

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF PASSES NUMBER BURNISHING TOOL ON SHIPS PUMPS SHAFTS SURFACE LAYERS STRENGTHENING AND ROUGHNESS CHANGES

Adam Charchalis, Robert Starosta, Wojciech Labuda

Gdynia Maritime University of Marine Engineering

Morska Street 83, 81-225 Gdynia, Poland

tel.: +48586901549, +48 58 6901249, fax: +48 58 6901399

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

Abstract

Angular momentum pumps are very often applied on ships. Because the pumps are working in hard conditions they are made from cavitation wear proof and electrochemical corrosion resistant 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 it possible to achieve high technological quality of elements. Because of many burnishing advantages, the method was proposed to angular momentum pumps shafts treatment instead of finish machining (finish turning, grinding, lapping).

The tool used was a roller burnishing tool SRMD type produced by Yamato. During the technological process, optimum burnishing parameters were applied in order to ensure high degree of surface layer relative hardness and to decrease surface roughness of angular momentum pumps shafts made of stainless steel X5CrNi1810.

The object of the paper was to define the influence of burnishing tool passes number on the ships pumps shafts surface layers strengthening and roughness changes.

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

OCENA WPŁYWU LICZBY PRZEJŚĆ NAGNIATAKA NA UMOCNINIE WARSTWY WIERZCHNIEJ I ZMIANĘ CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI CZOPÓW WAŁÓW POMP OKRĘTOWYCH

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 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.

Proces nagniatania przeprowadzono nagniataniem jednorolkowym SRMD firmy Yamato. Podczas procesu technologicznego zastosowano zoptymalizowane parametry nagniatania, umożliwiające uzyskanie największego stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej i zmniejszenia chropowatości powierzchni czopów wałów okrętowych pomp krętnych wykonanych ze stali nierdzewnej X5CrNi1810. Celem pracy było określenie wpływu liczby przejść nagniataka na poprawę twardości i chropowatości czopów wałów pomp okrętowych.

Słowa kluczowe: obróbka plastyczna, nagniatanie, stal nierdzewna, warstwa wierzchnia, pompy krętne

1. Wprowadzenie

Technologia zastosowana w procesie produkcyjnym ma istotny wpływ na trwałość części maszyn. Podczas obróbki wykańczającej nadawane są ostateczne wymiary i właściwości użytkowe

danego elementu. Osiąga się to poprzez zastosowanie odpowiedniego rodzaju obróbki oraz dobór właściwych parametrów technologicznych procesu. Jedną z metod mechanicznej obróbki wykańczającej, która umożliwia otrzymanie warstwy wierzchniej o szczególnie korzystnych właściwościach jest obróbka nagniataniem. Obróbka ta wykorzystuje zjawisko powierzchniowych odkształceń plastycznych na zimno wytwarzanych w warstwie wierzchniej przedmiotu [1, 2]. Są trzy podstawowe cele stosowania obróbki nagniataniem w procesach produkcyjnych części maszyn:

- obróbka gładkościowa, która powoduje zmniejszenie nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej nagniataniem,
- obróbka umacniająca, która podwyższa właściwości eksploatacyjne (tj. odporności na zużycie zmęczeniowe, cierne i korozyjne), przez zmianę właściwości materiału w warstwie wierzchniej,
- obróbka wymiarowo-gładkościowa, która wraz ze zwiększeniem dokładności wymiarowej powoduje jednocześnie zmniejszenie chropowatości powierzchni do wymaganej wartości.

Proces nagniatania umożliwia obróbkę powierzchni z dużą dokładnością wymiarową w 7 i 6 klasie dokładności i pozwala na osiągnięcie wielu korzyści, do których należy zaliczyć:

- możliwość uzyskania powierzchni o małej chropowatości ($R_a = 0,32-0,04 \mu\text{m}$) i dużym udziale nośnym profilu chropowatości (90%),
- wzrost twardości powierzchni,
- zwiększenie odporności na zmęczenie,
- 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 w określonych przypadkach obróbki cieplnej,
- dużą wydajność procesu (jedno przejście robocze narzędzia) i redukcja kosztów wytwarzania,
- dużą trwałość nagniataków.

Badania związane z obróbką nagniataniem i jej wpływem na warstwę wierzchnią prowadzone są w ośrodkach naukowych [1-8], których programy badawcze obejmują zagadnienia dotyczące nagniatania żeliw [8], niektórych stopów żaroodpornych, stali nierdzewnych, stopów miedzi i aluminium [3, 4], tytanu i jego stopów [6] oraz powłok galwanicznych, dyfuzyjnych i napawanych oraz części wykonanych przez spiekanie proszków metali.

Technologia nagniatania może być stosowana w zakładach przemysłu maszynowego zarówno w produkcji jednostkowej i seryjnej. Umożliwia ona wyeliminowanie tradycyjnej obróbki ścierniej takiej jak szlifowanie, dogładzanie, gładzenie czy polerowanie. Dlatego ostateczne kształtowanie wymiarów i właściwości użytkowych przez nagniatanie jest obróbką bezwiórową i bezpyłową. Pozwala to na zaliczanie jej do ekologicznych metod obróbki [5].

Celem pracy było uzyskanie odpowiedniej jakości technologicznej oraz właściwości eksploatacyjnych czopów wałów pomp odśrodkowych do wody morskiej stosowanych w okrętownictwie. W ramach prowadzonych badań przeprowadzono optymalizację parametrów technologicznych obróbki nagniataniem z uwagi na twardość i parametry stereometryczne powierzchni czopów wałów pomp odśrodkowych. Dlatego proces nagniatania należy prowadzić z uwagi na minimalizację chropowatości powierzchni współczynnika R_a oraz/lub maksymalizację stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U .

2. Metodyka badań

Wałki ze stali nierdzewnej X5CrNi1810 poddano wstępnej obróbce skrawaniem w celu przygotowania czopów pod obróbkę nagniataniem. Proces tocznia 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 $V_c = 112$ m/min, posuw $f = 0,27$ mm/obr, głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Średnia wartość współczynnika chropowatości R_a wyniosła $0,61$ μ m. Obrabiana stal charakteryzowała się po operacji toczenia średnią twardością 301 HV.

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} :

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

gdzie:

K_{Ra} - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,

R'_a - chropowatość powierzchni materiału,

R_a - chropowatość powierzchni materiału po powierzchniowej obróbce plastycznej.

Określenie wpływu liczby przejść nagniataka na zmianę wartości stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U oraz wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} będzie realizowany przy pomocy badań doświadczalnych opartych na układzie Hartley'a [9, 10]. Układ planu badań stosuje trzy wartości każdej badanej wielkości. Wartość maksymalna oznaczona jest „+1”, wartość środkowa jako „0”, a minimalna jako „-1”.

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).

3. Wyniki badań

Program badań i realizacja wpływu liczby przejść nagniataka na zmianę stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U przedstawiono w Tab. 1. Natomiast program badań i realizacja wpływu liczby przejść nagniataka na zmianę wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} przedstawiono w Tab. 2.

Analiza statystyczna wyników badań procesu nagniatania wykazała, że największy wpływ na wartość współczynnika S_U ma prędkość nagniatania i wraz z jej wzrostem następuje zmniejszenie stopnia względnego umocnienia materiału. W mniejszym stopniu wpływa na niego siła nagniatania. Jednakże wraz z jej wzrostem następuje umocnienie warstwy wierzchniej materiału. Najmniejszy wpływ na wartość stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U ma posuw. Analiza regresji wielokrotnej wykazała, że jest on statystycznie nieistotny. Uzyskane równanie regresji wielokrotnej przedstawia wzór 3.

$$S_u = 0,004F - 0,11V_n + 12,05 \pm 2,42. \quad (3)$$

Tab. 1. Program badań wpływu wybranych parametrów nagniatania na zmianę stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U

Tab. 1. The research program of influence chosen burnishing parameters on surface layers strengthening (S_U)

Nr próby	układu planu Hartley'a			Realizacja planu Hartley'a		
	x_F	x_{LP}	x_{Vn}	Siła F [N]	Liczba przejść nagniatąka LP	Prędkość nagniatania V_n [m/min]
1	-1	-1	-1	720	1	35
2	+1	-1	-1	1140	1	35
3	-1	+1	-1	720	4	35
4	+1	+1	+1	1140	4	112
5	-1	0	0	720	2	56
6	+1	0	0	1140	2	56
7	0	-1	0	930	1	56
8	0	+1	0	930	4	56
9	0	0	-1	930	2	35
10	0	0	+1	930	2	112
11	0	0	0	930	2	56

Tab. 2. Program badań wpływu wybranych parametrów nagniatania na zmianę stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej K_{Ra}

Tab. 2. The research program of influence chosen burnishing parameters on roughness reduction index value (K_{Ra})

Nr próby	układu planu Hartley'a			Realizacja planu Hartleya Dla oceny S_U parametr posuwu 0,13 mm/obr		
	x_F	x_{LP}	x_f	Siła F [N]	Liczba przejść nagniatąka LP	Posuw [mm/obr]
1	-1	-1	-1	720	1	0,13
2	+1	-1	-1	1140	1	0,13
3	-1	+1	-1	720	4	0,13
4	+1	+1	+1	1140	4	1,20
5	-1	0	0	720	2	0,54
6	+1	0	0	1140	2	0,54
7	0	-1	0	930	1	0,54
8	0	+1	0	930	4	0,54
9	0	0	-1	930	2	0,13
10	0	0	+1	930	2	1,20
11	0	0	0	930	2	0,54

Do przeprowadzenia badań wg planu Hartley'a dla wartości S_U proces technologiczny nagniatania został przeprowadzony przy stałej wartości posuwu równej $f = 0,13$ mm/obr. Pozostałe parametry procesu nagniatania wykorzystane w badaniach przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Parametry procesu technologicznego obróbki nagniataniem wg planu Hartley'a dla wartości S_U

Tab. 3. Technological parameters of burnishing process according to Hartley for parameters S_U

Parametr		Wartości
Siła nagniatania - F	[kN]	0,7; 0,9; 1,1
Prędkość nagniatania - V_c	[m/min]	35; 56; 112
Liczba przejść - LP	[-]	1; 2; 4

Wpływ liczby przejść nagniatąka na stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej przeprowadzono za pomocą analizy regresji wielokrotnej. Wartości standaryzowanych współczyn-

ników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności przedstawiono w Tab. 4.

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

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		8,12	0,36
Siła nagniatania - F	0,17	0,004	0,66
Liczba przejść - LP	-0,13	-0,422	0,73
Prędkość nagniatania - V_n	-0,35	-0,05	0,39

Stałe współczynniki przyjmowały odpowiednio wartości: współczynnik korelacji $R = 0,40$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,16$ oraz błąd estymacji 4,28. Analiza wpływu parametrów nagniatania uwzględniająca liczbę przejść nagniataka na wartość S_U potwierdziła wyniki mające na celu optymalizację technologii nagniatania. Największy wpływ na wartość względnego umocnienia warstwy wierzchniej ma prędkość nagniatania, a wynika to z największej wartości standaryzowanego współczynnika regresji BETA wynoszącej $-0,35$. Wzrost prędkości nagniatania powoduje zmniejszenie wartości stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej. W mniejszym stopniu na wartość S_U wpływa siła nagniatania ($BETA = 0,17$) ale jej wzrost powoduje zwiększenie wartości umocnienia materiału. Parametrem, który w najmniejszym stopniu wpływa na wartość S_U jest liczba przejść nagniataka ($BETA = -0,13$), a kolejne przejścia nagniataka nie powodują wzrostu twardości powierzchni poddanej obróbce nagniatania.

Analiza statystyczna wyników badań dotyczących optymalizacji procesu nagniatania wykazała, że największy wpływ na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni ma posuw. Wraz z jego wzrostem następuje zmniejszenie współczynnika K_{Ra} . W mniejszym stopniu na wartość K_{Ra} wpływa siła nagniatania, ale jej wzrost powoduje umocnienie materiału. Najmniejszy wpływ na wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a ma prędkość nagniatania. Analiza regresji wielokrotnej wykazała, że jest ona statystycznie nieistotna. Uzyskane równanie regresji wielokrotnej przedstawia wzór 4.

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

Do przeprowadzenia badań wg planu Hartley'a dla wartości K_{Ra} proces technologiczny nagniatania został przeprowadzony przy stałej wartości prędkości nagniatania równej $V_n = 35$ m/min. Pozostałe parametry procesu nagniatania wykorzystane w doświadczeniu zostały przedstawione w Tab. 5.

Tab. 5. Parametry procesu technologicznego obróbki nagniataniem wg planu Hartley'a dla wartości K_{Ra}
 Tab. 5. Technological parameters of burnishing process according to Hartley for parameters K_{Ra}

Parametr		Wartości
Siła nagniatania - F	[kN]	0,7; 0,9; 1,1
Posuw - f	[mm/obr]	0,13; 0,54; 1,2
Liczba przejść - LP	[-]	1; 2; 4

Podobnie jak dla względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U , tak i dla wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} wpływ liczby przejść nagniataka określono za pomocą analizy regresji wielokrotnej. W Tab. 6 przedstawiono wartości standaryzowanych współczynników regresji (BETA), współczynników regresji wielokrotnej (B) i poziomów istotności. Stałe współczynniki przyjmują odpowiednio wartości: współczynnik korelacji $R = 0,67$, współczynnik determinacji $R^2 = 0,46$ oraz błąd estymacji 3,76. Największy wpływ analizowanych parametrów

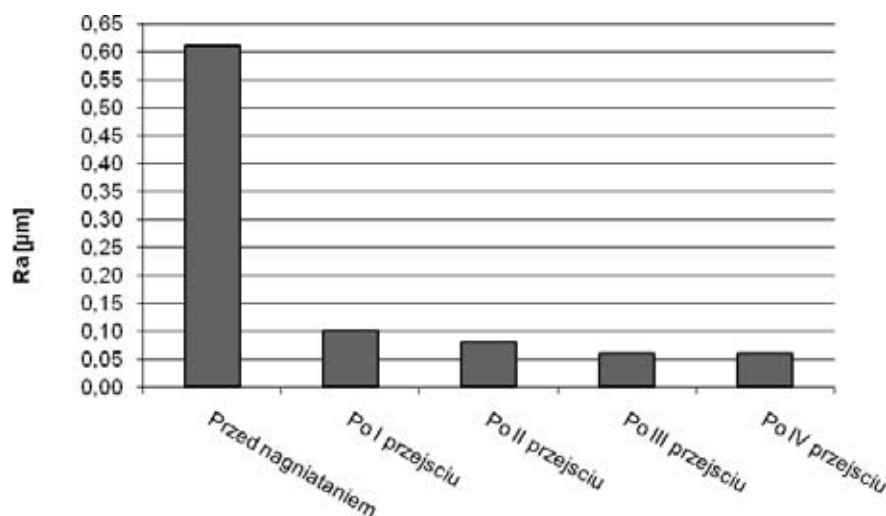
procesu nagniatania na wartość K_{Ra} ma posuw. Świadczy o tym wartość standaryzowanego współczynnika BETA równa $-0,65$. Im mniejsza wartość posuwu użyta w operacji nagniatania, tym wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a jest mniejsza. Drugim istotnym parametrem wpływającym na jakość uzyskanej powierzchni, a tym samym na wskaźnik K_{Ra} jest siła nagniatania. Świadczy o tym uzyskana wartość standaryzowanego współczynnika regresji (BETA = $0,51$). Wraz ze wzrostem wartości siły nagniatania następuje spadek wartości parametru R_a . Wartość BETA = $-0,02$ dla parametru liczby przejść nagniatania, świadczy o jego najmniejszym wpływie na wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni. Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ parametrów nagniatania dla procesu optymalizacji technologii nagniatania dla wartości K_{Ra} .

Tab. 6. Wyniki analizy regresji wielokrotnej parametru K_{Ra} dla zmiennych przedstawionych w Tab. 3
Tab. 6. The results of K_{Ra} parameter statistic analysis for variables presented in Tab. 3

	BETA	B	poziom p
Wyraz wolny		-4,87	0,53
Siła nagniatania - F	0,51	0,01	0,13
Liczba przejść - LP	-0,02	-0,08	0,94
Posuw - f	-0,65	-7,09	0,07

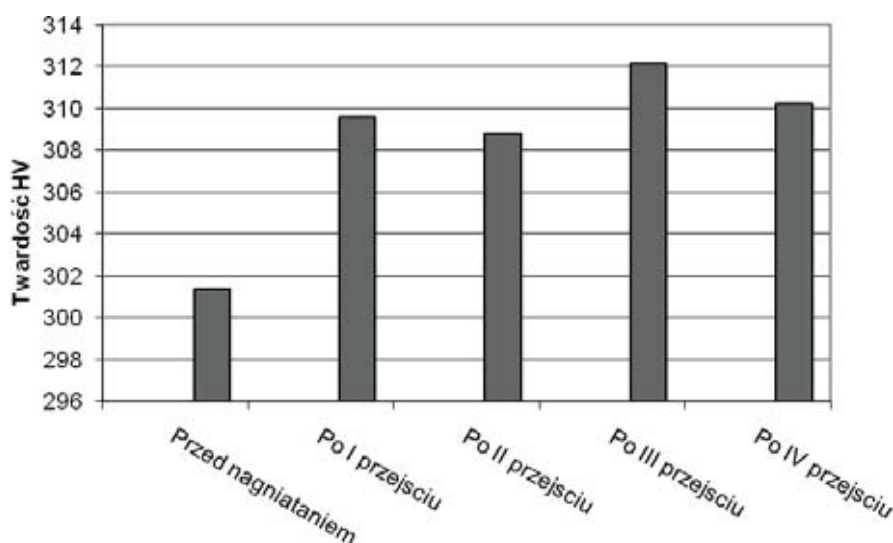
Wartości współczynników istotności (poziom p) na zmienne niezależne zarówno dla współczynnika S_U i K_{Ra} wynoszą ponad 5%. Jest to spowodowane zbyt małą liczbą wyników pomiarów poddanych analizie statystycznej. W celu potwierdzenia wpływu liczby przejść nagniatania na warstwę wierzchnią przeprowadzona została obróbka nagniataniem dla 4 przejść, przy optymalnych parametrach nagniatania uzyskanych w badaniach optymalizacji. Tak więc dla procesu technologicznego mającego na celu uzyskanie dużego współczynnika stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U oraz największego wskaźnika zmniejszenia chropowatości K_{Ra} należy zastosować jak największą siłę nagniatania ($F = 1140$ N), najmniejszą prędkość nagniatania ($V_n = 35$ m/min) oraz jak najmniejszy posuw ($f = 0,13$ mm/obr).

Wpływ liczby przejść nagniatania na wartość parametru R_a przedstawia Rys. 1. Uzyskane wyniki potwierdzają przyjęty plan eksperymentu wg Hartley'a. Świadczy o tym niewielki wpływ liczby przejść narzędzia nagniatającego na uzyskaną gładkość powierzchni. Największy wpływ na wskaźnik zmniejszenia chropowatości K_{Ra} ma pierwsze przejście nagniatania. Kolejne przejścia powodują także zmniejszenie wartości parametru R_a , ale nie są one tak znaczące jak w pierwszym cyklu.



Rys. 1. Wpływ liczby przejść nagniatania na wartość parametru R_a
Fig. 1. The influence of burnishing tool passes number on roughness reduction index value (K_{Ra})

Analiza wpływ liczby przejść nagniataka na wartość parametru S_U (Rys. 2) potwierdza, że największy wpływ na wzrost twardości w warstwie wierzchniej ma pierwsze przejście narzędzia nagniatającego. Proces nagniatania uwzględniający kolejne przejścia nagniataka nie powoduje wyraźnego wzrostu wartości twardości na powierzchni obrabianego czopa wału.



Rys. 2. Wpływ liczby przejść nagniataka na twardość powierzchni
Fig. 2. The influence of burnishing tool passes number on surface layers strengthening (S_U)

4. Wnioski

Zastosowanie procesu nagniatania dla stali odpornej na korozję X5CrNi1810 umożliwia zmniejszenia wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności R_a oraz zwiększenia stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_U .

Proces technologiczny mający na celu uzyskanie małej wartości chropowatości powierzchni powinien być przeprowadzony z możliwie największą siłą nagniatania i najmniejszym posuwem. Natomiast w celu uzyskania dużego współczynnika stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej proces technologiczny powinien być przeprowadzony z jak największą siłą nagniatania i najmniejszą prędkością nagniatania. Liczba przejść nagniataka zarówno dla pierwszego, jak i w drugiego przypadku nie powoduje znaczącej poprawy wartości współczynników K_{Ra} i S_U .

Liczba przejść narzędzia nagniatającego, nie ma również znaczącego wpływu na proces technologiczny mający na celu uzyskanie jak największej wartości wskaźnika K_{Ra} przy jednoczesnym umocnieniu warstwy wierzchniej. Parametry nagniatania powinny mieć 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 konstytuowanej przez nagniatanie na trwałość elementów maszyn. Wybrane problemy Trybologii*, PWN, Warszawa 1990.
- [3] Przybylski, W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
- [4] Przybylski, W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Tom 2*, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
- [5] Przybylski, W., Wojciechowski, J., *Technological and organizational aspects of cleaner manufacturing*, First Cleaner Production International Conference, Rydzyna 1996.

- [6] 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, No. 29, pp. 1302–1310, 2007.
- [7] Kukielka, L., *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Monografia WM, Nr 47, Koszalin 1994.
- [8] Tubielewicz, K., *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Monografie, Nr 69, Częstochowa 2000.
- [9] Górecka, R., Polański, Z., *Metrologia warstwy wierzchniej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
- [10] Polański, Z., *Metodyka badań doświadczalnych*, Politechnika Krakowska, Warszawa 1984.