

Tomasz Trzepieciński¹, Anna Bazan²
Politechnika Rzeszowska, ¹ Katedra Przeróbki Plastycznej, ²
Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji,
e-mail: ¹ tomtrz@prz.edu.pl, ² abazan@prz.edu.pl

ANALIZA WPŁYWU TARCIA NA ZMIANĘ TOPOGRAFII POWIERZCHNI WYTŁACZANYCH BLACH

Streszczenie – W pracy przedstawiono analizę topograficzną i tribologiczną powierzchni blach stalowych badanych w próbie przeciągania blachy stosowanej do opisu zjawiska tarcia blach w procesach kształtowania blach. Wykonano analizę topograficzną badanych próbek za pomocą systemu pomiarowego InfiniteFocus firmy Alicona. Jako dane wejściowe do budowy modelu matematycznego tarcia przyjęto wyniki przeprowadzonych testów przeciągania paska blachy mających na celu wyznaczenie wpływu wartości parametrów chropowatości powierzchni blachy, wartości parametrów chropowatości powierzchni przeciwpróbek oraz siły nacisku na wartość współczynnika tarcia.

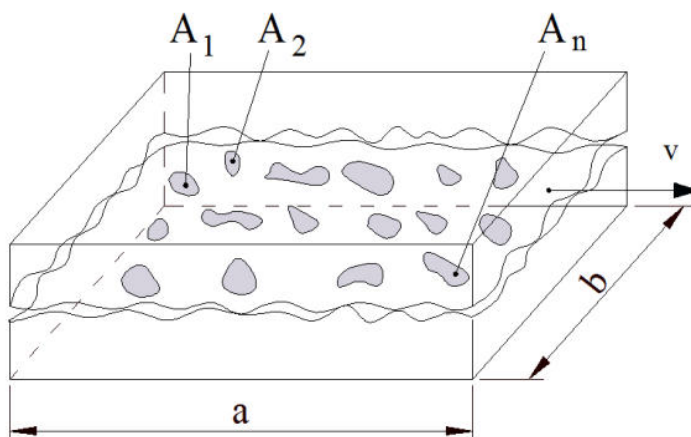
1 Informacje wstępne

Tarcie w procesach kształtowania blach jest złożoną funkcją właściwości materiału, parametrów procesu oraz warunków kontaktu [1]. Siły tarcia występujące na powierzchni kontaktu metali wywierają znaczący wpływ na przebieg procesu kształtowania blach. W przypadku wytłaczania przedmiotów o złożonej geometrii lokalny stan naprężeń i odkształceń zmienia się w trakcie procesu kształtowania. W większości procesów kształtowania blach występowanie oporów tarcia jest zjawiskiem niepożądanym i powoduje [1]: nierównomierność odkształceń, wzrost naprężeń promieniowych i siły wytłaczania, zmniejszenie trwałości narzędzi oraz jakości wyrobu. Istnieje szereg prób tarcia modelujących warunki tarcia w wybranych miejscach wytłoczki [2-4].

W procesie tłoczenia próbę przeciągania paska blachy przypisuje się do modelowania zjawiska tarcia między stemplem i ścianką wytłoczki. Próba ta polega na przeciąganiu paska blachy umieszczonego między przeciwpróbkami, najczęściej o kształcie walcowym lub płaskim. Parametrami wpływającymi na zmianę oporów tarcia jest siła docisku

przeciwpróbek, warunków smarowania, prędkości przeciągania próbki a także stosowanie blach o różnej topografii powierzchni.

Podczas kształtowania blach sztywnymi narzędziami znaczący wpływ na wielkość oporów tarcia wywiera makro- i mikrogeometria styku par trących. Podczas kształtowania blach początkowo występuje niewielkie pole rzeczywistego styku. Powierzchnie przylegają do siebie tylko wierzchołkami nierówności, które następnie, pod wpływem działania sił nacisku, zostają odkształcone i plastycznie aż powstała w ten sposób powierzchnia styku będąca wystarczająca do przeniesienia obciążenia. Następuje ścinanie i odkształcanie sprężysto-plastyczne nierówności powierzchni, przez co zwiększa się powierzchnia rzeczywistego styku. To z kolei prowadzi do wzrostu naprężeń stycznych podczas przemieszczania się po sobie współpracujących powierzchni. Wielkość oporów tarcia zależy nie od nominalnego, lecz od rzeczywistego pola powierzchni styku (rys. 1).



Rys. 1. Pole powierzchni styku

Rzeczywista powierzchnia kontaktu równa

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1)$$

jest mniejsza od nominalnej powierzchni kontaktu równej $A_n = a \cdot b$. Rzeczywista powierzchnia kontaktu między ciałami będącymi w kontakcie jest proporcjonalna do siły nacisku F_N :

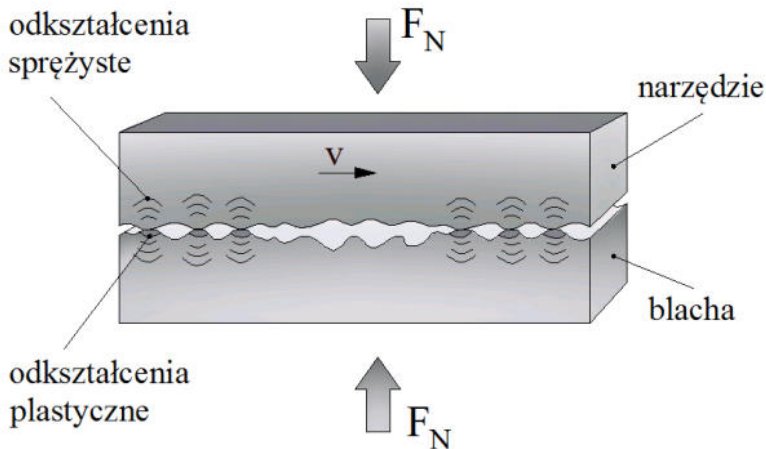
$$A_r = C_r \cdot F_N \quad (2)$$

gdzie C_r – współczynnik proporcjonalności zależny m.in. od rodzaju materiału, chropowatości powierzchni, warunków smarowania, typu obciążenia (statyczne lub dynamiczne). Poza metodami stochastycznymi

pozwalającymi na oszacowanie wartości współczynnika C_r , nie opracowano dotychczas metody pozwalającej na dokładne wyznaczenie wartości tego współczynnika.

Dwa główne czynniki wpływają na wzrost rzeczywistej powierzchni kontaktu w procesach przeróbki plastycznej na zimno to:

- makroskopowe odkształcenia plastyczne analizowanego elementu,
- naprężenia kontaktowe powodujące wzajemne oddziaływanie pól deformacji wierzchołków nierówności (rys. 2).



Rys. 2. Oddziaływanie trących ciał

Kształt powierzchni styku wpływa na wielkość nominalnego pola powierzchni styku i co jest z tym związane na wielkość nacisków jednostkowych. We wcześniejszych badaniach [5] stwierdzono, że zależność między wartością współczynnika tarcia a naciskiem normalnym jest nieliniowa. Mikrogeometria styku scharakteryzowana za pomocą parametrów chropowatości (2D, 3D) ma istotny wpływ na charakter zjawisk trybologicznych w strefie kontaktu, a także na wielkość siły tarcia. Wielkość parametrów 2D chropowatości zależy od kierunku ich pomiaru względem kierunku walcowania. Opory tarcia mierzone wzdłuż kierunku walcowania są mniejsze aniżeli mierzone w poprzek do kierunku walcowania [6].

2 Materiał

Badaniom poddano blachy stalowe zimnowalcowane stosowane w przemyśle motoryzacyjnym gatunku 08J kategorii tłoczności SB, BSB oraz USB wycięte z arkusza blachy wzdłuż kierunku walcowania. Wartość parametrów mechanicznych (Tabela 1) wyznaczono w próbie jednoosiowego rozciągania, natomiast wartość parametrów chropowatości

(Tabela 2) określono za pomocą systemu pomiarowego Subtronic 3+ firmy Rank Taylor-Hobson.

Tabela. 1. Właściwości mechaniczne badanych blach

Kategoria tłoczności	R _{eL} MPa	R _m MPa	A ₅₀ %	C MPa	n
SB	162	310	0,42	554	0,21
BSB	151	282	0,39	494	0,221
USB	153	287	0,44	487	0,221

gdzie: R_{eL} – dolna granica plastyczności, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, A₅₀ – wydłużenie względne, C – współczynnika umocnienia, n – wykładnik umocnienia.

Tabela. 2. Parametry chropowatości badanych blach

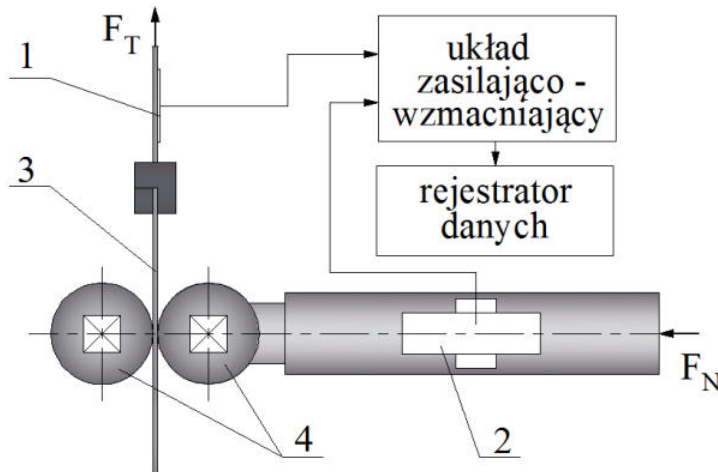
Kategoria tłoczności	S _a μm	S _q μm	S _{dq} μm/μm	S _{bi}	S _{vi}
SB	1,54	1,89	0,103	0,913	1,56
BSB	1,79	2,21	0,133	0,246	1,58
USB	1,64	1,98	0,126	0,658	1,63

gdzie; S_a - średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, S_q - średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni, S_{dq} - średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni, wskaźnik powierzchni nośnej (wskaźnik nośności), S_{vi} - wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia.

3 Badania eksperymentalne

Próby tarcia przeprowadzono metodą przeciągania pasa blachy umieszczonego między dwoma walcowymi przeciwpróbkami (rys. 3). Próbkę do testu tarcia miały kształt pasków o długości około 200 mm i szerokości 20 mm. Przeciwpróbki w postaci rolek o średnicy 20 mm zostały wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno.

Do badań użyto czterech kompletów rolek o następujących parametrach chropowatości Ra: 2,5; 1,25; 0,63; 0,32 μm, mierzonych równolegle do osi walców. Podczas badań mierzono za pomocą czujników tensometrycznych wielkość siły docisku oraz siły ciągnięcia. Z uwagi na to, że opory tarcia nie są stałe w czasie całego procesu odkształcenia plastycznego do rejestracji danych zastosowano komputerową aparaturę pomiarową pozwalającą na ciągły zapis wyników.



Rys. 3. Schemat próby przeciągania paska blachy: 1, 2 - tensometry, 3 – próbka, 4 – rolki robocze.

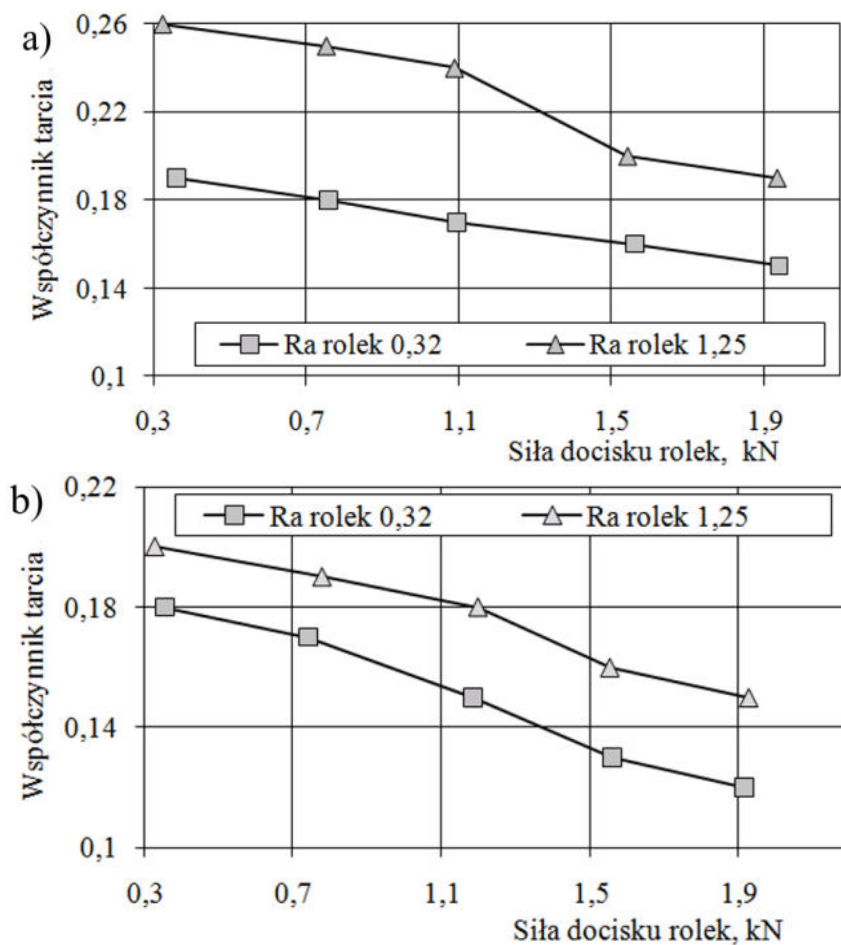
Stosowane w próbie siły docisku wynosiły 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 oraz 2 kN. Próbę przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego oraz ze smarowaniem olejem L-AN46 obu powierzchni próbek. Na podstawie przygotowanego zbioru danych wyznaczono wartość współczynnika tarcia według zależności:

$$\mu = \frac{F_T}{2 \cdot F_N} \quad (3)$$

gdzie: F_T – siła ciągnięcia, F_N – siła docisku.

4 Wyniki

Po wyznaczeniu wartości współczynnika tarcia dla kombinacji analizowanych czynników wpływających na wartość współczynnika tarcia określono wpływ zmiennych warunków tarcia na wartość parametrów chropowatości przeciąganych blach. Generalną zależnością wynikającą z badań jest spadek wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem siły docisku dla warunków tarcia suchego oraz smarowania (rys. 4). Po przekroczeniu pewnej wartości obciążenia zależność między siłą tarcia, a siłą docisku jest nieliniowa, a współczynnik tarcia według prawa Amontonsa nie ma stałej wartości i zmienia się wraz ze wzrostem nacisku.



Rys. 4. Zależność wartości współczynnika tarcia od siły docisku rolek dla blachy 08J SB w warunkach tarcia suchego (a) i smarowania olejem (b).

Ze zmianą warunków tarcia wiążą się zmiany własności warstwy wierzchniej próbek. Analizę topograficzną badanych próbek przeprowadzono za pomocą systemu pomiarowego InfiniteFocus firmy Alicona pozwalającego na porównanie i ocenę zmian pomiędzy rzeczywistym obiektem i modelem referencyjnym. Przeprowadzone pomiary parametrów funkcjonalnych struktury geometrycznej powierzchni blach po wykonaniu prób przeciągania paska blachy (Tabela 3) nie dały jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o wpływie warunków tarcia na zmianę chropowatości powierzchni blach.

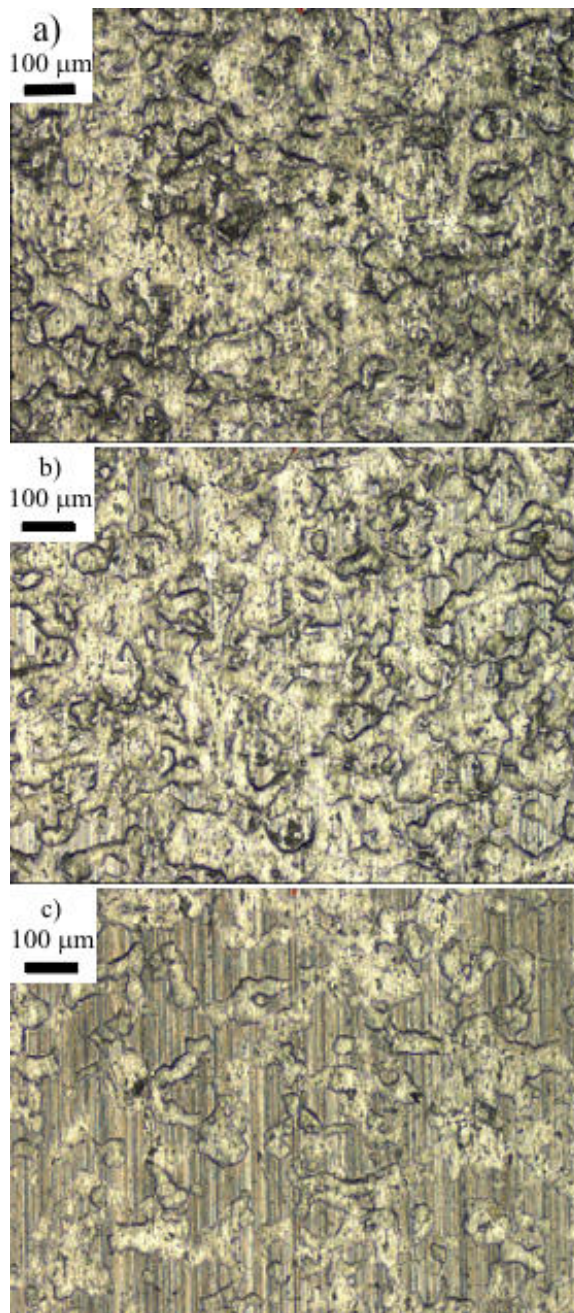
Tabela. 3. Parametry chropowatości badanych blach

Gatunek materiału	Warunki tarcia	Sa μm	Sq μm	Sdq $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Sbi	Svi
08J SB	-	1,54	1,89	0,103	0,913	1,56
	tarcie suche	1,16	1,46	0,090	0,928	1,31
	smar	1,34	1,64	0,099	0,725	1,36
08J BSB	-	1,79	2,21	0,133	0,246	1,58
	tarcie suche	1,29	1,56	0,085	0,814	1,22
	smar	1,09	1,4	0,087	0,866	1,33
08J USB	-	1,64	1,98	0,126	0,658	1,63
	tarcie suche	1,43	1,72	0,112	0,762	1,39
	smar	1,31	1,79	0,951	0,807	1,25

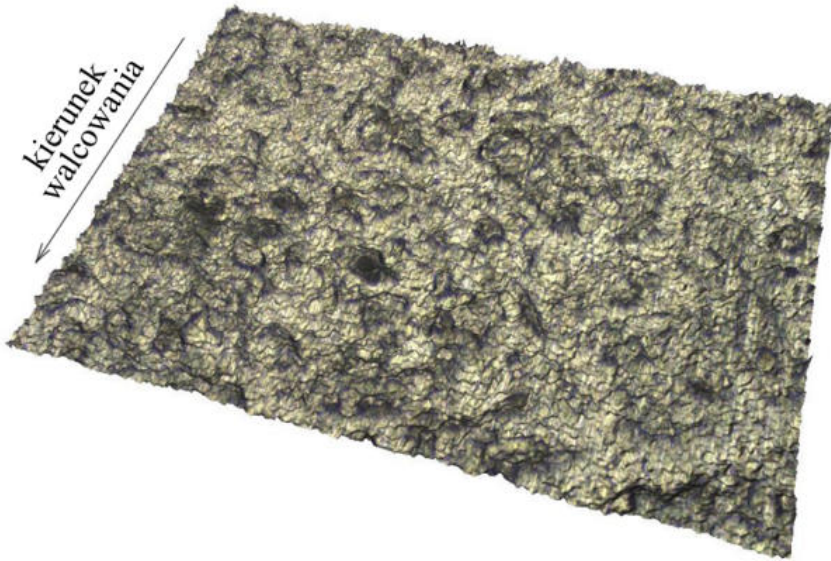
Procesowi tarcia analizowanych blach stalowych towarzyszy zmniejszenie parametrów amplitudowych Sa oraz Sq. W przypadku blach 08J BSB oraz 08J USB zastosowany smar w większym stopniu wpływał na zmniejszenie tego parametru. Jest to spowodowane wygładzaniem powierzchni blachy (rys. 5) na skutek plastycznego zgniatania wierzchołków mikronierówności. Jednocześnie wraz ze zmniejszeniem chropowatości powierzchni blachy zwiększa się udział powierzchni nośnej. Czynnikiem pośrednim wpływającym na zmianę chropowatości powierzchni jest kategoria tłoczności materiału blachy [5].

Odpowiednia topografia powierzchni determinuje powstanie tak zwanych kieszeni olejowych, które zmniejszają tarcie poprzez wytwarzanie ciśnieniowej poduszki smarowej [7] oraz spełniających rolę rezerwuaru smaru (rys. 6). Prowadzi to do prawie całkowitego wyeliminowania połączeń tarcowych, powodując tym samym zmniejszenie oporów tarcia.

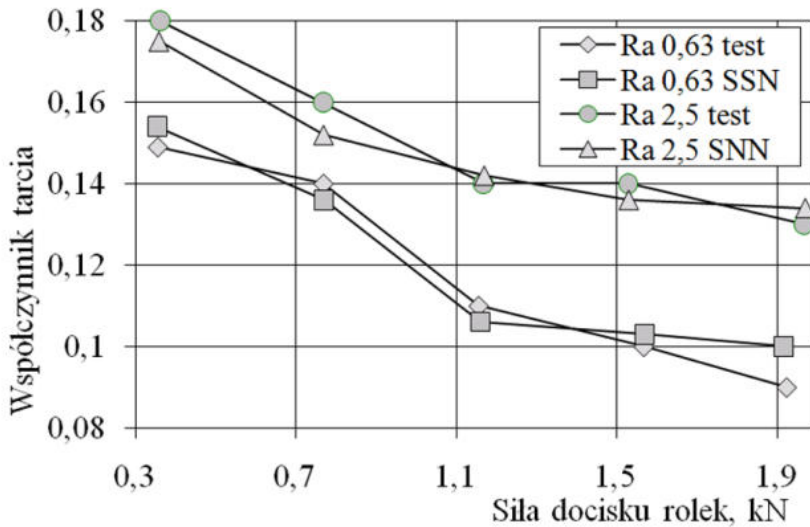
Model matematyczny tarcia zbudowano wykorzystując sztuczne sieci neuronowe przyjmując za dane wejściowe siłę docisku rolek, chropowatość rolek, warunki tarcia oraz parametry mechaniczne (Tabela 1) i parametry chropowatości blach (Tabela 2).



Rys. 5. Topografia powierzchni blachy stalowej 08J SB przed badaniem (a) oraz po procesie tarcia w następujących warunkach: smarowanie olejem, R_a rolki = 0,63 mm (b) oraz 0,32 mm (c), nacisk 0,8 kN. Obszar 1,4301x1,0849 mm.



Rys. 6. Topografia powierzchni blachy 08J BSB. Obszar 1,4301x1,0849 mm



Rys. 7. Porównanie wartości współczynnika tarcia wyznaczonego doświadczalnie oraz przez sztuczną sieć neuronową (SSN) dla blachy 08 SB w warunkach smarowania olejem.

Optymalizację liczby danych wejściowych przeprowadzono za pomocą algorytmu genetycznego będącym najlepszym i jednocześnie najprostszym narzędziem optymalizacyjnym [8]. Na etapie wyboru

istotnych zmiennych w wyniku działania algorytmu genetycznego odrzucono następujące zmienne, które nie wywierają istotnego wpływu na wartość współczynnika tarcia: R_m , A_{50} , n , S_q oraz S_{bi} . Do określenia architektury sztucznej sieci neuronowej wykorzystano program Statistica Neural Networks wraz z modułem Intelligent Problem Solver (IPS). Parametry działania sieci neuronowej oraz algorytmu genetycznego przyjęto na podstawie wyników wcześniejszych badań [5, 8, 9]. W procesie uczenia wykorzystano algorytm wstecznej propagacji błędów ze współczynnikiem uczenia równym 0,1 oraz członem bezwładności tzw. momentum równym 0,3 [5]. Jako kryterium jakości sieci przyjęto wartość odchylenia standardowego wartości zmiennej objaśnianej – S. D. Ratio, który dla dobrego modelu wynosi poniżej 0,1. Dobrana przez moduł IPS sieć neuronowa wielowarstwowa posiadała strukturę MLP 8:8-12-1:1. Wysoka wartość miernika korelacji przy niskiej wartości S. D. Ratio dla zbioru uczącego świadczy o dobrych własnościach aproksymacyjnych sieci neuronowej (rys. 7).

Współczynnik korelacji Pearsona liczony pomiędzy rzeczywistymi i obliczonymi przez sieć neuronową wartościami zmiennej objaśnianej wynosił dla zbioru uczącego 0,921 oraz dla zbioru weryfikującego 0,899. S. D. Ratio dla powyższych zbiorów wynosił odpowiednio: 0,192 i 0,267.

5 Podsumowanie

Zależność między siłą tarcia a siłą nacisku wyznaczona w próbie przeciągania blachy jest nieliniowa, co sprawia, że współczynnik tarcia nie ma stałej wartości i zmienia się wraz ze wzrostem nacisku. Chropowatość powierzchni istotnie wpływa na charakter zmian trybologicznych związanych z występowaniem oporów tarcia. Ze zmianą chropowatości powierzchni blach wiąże się możliwość ukonstytuowania korzystnej topografii powierzchni stwarzającej warunki do powstania tzw. smarowania hydrodynamicznego. Ponadto ze zmianą chropowatości powierzchni przeciwpróbek oraz warunków tarcia wynikających z występowania tarcia suchego i smarowania powierzchni olejem wiąże się zmiana chropowatości powierzchni blach.

6 Literatura

- [1] Gierzyńska M., *Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*, WNT, Warszawa 1983.
- [2] Firat M., Cicek O., *A FE technique to improve the accuracy of drawbead models and verification with channel drawing experiments of a high-strength steel*, International Journal of

- Advanced Manufacturing Technology, vol. 5, No 1, pp. 107-119, 2011.
- [3] Nine H.D., *Draw bead forces in sheet metal forming*, Proceedings of a Symposium on Mechanics of Sheet metal Forming: Behaviour and Deformation Analysis, Warren, Plenum Press, pp. 179-211, 1978.
- [4] Vallance D.W., Matlock D.K., *Applications of bending-under-tension friction test to coated sheet steels*, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 1, No 5, pp. 685-693, 1992.
- [5] Stachowicz F., Trzepieciński T., *ANN application for determination of frictional characteristics of brass sheet metal*, Journal of Artificial Intelligence, vol. 1, No 2(24), pp. 81-90, 2004.
- [6] Trzepieciński T., Gelgele H.L., *Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method*, International Journal of Material Forming, vol. 4, No 4, pp. 357-359.
- [7] Wihlborg A., Crafoord R., *Steel sheet surface topography and its influence on friction in a bending under tension friction test*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 13-14, pp. 1953-1959, 2001.
- [8] Trzepieciński T., *Genetic algorithms as an optimization tool of neural networks modelling friction phenomenon*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika, Nr 4, Z. 83, pp. 63-72, 2011.
- [9] Trzepieciński T., *Zastosowanie regresji wielokrotnej i sieci neuronowej do modelowania zjawiska tarcia*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Informatyki, Vol. 9, Nr 3, pp. 31-43, 2010.

ANALYSIS OF THE FRICTION INFLUENCE ON CHANGE OF SURFACE TOPOGRAPHY OF DRAWN SHEETS

Summary: In the article topographical and tribological analysis of surface of steel sheets was presented. For description of friction phenomenon in sheet metal forming processes the strip drawing test was used. The topographical analysis of tested samples was carried out by using measurement system Alicona InfiniteFocus. As input variables in mathematical model of friction the results of strip drawing tests were received. The friction tests were carried out order to determine the

influence of surface parameter value of the sheets, surface parameters of the rolls and pressure force on friction coefficient value.