

Radek N.,***Pietraszek J. ***** Politechnika Świętokrzyska
Kielce, Polska** Politechnika Krakowska,
Kraków, Polska**MODEL MATEMATYCZNY OPISUJĄCY
OBRÓBKĘ LASEROWĄ POWŁOK
MOLIBDENOWYCH NANOSZONYCH
ELEKTROISKROWO****1. Wstęp**

Proces obróbki laserowej powłok otrzymywanych różnymi technologiami ma złożony charakter, w związku z czym nie jest możliwe wiarygodne prognozowanie jego efektów w oparciu tylko o modelowanie teoretyczne. Znacznie korzystniejsze rezultaty daje prognozowanie na podstawie modeli matematycznych opartych na wynikach planowanego eksperymentu [1 ÷ 2]. Modele matematyczne obiektu badań wykonuje się w celu opisu danego zjawiska za pomocą funkcji obiektu badań.

W literaturze szeroko jest opisane nagrzewanie materiałów za pomocą wiązki laserowej. W pracach [3÷6] naukowcy zaproponowali wiele różnych modeli zmierzających do możliwie najdokładniejszego opisanie cyklu laserowego nagrzewania i następującego po nim gwałtownego chłodzenia. Modele te uwzględniają zmienny rozkład energii w wiązce, jej kształt, czas, sposób oddziaływania na materiał i opisują kompleksowo cykl cieplny podczas naświetlania laserowego. Natomiast brak jest w modelach uwzględnienia takich zjawisk fizycznych, jak: krzepnięcie materiału i skurcz z nim związany, tworzenie tlenków na powierzchni, parowanie materiału, powstanie plazmy oraz przemian fazowych występujących w czasie obróbki laserowej. Jest to związane ze skomplikowanym opisem matematycznym tych zjawisk i uzyskaniem satysfakcjonujących rozwiązań w konkretnych przypadkach.

Większość obliczeń w modelach matematycznych opisujących proces obróbki laserowej dotyczy określenia rozkładu pól temperatur w nagrzewanym materiale (na danej głębokości), szybkości nagrzewania i chłodzenia oraz zasięgu zmian strukturalnych. Wartości te wyprowadza się z równania różniczkowego, nieustalonego przewodzenia ciepła zwanego równaniem Fouriera - Kirchhoffa.

Otrzymanie rozwiązania tego równania w postaci analitycznej jest możliwe przy szczególnych założeniach. Rozwiązanie tego równania pozwala w sposób teoretyczny na bezpośrednie określenie rozmiarów strefy wpływu ciepła oraz rozkładu pól temperatur w przyjętym materiale modelowym podczas cyklu nagrzewania wiązką laserową.

Badania eksperymentalne weryfikujące modele teoretyczne są zawodne, ze względu na występowanie bardzo dużych prędkości procesu i wysokich temperatur. W przypadku badań doświadczalnych obserwuje się skutki procesów zachodzących w trakcie obróbki i na ich podstawie wyciąga się wnioski o zjawiskach, które odgrywają dominującą rolę podczas topienia wiązką laserową. Tymi skutkami są między innymi zmiany mikrotwardości, głębokość strefy przetopu powłoki oraz struktura geometryczna powierzchni określana głównie parametrami mikrogeometrii.

Dotychczas brak jest zweryfikowanego doświadczalnie modelu umożliwiającego ocenę wpływu parametrów obróbki na wybrane właściwości eksploatacyjne po naświetlaniu laserowym wiązką impulsową z uwzględnieniem ruchu próbki. Poznanie wpływu warunków obróbki jednocześnie na wybrane właściwości (mikrogeometria, mikrotwardość oraz strefa przetopu powłoki) pozwoli na ocenę celowości stosowania tej obróbki w praktyce. Z tych względów podjęto badania nad wyznaczeniem statystycznych zależności między podstawowymi parametrami obróbki a jej efektami.

2. Opis eksperymentu

Badania wpływu obróbki laserowej na właściwości eksploatacyjnych warstw powierzchniowych z racji konieczności uwzględnienia dużej liczby czynników są bardzo pracochłonne, z tego względu badania te przeprowadzi się w oparciu o teorię eksperymentu, która umożliwi minimalizację liczby doświadczeń [7÷8]. Wybór programu badań dokonano w oparciu o metody współczesnej teorii eksperymentu. Do komputerowego wspomaganie planowania i analizy doświadczeń wykorzystano profesjonalny program Statistica 6.0. Program ten przeznaczony jest do planowania i analizy wyników badań wykonywanych przy użyciu najczęściej stosowanych planów statystycznych zdeterminowanych oraz planów definiowanych indywidualnie.

W badaniach przeprowadzono eksperyment planowany w oparciu o program statystyczny, zdeterminowany, wieloczynnikowy, rotabilny z powtórzeniami PS/DS- λ . W oparciu o badania wstępne i wyznaczony obszar zmienności parametrów obróbki, określono przedziały zmienności wielkości wejściowych, dla których przyjęto oznaczenia:

$$x_k; k = 1, 2, \dots, i, x_k \in [x_{k \min}, x_{k \max}]$$

gdzie x_k – wielkość wejściowa, i – liczba wielkości wejściowych, $i = 2$.

Przyjęto pięciopoziomowy program badań i przedział normowania $[-\alpha, \alpha]$; $\alpha = 1,414$, odpowiadający ramionom gwiazdnym planu $PS/DS-\lambda$ oraz następujące oznaczenia wielkości kodowych zmiennych niezależnych:

$$x_k \equiv X_k \equiv Xk; \quad x_k \equiv Xk \in [-\alpha, \alpha]$$

Obliczono odpowiadające im wartości parametrów wejściowych dla poszczególnych układów czynników według następujących zależności:

$$x_k = \exp \left[\frac{\ln x_{k \min} + \ln x_{k \max}}{2} + \frac{\ln x_{k \max} - \ln x_{k \min}}{2\alpha} \alpha_k \right] \quad (1)$$

gdzie $\alpha_k = \{-1,414, -1, 0, 1, 1,414\}$ oznacza promień aktualnego ramienia przestrzeni badanej - wartość kodu. Macierz planowania eksperymentu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Macierz planowania eksperymentu PS/DS-1

| Nr. doświadczenia | Wartości kodowane | |
|-------------------|-------------------|---------|
| | x_1 | x_2 |
| n | | |
| 1 | - 1 | - 1 |
| 2 | + 1 | - 1 |
| 3 | - 1 | + 1 |
| 4 | + 1 | + 1 |
| 5 | - 1,414 | 0 |
| 6 | + 1,414 | 0 |
| 7 | 0 | - 1,414 |
| 8 | 0 | + 1,414 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 |

Parametry obróbki laserowej zostały tak dobrane, aby obejmowały cały zakres parametrów, przy których zachodzi proces przetapiania bez występowania parowania materiału, który mógłby zmienić mechanizm fizyczny procesu. Ze względu na niewielką grubość powłok elektroiskrowych ($8 \div 10 \mu\text{m}$), które poddano przetapianiu laserowemu, zakres zmienności parametrów był niewielki.

Przyjęte oznaczenia i wartości zmiennych niezależnych oraz przedziałów zmienności dla eksperymentu obróbki laserowej powłok Mo zamieszczono w tabeli 2.

Na podstawie literatury i prac własnych [9 - 12] przyjęto następujące zmienne niezależne:

- prędkość przesuwu próbki V ;
- moc wiązki laserowej P .

Tabela 2

Oznaczenia i wartości przedziałów zmienności parametrów obróbki

| i | Wielkości wejściowe | Jednostki | Oznaczenia zmiennych | Przedział zmienności | |
|---|------------------------|-----------|----------------------|----------------------|--------------|
| | | | | $x_{k \min}$ | $x_{k \max}$ |
| 1 | Moc, P | W | X_1 | 16 | 25 |
| 2 | Prędkość przesuwu, V | mm/min | X_2 | 208 | 300 |

Wartość zmiennych wejściowych eksperymentu obliczono według wzoru (1) dla przyjętych przedziałów zmienności parametrów wejściowych (P , V) dla obróbki laserowej powłok naniesionych elektroiskrowo z Mo na stal C45 (po hartowaniu) i przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Wartości zmiennych niezależnych dla powłoki Mo obrabianej laserowo

| | | | | | |
|-------|---------|-----|-----|-----|-------|
| | - 1,414 | - 1 | 0 | 1 | 1,414 |
| X_1 | 16 | 17 | 20 | 23 | 25 |
| X_2 | 208 | 220 | 250 | 285 | 300 |

3. Badania statystyczne

Ze względu na to, że eksperyment dotyczył sposobu obróbki, dla którego nie został opracowany dotychczas model matematyczny, a elementarne procesy fizyczne determinujące efekty obróbki są złożone, obliczenia powtórzone dwukrotnie (za drugim razem po eliminacji składników nieistotnych) w celu zwiększenia wiarygodności modelu statystycznego.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań eksperymentalnych obejmowała:

- aproksymację funkcji obiektu badań;
- statystyczną weryfikację adekwatności funkcji aproksymującej;
- statystyczną weryfikację istotności współczynników funkcji aproksymującej.

Z analizy procesu naświetlania laserowego wynika, że zależności wyrażające związki pomiędzy czynnikami badanymi i wynikowymi mogą być nieliniowe oraz, że mogą wystąpić interakcje, czyli zależności o typie funkcji uwikłanych. Brak modelu teoretycznego obiektu badań oraz istnienie niedoskonałego modelu fizycznego spowodowało, że dokonano niezależnych prób aproksymacji przy pomocy wielomianu drugiego stopnia ze składnikami liniowymi i interakcjami oraz funkcją potęgową, opisaną poniższym wzorem:

$$Y_n = e^{A_0} X_1^{A_1} X_2^{A_2} \dots X_i^{A_j}, \quad (2)$$

gdzie X_i – wielkości wejściowe;

n – liczba układów planu doświadczenia ($n = 13$);

i – liczba wielkości wejściowych;

j – liczba współczynników iloczynu potęgowego;

A_0, A_1, A_2 – współczynniki iloczynu potęgowego.

Wyniki wstępnych obliczeń wykazały, że najlepsze dopasowanie równań regresji do wyników eksperymentu umożliwił model wykładniczy, dlatego też obliczone równania regresji metodą regresji krokowej przedstawiono w tej postaci. Analizy dopasowania poszczególnych równań regresji do wyników eksperymentu dokonano na podstawie współczynnika korelacji wielowymiarowej R oraz na podstawie wartości funkcji t -Studenta i wartości funkcji F -Snedecora. Przyjęto poziom istotności $p = 0,05$. Jeśli zostanie spełniony warunek $p_{kr} \leq p$ wówczas możemy wnioskować o istotności funkcji regresji ($F_{kr} \leq F$) oraz o istotności danego czynnika w równaniu regresji ($t_{kr} \leq t$).

Korelację wyznaczono na podstawie wartości współczynnika korelacji przyjmując kryteria przedstawione w tabeli 4. W obliczeniach przyjęto następujące oznaczenia wielkości unormowanych:

$$x_1 = P, \quad x_2 = V$$

Tabela 4

Ocena korelacji i istotności [8]

| Współczynnik korelacji R | Korelacja | Zależność |
|----------------------------|---------------|-------------------------|
| poniżej 0,2 | słaba | prawie nic nie znacząca |
| 0,20 – 0,40 | niska | wyraźna lecz mała |
| 0,40 – 0,70 | umiarkowana | istotna |
| 0,70 – 0,90 | wysoka | znacząca |
| 0,90 – 100 | bardzo wysoka | bardzo pewna |

Wyniki badań powłoki Mo po obróbce laserowej przeprowadzone według eksperymentu planowanego przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Parametry wejściowe oraz wyjściowe dla eksperymentu planowanego próbek z powłokami Mo obrobionych laserem

| Lp. | Czynniki wejściowe | | Czynniki wyjściowe | | | | |
|----------|--------------------|------------------------------|--------------------|----------|----------|-----------|--------------------|
| | Moc, [W] | Prędkość skanowania [mm/min] | Ra, [μm] | Rv, [μm] | Rp, [μm] | SPP, [μm] | HV _{0,04} |
| | Kod | | | | | | |
| | x_1 | x_2 | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 |
| Wartości | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 17 | 220 | 12,04 | 25,48 | 30,34 | 23 | 1558 |
| 2 | 23 | 220 | 7,34 | 22,59 | 19,47 | 30 | 1082 |

Kontynuacja tabeli 5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----|-----|-------|-------|-------|----|------|
| 3 | 17 | 285 | 9,42 | 23,91 | 23,37 | 26 | 1145 |
| 4 | 23 | 285 | 8,16 | 21,51 | 31,6 | 25 | 1145 |
| 5 | 16 | 250 | 11,83 | 24,2 | 28,4 | 27 | 1369 |
| 6 | 25 | 250 | 9,79 | 29,34 | 32,26 | 29 | 1288 |
| 7 | 20 | 208 | 10,03 | 26,12 | 25,47 | 30 | 1145 |
| 8 | 20 | 300 | 9,64 | 27,14 | 24,83 | 45 | 1213 |
| 9 | 20 | 250 | 6,05 | 15,27 | 18,55 | 37 | 1369 |
| 10 | 20 | 250 | 5,89 | 14,86 | 17,49 | 40 | 1145 |
| 11 | 20 | 250 | 6,88 | 20,76 | 17,84 | 39 | 1369 |
| 12 | 20 | 250 | 6,62 | 18,24 | 16,8 | 40 | 1213 |
| 13 | 20 | 250 | 6,01 | 13,92 | 15,61 | 37 | 1369 |

3.1. Wpływ parametrów obróbki na strefę przetopu powłoki

Strefa przetopu powłoki w zależności od zastosowanych parametrów obróbki zmienia się od wartości 23 μm dla: $P = 17 \text{ W}$ i $V = 220 \text{ mm/min}$ do wartości 45 μm przy zastosowaniu: $P = 20 \text{ W}$ i $V = 300 \text{ mm/min}$. Średnia grubość SPP wyniosła $g_{sr} = 32,9 \mu\text{m}$. Z analizy wyników badań wynika, że zakres zmian głębokości przetopu jest stosunkowo duży (różnica między minimalną głębokością przetopu a maksymalną jest prawie dwukrotna). Należy się liczyć z faktem, że przy małych wartościach mocy proces przetopu powłoki nie występuje, a przy znacznych wartościach mocy rozpoczyna się parowanie materiału. Zmienia się wówczas mechanizm procesu i nie można go opisać tymi samymi równaniami.

Postać unormowana równania regresji dla strefy przetopu powłoki (bez składników nieistotnych) opisuje zależność:

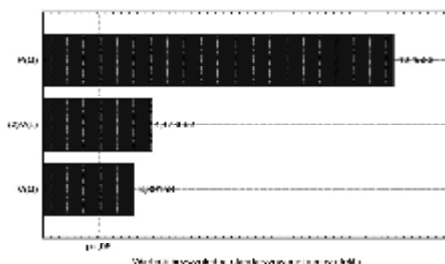
$$SPP = 38,6 - 6,99P^2 + 2,4V - 2,24 V^2. \quad (3)$$

Model rzeczywisty określający związek SPP z parametrami obróbki ma postać:

$$SPP = 38,6 - 6,99 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1\max}}{x_{1\min}}\right)} - \alpha \right]^2 + 2,4 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2\max}}{x_{2\min}}\right)} - \alpha \right] - 2,24 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2\max}}{x_{2\min}}\right)} - \alpha \right]^2. \quad (4)$$

Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej jest równa $R = 0,82$ (korelacja jest wysoka, a zależność znaczna).

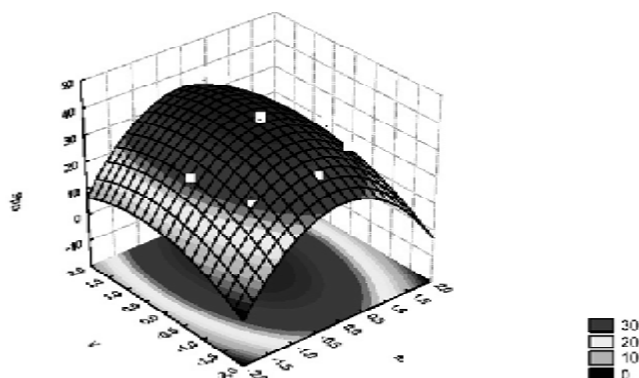
Na przykładowych wykresach (rys. 1÷3) przedstawiono prezentację graficzną wpływu obróbki laserowej na grubość SPP powłoki Mo naniesionej elektroiskrowo. Wykres Pareto (rys. 1) przedstawia istotne współczynniki regresji (słupki znajdują się po prawej stronie linii pionowej określającej poziom istotności $p = 0,05$, czyli $p_{kr} \leq p$).



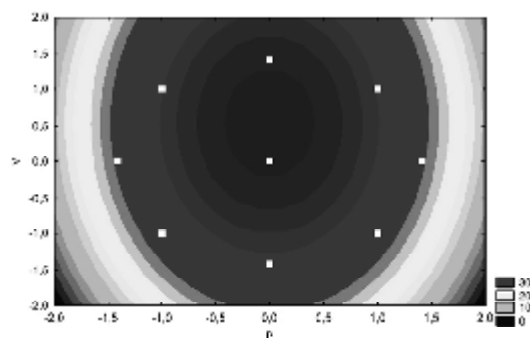
Rys. 1– Wykres istotności współczynników regresji (wykres Pareto) w równaniu regresji w postaci unormowanej

Z wykresów (rys. 2 i rys. 3) można wnioskować, że maksymalne głębokości SPP można uzyskać przy mocy promieniowania $P = 20$ W i prędkości przesuwu w zakresie $V = 250 \div 300$ mm/min. Na uzyskane wartości SPP w eksperymencie planowanym wpływ miała zarówno moc wiązki, jak i prędkość posuwu.

Ponieważ $p_{kr} \leq p$, to opracowany model matematyczny jest adekwatny.



Rys. 2 – Wpływ mocy promieniowania i prędkości posuwu na głębokość strefy przetopu (wykres 3D)



Rys. 3 – Wykres warstwiczny funkcji $SPP = F(P, V)$

3.2. Wpływ parametrów obróbki na mikrotwardość

Mikrotwardość TWP w zależności od zastosowanych parametrów obróbki zmienia się od wartości 1082 $HV_{0,04}$ dla: $P = 23$ W i $V = 220$ mm/min do wartości 1558 $HV_{0,04}$ przy zastosowaniu: $P = 17$ W i $V = 220$ mm/min. Średnia mikrotwardość TWP wyniosła 1262 $HV_{0,04}$. Analizując uzyskane wyniki mikrotwardości można zauważyć, że zakres zmian poszczególnych wartości mikrotwardości nie jest duży (max. mikrotwardość jest prawie 50 % większa od min. mikrotwardości). Maksymalną mikrotwardość (1558 $HV_{0,04}$) uzyskano przy najmniejszej grubości SPP ($g_{min} = 23 \mu m$).

Postać unormowana równania regresji dla mikrotwardości TWP (bez składników najbardziej nieistotnych) opisuje zależność:

$$HV = 1262,8 - 73,83P + 119PV \quad (5)$$

Model rzeczywisty określający związek HV z parametrami obróbki ma postać:

$$HV = 1262,8 - 73,83 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} - \alpha \right] + 119 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} - \alpha \right] \times$$

$$\times \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right)} - \alpha \right]. \quad (6)$$

Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej jest równa $R = 0,66$ (korelacja jest umiarkowana, a zależność istotna).

3.3. Wpływ parametrów obróbki na parametry wysokościowe mikrogeometrii

Obróbka laserowa powłok elektroiskrowych spowodowała wzrost parametrów wysokościowych mikrogeometrii (Ra , Rv , Rp) w stosunku do powłok bez tej obróbki. Wartości parametrów mikrogeometrii zawierają się w przedziale 5,89÷32,26 μm . Najniższą chropowatość $Ra_{\min} = 5,89 \mu\text{m}$ uzyskano przy parametrach: $P = 20 \text{ W}$ i $V = 250 \text{ mm/min}$, natomiast najwyższą chropowatość $Ra_{\max} = 12,04 \mu\text{m}$ uzyskano przy parametrach: $P = 17 \text{ W}$ i $V = 220 \text{ mm/min}$. Średnia wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu wyniosła $Ra_{\text{sr}} = 8,44 \mu\text{m}$. Natomiast średnia maksymalna głębokość wgłębienia profilu wynosiła $Rv_{\text{sr}} = 21,79 \mu\text{m}$, zaś średnią maksymalną wysokość wzniesienia profilu otrzymano na poziomie $Rp_{\text{sr}} = 23,23 \mu\text{m}$.

Najniższe chropowatości uzyskuje się przy małych mocach i dużych prędkościach przesuwu. Najwyższe chropowatości otrzymuje się przy dużych mocach i małych prędkościach przesuwu (duży czas oddziaływania wiązki na materiał). W przeprowadzonym eksperymencie na wartości uzyskanych parametrów wysokościowych mikrogeometrii wpływ miały nie tylko prędkość przesuwu próbki i moc wiązki laserowej, ale także inne czynniki np. otoczenie procesu, rodzaj lasera, właściwości fizyczne obrabianego materiału itd.

Postać unormowana równania regresji dla Ra (bez składników nieistotnych) opisuje zależność:

$$Ra = 6,29 - 1,11P + 1,99P^2 + 1,5V^2 + 0,86PV. \quad (7)$$

Model rzeczywisty określający związek Ra z parametrami obróbki ma postać:

$$Ra = 6,29 - 1,11 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1\max}}{x_{1\min}}\right)} - \alpha \right] + 1,99 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1\max}}{x_{1\min}}\right)} - \alpha \right]^2 + 1,5 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2\max}}{x_{2\min}}\right)} - \alpha \right]^2 + 0,86 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1\max}}{x_{1\min}}\right)} - \alpha \right] \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2\max}}{x_{2\min}}\right)} - \alpha \right]. \quad (8)$$

Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej jest równa $R = 0,95$ (korelacja jest bardzo wysoka, a zależność bardzo pewna).

Postać unormowana równania regresji dla Rv (bez składników nieistotnych) opisuje zależność:

$$Rv = 16,61 + 4,25P^2 + 4,18V^2. \quad (9)$$

Model rzeczywisty określający związek Rv z parametrami obróbki ma postać:

$$Rv = 16,61 + 4,25 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1\max}}{x_{1\min}}\right)} - \alpha \right]^2 + 4,18 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2\min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2\max}}{x_{2\min}}\right)} - \alpha \right]^2. \quad (10)$$

Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej jest równa $R = 0,86$ (korelacja jest wysoka, a zależność znaczna).

Postać unormowana równania regresji dla Rp (bez składników nieistotnych) opisuje zależność:

$$Rp = 17,26 + 6,15P^2 + 3,56V^2 + 4,77PV. \quad (11)$$

Model rzeczywisty określający związek Rp z parametrami obróbki ma postać:

$$Rp = 17,26 + 6,15 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} \right) - \alpha}{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} \right) - \alpha} \right]^2 + 3,56 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right)} \right) - \alpha}{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right)} \right) - \alpha} \right]^2 + 4,77 \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} \right) - \alpha}{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_{1min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right)} \right) - \alpha} \right] \cdot \left[2\alpha \cdot \frac{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right)} \right) - \alpha}{\left(\frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right)} \right) - \alpha} \right]. \quad (12)$$

Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej jest równa $R = 0,97$ (korelacja jest bardzo wysoka, a zależność bardzo pewna).

Wnioski

1. Skoncentrowanym strumieniem wiązki laserowej można skutecznie modyfikować stan warstwy wierzchniej powłok elektroiskrowych i wpływać w ten sposób na ich właściwości użytkowe.

2. Otrzymane na podstawie analizy wyników badań, przeprowadzonych według eksperymentu planowanego, zależności statystyczne (Ra , Rv , Rp , SPP w funkcji parametrów obróbki laserowej) są znaczne, o wysokiej korelacji oraz pozwalają one na prognozowanie efektów obróbki laserowej. Wyjątkiem jest otrzymanie nieadekwatnego modelu matematycznego (korelacja umiarkowana) opisującego zależność mikrotwardości ($HV_{0,04}$) z parametrami obróbki laserowej (tj. mocą wiązki - P i prędkością przesuwu próbki - V).

3. Określone zależności funkcyjne pomiędzy parametrami obróbki a wybranymi parametrami mikrogeometrii (Ra , Rv , Rp) oraz strefą przetopu powłoki (SPP) mikrotwardością ($HV_{0,04}$) pozwalają na dobór warunków obróbki laserowej (P , V) gwarantujących minimalną chropowatość przy zachowaniu dużej mikrotwardości głębokości przetopu.

4. W celu uzyskania najlepszych właściwości użytkowych warstw powierzchniowych należy przeprowadzić optymalizację parametrów obróbki laserowej (P , V). Za celowe wydaje się zastosowanie wiązki laserowej o przekroju prostokątnym, co gwarantuje równomierny rozkład temperatury w wiązce i może korzystnie wpływać na chropowatość powierzchni.

Literatura

1. Radziejewska J.: Wpływ stopowania laserowego na strukturę geometryczną i stan warstwy wierzchniej. Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1999.
2. Zielecki W.: Modyfikowanie właściwości technologicznych i użytkowych stali wiązką laserową i elektronową. Rozprawa doktorska, PRz, Rzeszów 1993.
3. Domański R.: Promieniowanie laserowe - oddziaływanie na ciała stałe. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1990.
4. Pakitny R., Winczek J., Jabreen H., Thiab S. M.: Pola temperatur w elementach stalowych poddanych działaniu ciągłego i impulsowego laserowego źródła ciepła. Obróbka Powierzchniowa - II Ogólnopolska Konferencja - Kule 1993.
5. Rybałko A. W., Griciuk D. T., Sahin O.: Elietroiskrowoie liegirowaniie oscillirujuszczim po powierzchni dietali obrabatywajuszczim eliektrodom. Elektronnaja Obrabotka Materialow 5 (2001).
6. Stelmach M.: Lazery v technologii. Energia, Moskwa 1975.
7. Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2002.
8. Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
9. Antoszewski B., Radek N.: Obróbka laserowa powłok tytanowych i molibdenowych nanoszonych elektroiskrowo. Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii, rozdział 3, Bydgoszcz 2003.
10. Radek N., Antoszewski B.: Laser treatment of electro-spark deposited coatings. Materials Engineering 4 (2005).
11. Radek N., Szalapko J.: Obróbka laserowa powłok molibdenowych nanoszonych obróbką elektroiskrową. Logistyka 2 (2010).
12. Zimny J.: Laserowa obróbka stali. Politechnika Częstochowska - Rozprawy - nr 67, Częstochowa 1999.

Надійшла 28.02.2011