

Dr inż. Robert STAROSTA, mgr inż. Wojciech LABUDA

Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów, Gdynia

e-mail: starosta@am.gdynia.pl

Wpływ parametrów technologicznych operacji powierzchniowej obróbki plastycznej na strukturę geometryczną powierzchni czopów wału wykonanego ze stali austenitycznej

The effect of technological parameters of surface plastic working on the geometric structure of the surface of a neck of a shaft made from austenitic steel

Streszczenie

Na statkach, w instalacjach wody zaburtowej (np. instalacji chłodzenia silników), 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 wywoływaną przez wodę morską. W przypadku wałów pomp najczęstszą niesprawnością jest zużycie czopów (korozyjne, cierne i zmęczenie stykowe) w miejscu montażu uszczelnień (dławnic). Zwiększenie trwałości eksploatacyjnej pomp krętnych można osiągnąć dzięki zastosowaniu obróbki nagniataniem jako technologii, która umożliwia uzyskanie stosunkowo małej chropowatości powierzchni przy jednoczesnym jej umocnieniu zgniotem. Celem badań było wyznaczenie optymalnych parametrów procesu nagniatania i zmniejszenie chropowatości powierzchni czopów wałów okrętowych pomp krętnych wykonanych ze stali odpornej na korozję X5CrNi18-10. Proces nagniatania przeprowadzono nagniataniem jednorolkowym SRMD firmy Yamato. Podczas nagniatania zastosowano zróżnicowane następujące parametry procesu technologicznego: siła nagniatania, prędkość nagniatania, posuw oraz liczba przejść. Istotny wpływ na zmniejszenie chropowatości powierzchni nagniatanych czopów ma posuw i siła nagniatania. Prędkość nagniatania oraz liczba kolejnych przejść nagniatania wpływają w niewielkim stopniu na gładkość obrabianych powierzchni. Stosując mały posuw $f_n = 0,13$ mm/obr oraz siłę F_n 1,1 kN uzyskano chropowatość powierzchni o $R_a = 0,07$ μ m. Następne przejścia narzędzia powodują nieduże zmniejszenie chropowatości. Przyczyniają się one do uzyskania geometrii powierzchni o kształcie krzywej udziału materiałowego zapewniającej hipotetycznie zwiększenie odporności na zużycie cierne jak i polepszenie szczelności wału we współpracy z dławnicą okrętowej pompy krętnej.

Abstract

Torque pumps are frequently used in the outside water installations of ships (e.g. engine cooling installations). Due to the difficult conditions of their operation, materials resistant to cavitation wear and electrochemical corrosion caused by sea water are used in their construction. In the case of pump shafts, the most frequently occurring malfunction is shaft neck wear (corrosion, friction, and contact fatigue) in the vicinity of the seals (packing). An increase in the exploitation durability of torque pumps can be achieved thanks to the process of burnishing technology, which makes it possible to achieve a relatively small surface roughness with simultaneous strengthening of the surface through deformation hardening. The purpose of studies was to determine optimal process parameters of the burnishing process and to decrease surface roughness of shaft necks of ship torque pumps made from corrosion resistant steel X5CrNi18-10. The burnishing process was carried out using a SRMD one-roller burnishing tool of the Yamato company. During burnishing the following varied technological process parameters were applied: burnishing force, burnishing speed, advance, and the number of passes. Advance and burnishing force has a significant effect on the decrease of surface roughness of burnished shaft necks. Burnishing speed and the amount of subsequent passes of the burnishing tool have an insignificant effect on the smoothness of worked surfaces. For a small advance of $f_n = 0.13$ mm/rot and a force of F_n 1.1 kN, a surface roughness of $R_a = 0.07$ μ m was obtained. Further tool passes cause a slight decreases in roughness. These passes contribute to the achievement of a surface geometry with the shape of the Abbott-Firestone curve hypo-

thetically ensuring an increase in abrasive wear resistance as well as improvement of shaft tightness in cooperation with the packing of the ship torque pump.

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

Key words: *plastic working, burnishing, corrosion resistant steel, surface layer, torque pumps*

1. WPROWADZENIE

Na statkach bardzo często używa się pomp krętnych. Znalazły one zastosowanie do osuszania zęz ładunkowych i siłowni, opróżniania zbiorników balastowych, w układach chłodzenia silników oraz do zasilania wodą kotłów. W wielu przypadkach medium, które jest przetłaczane lub podnoszone za pomocą pomp krętnych, jest woda zaburtowa. Ze względu na trudne warunki pracy do budowy tego rodzaju pomp są stosowane materiały odporne na zużycie kawitacyjne oraz korozję elektrochemiczną wywoływaną przez wodę morską. Wówczas wirniki pomp wykonywane są z brązów: aluminiowego, manganowego albo krzemowego. Natomiast wały wytwarzane są ze stali odpornych na korozję. Pomimo zastosowania powyższych materiałów obserwuje się w praktyce eksploatacyjnej występowanie niesprawności wymienionych elementów pomp krętnych. W przypadku wałów najczęściej stwierdza się zużycie czopów (korozyjne, cierne i zmęczeniowe stykowe) w miejscu montażu uszczelnień (dławnic) [3, 5, 9,10].

Podczas procesu wytwarzania wałów podstawową technologią kształtowania ich wymiarów jest obróbka skrawaniem. Czopy toczone są za pomocą płytek wielostrzowych z węglików spiekanych z nałożonymi powłokami wielowarstwowymi (Al_2O_3 , TiN) otrzymywanymi metodami PVD. Jednak uzyskiwane chropowatości powierzchni są najczęściej niepowtarzalne, co jest najczęściej związane ze zużyciem powierzchni przyłożenia narzędzia skrawającego.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano nagniatanie jako technologię, która miałaby potencjalnie przyczynić się do zwiększenia trwałości eksploatacyjnej czopów wałów okrętowych pomp krętnych, w wyniku uzyskania lepszej struktury geometrycznej ich powierzchni rzeczywistej [1, 2, 4, 5, 11].

1. INTRODUCTION

Torque pumps are very frequently used on ships. They have found applications in draining bilges and power plants, draining ballast tanks, in engine cooling systems, and in boiler water supply. In many cases, the medium that is pumped or raised using torque pumps is external water. Due to the difficult conditions of their operation, materials resistant to cavitation wear and electrochemical corrosion caused by sea water are used in the construction of these types of pumps. In such cases, the pump rotors are made from the following types of bronzes: aluminum, manganese, or silicon. However the shafts are made from corrosion resistant steel. Despite the application of the above materials, in practice, during exploitation, malfunctions of the above elements of torque pumps can be observed. In the case of shafts, the most frequently occurring malfunction is shaft neck wear (corrosion, friction, and contact fatigue) in the vicinity of the seals (packings) [3, 5, 9, 10].

During the process of shaft production, the main technology used for forming their dimensions is machining. Shaft necks are turned using cutting tools with many edged plates made from sintered carbides with many-layered coats (Al_2O_3 , TiN) obtained using PVD methods. However, the surface roughnesses achieved are most often inimitable, which is most often related to tool flank surface wear.

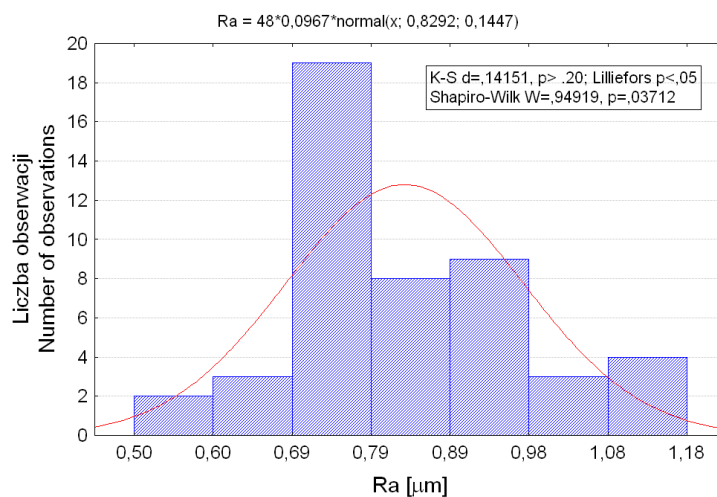
In the studies carried out, burnishing was used as a technology which could potentially contribute to increasing the operating life of shaft necks of ship torque pumps due to the obtainment of a better geometric structure of their real surface [1, 2, 4, 5, 11].

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Wałki ze stali nierdzewnej X5CrNi18-10 poddano wstępnej obróbce skrawaniem celem przygotowania czopów pod obróbkę nagniataniem. Proces toczenia przeprowadzono na tokarce TUC 40 nożem z wymiennymi płytkami typu Viper WNMG 080408 WF firmy Sandvik Coromant. Podczas operacji toczenia zastosowano następujące parametry skrawania: prędkość skrawania $V_c = 112$ m/min, posuw $f = 0,27$ mm/obr, głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Pomimo zastosowania niezmiennych parametrów technologicznych obróbką skrawaniem uzyskano zróżnicowane wyniki pomiaru chropowatości powierzchni badanych wałków. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności wahała się w przedziale od 0,5 do 1,18 μm . Średnia wartość parametru R_a chropowatości wyniosła 0,83 μm (tablica 1). Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa wyników pomiaru chropowatości powierzchni czopów nie ma rozkładu normalnego (rys. 1), dlatego uzyskane rezultaty nie są przypadkowe. Zależą od stopnia zużycia płytki skrawającej. Obrabiana stal charakteryzowała się po toczeniu średnią twardością 307 HV 5.

2. SAMPLE PREPARATION

X5CrNi18-10 stainless steel shafts were subjected to preliminary machining in order to prepare the shaft necks for burnishing. The turning process was carried out on a TUC 40 turning lathe using a Viper WNMG 080408 WF type tool with exchangeable plates of the Sandvik Coromant company. The following machining parameters were used during the turning operation: machining speed $V_c = 112$ m/min, advance $f = 0.27$ mm/rot, machining depth $a_p = 0.5$ mm. Despite the use of constant technological parameters of machining, various results of roughness measurements of the studied shafts were obtained. The value of the arithmetic mean of the deviation of the unevenness profile was in the range of 0.5 to 1.18 μm . The mean value of roughness parameter R_a was equal to 0.83 μm (table 1). The probability distribution function of the results of the roughness measurement of shaft neck surfaces did not have a normal distribution (fig. 1), and so, the obtained results are not random. They are dependent on the degree of wear of the cutting tool. The machined steel had an average hardness of 307 HV 5 after turning.



Rys. 1. Histogram wyników pomiarów parametru R_a (K-S d – wynik testu normalności Kołmogorowa–Smirnowa z poprawką Lillieforsa oraz test W Shapiro-Wilka, p – obliczony poziom istotności)

Fig. 1. Histogram of the results of measurements of parameter R_a (K-S d – result of the Kolmogorow–Smirnow normality test with Lilliefors correction and the Shapiro-Wilk W test, p – calculated significance level)

Tablica 1. Wyniki podstawowej analizy statystycznej pomiaru parametru R_a chropowatości skrawanych powierzchni czopów stalowych (liczba pomiarów 48)

Table 1. The results of basic statistical analysis of the measurement of roughness parameter R_a of machined steel shaft neck surfaces (number of measurements 48)

Średnia Average	Mediana Median	Przedział ufności Confidence interval ($\alpha = 0,05$)	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Odch. stand. Standard deviation	Błąd stand. Standard error
0,83	0,79	0,79 \pm 0,87	0,50	1,18	0,14	0,02

3. METODYKA BADAŃ

Proces nagniatania przeprowadzono nagniatakiem jednorolkowym SRMD firmy Yamato. Nagniataniu poddane zostały czopy o średnicy ϕ 40 mm. Zastosowane parametry procesu technologicznego powierzchniowej obróbki plastycznej przedstawiono w tablicy 2.

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} :

$$K_{Ra} = \frac{R_a'}{R_a} \quad (1)$$

gdzie:

K_{Ra} - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,

R_a' - chropowatość powierzchni materiału po toczeniu,

R_a - chropowatość powierzchni materiału po powierzchniowej obróbce plastycznej.

3. METHODOLOGY OF STUDIES

The burnishing process was carried out using a SRMD one-roller burnishing tool of the Yamato company. Shaft necks with ϕ 40 mm diameters were subjected to burnishing. The applied technological process parameters of surface plastic working are presented in table 2.

Surface roughness was measured using a HOMMEL TESTER T1000 profile measurement gauge. The length of a segment of measurement was equal to 4.8 mm, and each elementary segment had a length of 0.8 mm. On the basis of the obtained results, an index of the decrease in surface roughness K_{Ra} was determined:

$$K_{Ra} = \frac{R_a'}{R_a} \quad (1)$$

where:

K_{Ra} - index of decrease in surface roughness,

R_a' - material surface roughness after turning,

R_a - material surface roughness after plastic working.

Tablica 2. Parametry procesu technologicznego obróbki nagniataniem

Table 2. Technological process parameters of burnishing

Parametr Parameter		Wartości Value
Siła nagniatania – F_n Burnishing force	[kN]	0,7; 0,9; 1,1
Prędkość nagniatania – V_n Burnishing speed	[m/min]	35; 56; 88; 112
Posuw - f_n Advance	[mm/obr] [mm/rot]	0,13; 0,54; 0,94; 1,2

Ocena wpływu liczby przejść nagniatka na zmianę wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} była przeprowadzona na podstawie planu badań doświadczalnych opartych na układzie Hartley'a (tablica 3). Układ planu badań stosuje trzy wartości dla każdej badanej wielkości (zmienną niezależną). Wartość maksymalna oznaczona jest „+1”, wartość środkowa jako „0”, a minimalna jako „-1”.

Oceniono wpływ liczby przejść narzędzia na parametry geometrii powierzchni: chropowatości (R_t , R_z , R_a , R_q), falistości (W_t , W_z , W_a) oraz udziału materiałowego (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $R_{mr}(50\%)$, M_{r1} , M_{r2}). Powyższe parametry wyznaczono przy użyciu programu komputerowego Turbo Data Win 1.48. Wyznaczony przez program komputerowy parametr $R_{mr}(50\%)$ jest odpowiednikiem znormalizowanego (ISO) udziału materiałowego profilu chropowatości $R_{mr}(c)$. Udział $R_{mr}(c)$ jest ilorazem długości materiałowych elementów profilu na przyjętym poziomie odniesienia c (położenie linii odniesienia) i odcinka pomiarowego. Udział materiałowy ukazuje wykorzystanie powierzchni po obróbce wykańczającej. Wynik pomiaru jest w dużym stopniu uzależniony od przyjętego położenia linii odniesienia. Autorzy programu Turbo Data Win 1.48 przyjęli koncepcję że $R_{mr}(50\%)$ wyznacza położenie linii odniesienia, od najwyższego wierzchołka profilu chropowatości, przecinając krzywą udziału materiałowego w miejscu, dla którego udział materiałowy $R_{mr}(c)$ wynosi 50%.

Wyniki poddano analizie statystycznej – regresji wielorakiej celem określenia ich wpływu na badane właściwości. Ze względu na różną mianą zmiennych niezależnych wpływ poszczególnych parametrów analizowano na podstawie standaryzowanych współczynników regresji (BETA). Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego Statistica 5.5.

The evaluation of the effect of the number of passes of the burnishing tool on the change in the value of the index of decrease in surface roughness K_{Ra} was carried out on the basis of the plan of experimental studies based on the Hartley system (table 3). The system of the study plan uses three values for every studied quantity (independent variable). The maximum value is designated as „+1,” the medium value as “0,” and the minimum value as “-1.”

The effect of the number of tool passes on the following surface geometric parameters was evaluated: roughness (R_t , R_z , R_a , R_q), waviness (W_t , W_z , W_a), and bearing ratio (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $R_{mr}(50\%)$, M_{r1} , M_{r2}). The above parameters were determined using the Turbo Data Win 1.48 computer software. The parameter $R_{mr}(50\%)$ determined by the computer software is the equivalent of the normalized (ISO) bearing ratio of the roughness profile $R_{mr}(c)$. Ration $R_{mr}(c)$ is the quotient of material lengths of profile elements at the accepted level of reference c (position of the line of reference) and for the accepted measurement segment. The bearing ratio indicates surface utilization after finishing work. The result of measurement is dependent in a large degree on the accepted position of the line of reference. The authors of the Turbo Data Win 1.48 program accepted that $R_{mr}(50\%)$ determines the position of the line of reference from the highest point of the roughness profile, cutting through the Abbott-Firestone curve at the point in which bearing ratio $R_{mr}(c)$ is equal to 50%.

The results were subjected to statistical analysis – multiple regression for the purpose of determining their effects on the studied properties. Due to the various names of independent variables, the effect of individual parameters was analyzed on the basis of standardized regression coefficients (BETA). Calculations were carried out using the Statistica 5.5 computer software.

Tablica 3. Program badań wpływu wybranych parametrów nagniatania na zmianę wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} [7, 11]

Table 3. Program of studies of the effect of selected burnishing parameters on the change in the value of the index of decrease in surface roughness K_{Ra} [7, 11]

Nr próby Test no.	Układ planu Hartley'a Hartley plan system		
	x_{Fn}	x_{LP}	x_{fn}
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1
5	-1	0	0
6	+1	0	0
7	0	-1	0
8	0	+1	0
9	0	0	-1
10	0	0	+1
11	0	0	0

4. WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonej obróbki nagniataniem wartości współczynników K_{Ra} określających wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni wahały się w przedziale od 1 do 15. Najmniejszą wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ i największą wartość wskaźnika $K_{Ra} = 15$ uzyskano stosując następujące parametry obróbki nagniataniem: $F_n = 1140 \text{ N}$, $V_n = 112 \text{ m/min.}$, $f_n = 0,13 \text{ mm/obr.}$

Analizując wpływ parametrów nagniatania na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni posłużono się analizą regresji wielorakiej. Uzyskane wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności (poziom p) podano w tablicy 4. Pozostałe współczynniki przyjmują wartości stałe i wynoszą one odpowiednio: współczynnik korelacji $R = 0,71$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,51$, błąd estymacji 2,29.

4. RESULTS OF STUDIES

As a result of the executed burnishing work, the value of coefficients K_{Ra} denoting the index of decrease of surface roughness were within a range of 1 to 15. The lowest value of the arithmetic mean of deviation of unevenness of the profile $R_a = 0.07 \mu\text{m}$ and the highest value of index $K_{Ra} = 15$ were obtained for the following burnishing parameters: $F_n = 1140 \text{ N}$, $V_n = 112 \text{ m/min.}$, $f_n = 0,13 \text{ mm/rot.}$

Multiple regression analysis was used to analyze the effect of burnishing parameters on the index of decrease of surface roughness. The obtained values of standardized regression coefficients (BETA), multiple regression coefficients (B), and significance levels (p levels) are given in table 4. The remaining coefficients have constant values as follows: correlation coefficient $R = 0.71$, coefficient of determination $R^2 = 0.51$, estimation error 2.29.

Tablica 4. Wyniki analizy regresji wielorakiej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w tablicy 2 ($F(3,44) = 15,29$; $p = 0,00$ – wynik analizy wariancji, $R = 0,71$ – współczynnik korelacji, $R^2 = 0,51$ - współczynnik determinacji, błąd estymacji 2,29)

Table 4. The results of multiple regression analysis of the parameter K_{Ra} for variables presented in table 2 ($F(3,44) = 15.29$; $p = 0.00$ – result of variance analysis, $R = 0.71$ – correlation coefficient, $R^2 = 0.51$ - coefficient of determination, estimation error 2.29)

	BETA	B	Poziom p p level
Wyraz wolny <i>Free term</i>		0,068	0,97
Siła nagniatania - F_n <i>Burnishing force</i>	0,41	0,007	0,00
Prędkość nagniatania - V_n <i>Burnishing speed</i>	-0,12	-0,01	0,27
Posuw - f_n <i>Advance</i>	-0,57	-4,44	0,00

gdzie:

BETA – standaryzowany współczynnik regresji wielorakiej,

B – estymator współczynnika regresji wielorakiej,

p – obliczony poziom istotności (significance level), jeżeli jego wartość jest mniejsza od przyjętego poziomu istotności α należy odrzucić hipotezę zerową, która stanowi że zmienna niezależna nie ma istotnego wpływu na wartość zmiennej zależnej, gdy $\alpha < p$, to na danym poziomie istotności α nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

where:

BETA – standardized multiple regression coefficient,

B – estimator of the multiple regression coefficient,

p – calculated significance level; if its value is less than the accepted significance level α , the zero hypothesis, stating that the independent variable does not have a significant effect on the value of a dependent variable, is to be rejected; when $\alpha < p$, then at the given significance level α , there are no grounds for rejecting the zero hypothesis.

Rozpatrując uzyskane wartości standaryzowanych współczynników regresji wielorakiej dla zmiennych niezależnych, można stwierdzić, że największy wpływ na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} ma posuw (BETA = -0,57). Im mniejszy posuw zastosowany 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 obliczonego poziomu istotności ($p = 0,27$). Świadczy to o braku statystycznej istotności wpływu rozpatrywanego parametru na strukturę geometryczną powierzchni czopów. Potwierdza to przeprowadzona analiza regresji wielorakiej, w której nie uwzględniono zmiennej niezależnej prędkości nagniatania (tablica 5).

Taking into account the obtained values of the standardized multiple regression coefficients for independent variables, it can be stated that advance (BETA = -0,57) had the greatest effect on the index of decrease of surface roughness K_{Ra} . The lower the advance used during the burnishing process, the lower the mean deviation of the unevenness profile R_a . The second significant parameter having an effect on the quality of the obtained surface and the K_{Ra} index, is burnishing force. The value of the standardized regression coefficient is indicative of this fact (BETA = 0,41). Along with the increase of burnishing force, there occurs a decrease in the value of the R_a parameter. Coefficient BETA for the variable V_n is characterized by a high value of the calculated significance level ($p = 0,27$). This is indicative of a lack of statistical significance of the effect of the considered parameter on the geometric structure of shaft neck surfaces. This is confirmed by multiple regression analysis, in which the independent variable of burnishing speed was not taken into account (table 5).

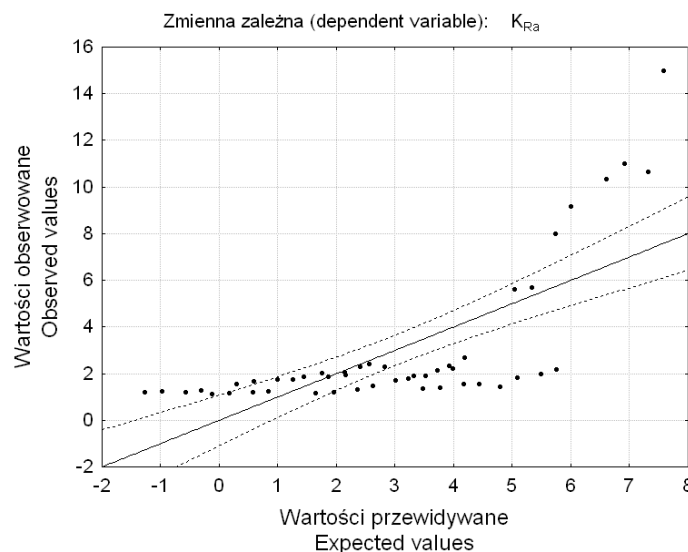
Pozostałe współczynniki przyjmują wartości: współczynnik korelacji $R = 0,70$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,50$, błąd estymacji: 2,29. Współczynniki BETA, B i poziomu p dla posuwu i siły nagniatania osiągnęły takie same wartości dla obu analiz (tablice 4 i 5). W powtórnej analizie statystycznej z pominięciem zmiennej V_n obniżył się stopień dopasowania równania regresji do uzyskanych rzeczywistych wyników, o czym świadczą wartości współczynników determinacji R^2 . Prawdopodobną przyczyną uzyskanej niższej wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,50$), może być brak liniowego wpływu, któregoś z parametrów nagniatania na wartość zmiennej zależnej K_{Ra} (rys. 2 i rys 3).

The remaining coefficients had the following values: correlation coefficient $R = 0.70$, coefficient of determination $R^2 = 0.50$, estimation error: 2.29. Coefficients BETA, B, and p level for advance and burnishing force reached the same values for both analyses (tables 4 and 5). In another statistical analysis with omission of variable V_n , the regression equation matched the obtained real results in a lesser degree, of which the values of the coefficient of determination R^2 are indicative of. The probable cause of the lower value of the coefficient of determination obtained ($R^2 = 0.50$) can be a lack of linear influence of one of the burnishing parameters on the value of dependent variable K_{Ra} (fig. 2 and fig. 3).

Tablica 5. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w tablicy 2 bez uwzględnienia wpływu prędkości nagniatania V_n ($F(2,44) = 22,19$; $p = 0,00$, $R = 0,70$, $R^2 = 0,50$, błąd estymacji 2,29)

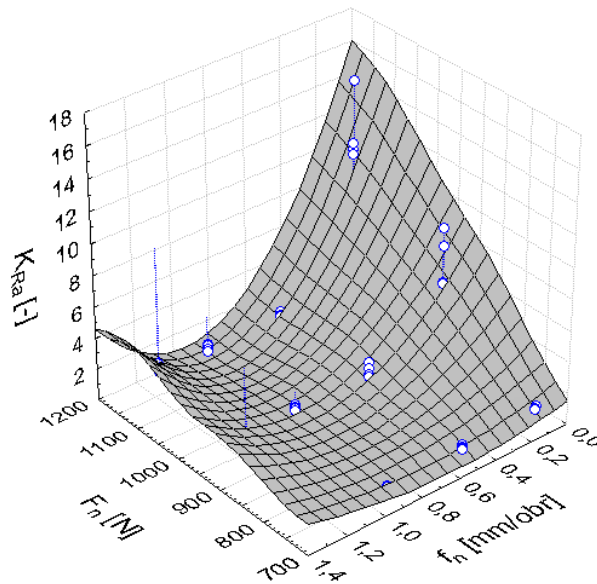
Table 5. Results of multiple regression analysis of the K_{Ra} parameter for the variables presented in table 2 without taking into account the effect of burnishing speed V_n ($F(2,44) = 22.19$; $p = 0.00$, $R = 0.70$, $R^2 = 0.50$, estimation error 2.29)

	BETA	B	Poziom p p level
Wyraz wolny <i>Free term</i>		-0, 84	0,66
Siła nagniatania - F_n <i>Burnishing force</i>	0,41	0,007	0,00
Posuw - f_n <i>Advance</i>	-0,57	-4,44	0,00



Rys. 2. Zależność pomiędzy wartościami przewidywanymi (obliczonymi z równania regresji) a wartościami obserwowanymi (zmierzonymi) dla zmiennej zależnej K_{Ra}

Fig. 2. Dependency between the forecasted values (calculated from the regression equation) and the observed values (measured) for dependent variable K_{Ra}



Rys. 3. Wpływ siły nagniatania i posuwu na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra}
 Fig. 3. The effect of burnishing force and advance on the value of the index of decrease of surface roughness K_{Ra}

Równanie regresji ma postać:

$$K_{Ra} = 0,007F_n - 4,44f_n - 0,84 \pm 2,29 \quad (2)$$

Celem lepszego dopasowania równania regresji wielokrotnej do uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono matematyczną transformację danych, zarówno zmiennych niezależnych jak zmiennej zależnej. Najlepszy efekt (największą wartość współczynnika determinacji) przyniosło logarytmowanie parametru posuwu f_n i parametru K_{Ra} . Zastosowanie takiej transformacji danych zaleca Korzyński [7]. Uzyskane wartości BETA, B i poziomu p podano w tabelicy 6, natomiast pozostałe współczynniki 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 4) w dokładniejszy sposób pozwoli na szacowanie wpływu parametrów obróbkowych nagniatania na strukturę stereometryczną powierzchni czopów wałów pomp krętnych wykonanych ze stali X5CrNi18-10.

The regression equation was as follows:

$$K_{Ra} = 0,007F_n - 4,44f_n - 0,84 \pm 2,29 \quad (2)$$

For better matching of the multiple regression equation to the obtained measurement results, a mathematical transformation of data was carried out for independent variables as well as the dependent variable. The best effect (the highest value of the coefficient of determination) was achieved with the use of a logarithm for the advance parameter f_n and parameter K_{Ra} . The use of such a transformation of data is recommended by Korzyński [7]. The obtained values of BETA, B, and p level are given in table 6, and the remaining coefficients are equal to the following values: correlation coefficient $R = 0.83$, coefficient of determination $R^2 = 0.70$, estimation error: 0.17. The value of the coefficient of determination is indicative of the fact that, the modified regression equation (equation 4) allows for a more exact method of evaluating the effects of burnishing parameters on the stereometric structure of the necks of torque pump shafts made from X5CrNi18-10 steel.

Tablica 6. Wpływ transformacji, matematycznej ($\log K_{Ra}$ i $\log f_n$) na wyniki analizy regresji wielokrotnej, przeprowadzonej dla zmiennych niezależnych przedstawionych w tablicy 2 bez uwzględnienia prędkości nagniatania ($F(2,44) = 51,38$; $p = 0,00$, $R = 0,83$, $R^2 = 0,70$, błąd estymacji 0,17)

Table 6. The effect of the mathematical transformation ($\log K_{Ra}$ and $\log f_n$) on the results of multiple regression analysis carried out for independent variables presented in table 2 without taking into account burnishing speed ($F(2,44) = 51.38$; $p = 0.00$, $R = 0.83$, $R^2 = 0.70$, estimation error 0.17)

	BETA	B	Poziom p p level
Wyraz wolny Free term		-0,64	0,00
Siła nagniatania - F_n Burnishing force	0,52	0,001	0,00
Posuw - $\log f_n$ Advance	-0,65	-0,51	0,00

Równanie regresji wielokrotnej ma wówczas postać:

$$\log K_{Ra} = 0,001F_n - 0,51\log f_n - 0,64 \pm 0,17 \quad (3)$$

In this case, the multiple regression equation is as follows:

$$\log K_{Ra} = 0,001F_n - 0,51\log f_n - 0,64 \pm 0,17 \quad (3)$$

Po przekształceniu:

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

After transformation:

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

Ocenę wpływu liczby przejść nagniataka, posuwu oraz siły na zmianę wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} zrealizowano według trójwartościowego programu badań dla trzech zmiennych niezależnych opracowanego przez Hartley'a (tablica 3). Wartości użytych parametrów nagniatania przedstawiono w tablicy 7. W związku z niewielkim wpływem prędkości nagniatania na wartość wskaźnika K_{Ra} eksperyment przeprowadzono dla jednej wartości tego parametru, a mianowicie 35 m/min. Wybrano najmniejszą prędkość nagniatania, ponieważ z jednej strony ten parametr procesu technologicznego nie ma istotnego wpływu na wskaźnik zmniejszenia chropowatości, jednak mała wartość V_n sprzyja większemu umocnieniu nagniatanej powierzchni [8].

Evaluation of the effect of the number of passes of the burnishing tool, advance, and force on the change of the index of decrease of surface roughness K_{Ra} was realized according to the three-valued study program for three independent variables as developed by Hartley (table 3). The values of the burnishing parameters applied are presented in table 7. Due to the small effect of burnishing speed on the value of index K_{Ra} , the experiment was carried out for one value of this parameter: 35 m/min. The smallest burnishing speed was selected due to the fact that, on one hand, this technological process parameter does not have a significant effect on the index of decrease of roughness, however, a small V_n value is favorable for greater strengthening of the burnished surface [8].

Tablica 7. Użyte parametry procesu technologicznego obróbki nagniataniem do oceny wpływu liczby przejść nagniataka na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości (do planu Hartley'a)

Table 7. Burnishing technological process parameters used for the evaluation of the effect of the number of passes of the burnishing tool on the value of the index of decrease of roughness (for Hartley's plan)

Parametr Parameter		Wartości Value
Siła nagniatania - F_n Burnishing force	[kN]	0,7; 0,9; 1,1
Posuw - f_n Advance	[mm/obr] [mm/rot]	0,13; 0,54; 1,2
Liczba przejść - LP Amount of passes	[-]	1; 2; 4
Prędkość nagniatania - V_n Burnishing speed	m/min	35

Wpływ liczby przejść narzędzia na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} oceniono za pomocą analizy regresji wielorakiej. W tablicy 8 przedstawiono wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielorakiej (B) i poziomów istotności. Współczynniki odnoszące się do analizy wszystkich zmiennych niezależnych przyjmują odpowiednio wartości: współczynnik korelacji $R = 0,68$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,46$ oraz błąd estymacji 3,76. Największy wpływ analizowanych parametrów procesu nagniatania na wartość K_{Ra} ma posuw. Świadczy o tym wartość standaryzowanego współczynnika BETA równy -0,65. Im mniejsza wartość posuwu zastosowana 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 = 0,51). Wraz ze wzrostem wartości siły nagniatania następuje spadek wartości parametru R_a . Wartość BETA = 0,02 dla parametru liczby przejść nagniataka, świadczy o jego bardzo małym wpływie na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni.

The effect of the amount of passes of the burnishing tool on values of the index of decrease of surface roughness K_{Ra} was evaluated using multiple regression analysis. Table 8 shows the values of standardized regression coefficients (BETA), multiple regression coefficients (B), and significance levels. Coefficients related to the analysis of all independent variables have the following values: correlation coefficient $R = 0.68$, coefficient of determination $R^2 = 0.46$, and estimation error 3.76. Among the analyzed burnishing process parameters, advance had the greatest effect on the value of K_{Ra} . The value of standardized coefficient BETA equal to -0.65 was indicative of this. The smaller the value of advance used during the burnishing process, the smaller the value of the mean deviation of the unevenness profile R_a .

The second significant parameter having an effect on the quality of the obtained surface and the K_{Ra} index, is burnishing force. The value of the standardized regression coefficient is indicative of this fact (BETA = 0.51). Along with the increase of burnishing force, there occurs a decrease in the value of the R_a parameter. The BETA = 0.02 value for the parameter of the amount of burnishing tool passes, is indicative of its very small effect on the value of the index of decrease of surface roughness.

Tablica 8. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w tablicy 7
($F(3,9) = 1,99$; $p = 0,2$, $R = 0,68$, $R^2 = 0,46$, błąd estymacji 3,76)

Table 8. Multiple regression analysis results for parameter K_{Ra} for variables presented in table 7
($F(3.9) = 1.99$; $p = 0.2$, $R = 0.68$, $R^2 = 0.46$, estimation error 3.76)

	BETA	B	Poziom p p level
Wyraz wolny <i>Free term</i>		-4,87	0,53
Siła nagniatania - F_n <i>Burnishing force</i>	0,51	0,01	0,13
Liczba przejść – LP <i>Amount of passes</i>	0,02	-0,08	0,94
Posuw – f_n <i>Advance</i>	-0,65	-7,09	0,07

Wartości obliczonych współczynników istotności (poziom p) zmiennych niezależnych dla wskaźnika K_{Ra} wynoszą ponad 5%. Także wynik analizy wariancji $F(3,9)$ wynoszący 1,99 na założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ ($p = 0,2$) nie potwierdza, metodami statystycznymi, istotnego wpływu zmiennych niezależnych F_n , f_n oraz LP na zmienną zależną K_{Ra} . Choć nie wynika stąd, że powiązanie takie nie istnieje. Prawdopodobnymi przyczynami uzyskania stosunkowo dużych wartości obliczonych współczynników istotności może być zarówno ograniczony do 11 prób program badań układu Hartley'a dla eksperymentu trójwartościowego i trzech zmiennych niezależnych, jak również możliwość uzyskania przypadkowych wyników. Celem sprawdzenia wpływu liczby przejść nagniatania na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni przeprowadzona została obróbka nagniataniem od 1 do 4 przejść dla jednego czopa. Zastosowano siłę nagniatania $F_n = 1140$ N, prędkość nagniatania $V_n = 35$ m/min oraz posuw $f_n = 0,13$ mm/obr.

W tablicy 9 przedstawiono wpływ liczby przejść narzędzia na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni. Ze względu na stosunkowo duży rozrzut uzyskanych wyników pomiarów, celem oceny czy istnieje statystycznie istotna różnica pomiędzy poszczególnymi przejściami nagniatania posłużono się testem nieparametryczny dla prób zależnych (test Friedmana).

The values of calculated significance coefficients (p level) of independent variables for index K_{Ra} are above 5%. Also, the result of variance analysis $F(3.9)$ equal to 1.99 for the accepted significance level $\alpha = 0.05$ ($p = 0.2$) does not statistically confirm a significant effect of independent variables F_n , f_n , and LP on dependent variable K_{Ra} . However, this does not prove that such a relation does not exist. The probable causes for obtaining relatively high values of calculated significance coefficients can be the program of studies according to Hartley's system that was limited to 11 tests for a three-value experiment with three independent variables as well as possible obtainment of random results. In order to verify the effect of the number of passes of the burnishing tool on the value of the index of decrease of surface roughness, burnishing was carried out for 1 to 4 passes per shaft neck. A burnishing force of $F_n = 1140$ N, burnishing speed of $V_n = 35$ m/min and advance of $f_n = 0.13$ mm/rot were used.

Table 9 shows the effect of the number of burnishing tool passes on the value of the index of decrease of surface roughness. Due to the relatively large dispersion of obtained measurement results, the nonparametric test for dependent tests (Friedman test) was used for the purpose of determining whether there exists a statistically significant difference between individual amounts of passes of the burnishing tool.

Wybrano ten test, dlatego że dysponowano jedynie 9 pomiarami (dla każdego przejścia) oraz z powodu istnienia zależności pomiędzy uzyskaną chropowatością powierzchni po nagniataniu a gładkością czopa przed zastosowaniem kolejnego cyklu obróbki. Uzyskana wartość testu Friedmana χ^2 ANOVA = 25,18 pozwala na założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$, czyli z prawdopodobieństwem 95%, wyciągnąć wniosek, że istnieje statystycznie istotna różnica pomiędzy wskaźnikami zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} w kolejnych przejściach nagniataka.

Gdy rozpatruje się wpływ liczby cykli nagniatania na chropowatość powierzchni ocenioną w bezwzględnych wartościach średnich, okazuje się, że kolejne przejścia nie powodują znacznego zmniejszenia wartości parametru R_a . Zmiany te po drugim, trzecim, i czwartym przejściu narzędzia nie są tak znaczące jak w pierwszym cyklu powierzchniowej obróbki plastycznej (rys. 4). Po pierwszym przejściu wartość R_a zmniejszyła się do wartości 0,104 μm , czyli o 0,506 μm (R_a po toczeniu wynosiło 0,61 μm), z kolei po czwartym rozpatrywany parametr spadł do wartości 0,06 mm, zmiana wynosiła zatem 0,55 μm . Różnica pomiędzy wartościami R_a po czwartym i pierwszym przejściu wynosiła jedynie 0,044 μm . Na podstawie danych przedstawionych na rys. 4 oraz przeprowadzonych nieparametrycznych testów istotności (test kolejności par Wilcoxona, $T = 3,5$, oraz test znaków, $z = 0,5$), dla prób zależnych stwierdzono przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ brak statystycznego wpływu czwartego przejścia nagniataka na wartość R_a .

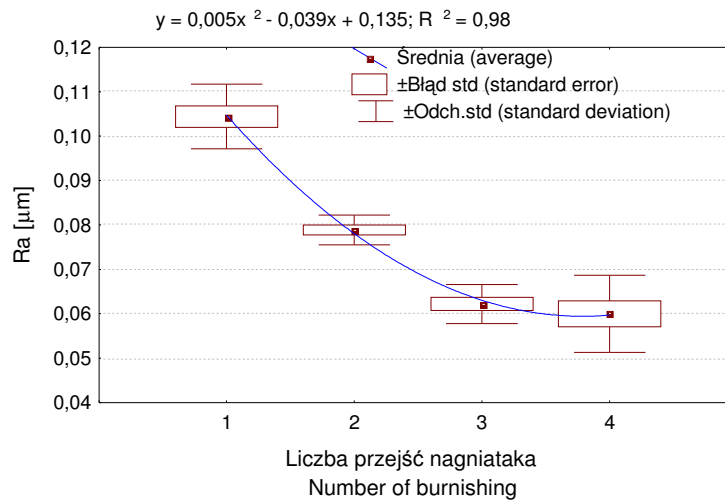
This test was chosen due to the fact that only 9 measurements were available (for every pass), and due to the fact of a dependency between the surface roughness obtained after burnishing and the smoothness of the shaft neck before commencing the next work cycle. The obtained Friedman test value χ^2 ANOVA = 25.18 makes it possible, for the accepted significance level $\alpha = 0.05$, and so, with a probability of 95%, to conclude that there exists a statistically significant difference between indexes of decrease of surface roughness K_{Ra} for subsequent burnishing tool passes.

When the effect of the amount of burnishing cycles on surface roughness evaluated in absolute mean values is considered, it appears, that subsequent passes do not cause a significant decrease in the value of parameter R_a . These changes, after the second, third, and fourth tool pass are not as significant as after the first cycle of surface plastic work (fig. 4). After the first pass, the value of R_a decreased to a value of 0.104 μm , that is, it decreased by 0.506 μm (R_a after turning was equal to 0.61 μm), and after the fourth, the considered parameter decreased to a value of 0.06 mm, with the change being equal to 0.55 μm . The difference between R_a values after the fourth and first pass was equal to only 0.044 μm . On the basis of data presented on fig. 4 and executed nonparametric significance tests (Wilcoxon pair sequence test, $T = 3.5$ and sign test, $z = 0.5$), for dependent tests, a lack of statistical effect of the fourth burnishing tool pass on R_a value for the accepted significance level $\alpha = 0.05$ was stated.

Tablica 9. Wpływ liczby przejść nagniataka na wartość K_{Ra} (parametry nagniatania $F_n = 1140$ N, $V_n = 35$ m/min, $f_n = 0,13$ mm/obr)

Table 9. The effect of the number of burnishing tool passes on K_{Ra} value (burnishing parameters $F_n = 1140$ N, $V_n = 35$ m/min, $f_n = 0.13$ mm/rot)

Liczba przejść <i>Number of passes</i>	Średnia <i>Average</i>	Mediana <i>Median</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maksimum <i>Maximum</i>	Odch. stand. <i>Standard deviation</i>	Błąd stand. <i>Standard error</i>
1	5,83	6,06	5,05	6,06	0,38	0,13
2	7,70	7,58	7,58	8,66	0,36	0,12
3	9,78	10,1	8,66	10,10	0,64	0,21
4	10,27	10,1	7,58	12,12	1,34	0,45



Rys. 4. Wpływ liczby przejść nagniatąka na parametr R_a chropowatości powierzchni czopów (po toczeniu $R_a = 0,61 \mu\text{m}$)

Fig. 4. The effect of the number of burnishing tool passes on parameter R_a of shaft neck roughness (after turning $R_a = 0.61 \mu\text{m}$)

W tabelicy 10 przedstawiono wyniki podstawowej analizy statystycznej dla pozostałych analizowanych parametrów chropowatości powierzchni czopów tj. R_t , R_z , R_q . Zauważono zmniejszenie wartości tych parametrów wraz liczbą przejść narzędzia w porównaniu do toczenia. Przeprowadzona analiza statyczna oceny różnic pomiędzy pierwszym a trzecim przejściem nagniatąka wykazała, że różnica pomiędzy średnimi wartościami maksymalnej wysokości profilu chropowatości (R_t) wynosiła wprawdzie $0,19 \mu\text{m}$, jednak na założonym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) jest ona statystycznie nieistotna (test Wicoxona $T = 17$, test znaków $Z = 0,66$). Związane to jest z dużym rozrzutem uzyskanych wyników pomiarów R_t , zwłaszcza po trzecim przejściu. Świadczy o tym relatywnie duża wartość odchylenia standardowego ($0,49 \mu\text{m}$). Wartość błędu standardowego wynosi $0,16 \mu\text{m}$. Wartość oczekiwana (rzeczywista) R_t zawiera się w przedziale (wartość średnia $R_t \pm 1,96$ razy błąd standardowy) od $0,7 \mu\text{m}$ do $1,31 \mu\text{m}$. Z kolei wartość oczekiwana R_t po pierwszym przejściu znajduje się w przedziale od $1,14 \mu\text{m}$ do $1,36 \mu\text{m}$. Pozostałe parametry, które określają średnie odchylenie profilu chropowatości od linii średniej, czyli R_q oraz R_z , uległy zmniejszeniu po każdym przejściu narzędzia.

Table 10 shows the results of basic statistical analysis for the remaining analyzed shaft neck surface roughness parameters, that is: R_t , R_z , R_q . A decrease in the values of these parameters with the increase of the number of tool passes was observed in comparison to turning. The static analysis of differences between the first and third burnishing tool pass showed, that the difference between mean values of the maximum height of the roughness profile (R_t) was in fact equal to $0.19 \mu\text{m}$, however, with an accepted significance level ($\alpha = 0.05$) it is statistically insignificant (Wilcoxon test $T = 17$, sign test $Z = 0.66$). This is related to the high dispersion of obtained measurement results R_t , especially after the third pass. The relatively high value of standard deviation is indicative of this ($0.49 \mu\text{m}$). Standard error value is equal to $0.16 \mu\text{m}$. Expected value (real value) of R_t is within the range (mean value $R_t \pm 1.96$ times standard error) of $0.7 \mu\text{m}$ to $1.31 \mu\text{m}$. The expected value of R_t after the first pass is within the range from $1.14 \mu\text{m}$ to $1.36 \mu\text{m}$. The remaining parameters determining the mean deviation of the roughness profile from the mean line, that is, R_q and R_z , decreased after every tool pass.

Świadczyć to może o zmianie kształtu krzywej udziału materiałowego powierzchni nagniatanych powierzchni, zmniejszeniu wartości chropowatości rdzenia R_k i zwiększenia wartości udziału nośnego powierzchni $R_{mr}(c)$ (malejąca wartość $R_{mr}(50\%)$ – tablica 11).

Analizując wpływ liczby przejść narzędzia na falistość powierzchni czopów, zaobserwowano jedynie istotny wpływ pierwszego przejścia nagniataka na wartości parametrów W_t , W_z , W_a (rys. 5). Średnia wysokość największego profilu falistości W_t po obróbce skrawaniem wynosiła $3,1 \mu\text{m}$ a po pierwszym nagniataniu spadła do wartości $1,85 \mu\text{m}$, po trzecim wynosiła $1,88 \mu\text{m}$.

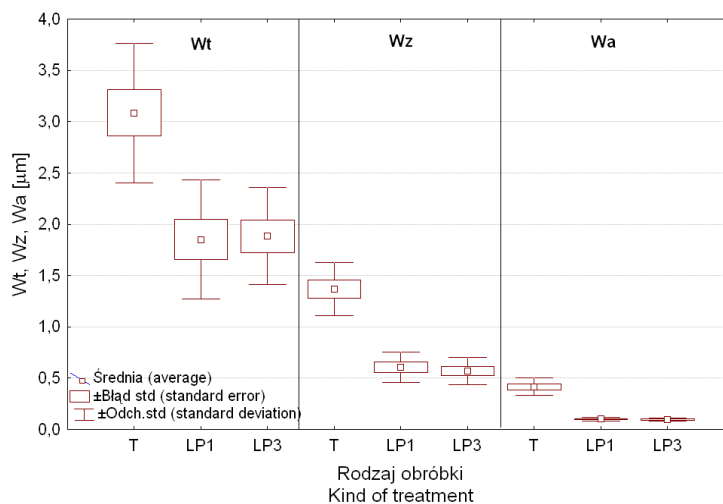
This can indicate a change in the shape of the Abbott-Firestone curve of the burnished surfaces, decrease in the roughness value of the core R_k , and increase of the value of the surface bearing ration $R_{mr}(c)$ (decreasing value $R_{mr}(50\%)$ – table 11).

During analysis of the number of tool passes on the waviness of shaft neck surfaces, the only significant effect observed was that of the first burnishing tool pass on the values of parameters W_t , W_z , W_a (fig. 5). The average height of the greatest waviness profile W_t after machining was equal to $3.1 \mu\text{m}$ and dropped to a value of $1.85 \mu\text{m}$ after the first burnishing pass, and after the third, was equal to $1.88 \mu\text{m}$.

Tablica 10. Wyniki podstawowej analizy statystycznej parametrów chropowatości R_t , R_z , R_q

Table 10. Results of basic statistical analysis of roughness parameters R_t , R_z , R_q

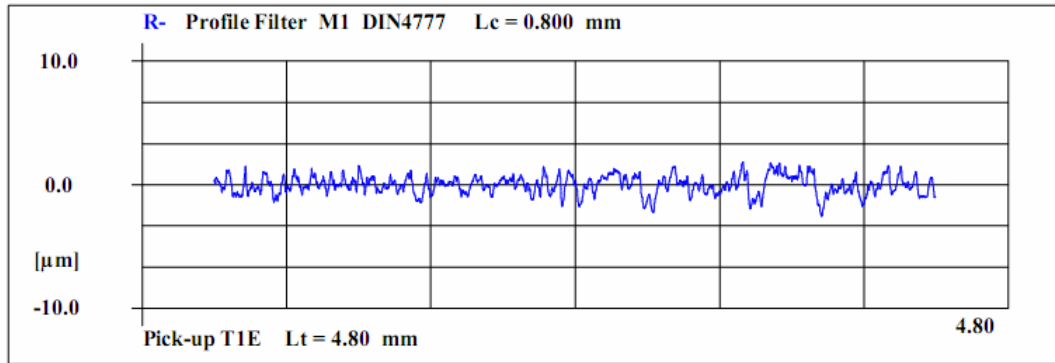
Parametr Parameter [μm]	N ważnych N valid	Średnia Average	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Odch. stand. Standard deviation	Błąd stand. Standard error
Po toczeniu / After turning						
R_t	10	5,07	4,14	6,31	0,69	0,22
R_z		3,81	3,24	4,31	0,34	0,11
R_q		0,77	0,57	0,98	0,12	0,04
Po nagniataniu - 1 przejście / After burnishing - 1 pass						
R_t	9	1,20	0,93	1,66	0,25	0,08
R_z		0,87	0,74	1,11	0,1	0,03
R_q		0,14	0,13	0,17	0,015	0,01
Po nagniataniu - 3 przejście / After burnishing - 3 pass						
R_t	9	1,01	0,58	1,85	0,49	0,16
R_z		0,64	0,47	0,89	0,16	0,05
R_q		0,09	0,08	0,11	0,01	0,004



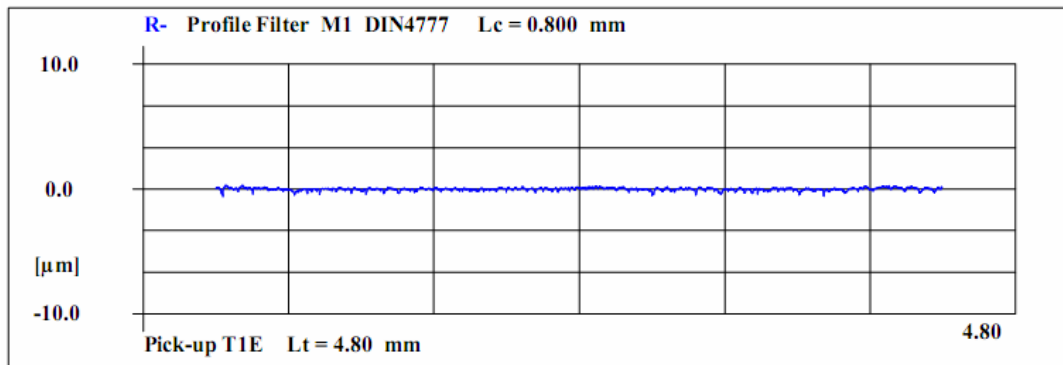
Rys. 5. Wpływ rodzaju obróbki na falistość powierzchni czopów na parametry falistości powierzchni, gdzie T: toczenie, LP1- jedno przejście nagniataka, LP3- trzykrotne przejście nagniataka

Fig. 5. Effect of the type of working on waviness of shaft neck surfaces and parameters of surface waviness, where T: turning, LP1 – one burnishing tool pass, LP3 – three burnishing tool passes

a)



b)



Rys. 6. Profil chropowatości powierzchni czopa przed (a) i po nagniataniu – 1 przejście (b), narzędzia
 Fig. 6. Roughness profile of shaft neck surface before (a) and after burnishing – 1 tool pass (b)

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe profile chropowatości powierzchni czopa po toczeniu, jednokrotnym i trzykrotnym nagniataniu.

W tabeli 11 umieszczono wynik podstawowej analizy statystycznej wybranych parametrów krzywej udziału materiałowego. Operacja nagniatania narzędziem SMRD powoduje zmniejszenie udziału materiału wierzchołków (M_{r1}) oraz wartości dolnej granicy profilu rdzenia chropowatości (M_{r2}), czyli wzrost udziału materiału wgłębień ($100\% - M_{r2}$) w porównaniu do powierzchni toczonej. Obserwowano również spadek pozostałych parametrów krzywej udziału materiału profilu chropowatości. Zredukowana wysokość wzniesień R_{pk} w wyniku trzykrotnego nagniatania zmieniła wartość pięciokrotnie z $0,75 \mu\text{m}$ do $0,15 \mu\text{m}$, a tym samym czop obrobiony plastycznie powinien charakteryzować się większą odpornością na zużycie ściernie podczas współpracy ze szczelnym dławnicą. Malejąca wartość głębokości rdzenia chropowatości R_k świadczy, że nagniatanie poprawia tzw. obciążalność powierzchni tzn. po dotarciu znaczna część powierzchni czopa będzie się stykała z elementem uszczelniającym.

Fig. 6 shows examples of roughness profiles of the shaft neck surface after turning, single and triple burnishing.

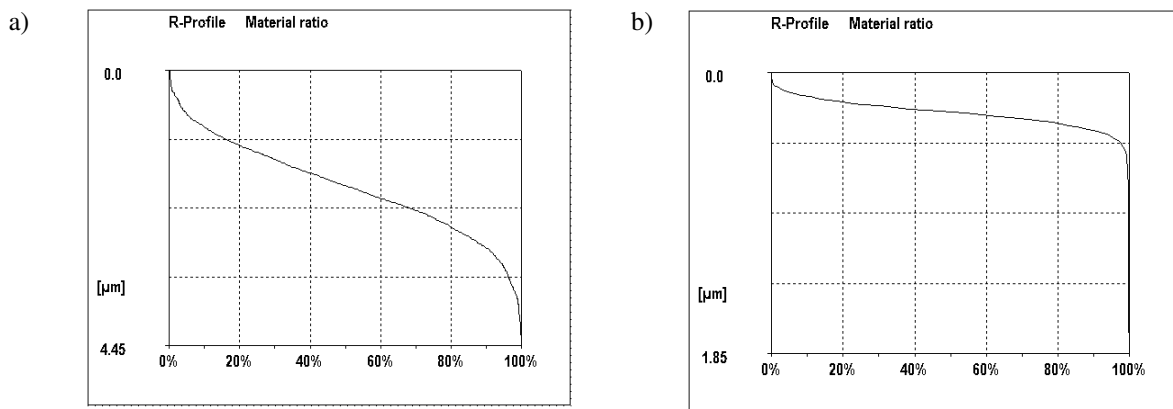
Table 11 presents the result of basic statistical analysis of selected parameters of the Abbott-Firestone curve. The burnishing operation using the SMRD tool causes a decrease in vertex bearing ratio (M_{r1}) and a decrease of the value of the lower limit of the roughness core profile (M_{r2}), that is, an increase in the bearing ratio of recesses ($100\% - M_{r2}$) in comparison to the turned surface. A decrease of the remaining parameters of the roughness profile Abbott-Firestone curve was also observed. The reduced height of upgrades R_{pk} changed its value five times from $0.75 \mu\text{m}$ to $0.15 \mu\text{m}$ as a result of triple burnishing, and the neck subjected to plastic working should be characterized by a greater resistance to abrasive wear during cooperation with the packing sealant. The decreasing value of the depth of the core of roughness R_k indicates, that burnishing improves so-called surface load carrying capacity, that is, after grinding in, a significant part of the neck surface will come into contact with the sealing element.

Po powierzchniowej obróbce plastycznej malejąca wartość zredukowanej głębokości wgłębień R_{vk} powinna zapewnić zwiększenie szczelności łożyska, w porównaniu do czopów toczonech. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe krzywe udziału materiałowego czopów poddanych obróbce skrawaniem oraz nagniatanym.

After surface plastic working, the decreasing value of reduced recess depth R_{vk} should ensure an increase in the tightness of the packing compared to turned shaft necks. Fig. 7 illustrates examples of Abbott-Firestone curves of shaft necks subjected to machining and subjected to burnishing.

Tablica 11. Wyniki podstawowej analizy statystycznej parametrów krzywej udziału materiałowego
 Table 11. Results of basic statistical analysis of Abbott-Firestone curve parameters

Parametr Parameter	N ważnych N valid	Średnia Average	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Odch. stand. Standard deviation	Błąd stand. Standard error
Po toczeniu / After turning						
R_k [μm]	10	2,06	1,50	2,90	0,44	0,14
R_{vk} [μm]		0,77	0,50	1,10	0,17	0,05
R_{pk} [μm]		0,75	0,39	0,94	0,18	0,06
R_{mr} (50%) [μm]		2,62	1,87	3,36	0,48	0,16
M_{r1} [%]		8,54	6,10	10,80	2,11	0,70
M_{r2} [%]		90,57	87,8	94,2	1,67	0,55
Po nagniataniu - 1 przejście / After burnishing - 1 pass						
R_k [μm]	9	0,33	0,29	0,40	0,04	0,01
R_{vk} [μm]		0,09	0,07	0,14	0,02	0,01
R_{pk} [μm]		0,25	0,21	0,31	0,04	0,01
R_{mr} (50%) [μm]		0,31	0,26	0,37	0,048	0,017
M_{r1} [%]		7,02	5,40	9,50	1,49	0,49
M_{r2} [%]		85,84	83,20	88,90	1,70	0,57
Po nagniataniu - 3 przejście / After burnishing - 3 pass						
R_k [μm]	9	0,23	0,21	0,25	0,01	0,004
R_{vk} [μm]		0,09	0,08	0,10	0,01	0,003
R_{pk} [μm]		0,15	0,11	0,19	0,03	0,01
R_{mr} (50%) [μm]		0,26	0,21	0,31	0,033	0,011
M_{r1} [%]		8,38	6,50	10,00	1,15	0,38
M_{r2} [%]		87,44	84,3	89,5	1,62	0,54



Rys. 7. Przykładowe krzywe udziału materiałowego czopów poddanych obróbce toczeniem (a) oraz trzykrotnie nagniatanym (b)

Fig. 7. Examples of Abbott-Firestone curves of shaft necks subjected to turning (a) and triple burnishing (b)

5. PODSUMOWANIE

Podczas nagniatania czopów wałów wykonanych ze stali X5CrNi18-10 narzędziem SMRD firmy Yamato stwierdzono:

- Po jednym przejściu narzędzia, największą wartość współczynnika zmniejszenia chropowatości $K_{Ra} = 15$, a tym samym najmniejszą wartość chropowatości powierzchni czopa $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ uzyskano stosując następujące parametry procesu technologicznego: siła nagniatania $F_n = 1140 \text{ N}$, prędkość nagniatania $V_n = 112 \text{ m/min.}$, posuw $f_n = 0,13 \text{ mm/obr.}$
- Największy wpływ spośród analizowanych parametrów na wartość współczynnika zmniejszenia chropowatości K_{Ra} ma posuw. Zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna.
- Wartość prędkości nagniatania nie wpływa istotnie na zmniejszenie chropowatości powierzchni.
- Liczba przejść narzędzia podczas nagniatania w mniejszy sposób wpływa na zmniejszenie wartości parametru chropowatości powierzchni materiału R_a niż posuw i siła nagniatania.
- Na zmniejszenie falistości powierzchni obrabianych czopów wpływa jedynie jednokrotnie przeprowadzona powierzchniowa obróbka plastyczna.
- Wielokrotne nagniatanie powierzchni czopów korzystnie wpływa na przebieg krzywej udziału materiałowego.
- Zaobserwowano zmniejszenie wartości parametrów krzywej udziału materiałowego: M_{r1} , M_{r2} , R_k , R_{vk} , R_{pk} , $R_{mr}(50\%)$ nagniatanych czopów w porównaniu do operacji toczenia.
- Celowe jest wykonywanie co najwyżej trzech cykli nagniatania.
- Ze względu na zmniejszoną chropowatość i falistość powierzchni, a także korzystniejszy przebieg krzywej udziału materiałowego, nagniatanie czopów wałów okrętowych pomp krętnych powinno przyczynić się do zmniejszenia zużycia współpracujących tribologicznie elementów dławnic i zwiększenia ich szczelności.

5. CONCLUSION

During the burnishing of shaft necks made from X5CrNi18-10 steel using a SMRD burnishing tool of the Yamato company, it was stated that:

- *After one tool pass, the greatest value of the index of decrease of roughness $K_{Ra} = 15$, and the smallest value of neck surface roughness $R_a = 0.07 \mu\text{m}$ was obtained using the following technological process parameters: burnishing force of $F_n = 1140 \text{ N}$, burnishing speed of $V_n = 112 \text{ m/min}$ and advance of $f_n = 0.13 \text{ mm/rot.}$*
- *Among the analyzed parameters, the one with the greatest effect on the index of decrease of roughness K_{Ra} was advance. This dependency is inversely proportionate.*
- *The value of burnishing speed does not have a significant effect on decreasing surface roughness.*
- *The number of tool passes during burnishing has a lesser effect on decreasing the value of material surface roughness parameter R_a than advance and burnishing force.*
- *Surface waviness of the shaft necks is only decreased during a single cycle of surface plastic working.*
- *Manifold burnishing of neck surfaces has an advantageous effect on the course of the Abbott-Firestone curve.*
- *A decrease in the value of Abbott-Firestone curve parameters was observed: M_{r1} , M_{r2} , R_k , R_{vk} , R_{pk} , $R_{mr}(50\%)$ of burnished shaft necks in comparison with the turning operation.*
- *Execution of three burnishing cycles at most has meaning.*
- *Due to decreased roughness and waviness of the surface, as well as a more advantageous course of the Abbott-Firestone curve, burnishing of shaft necks of ship torque pumps should serve to decrease wear of tribologically cooperating elements of packing and increase their tightness.*

Uzyskane wyniki współczynnika zmniejszenia chropowatości, jak również dane dotyczące umocnienia powierzchni, posłużą do wyboru parametrów nagniatania metodą wielokryterialnej optymalizacji matematycznej. Wyznaczone parametry procesu technologicznego zostaną wykorzystane do wykonania próbek przeznaczonych do badań właściwości korozyjnych i tribologicznych.

The results of the index of decrease of roughness obtained, as well as data regarding surface strengthening, will serve for the selection of burnishing parameters using the multi-criterion method of mathematical optimization. The determined technological process parameters will be used to make samples for studying tribological and corrosion properties.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] El-Axira M.H., Othmanb O.M., Abodienac A.M., Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 196, (2008) 120–128.
- [2] El-Taweel T. A., El-Axira M. H., Analysis and optimization of the ball burnishing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2009) 41:301–310.
- [3] Górski Z, Perepeczko A., *Pompy okrętowe*, Wyd. Studium Doskonalenia Kadr s.c. WSM, Gdynia 1996.
- [4] Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E., Chaoui K., Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 180 (2006) 130–136.
- [5] Jędral W., *Pompy wirowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [6] Korzyński M., Relief making on bearing sleeve surface by eccentric burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 131–138.
- [7] Korzyński M., *Metodyka eksperymentu – planowanie, realizacja, i statystyczne opracowanie wyników eksperymentu technologicznego*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [8] Labuda W., Starosta R., Estimation of the influence of burnishing parameters on X5CrNi18-10 steel, *Solid State Phenomena*, 165 (2010) pp 300-3051.
- [9] Piaseczny L., *Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992.
- [10] Piotrowski I., Witkowski K., *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*. Wyd. Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2002.
- [11] Przybylski W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. Tom 2, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.