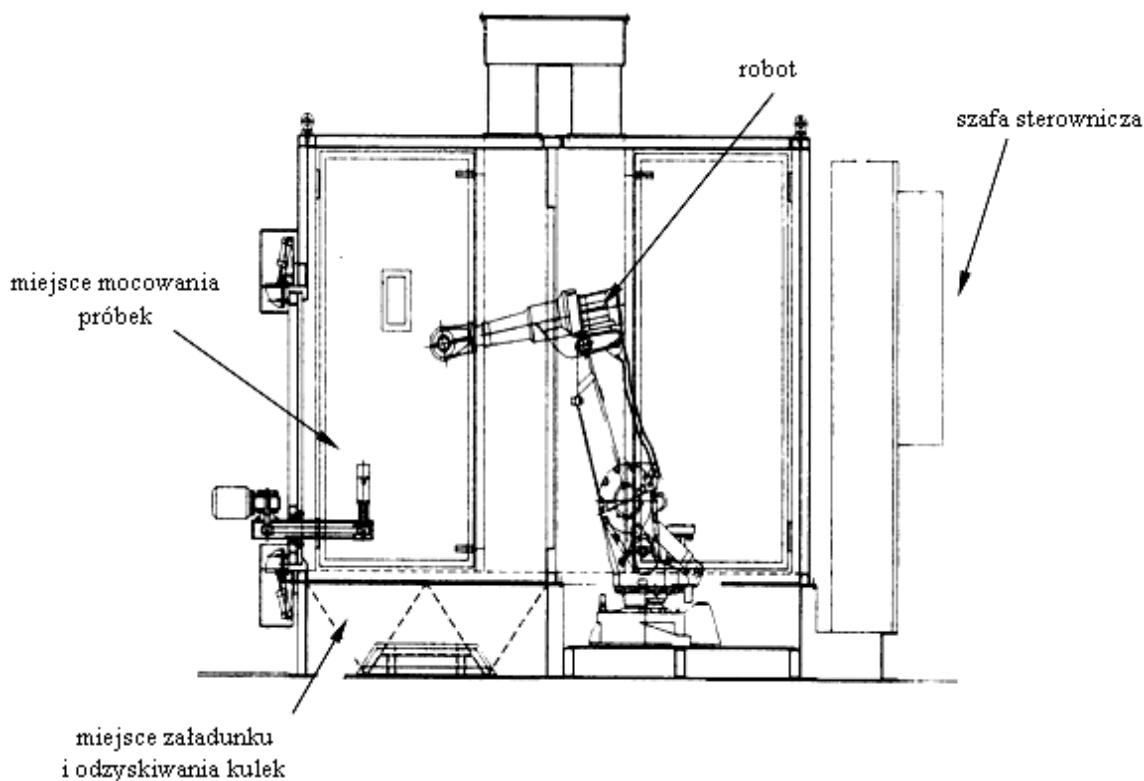
Celem przeprowadzonych w niniejszej pracy badań było uzyskanie modelu matematycznego w postaci potęgowego równania regresji ujmującego wpływ podstawowych parametrów kulkowania strumieniowego na kulownicy Vapor Blast na wytrzymałość zmęczeniową stopu AZ91 oraz wykazanie przydatności zastosowanej metodyki eksperymentu do badań technologicznych.

## 2. Metodyka badań

Badania wykonywano na próbkach ze stopu AZ91 wyciętych z wałków odlewanych, obrabionych cieplnie i sprawdzonych pod względem składu chemicznego i właściwości na zgodność z normą PN-EN 1753:2001. Stosowano próbki o specjalnym kształcie umożliwiającym ocenę wpływu technologii obróbki powierzchni walcowej próbek na ich wytrzymałość zmę-

czeniu [3]. Badania zmęczeniowe wykonywano na specjalnym stanowisku opisanym w [4] przy użyciu wibratora elektrodynamicznego, na którym próbki w wyniku wywołanych drgań poddawane były zginaniu wahadłowemu. Wytrzymałość zmęczeniową obliczano metodą Locati [2] wykorzystując dane doświadczalne zamieszczone w pracy [5].

Kulkowanie strumieniowe (wstępnie toczonych) próbek wykonywano na urządzeniu przedstawionym na rysunku 1. Na tym stanowisku, części obrabiane mocowano w specjalnym uchwycie obracającym się w czasie obróbki z małą prędkością a strumień drobin wyrzucany był przez dwie pneumatyczne dysze umieszczone na ramieniu robota poruszającym się w pionie ruchem posuwisto-zwrotnym. Prędkości obrotu i przesuwu, odległość dysz i ciśnienie zasilania są regulowane i dobrano je tak, aby zapewnić obrabianym powierzchniom 100% pokrycie śladami obróbki. Doświadczenia wykonywano przy następujących warunkach stałych obróbki: odległość próbek dysz wynosiła 120 mm, średnica dysz 10 mm, prędkość obrotowa uchwytu 30 obr/min. Całość eksperymentu przeprowadzono wg planu PS/DK 2<sup>3</sup> [1]. Takie, często stosowane w badaniach technicznych plany dwupoziomowe pozwalają na otrzymanie opisu matematycznego badanego obiektu (procesu) zarówno w formie równania liniowego jak i potęgowego. Modele potęgowe są chętniej stosowane do opisu procesów obróbkowych gdyż wierniej opisują oraz wprost pokazują badane zależności.



Rys. 1. Schemat kulownicy VAPOR BLAST 3576

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. VAPOR BLAST 3576 pneumatic shot peening machine

Source: Elaboration of the Authors

W wyniku doświadczeń zrealizowanych wg planów PS/DK 2<sup>3</sup> z uwzględnieniem skutków interakcji otrzymuje się opis badanego obiektu jako równanie regresji w postaci:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n , \quad (1)$$

gdzie:  $x_1 \dots x_n$ , – zakodowane czynniki wejściowe,  $b_0 \dots b_n$  – współczynniki regresji równania liniowego,  $y$  – zakodowana postać czynnika wynikowego (mierzonego).

Współczynniki regresji równania (1) oblicza się na podstawie wyników pomiarów czynnika wynikowego, sumując średnie wyniki kolejnych doświadczeń ze znakiem takim jaki figuruje w kolumnie przypisanej danemu czynnikowi wejściowemu, stosując wzór:

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ki} \bar{y}_i, \quad (2)$$

gdzie  $N$  – liczba doświadczeń w planie,  $b_k$  – wartość  $k$ -tego czynnika wejściowego,  $x_{ki}$  – wartość (+1 lub -1) z  $k$ -tej kolumny i  $i$ -tego wiersza maczyzy planu.

Aby uzyskać model badanego procesu w postaci potęgowej należy wstępnie zakodować czynniki wejściowe wg wzoru:

$$x_1 = \frac{2(\ln \hat{x}_1 - \ln \hat{x}_{1\max})}{\ln \hat{x}_{1\max} - \ln \hat{x}_{1\min}} + 1, \quad (3)$$

gdzie  $\hat{x}_k$  – niezakodowana postać  $k$  – tego czynnika wejściowego,  $\hat{x}_{k0}$  – wartość centralna  $k$  – tego czynnika obliczona ze wzoru:

$$\hat{x}_{k0} = \frac{\hat{x}_{k\max} + \hat{x}_{k\min}}{2}, \quad (4)$$

a  $\Delta \hat{x}_k$  – jednostka zmienności  $k$  – tego czynnika, obliczana ze wzoru:

$$\Delta \hat{x}_k = \frac{\hat{x}_{k\max} - \hat{x}_{k\min}}{2}, \quad (5)$$

a po wykonaniu eksperymentu należy odkodować równanie (1) podstawiając doń zależności (2) i (3) i wykonując odpowiednie działania.

Biorąc pod uwagę wymagania stosowanego w badaniach planu dwupoziomowego PS/DK 2<sup>3</sup> oraz wyniki badań wstępnych jako czynniki wejściowe (parametry zmienne) procesu kulowania strumieniowego przyjęto: średnicę kulek, ciśnienie zasilania i czas obróbki. Zastosowane w badaniach poziomy, wartości centralne i jednostki zmienności tych parametrów zamieszczono w tab. 1 natomiast maczyzy planu zamieszczono w lewej części tablicy 2.

Tab. 1. Przyjęte wartości parametrów wejściowych  
Table 1. Used input parameters values

Parametry (czynniki) wejściowe	Poziom górny (+)	Poziom dolny (-)	Wartość centralna czynnika	Jednostka zmienności czynnika
Średnica kulek (śrutu) [mm]	0,6	0,4	0,5	0,1
Ciśnienie zasilania [MPa]	0,90	0,45	0,67	0,22
Czas obróbki [s]	95	55	75	20

Źródło: Opracowanie własne  
Source: Elaboration of the Authors

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

$$y = Z_{gw}, \quad (6)$$

gdzie  $[y] = [\text{MPa}]$ .

### 3. Wyniki badań i obliczeń

Wyniki badań i obliczeń wykonanych zgodnie z powyższą metodyką podstawiono do maczy planu badań w kolumnie dotyczącej czynnika wynikowego, oznaczonej jako  $\bar{y}$  (Tab. 2) a dla potrzeb przewidywanych przyszłych obliczeń i badań modelowych w tablicy tej podano również wartości  $\ln \hat{y}$ .

Tab. 2. Matryca planu badań PS/DK2<sup>3</sup> i wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej  
Table 2. Matrix of research plan and the results of fatigue strength limit tests

Lp.	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	$\bar{y}$	S <sup>2</sup> (y) <sub>i</sub>	ln $\bar{y}$	$\hat{y}$
1.	+	+	+	+	88,0	86,3	<b>87,15</b>	1,445	4,46	<b>80,64</b>
2.	+	+	+	-	80,0	81,5	<b>80,75</b>	1,125	4,39	<b>78,31</b>
3.	+	+	-	+	71,3	62,8	<b>67,05</b>	36,125	4,20	<b>70,11</b>
4.	+	+	-	-	66,3	66,1	<b>66,20</b>	0,020	4,19	<b>68,09</b>
5.	+	-	+	+	53,8	74,0	<b>63,90</b>	204,02	4,15	<b>63,44</b>
6.	+	-	+	-	44,8	69,0	<b>56,90</b>	292,82	4,04	<b>61,61</b>
7.	+	-	-	+	61,2	49,2	<b>55,20</b>	72,00	4,01	<b>55,15</b>
8.	+	-	-	-	57,1	53,8	<b>55,45</b>	5,445	4,01	<b>53,56</b>

Źródło: Opracowanie własne  
Source: Elaboration of the Authors

Dane zawarte w tablicy 2 stały się podstawą do wyznaczenia modelu potęgowego procesu kulkowania opisującego wpływ parametrów wejściowych procesu na wytrzymałość zmęczeniową. Zgodnie z wzorem (3) w przeprowadzonych badaniach czynniki wejściowe kodowano jako:

➤ średnica śrutu (kulek):

$$x_1 = \frac{2(\ln \hat{x}_1 - \ln \hat{x}_{1\max})}{\ln \hat{x}_{1\max} - \ln \hat{x}_{1\min}} + 1 = \frac{2(\ln \phi - \ln 0,6)}{\ln 0,6 - \ln 0,4} + 1 = 4,93 \ln \Phi + 3,52 \quad (7)$$

➤ ciśnienie zasilania jako:

$$x_2 = \frac{2(\ln \hat{x}_2 - \ln \hat{x}_{2\max})}{\ln \hat{x}_{2\max} - \ln \hat{x}_{2\min}} + 1 = \frac{2(\ln p - \ln 0,9)}{\ln 0,9 - \ln 0,45} + 1 = 2,88 \ln p + 1,30 \quad (8)$$

➤ czas obróbki jako:

$$x_3 = \frac{2(\ln \hat{x}_3 - \ln \hat{x}_{3\max})}{\ln \hat{x}_{3\max} - \ln \hat{x}_{3\min}} + 1 = \frac{2(\ln t - \ln 95)}{\ln 95 - \ln 55} + 1 = 2,68 \ln t - 11,19. \quad (9)$$

W przypadku modeli potęgowych, matematyczne opracowanie wyników doświadczeń jest uproszczone [5] – nie dokonuje się matematycznej oceny istotności współczynników regresji, za nieistotny przyjmuje się natomiast wpływ tych czynników, których wykładnik potęgowy jest mniejszy niż 0,1. Po odrzuceniu wyrazów nieistotnych dokonuje się odkodowania i uporządkowania, otrzymując w rezultacie model potęgowy opisujący badane zależności.

Aby otrzymać model potęgowy dokonano, zgodnie z wzorem (2), obliczeń współczynników regresji:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{0i} \bar{y}_i = & (10) \\ &= \frac{1}{8} (4,46 + 4,39 + 4,20 + 4,19 + 4,15 + 4,04 + 4,01 + 4,01) = 4,18; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} \bar{y}_i = & (11) \\ &= \frac{1}{8} (4,46 + 4,39 + 4,20 + 4,19 - 4,15 - 4,04 - 4,01 - 4,01) = 0,12; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{2i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{2i} \bar{y}_i = & (12) \\ &= \frac{1}{8} (4,46 + 4,39 - 4,20 - 4,19 + 4,15 + 4,04 - 4,01 - 4,01) = 0,07; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{3i} \bar{y}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{3i} \bar{y}_i = & (13) \\ &= \frac{1}{8} (4,46 - 4,39 + 4,20 - 4,19 + 4,15 - 4,04 + 4,01 - 4,01) = 0,02. \end{aligned}$$

Po podstawieniu do ogólnego równania regresji (1) obliczonych współczynników otrzymano model matematyczny w postaci zakodowanej:

$$\bar{y} = 4,18 + 0,12x_1 + 0,07x_2 + 0,02x_3, \quad (14)$$

a po odkodowaniu równania (14) otrzymano równanie regresji w postaci:

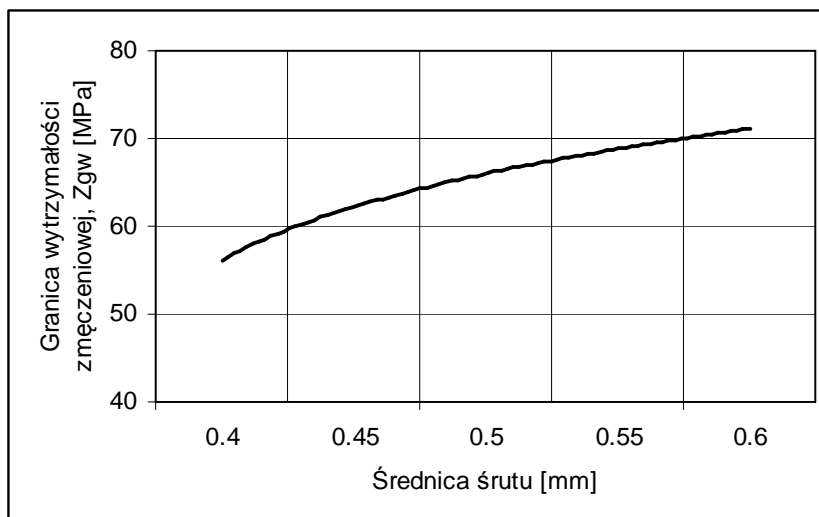
$$\ln Z_g = 4,18 + 0,12(4,93 \ln \phi + 3,52) + 0,07(2,88 \ln p + 1,30) + 0,02(2,67 \ln t - 11,19). \quad (15)$$

Po wykonaniu działań i odlogarytmowaniu powyższego równania otrzymano model w postaci:

$$Z_g = 87,35 \cdot \phi^{0,59} \cdot p^{0,20} \cdot t^{0,05}, \quad (16)$$

gdzie  $\phi$  - średnica śrutu [mm],  $p$  - ciśnienie zasilania [MPa],  $t$  - czas obróbki [s].

Określone na podstawie tego modelu zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami procesu a wytrzymałością zmęczeniową stopu AZ91 przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

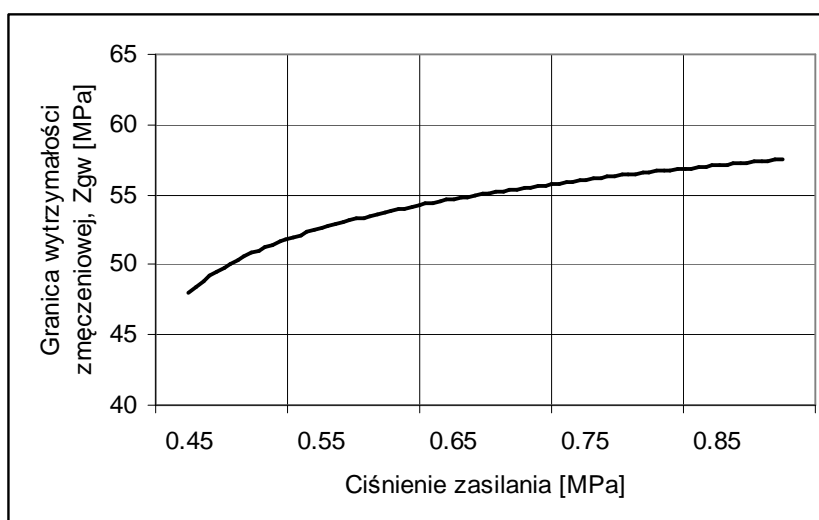


Rys. 2. Wpływ średnicy śrutu na wytrzymałość zmęczeniową stopu AZ91 przy ciśnieniu zasilania 0,6 MPa i czasie kulowania 75 s

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 2. Shot diameter influence on AZ91 alloy fatigue strength with 0,6 MPa inlet pressure and 75 s peening time

Source: Elaboration of the Authors



Rys. 3. Wpływ ciśnienia zasilania na wytrzymałość zmęczeniową stopu AZ91 przy średnicy śrutu 0,6 mm i czasie kulowania 75 s

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 3. Inlet pressure influence on AZ91 alloy fatigue strength with 0,6 mm shot dia and 75 s peening time

Source: Elaboration of the Authors

Wartości granicy wytrzymałości zmęczeniowej obliczone z równania (16) zamieszczono w tabeli 2 w kolumnie oznaczonej jako  $\hat{y}$ . Wykazują one dobrą zgodność z wynikami otrzymanymi na drodze doświadczalnej (kolumna oznaczona jako  $\bar{y}$  w tabeli 2) – o czym może świadczyć wysoka wartość współczynnika ich wzajemnej korelacji wynosząca 0,96.

Otrzymany model wskazuje, że najsilniejszy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma średnica stosowanego śrutu. Nieco mniejszy, ale istotny, ma ciśnienie. Natomiast czas obróbki (w badanym zakresie zmienności) nie wpływa na poprawę właściwości zmęczeniowych (wartość wykładnika potęgowego jest mniejsza od 0,1).

#### 4. Wnioski

- Poprzez wykonanie eksperymentu zgodnie z planem PSDK 2<sup>3</sup> możliwe jest (przy zastosowaniu odpowiedniego sposobu kodowania czynników wejściowych i odpowiedniej procedury obliczeniowej) uzyskanie opisu matematycznego procesu kulkowania strumieniowego, ujmującego zależności pomiędzy najważniejszymi parametrami procesu w postaci zależności potęgowej.
- Uzyskany model klarownie i wprost pokazuje wpływ parametrów procesu kulkowania strumieniowego i umożliwia sterowanie procesem poprzez adekwatny dobór parametrów kulkowania.
- Z przeprowadzonego eksperymentu wynika, że parametrem najbardziej wpływającym na wytrzymałość zmęczeniową jest średnica kulek a najmniej wpływającym – czas kulkowania.
- Wyniki badań wskazują na możliwość skutecznego procesu kulkowania i metodę tę można polecić w celu poprawy wytrzymałości zmęczeniowej elementów ze stopu magnezu AZ91.

#### Literatura

- [1] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 2013.
- [2] Locati L.: *Programmed fatigue test, variable amplitude*. Rotat Metallurgia Italiana 1952, 44, (4) pp. 135-44.
- [3] Łunarski J., Smagała E.: *Próbka do oceny efektywności zabiegów technologicznych podwyższających wytrzymałość zmęczeniową elementów walcowych*. Patent Nr 115490, 1982.
- [4] Zielecki W., Perłowski R.: *Badania zmęczeniowe połączeń klejowych*. [w:] Technologie, urządzenia, metody. Praca zbiorowa pod red. M. Korzyńskiego. Rzeszów: Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, 2007.
- [5] Żarski T.: *Wpływ kulkowania na wybrane właściwości elementów konstrukcyjnych ze stopu GA8*. Praca doktorska. Politechnika Rzeszowska, 2008.