

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF BURNISHING PARAMETERS ON STEEL X5CrNi1810 SURFACE LAYERS STRENGTHENING AND ROUGHNESS CHANGES

Wojciech Labuda, Robert Starosta, Tomasz Dyl

Gdynia Maritime University of Marine Engineering

Morska Street 83, 81-225 Gdynia, Poland

tel.: +48 58 6901549, +48 58 6901249

fax: +48 58 6901399

e-mail: starosta@am.gdynia.pl,

Abstract

Angular momentum pumps are applied very often on ships. Because the pumps are working in hard conditions they are made from cavitation wear proof and electrochemical corrosion proof materials. The most popular damage of pump shaft is neck wear in place where seals are mounted.

Burnishing as modern finish plastic tooling method makes possible getting high technological quality of elements. Because of many burnishing advantages it was proposed to shafts angular momentum pumps working instead of finish machining (finish turning, grinding, lapping). The goal was to estimate optimal burnishing parameters which enable to receive biggest strengthening and lowest roughness factor of angular momentum pumps shafts. The shaft necks are made from stainless steel X5CrNi1810. The tool one - roller burnishing tool SRMD type produced by Yamato. Its axis is parallel to working shaft axis. During working technological parameters like force, velocity and feed were changed.

Keywords: plastic tooling, burnishing, surface layers, stainless steel, angular momentum pump

OCENA WPLYWU PARAMETRÓW NAGNIATANIA NA UMOCNIENIE WARSTWY WIERZCHNIEJ I ZMIANĘ CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI STALI X5CrNi1810

Streszczenie

Na statkach bardzo często wykorzystuje się pompy krętne. Ze względu na trudne warunki ich pracy do budowy tego rodzaju pomp stosuje się materiały odporne na zużycie kawitacyjne oraz korozję elektrochemiczną wywołaną przez wodę morską. W przypadku wałów pomp najczęstszą niesprawnością jest zużycie czopów (korozyjne, cierne i zmęczenie stykowe) w miejscu montażu uszczelnień (dławic).

Obróbka nagniataniem jako nowoczesna metoda wykańczająca obróbki plastycznej umożliwia uzyskanie elementów maszyn o odpowiedniej jakości technologicznej. W związku z licznymi korzyściami stosowania obróbki nagniataniem proponuje się jej zastosowanie w zamian za wykańczającą obróbkę skrawaniem (toczenie wykańczające, szlifowanie, polerowanie) do wałów okrętowych pomp krętnych. Celem pracy było wyznaczenie optymalnych parametrów nagniatania dla uzyskania największego stopienia względnego umocnienia warstwy wierzchniej i zmniejszenia chropowatości powierzchni czopów wałów okrętowych pomp krętnych wykonanych ze stali nierdzewnej X5CrNi1810. Proces nagniatania przeprowadzono nagniataniem jednorolkowym SRMD firmy Yamato, który charakteryzuje się równoległością osi części roboczej do osi obrabianego czopu. Podczas nagniatania zastosowano zróżnicowane parametry procesu technologicznego takie jak: siła nagniatania, prędkość nagniatania oraz posuw.

Słowa kluczowe: obróbka plastyczna, nagniatanie, stal odporna na korozję, warstwa wierzchnia, pompy krętne

1. Wprowadzenie

Na trwałość i niezawodność części maszyn istotny wpływ ma technologia zastosowana w procesie produkcyjnym. Ostateczne kształtowanie warstwy wierzchniej, czyli wymiarów i właściwości użytkowych uzyskuje się podczas obróbki wykańczającej danego elementu [1, 2]. Obróbka nagniataniem znana jest od kilkudziesięciu lat. Pierwsze narzędzia do nagniatania otworów powstały

w latach 1960-1965, natomiast w okresie późniejszym także do wałków. Podstawowym celem obróbki nagniatania jest uzyskanie odpowiednich właściwości warstwy wierzchniej, które mają znaczący wpływ na trwałość elementów części maszyn.

Technologia nagniatania może być stosowana w zakładach przemysłu maszynowego. Umożliwia ona wyeliminowanie tradycyjnej obróbki ścierniej takiej jak szlifowanie, dogładzanie, gładzenie czy polerowanie. Dlatego ostateczne kształtowanie wymiarów i właściwości użytkowych przez nagniatanie staje się obróbką bezwiórową i bezpyłową. Pozwala to na zaliczanie jej do ekologicznych metod obróbki (3). W praktyce przemysłowej proces ten realizowany jest na obrabiarkach uniwersalnych jak i obrabiarkach CNC, ale zaliczany jest do obróbki plastycznej. Proces nagniatania umożliwia obróbkę powierzchni z dużą dokładnością wymiarową (w 7 i 6 klasie dokładności), co pozwala na osiągnięcie wielu korzyści, do których należy zaliczyć:

- możliwość uzyskania powierzchni o dużej gładkości ($R_a = 0,32-0,04 \mu\text{m}$) i dużym udziale nośnym profilu chropowatości (90%),
- wzrost twardości powierzchni,
- zwiększenie odporności na zmęczenie (powierzchniowe i objętościowe),
- zwiększenie odporności na zużycie ściernie i zacieranie,
- braku na nagniatanej powierzchni ziaren ściernych, ostrych i twardych fragmentów narostu oraz wiórów,
- możliwość stosowania narzędzi nagniatających na uniwersalnych tokarkach (konceptcja obróbki na jednym stanowisku),
- eliminację lub ograniczenie czasochłonnych operacji takich jak gładzenie, docieranie, szlifowanie, polerowanie,
- możliwość eliminacji obróbki cieplnej w określonych przypadkach,
- dużą wydajność procesu (jedno przejście robocze narzędzia) i redukcje kosztów wytwarzania,
- dużą trwałość nagniataków,
- zmniejszenie kosztów wytwarzania części maszyn.

Wiele ośrodków naukowych na całym świecie zajmuje się obróbką nagniataniem i jej skutkami w warstwie wierzchniej. Programy badawcze obejmują między innymi zagadnienia dotyczące nagniatania żeliw [6], niektórych stopów żaroodpornych i stali nierdzewnych, stopów miedzi i aluminium [9], tytanu i jego stopów [7, 10], powłok galwanicznych, dyfuzyjnych i napawanych [1, 9] oraz części wykonanych przez spiekanie proszków metali.

W związku z wieloma zaletami wynikającymi ze stosowania obróbki nagniataniem proponuje się wyznaczenie optymalnych parametrów nagniatania dla uzyskania największego stopienia względnego umocnienia warstwy wierzchniej i zmniejszenia chropowatości powierzchni czopów wałów okrętowych pomp krętnych wykonanych ze stali nierdzewnej X5CrNi1810.

2. Przygotowanie próbek

Wałki ze stali nierdzewnej X5CrNi1810 poddano wstępnej obróbce skrawaniem w celu przygotowania czopów pod obróbkę nagniataniem. Proces toczenia przeprowadzono na tokarce TUC 40 nożem z wymiennymi płytkami typu WNMG 080408 WF firmy Sandvik Coromant. Podczas operacji toczenia zastosowano następujące parametry skrawania: prędkość skrawania $V_c = 112 \text{ m/min}$, posuw $f = 0,27 \text{ mm/obr}$, głębokość skrawania $a_p = 0,5 \text{ mm}$. Pomimo zastosowania niezmiennych parametrów technologicznych obróbki skrawaniem uzyskano zróżnicowane wyniki pomiaru chropowatości powierzchni badanych wałków. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności, wahała się w przedziale 0,5 do 1,18 μm . Średnia wartość współczynnika chropowatości R_a wyniosła 0,83 μm . (Tab. 1) Obrabiana stal charakteryzowała się po operacji toczenia średnią twardością 307 HV, wyniki podstawowej analizy statystycznej przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 1. Wyniki podstawowej analizy statystycznej pomiaru chropowatości (liczba pomiarów 48)
 Tab. 1. The results of statistic analysis of roughness factor measurements (measurements number 48)

Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch. Stand.	Błąd Stand.
0,83	0,79	0,50	1,18	0,14	0,02

Tab. 2. Wyniki analizy statystycznej pomiaru twardości (liczba pomiarów 48)
 Tab. 2. The results of statistic analysis of hardness measurements (measurements number 48)

Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch. Stand.	Błąd Stand.
307	307	284	325	8,75	1,26

3. Metodyka badań

Proces nagniatania przeprowadzono nagniatakiem jednorolkowym SRMD firmy Yamato, który charakteryzuje się, w odróżnieniu od najczęściej stosowanych, równoległością osi części roboczej do osi obrabianego wałka. Nagniataniu poddane zostały czopy wałków ze stali odpornej na korozję X5CrN1810 o średnicy ϕ 40 mm. Zastosowane parametry procesu technologicznego powierzchniowej obróbki plastycznej przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Parametry procesu technologicznego obróbki nagniataniem
 Tab. 3. Technological parameters of burnishing process

Parametr	Wartości	
Siła nagniatania - F	[kN]	0,7; 0,9; 1,1
Prędkość nagniatania - V_c	[m/min]	35; 56; 88; 112
Posuw - f	[mm/obr]	0,13; 0,54; 0,94; 1,2

Pomiar twardości zrealizowano metodą Vickersa za pomocą przyrządu WPM, przy sile nacisku wynoszącej 50 N. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_u :

$$S_u = \frac{HV_2 - HV_1}{HV_1} 100\%, \quad (1)$$

gdzie:

S_u - stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej,

HV_1 - twardość materiału przed nagniataniem,

HV_2 - twardość materiału po powierzchniowej obróbce plastycznej.

Chropowatość powierzchni zmierzono profilometrem HOMMEL TESTER T1000. Długość odcinka pomiarowego wynosiła 4,8 mm, a odcinka elementarnego 0,8 mm. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} :

$$K_{Ra} = \frac{Ra'}{Ra}, \quad (2)$$

gdzie:

K_{Ra} - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,

Ra' - chropowatość powierzchni materiału,

Ra - chropowatość powierzchni materiału po powierzchniowej obróbce plastycznej.

Wyniki określające twardość i chropowatość powierzchni poddano analizie statystycznej - regresji wielokrotnej, w celu określenia ich wpływu na badane właściwości. Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego Statistica 5.5. Ze względu na różne miana zmiennych niezależnych, wpływ poszczególnych parametrów analizowano na podstawie standaryzowanych współczynników regresji (BETA).

4. Wyniki badań

Zastosowane parametry nagniatania wpłynęły zarówno na zmniejszenie wartości chropowatości powierzchni oraz na zwiększenie umocnienia warstwy wierzchniej materiału obrobionego. Wartości współczynników S_u określającego stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej zmieniały się w zależności od zastosowanych parametrów obróbki nagniataniem i wahały się w granicach od 1% do 18%. Najwyższą wartość stopnia względnego umocnienia powierzchni czopa wału ($S_u = 18\%$) uzyskano stosując następujące parametry nagniatania: $F = 1140$ N, $V_n = 35$ m/min, $f = 1,2$ mm/obr. Natomiast najmniejszą wartość stopnia względnego umocnienia ($S_u = 1\%$) uzyskano przy parametrach nagniatania: $F = 1140$ N, $V_n = 112$ m/min, $f = 1,2$ mm/obr. Analizując wpływ parametrów nagniatania na stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej posłużono się analizą regresji wielokrotnej. Uzyskane wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności (poziom p) podano w Tab. 4. Pozostałe współczynniki przyjmują wartości stałe i wynoszą one odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,80$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,65$ oraz błąd estymacji: 2,45.

Tab. 4. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru S_u dla zmiennych przedstawionych w tabeli 3
Tab. 4. The results of S_u parameter statistic analysis for variables presented in table 3

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		12,28	0,00
Prędkość nagniatania – V_n	-0,79	-0,11	0,00
Posuw – f	-0,03	-0,33	0,71
Siła nagniatania - F	0,18	0,004	0,05

Tab. 5. Wpływ wartości prędkości nagniatania V_n na parametr S_u
Tab. 5. The influence of burnishing speed V_n on S_u parameter

Parametry nagniatania: $F = 1,1$ kN; $f = 1,2$ obr/min				
Prędkość nagniatania V_n [m/min]	35	56	88	112
Stopień względnego umocnienia S_u [%]	18	10	10	1
Parametry nagniatania: $F = 0,9$ kN; $f = 0,13$ obr/min				
Prędkość nagniatania V_n [m/min]	35	56	88	112
Stopień względnego umocnienia S_u [%]	15	11	6	4

Wartość standaryzowana współczynnika regresji BETA prędkości nagniatania wynosi -0,79, co świadczy o jej największym wpływie na współczynnik umocnienia S_u . Wraz ze wzrostem prędkości nagniatania następuje zmniejszenie stopnia względnego umocnienia materiału (Tab. 5) W mniejszym stopniu ($BETA = 0,18$) na współczynnik S_u wpływa siła nagniatania, ale wraz z jej wzrostem następuje umocnienie materiału. Mała wartość współczynnika BETA (-0,03) dla posuwu określa, że ma on najmniejszy wpływ na wartość współczynnika S_u i jest on statystycznie nieistotny (poziom p = 0,71). Wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności (poziom p) przeprowadzonej analizy regresji wielokrotnej nie uwzględniającej posuwu zawarto w Tab. 6. Pozostałe współczynniki przyjmują

wartości stałe i wynoszą one odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,81$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,65$, błąd estymacji: 2,42. Porównane wartości współczynników BETA z Tab. 4 i 6 mają te same wartości. Potwierdza to brak statystycznej istotności zmiennej niezależnej f na wartość stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej. Jego pominięcie nie wpływa również na wartości współczynników determinacji dla obu analiz.

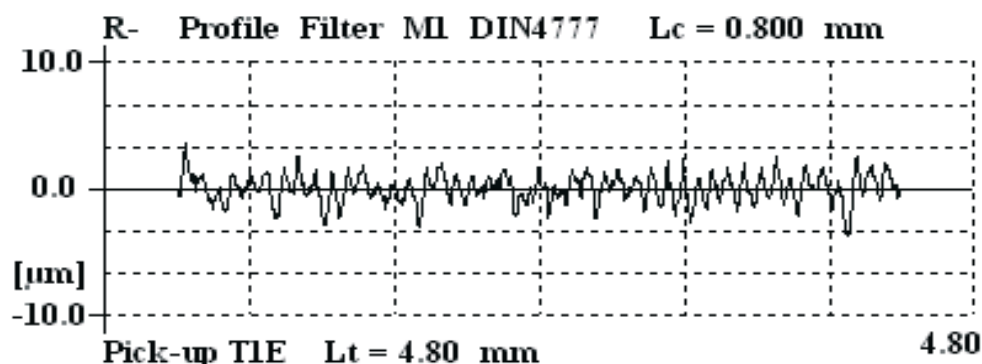
Tab.6. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru S_u dla zmiennych przedstawionych w tabeli 3 bez uwzględnienia posuwu

Tab. 6. The results of S_u parameter statistic analysis for variables presented in table 3 without taking into account the feed

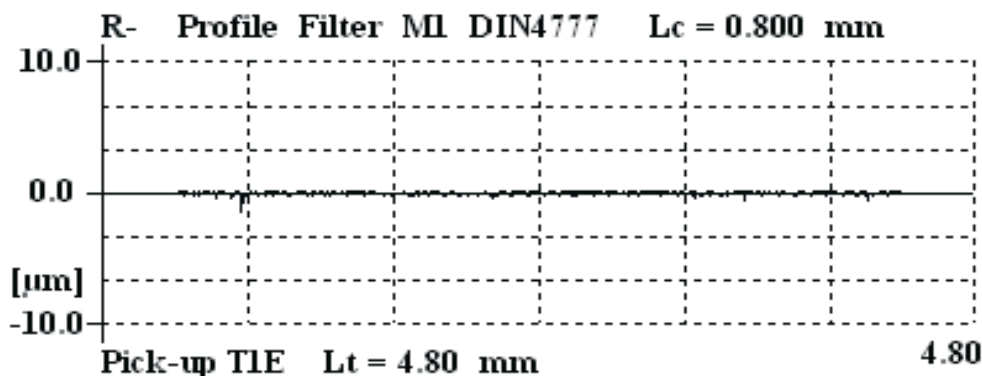
	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		12,05	0,00
Prędkość nagniatania - V_n	-0,79	-0,11	0,00
Siła nagniatania - F	0,18	0,004	0,04
Równanie regresji wielokrotnej ma postać: $S_u = 0,004F - 0,11V_n + 12,05 \pm 2,42$			

W wyniku przeprowadzonej obróbki nagniataniem wartości współczynników K_{Ra} określających wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni wahały się w przedziale od 1 do 11. Najmniejszą wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ (Rys. 1) i największą wartość wskaźnika $K_{Ra} = 11$ (Rys. 2.) uzyskano stosując następujące parametry obróbki nagniataniem: $F = 1140 \text{ N}$, $V_n = 56 \text{ m/min.}$, $f = 0,13 \text{ mm/obr.}$

a)

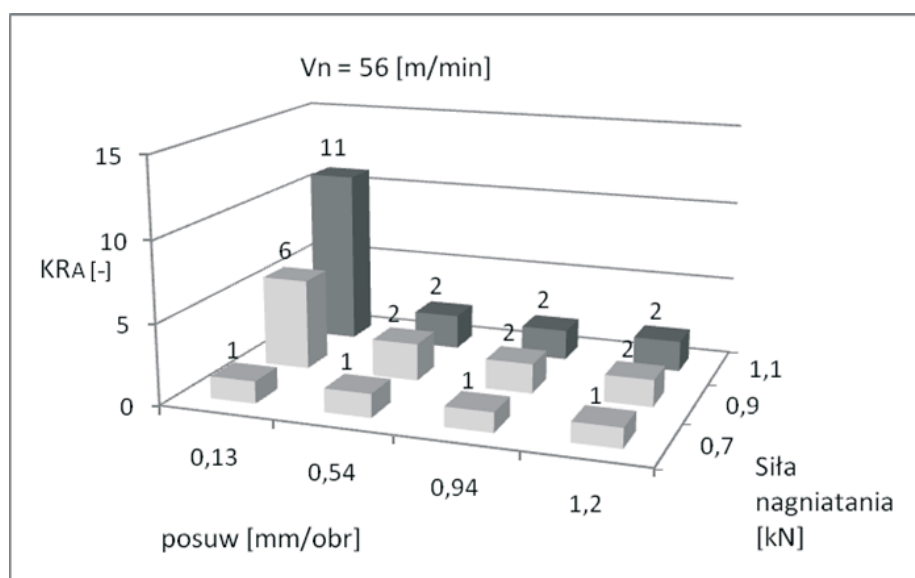


b)



Rys. 1. Profilogramy powierzchni wałka a) przed nagniataniem $R_a = 0,77 \mu\text{m}$ b) po obróbce nagniataniem $R_a = 0,7 \mu\text{m}$

Fig. 1. The shaft surface profile analysis: a) before burnishing process $R_a = 0,77 \mu\text{m}$ b) after burnishing process $R_a = 0,7 \mu\text{m}$



Rys. 2. Wpływ parametrów nagniatania na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości (K_{Ra})
 Fig.2. The influence of burnishing parameters on roughness reduction index value (K_{Ra})

Analizując wpływ parametrów nagniatania na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni posłużono się również analizą regresji wielokrotnej. Uzyskane wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności (poziom p) podano w Tab. 7. Pozostałe współczynniki przyjmują wartości stałe i wynoszą one odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,71$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,51$, błąd estymacji 2,29.

Tab. 7. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w Tab. 3
 Tab. 7. The results of K_{Ra} parameter statistic analysis for variables presented in Tab. 3

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		0,068	0,97
Siła nagniatania - F	0,41	0,007	0,00
Prędkość nagniatania - V_n	-0,12	-0,01	0,27
Posuw - f	-0,57	-4,44	0,00

Rozpatrując uzyskane wartości standaryzowanych współczynników regresji wielokrotnej dla zmiennych niezależnych, można stwierdzić, że największy wpływ na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} ma posuw (BETA = -0,57). Im mniejsza wartość posuwu użyta w operacji nagniatania, tym wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a jest mniejsza. Drugim istotnym parametrem wpływającym na jakość uzyskanej powierzchni, a tym samym na wskaźnik K_{Ra} jest siła nagniatania. Świadczy o tym uzyskana wartość standaryzowanego współczynnika regresji (BETA = 0,41). Wraz ze wzrostem wartości siły nagniatania następuje spadek wartości parametru R_a . Współczynnik BETA dla zmiennej V_n cechuje się wysoką wartością poziomu istotności ($p = 0,27$). Świadczy to o braku statystycznej istotności rozpatrywanego parametru na strukturę stereometryczną czopów wałów. Potwierdza to przeprowadzona analiza regresji wielokrotnej, która nie uwzględnia prędkości nagniatania (Tab. 8). Uzyskane wartości BETA, B i poziomu p podano w Tab. 8. Pozostałe współczynniki przyjmują wartości stałe

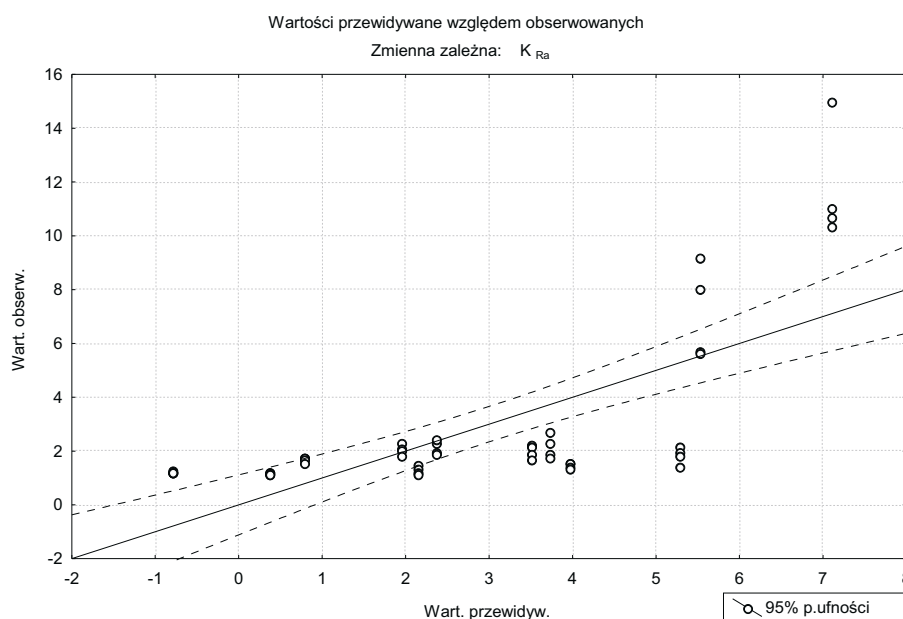
i wynoszą odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,70$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,49$, błąd estymacji: 2,30. Współczynniki BETA, B i poziomu p dla posuwu i siły nagniatania osiągnęły takie same wartości (Tab. 7, 8). Powtórna analiza statystyczna z pominięciem zmiennej V_n , pomimo tego, że potwierdza jego statystyczną nieistotność na wartość wskaźnika K_{Ra} , to obniżyła stopień dopasowania równania regresji do uzyskanych rzeczywistych wyników, o czym świadczą wartości współczynników determinacji R^2 . Prawdopodobną przyczyną uzyskanej niższej wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,49$), może być brak liniowego wpływu, któregoś z parametrów nagniatania na wartość K_{Ra} (Rys. 3).

Tab. 8. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w tab. 3 bez uwzględnienia prędkości nagniatania

Tab. 8. The results of K_{Ra} parameter statistic analysis for variables presented in tab. 3 without taking into account the burnishing speed

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		-0,84	0,66
Siła nagniatania - F	0,41	0,007	0,00
Posuw - f	-0,57	-4,44	0,00

W celu lepszego dopasowania równania regresji wielokrotnej do uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono logarytmowanie parametru posuwu f i parametru K_{Ra} . Uzyskane wartości BETA, B i poziomu p podano w Tab. 9, natomiast pozostałe współczynniki przyjmują wartości stałe i wynoszą odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,83$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,70$, błąd estymacji: 0,17. Wartość współczynnika determinacji świadczy o tym, że zmodyfikowane równanie regresji (wzór 3) w dokładniejszy sposób pozwoli na szacowanie wpływu parametrów obróbkowych nagniatania na strukturę stereometryczną powierzchni czopów wałów pomp krętnych.



Rys. 3. Zależność pomiędzy wartościami przewidywanymi (obliczonymi z równania regresji) a wartościami obserwowanymi (zmiernymi)

Fig. 3. Dependence between predicted (calculated) and observed (measured) values

Tab. 9. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru $\log K_{Ra}$ dla zmiennych przedstawionych w tab. 3 bez uwzględnienia prędkości nagniatania

Tab. 9. The results of K_{Ra} parameter statistic analysis for variables presented in tab. 3 without taking into account the burnishing speed

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		-0,64	0,00
Siła nagniatania - F	0,52	0,001	0,00
Posuw - logf	-0,65	-0,51	0,00
Równanie regresji wielokrotnej ma postać: $\log K_{Ra} = 0,001F - 0,51 \log f - 0,64$			

$$K_{Ra} = \frac{10^{0,001 \cdot F}}{4,36 \cdot f^{0,51}}, \quad (3)$$

gdzie:

K_{Ra} - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni [-],

F - siła nagniatania [kN],

f - posuw [mm/obr].

5. Wnioski

Możliwe jest przeprowadzenie procesu nagniatania stali odpornej na korozję X5CrNi1810 w celu zmniejszenia wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a oraz zwiększenia stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_u . Dobór parametrów powinien zależeć od celu zastosowania powierzchniowej obróbki plastycznej.

- proces technologiczny mający na celu uzyskanie małej wartości chropowatości powierzchni powinien być przeprowadzony z możliwie największą siłą nagniatania i najmniejszym posuwem,
- w celu uzyskania dużego współczynnika stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej proces technologiczny powinien być przeprowadzony z jak największą siłą nagniatania i najmniejszą prędkością nagniatania,
- w celu uzyskania jak najmniejszej wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a przy jednoczesnym umocnieniu warstwy wierzchniej należy zastosować jak największą siłę nagniatania, jak najmniejszy posuw oraz jak najmniejszą prędkość nagniatania.

Literatura

- [1] Przybylski, W., *Technologia obróbki nagniataniem*, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1987.
- [2] Przybylski, W., *Wpływ stanu warstwy wierzchniej na konstytuowaną przez nagniatanie na trwałość elementów maszyn, Wybrane problemy Trybologii*, PWN, Warszawa 1990.
- [3] Przybylski, W., Wojciechowski, J., *Technological and organizational aspects of cleaner manufacturing*. First Cleaner Production International Conference, Rydzyna 1996.
- [4] Kukielka, L., *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Monografia WM Nr 47, Koszalin 1994.

- [5] Hassan, A. M., *The effects ball-and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals*, Journal of Materials Processing Technology 72, pp. 385-391, 1997.
- [6] Tubielewicz, K., *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Monografie Nr 69, Częstochowa 2000.
- [7] Melechow, R., Tubielewicz, K., Błaszczuk, W., *Tytan i jego stopy*, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Monografie Nr 107, pp. 197-205, Częstochowa 2004.
- [8] López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Muñoa, J., Sánchez J. A., *Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, pp. 1659-1668, 2005.
- [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 186, pp. 272-278, 2007.
- [10] Golden, P. J., Hutson, A., Sundaram, V., Arps, J. H., *Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6Al-4V*, International Journal of Fatigue 29, pp. 1302-1310, 2007.

