

Katarzyna ANTOSZ¹

Rafał KLUZ²

Tomasz TRZEPIECIŃSKI³

Magdalena BUCIOR⁴

MODELOWANIE WPLYWU PARAMETRÓW OBRÓBKI NAGNIATANIEM NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI WAŁKÓW ZE STALI 42CRMO4

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu parametrów nagniatania ślizgowego na chropowatość powierzchni wałków wykonanych ze stali 42CrMo4. Proces nagniatania wykonano przy użyciu narzędzi z końcówką z polikrystalicznego diamentu. Przed nagniataniem próbki poddano toczeniu na tokarce narzędziowej. Badania prowadzono według planu Hartleya PS/DS-P:Ha3, który umożliwia zdefiniowanie równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia. Wykorzystano również modele sztucznej sieci neuronowej do przewidywania chropowatości powierzchni wałków po procesie nagniatania. Rozważane parametry wejściowe procesu obejmowały wartości nacisku, prędkości nagniatania i prędkości posuwu. We wszystkich analizowanych przypadkach nagniatania wartość chropowatości powierzchni określonej parametrem Ra uległa zmniejszeniu. Różnice między danymi eksperymentalnymi a modelem Hartleya nie przekraczały 24%. Najlepszą reprezentację modelu Hartleya uzyskano dla parametrów nagniatania: posuw $f = 0,32$ mm/obr, nacisk $P = 130$ N i prędkość nagniatania $v = 180$ obr/min. Perceptrony wielowarstwowe były najlepszymi predyktorami chropowatości powierzchni wałków. Przy współczynniku korelacji Pearsona R^2 powyżej 0,998 wartość średniego błędu bezwzględnego nie przekroczyła 0,005.

Słowa kluczowe: nagniatanie ślizgowe, plan Hartley'a, sztuczne sieci neuronowe, topografia powierzchni.

1. Wprowadzenie

Obróbka nagniataniem zapewnia wymagane wymiary oraz kształt elementów, ale nie jest zbyt korzystna z punktu widzenia zapewnienia stereometrycznej

¹ Katarzyna Antosz (autor do korespondencji); Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651452, e-mail: katarzyna.antosz@prz.edu.pl

² Rafał Kluz; Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

³ Tomasz Trzepieciński; Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Przeróbki Plastycznej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

⁴ Magdalena Bucior; Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

struktury powierzchni w końcowej fazie produkcji elementu [1]. Ze względu na małe wymiary końcówek narzędzi strefa odkształcenia plastycznego nagniatanych części jest bardzo mała. Proces nagniatania jest metodą obróbki precyzyjnej, która służy do poprawy właściwości mechanicznych, odporności na korozję, chropowatości powierzchni, odporności na zużycie oraz wytrzymałości zmęczeniowej [2]. Nagniatanie ślizgowe powoduje powstanie głębokiej warstwy utwardzonej w której wywołany zostaje stan naprężeń ściskających [3]. Ze względu na mały promień narzędzia nagniatanie ślizgowe charakteryzuje się występowaniem niewielkich sił, co umożliwia obróbkę części o małej sztywności [4]. Proces nagniatania pozwala na osiągnięcie takich korzyści jak [5]: wzrost twardości powierzchni, wzrost odporności zmęczeniowej, możliwość obróbki powierzchni o dużym promieniu naroża, możliwość obróbki powierzchni o małej wartości współczynnika tarcia, zdolność do wytworzenia wysokiej gładkości powierzchni, minimalne nagrzewanie się warstwy wierzchniej podczas obróbki, możliwość stosowania narzędzi dogniatających zamocowanych na tokarkach uniwersalnych, wysoką wydajność procesu, niskie zużycie energii procesu nagniatania.

W ostatnich latach badania wpływu parametrów procesu nagniatania na właściwości warstw wierzchniej zostały przeprowadzone przez wielu autorów z zastosowaniem różnorodnych technik badawczych. Korzyński i in. [6] przeprowadzili nagniatanie ślizgowe stali 42CrMo4 z cylindrycznym elementem ślizgowym wykonanym z polikrystalicznego diamentu. Warstwa wierzchnia po obróbce charakteryzowała się podwyższoną mikrotwardością oraz ściskającymi naprężeniami wewnętrznymi. Shiou i Cheng [7] zastosowali plan ortogonalny Taguchi L18 do analizy procesu nagniatania kulowego powierzchni formy ze stali narzędziowej NAK80. Dzięki zastosowaniu optymalnych parametrów nagniatania, chropowatość R_a powierzchni badanych części zmniejszyła się z około $1,0 \mu\text{m}$ do $0,020 \mu\text{m}$. Maximov i in. [8] przeanalizowali wpływ parametrów procesu nagniatania ślizgowego stali AISI316Ti na wartość naprężeń szczątkowych i odporność na zużycie ściernie obrobionej powierzchni. Większa prędkość nagniatania zwiększyła produktywność nagniatania, ale z drugiej strony prędkość ta zmniejszyła wartość naprężeń szczątkowych. El-Tayeb i in. [9] zastosowali proces nagniatania do obróbki powierzchni wałków stopu aluminium 6061. Stwierdzono, że odpowiednia prędkość nagniatania może poprawić chropowatość powierzchni nawet o 40%. Nagniatanie pozwoliło na prawie 46% zmniejszenie współczynnika tarcia w stosunku do powierzchni nieobrobionej.

Badania wpływu parametrów procesu nagniatania na jakość powierzchni obrobionej za pomocą sztucznych sieci neuronowych (SSN), które przy odpowiednim doborze struktury są zdolne do modelowania dowolnych nieliniowych zależności pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi są ograniczone. W ostatnich latach przeprowadzono kilka ogólnikowych badań [10], dlatego proces zastosowania SSN do analizy procesu nagniatania wymaga doskonalenia. W niniejszej pracy zbadano wpływ procesu nagniatania ślizgowego na topografię powierzchni wałków ze stali 42CrMo4. Proces nagniatania wykonano przy użyciu

narzędzi z końcówką z polikrystalicznego diamentu. Badania przeprowadzono bazując na planie Hartleya PS/DS-P:Ha3, który umożliwia zdefiniowanie równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia. Perceptron wielowarstwowy zastosowano do zbadania korelacji między parametrami obróbki a chropowatością powierzchni próbek.

2. Badania eksperymentalne

Materiałem badawczym były wałki o średnicy 50 mm wykonane ze stali stopowej 42CrMo4 o twardości 21-22 HRC. Stal 42CrMo4 jest powszechnie stosowaną stalą chromowo-molibdenową wykazującą wysoką hartowność, która jest zwykle używana po hartowaniu i odpuszczeniu. Typowym zastosowaniem stali 42CrMo4 są części maszyn, które wymagają dużej plastyczności rdzenia i są poddawane obciążeniom zmiennym. Przykładami zastosowań tej stali są wały korbowe, mocno obciążone śruby, koła zębate, osie oraz tarcze. Podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne stali 42CrMo4 w postaci prętów

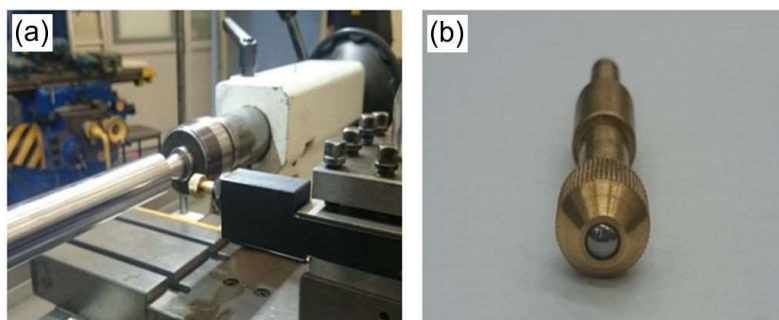
Średnica D, mm	Granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Wydłużenie A5, %	Twardość HB
40-95	650	900-1100	12	265-325

Wałki zostały poddane toczeniu w taki sposób, aby uzyskać chropowatość powierzchni określoną średnią arytmetyczną rzędnych profilu $R_a = 2,6 \mu\text{m}$. Nagniatanie ślizgowe wykonano na tokarce uniwersalnej LZ 360, która jest przystosowana do precyzyjnej produkcji części średniej wielkości zgodnie z klasą dokładności DIN8605. Proces nagniatania prowadzono na stanowisku badawczym (rys. 1a) za pomocą nagniataka DB-3 (rys. 1b). W badaniach wykorzystano końcówkę narzędzia z diamentu polikrystalicznego oraz węgla spiekane.

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone zgodnie ze statycznym planem Hartleya. Jest to trójpoziomowy plan eksperymentalny, który wymaga ustalenia czynników wejściowych na trzech jednakowo rozłożonych poziomach. Rozważane parametry wejściowe procesu obejmują zastosowany nacisk, prędkość nagniatania oraz prędkość posuwu. Macierzowy plan badawczy przedstawiono w tabeli 2. Pomiary chropowatości powierzchni próbek przeprowadzono za pomocą profilometru Taylor-Hobson Surtronic 2 zgodnie z normą EN ISO 4287:1999. Średnia arytmetyczna rzędnych profilu R_a jako główny parametr chropowatości powierzchni została wybrana do scharakteryzowania właściwości trybologicznych nagniatanych powierzchni. W wyniku eksperymentów przeprowadzonych zgodnie z planem Hartley'a otrzymano równanie regresji procesu nagniatania ślizgowego jako:

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (1)$$

gdzie b_k , b_{kk} , b_{kj} są współczynnikami w równaniu regresji, x_k oraz x_j są zmiennymi wejściowymi.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego (a) oraz narzędzia (b)

Tabela 2. Macierzowy plan badawczy

Numer eksperymentu	Posuw f , mm/obr.	Nacisk P , N	Prędkość nagniatania v , obr/min.
1	0,094	130	360
2	0,094	30	180
3	0,032	130	180
4	0,032	30	360
5	0,094	80	270
6	0,032	80	270
7	0,063	130	270
8	0,063	30	270
9	0,063	80	360
10	0,063	80	180
11	0,063	80	270

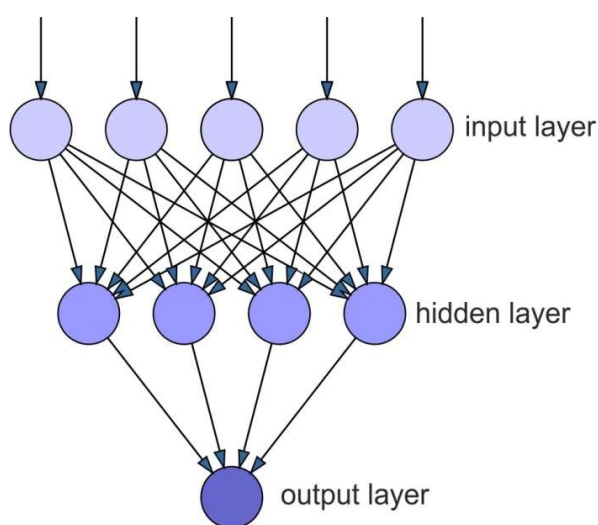
2. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych

Sztuczne sieci neuronowe (SSN) są algorytmami do analizy liniowych i nieliniowych modeli złożonych problemów regresyjnych, a także do nadzoru procesów obróbkowych w czasie rzeczywistym. Liczba neuronów w warstwach wejściowej i wyjściowej jest zdeterminowana liczbą parametrów prezentowanych sieci na wejściu oraz liczbą parametrów objaśnianych na wyjściu. Sieć wielowarstwowa (perceptron) z odpowiednią liczbą warstw ukrytych i neuronów w tych warstwach jest zdolny do analizy i predykcji dowolnej funkcji nieliniowej.

Zastosowano funkcję tangensa hiperbolicznego do obliczenia wartości wyjściowej neuronów:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2)$$

Jako parametry wejściowe do sieci wytypowano wartości posuwu, nacisku oraz prędkości nagniatania. Natomiast na wyjściu sieci oczekiwano wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu *Ra* powierzchni wałków po nagniataniu. Dóbr struktury sieci neuronowej (rys. 2) zależy od złożoności problemu, w postaci liczby zmiennych objaśniających i objaśnianych oraz wielkości zbioru uczącego. Ze względu na brak jednoznacznych wytycznych do budowy architektury sieci neuronowej do określonego problemu w artykule przetestowano zdolności regresyjne trzech sieci neuronowych o jednej warstwie ukrytej oraz różnej liczbie neuronów w tych warstwie.



Rys. 2. Architektura sieci neuronowej wielowarstwowej

Procesu uczenia sieci przeprowadzono za pomocą trzech algorytmów: algorytmu propagacji wstecznej (ang. *back propagation* BP), powszechnie stosowanym algorytmem uczenia sieci wielowarstwowych. W wyniku procesu uczenia SSN nabywa przewidywania sygnałów wyjściowych na podstawie sekwencji sygnałów wejściowych i odpowiadających im sygnałów wyjściowych. Jakość sieci oceniano na podstawie dwóch parametrów [10, 11]:

- a) błędu średniokwadratowego RMSE (ang. round mean square error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_j - p_j|^2} \quad (3)$$

b) współczynnika determinacji R^2 (ang. coefficient of determination):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (a_j - p_j)^2}{\sum_{i=1}^n (p_j)^2} \right) \quad (4)$$

gdzie p jest wartością przewidywaną, a jest wartością aktualną a n jest liczbą zestawów uczących.

Dane wejściowe zostały znormalizowane za pomocą funkcji min-max, która za pomocą funkcji liniowej przekształca wartości danych pierwotnych do nowego przedziału ($N_{min} = -1$, $N_{max} = 1$):

$$D' = \frac{(D - min)}{max - min} (N_{max} - N_{min}) + N_{min} \quad (5)$$

gdzie (min , max) jest przedziałem, w którym zwarte są dane pierwotne, D – wartość zmiennej poddawanej normalizacji.

3. Zastosowanie planu Hartley'a PS/DS-P:Ha3

Proces nagniatania ślizgowego za pomocą narzędzia diamentowego doprowadził do znacznego zmniejszenia chropowatości powierzchni wałków (tabela 3). Największą redukcję parametru Ra stwierdzono po nagniataniu z posuwem $f = 0,032$ mm/obr., naciskiem $P = 130$ N i prędkością nagniatania $v = 180$ obr/min. Największą chropowatość powierzchni wałków zaobserwowano po nagniataniu ślizgowym z posuwem $f = 0,063$ mm/obr., naciskiem $P = 30$ N oraz prędkością nagniatania $v = 270$ obr/min (tabela 2). Po nagniataniu powierzchni narzędziem z węgla wolframu można stwierdzić, że najlepszą chropowatość uzyskano w eksperymencie nr 3, a najgorszą w eksperymencie nr 2 (tabela 4). Natomiast w każdym eksperymencie chropowatość Ra uległa zmniejszeniu. Różnica między wartościami parametru Ra mierzonymi na dwóch powierzchniach wałków nagniatanych analizowanymi narzędziami była bardzo zbliżona. Potwierdza to wysoką powtarzalność procesu obróbki. Adekwatność otrzymanego równania regresji dla nagniatania narzędziem diamentowym:

$$Ra = -0.42042 - 22.915 \cdot f + 0.00157 \cdot P + 0.00882 \cdot v - 120.83 \cdot f^2 - 0.00006 \cdot P^2 - 0.133 \cdot f \cdot v + 0.029 \cdot P \cdot f \quad (6)$$

została zweryfikowana na podstawie testu adekwatności wariancji Fisher-Snedecor'a:

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{i=1}^{11} (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1} \quad (7)$$

oraz krytycznej wartości zmiennej losowej F_{kr} :

$$F_{kr} = F_{(\alpha; f_1; f_2)} = F_{(0.05; 7; 11)} = 3.0123 \quad (8)$$

gdzie y_i to średnia wartość współczynnika procesu w i -tym eksperymencie, r to liczba powtórzeń, k to liczba czynników w równaniu regresji, a n to liczba eksperymentów.

Wartości współczynników w równaniu regresji oraz ich wartości krytyczne przedstawiono w tabeli 6.

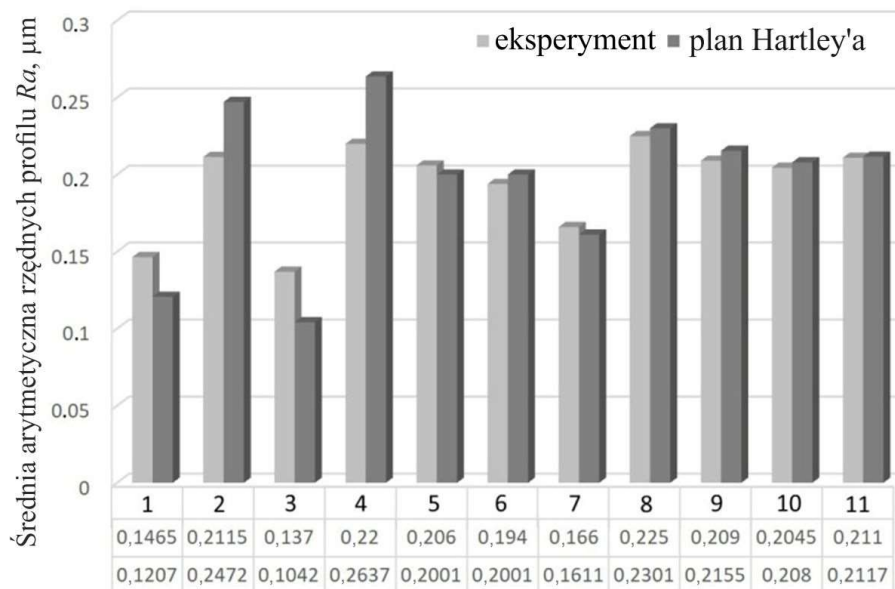
Tabela 3. Średnia arytmetyczna rzędnych profilu Ra nagniatanych wałków za pomocą narzędzia diamentowego

Numer eksperymentu	Średnia arytmetyczna rzędnych profilu Ra			Wariancja błędów S_{ad}^2
	pomiar 1	pomiar 2	średnia	
1	0,145	0,148	0,146	0,000045
2	0,216	0,207	0,211	0,000405
3	0,143	0,131	0,137	0,00072
4	0,217	0,223	0,220	0,00018
5	0,205	0,207	0,206	0,00002
6	0,191	0,197	0,194	0,00018
7	0,169	0,163	0,166	0,00018
8	0,226	0,224	0,225	0,00002
9	0,216	0,202	0,209	0,00098
10	0,204	0,205	0,204	0,000005
11	0,208	0,214	0,211	0,00018

Tabela 4. Istotność parametrów w równaniu regresji opisującym nagniatanie za pomocą narzędzia diamentowego

Współczynnik	Wartość	Zależność	Wartość krytyczna	Znaczenie
b_0	2,117	>	0,0442	istotny
b_1	0,0217	<	0,03271	nieistotny
b_2	-0,345	>	0,03271	istotny
b_3	0,0375	>	0,03271	istotny
b_{11}	-0,116118	>	0,051492	istotny
b_{22}	-0,1611253	>	0,051492	istotny
b_{33}	-0,04862	<	0,051492	nieistotny
b_{12}	0,045	>	0,04006	istotny
b_{13}	-0,37	>	0,04006	istotny
b_{23}	0,0025	<	0,04006	nieistotny

Wyniki planu Hartleya pokazują, że uzyskany czynnik losowy F nie przekraczał wartości krytycznej F_{kr} dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Dlatego równanie regresji (6) można uznać za adekwatne. Funkcja Hartleya osiąga minimum dla wartości $Ra = 0,1042 \mu\text{m}$ (rys. 3), co odpowiada eksperymentalnym parametrom nagniatania zapewniającym najniższą wartość chropowatości powierzchni wałka. W eksperymentach numer 1-4 błąd względny waha się w granicach 18-24%, podczas gdy w pozostałych testach wartość błędu nie przekracza 3%.



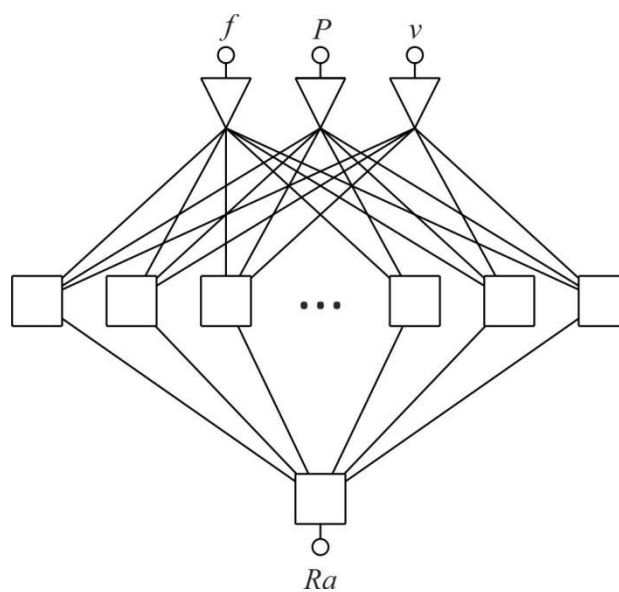
Rys. 3. Porównanie wartości parametru chropowatości wałków otrzymanych eksperymentalnie oraz z użyciem planu Hartley'a

4. Wyniki modelowania neuronowego

Ze względu na stosunkowo małą liczbę zestawów uczących do modelowania wpływu parametrów nagniatania narzędziem diamentowym na chropowatość powierzchni wałków do analizy możliwości predykcyjnych wybrano sieci z jedną warstwą ukrytą oraz różną liczbą neuronów w tej warstwie tj. 5, 10 oraz 15. Przyjęto na tym etapie założenie, że jeżeli sieci o tej strukturze nie przyniosą oczekiwanych rezultatów ich struktura zostanie rozbudowana. Zbyt rozbudowana struktura sieci neuronowej do modelowania zadanego problemu może doprowadzić do jej przeuczenia, a więc utraty zdolności do generalizacji danych.

Ze względu na bardzo dużą skłonność algorytmu wstecznej propagacji błędów do przeuczenia sieci zatrzymano działanie algorytmu uczenia w chwili braku dalszego zmniejszania się błędów sieci. Wartości błędów RMSE po zakończeniu

procesu uczenia dla sieci o strukturach 3:3-5-1:1, 3:3-10-1:1 oraz 3:3-15-1:1 (rys. 4) wyniosły odpowiednio 0,03949, 0,0369 oraz 0,01219. Zwiększenie ilości neuronów w warstwie ukrytej do 15 spowodowało prawie trzykrotne zmniejszenie wartości błędu sieci 3:3-15-1:1 w stosunku do sieci 3:3-5-1:1 oraz 3:3-10-1:1. Na rysunku 5 przedstawiono wartości wybranych parametrów regresyjnych SSN. Sieć 3:3-15-1:1 charakteryzowała się również najmniejszą wartością iloczynu odchylenia standardowego (S.D. ratio) oraz największą wartością współczynnika determinacji R^2 (rys. 6). Porównanie wartości parametru Ra otrzymanego eksperymentalnie z wartości mai przewidywanymi przez sieci neuronowe przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 4. Architektura sieci 3:3-15-1:1.

a)		b)		c)	
	Tr. RA		Tr. RA		Tr. RA
Data Mean	0.2882231	Data Mean	0.2882231	Data Mean	0.2882231
Data S.D.	0.6818044	Data S.D.	0.6818044	Data S.D.	0.6818044
Error Mean	0.005656	Error Mean	-0.002605	Error Mean	0.0005131
Error S.D.	0.04099	Error S.D.	0.03866	Error S.D.	0.01277
Abs E. Mean	0.03265	Abs E. Mean	0.03298	Abs E. Mean	0.01009
S.D. Ratio	0.06013	S.D. Ratio	0.0567	S.D. Ratio	0.01873
Correlation	0.998219	Correlation	0.9984285	Correlation	0.9998283

Rys. 5. Wybrane statystyki regresyjne sieci (a) 3:3-5-1:1, (b) 3:3-10-1:1 oraz (c) 3:3-15-1:1

Tabela 5. Porównanie wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu Ra otrzymane eksperymentalnie podczas nagniatania narzędziem diamentowym oraz wyników modelu neuronowego sieci 3:3-15-1:1

Numer pomiaru	Ra , μm (eksperyment)	Ra , μm (SSN)			Błąd, μm		
		3:3:-5-1:1	3:3:-10-1:1	3:3:-15-1:1	3:3:-5-1:1	3:3:-10-1:1	3:3:-15-1:1
1	0,146	0,147974	0,148343	0,147089	-0,00197	-0,00234	-0,00109
2	0,211	0,213049	0,212012	0,211856	-0,00205	-0,00101	-0,00086
3	0,137	0,13751	0,138989	0,137651	-0,00051	-0,00199	-0,00065
4	0,22	0,221991	0,220463	0,220134	-0,00199	-0,00046	-0,00013
5	0,206	0,204216	0,204285	0,20585	0,001784	0,001715	0,00015
6	0,194	0,19341	0,191526	0,193785	0,00059	0,002474	0,000215
7	0,166	0,165626	0,163611	0,165002	0,000374	0,002389	0,000999
8	0,225	0,221527	0,225644	0,224991	0,003473	-0,00064	8,53E-06
9	0,209	0,209985	0,208425	0,208393	-0,00099	0,000574	0,000607
10	0,204	0,207262	0,203041	0,204161	-0,00326	0,000959	-0,00016
11	0,211	0,210688	0,212901	0,211837	0,000312	-0,0019	-0,00084

5. Wnioski

W artykule określono wpływ parametrów nagniatania ślizgowego wałków ze stali 42CrMo4 na chropowatość ich powierzchni przy użyciu planu Hartleya i sztucznych sieci neuronowych. Chociaż zbiór uczący zawierał tylko 11 danych pomiarowych, sieci neuronowe trenowane za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędu zapewniły możliwość przewidywania wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu wałków na poziomie R^2 co najmniej 0,998. Wartości błędów przewidywania chropowatości powierzchni wałków za pomocą sieci 3:3-15-1:1 charakteryzującej się największą wartością współczynnika determinacji R^2 są mniejsze niż błędy wynikające z wykorzystania planu Hartleya.

W przyszłych badaniach należy przeprowadzić badania nagniatania ślizgowego wałków w szerokim zakresie zmian parametrów obróbkowych. Kolejnym zadaniem będzie uwzględnienie na wejściu sieci neuronowej wpływu chropowatości narzędzia i warunków smarowania na chropowatość powierzchni wałków. Poprzez zwiększenie zakresu wartości parametrów wejściowych i oraz liczby zestawów uczących możliwe będzie zdobycie zdolności prognozowania sieci poza zakres danych, które użyto w procesie jej trenowania.

Bibliografia

- [1] Korzynski M., Zarski T.: Slide diamond burnishing influence on of surface stereometric structure of an AZ91 alloy. *Surface and Coating Technology* 2016; 307: 590–595.
- [2] Kumar K., Prasad, K.E.: Application of roller burnishing process for final machining of cylindrical surface. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 2016; 12(1): 1–7.

- [3] Chomienne V., Valirgue F., Rech J., Vierdu C.: Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2016; 13: 90–96.
- [4] Zaleski K., Skoczyła A.: Effect of slide burnishing on the surface layer and fatigue life of titanium alloy parts. *Advances in Materials Science* 2019; 19(4): 35–45.
- [5] Labuda W., Starosta R., Charchalis A.: The analysis of the influence of the burnishing process on corrosion properties of steel applied to sea water pump shafts. *Journal of Kones Powertrain and Transport* 2011; 18(4): 221–228.
- [6] Korzyński M., Lubas J., Świrad S., Dudek K.: Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2011; 211(1): 84–94.
- [7] Shiou F.J., Cheng C.H.: Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes. *Journal of Materials Processing Technology* 2008; 201(1–3): 554–559.
- [8] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Ganev N., Amudjev I.M., Dunchev V.P.: Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2018; 40: 194.
- [9] El-Tayeb N.S.M, Low K.O., Brevern P.V.: Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of aluminium 6061. *Journal of Materials Processing Technology* 2007; 186: 272–278.
- [10] Cagan S.C., Aci M., Buldum B.B., Aci C.: Artificial neural networks in mechanical surface enhancement technique for the prediction of surface roughness and microhardness of magnesium alloy. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 2019; 67(4): 729–739.
- [11] Nalbant M. Gökkaya H., Toktaş I., Sur G.: The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 2009; 25(1): 211–223.

<http://dx.doi.org/10.7862/rm.2021.02>