

Nr 100/2017, 76–86  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## NAGNIATANIE STALIWA TYPU DUPLEKS W ASPEKTCIE ZWIĘKSZENIA TWARDOŚCI I ZMNIEJSZENIA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

### THE BURNISHING PROCESS OF TWO-PHASE CAST STEEL IN THE ASPECT OF REDUCING ROUGHNESS AND INCREASE OF HARDNESS

**Tomasz Dyl<sup>1\*</sup>, Dariusz Rydz<sup>2</sup>, Grzegorz Stradomski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów, e-mail: dylu@am.gdynia.pl

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Częstochowa

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nagniatania statycznego naporowego tocznego (NSNT) staliwa typu dupleks w gatunku GX2CrNiMoCuN25-6-3-3. Nagniatanie czopów wałów przeprowadzono z wykorzystaniem nagniataka krążkowego (NK-01). Po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych określono, że występuje wzrost stopnia umocnienia, następuje zmniejszenie chropowatości, a krzywa udziału materiałowego ma kształt wypukły, co, biorąc pod uwagę nośność powierzchni, wpływać będzie bezpośrednio na jej odporność na zużywanie ścierne i korozyjne. Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że na twardość warstwy wierzchniej oraz chropowatość zewnętrznych powierzchni walcowych istotny wpływ mają parametry technologiczne obróbki: posuw nagniatania, głębokość dosuwu nagniataka, prędkość nagniatania i liczba przejść obróbkowych. Obróbkę nagniataniem staliwa typu dupleks gładkościową i umacniającą wykonano przy zadanych parametrach: posuw nagniatania  $f_n = 0,2$  mm/obr; głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm, prędkość nagniatania  $v_n = 70$  m/min i liczba przejść obróbkowych  $i = 2$ .

**Słowa kluczowe:** nagniatanie statyczne naporowe toczne (NSNT), wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni, stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej, staliwo typu dupleks.

**Abstract:** The paper presents results of experimental studies of burnishing rolling – pressuring (BRP) cast steel grade GX2CrNiMoCuN25-6-3-3. Burnishing of the shafts neck is proposed using burnisher roller (BR-01). In experimental studies it has been stated that there is a surface layer increase in hardness, roughness reduction and the material ratio curve is convex shaped, which, taking into account the load capacity of the surface, will directly affect its resistance to wear and corrosion. After studies it was found that the hardness of the surface layer and the roughness of the shaft necks are significantly

influenced by technological parameters of processing. To achieve the objectives of strengthen and smooth burnishing of cast steel duplex should be used: feed  $f_n = 0.2$  mm/rev and disk burnishing tool feed  $a_n = 1.0$  mm, burnishing speed  $v_n = 70$  m/min and the passes  $i = 2$ .

**Keywords:** burnishing rolling – pressuring process (BRP), surface roughness reduction ratio, degree of relative strain hardening, duplex cast steel.

## 1. WSTĘP

Nagniatanie jest powierzchniową obróbką plastyczną, która polega na kształtowaniu właściwości technologicznych warstwy wierzchniej (WW) przy wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego. Element obrabiany jest wskutek określonego, stykowego współdziałania narzędzia z powierzchnią obrabianą [Przybylski 1987; Kukiełka 1994; Korzyński 2007; Czechowski i in. 2012; Balland i in. 2013; Dyl 2016]. W wyniku oddziaływania nagniatąka na przedmiot obrabiany następuje nie tylko zmniejszenie chropowatości powierzchni, o korzystnym udziale nośnym materiałowym, ale również kształtowanie korzystnych użytkowych właściwości stref WW [Przybylski 1987; Tubielewicz 1996; Dyl 2014, 2016]. Jakość wyrobu nagniatanego zależy od wielu czynników, z których najważniejsze są: właściwości materiału przedmiotu obrabianego, geometria elementu nagniatającego, parametry i warunki realizacji procesu nagniatania [Przybylski 1987; Tubielewicz 1996; Korzyński 2007; Dyl 2014; Kukiełka i in. 2016]. Nagniatanie zewnętrznych powierzchni walcowych jest wykorzystywane do wykończeniowej obróbki elementów typu: wały gładkie i stopniowe, czopy wałów korbowych, długich osi, prętów tłoczkowych i itp.

Celem stosowania określonego sposobu obróbki nagniataniem może być np. zwiększenie gładkości powierzchni i dokładności wykonania przedmiotu, względy ekonomiczne oraz zwiększenie odporności na zmęczenie i odporności na korozję [Przybylski 1987; Ossowska i Łabanowski 2005; Konefał i in. 2013]. Głębokość zalegania odkształceń plastycznych i stopień umocnienia oraz dokładność obróbki stanowią główne różnice efektów obróbkowych dla poszczególnych sposobów nagniatania. Nagniatanie stosuje się jako obróbkę wykończeniową, która ma za zadanie [Przybylski 1987; Dyl 2014]:

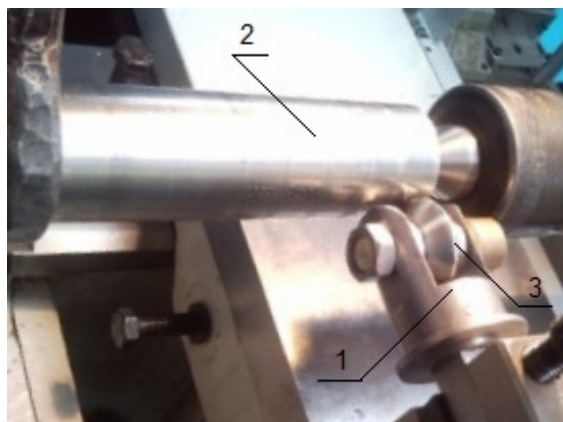
- umocnienie warstwy wierzchniej – istotne jest uzyskanie pożądanych zmian właściwości fizycznych WW, które m.in. zmniejszają zjawisko zużywania ściernego, zwiększając zarazem twardość i wytrzymałość na zmęczenie;
- gładkościowe – zmniejszenie nierówności i chropowatości powierzchni;
- wymiarowo-gładkościowe – uzyskuje się odpowiednią dokładność wymiarową, połączoną z otrzymaniem określonej niskiej chropowatości powierzchni.

Przy projektowaniu procesu technologicznego wytwarzania czy regeneracji elementów maszyn należy wybrać sposób nagniatania, warunki obróbkowe oraz kształt i liczbę elementów nagniatających. Jedną z metod takiej obróbki WW jest

nagniatanie statyczne naporowe toczne [Przybylski 1987; Dyl 2014], a dobór jej parametrów jest zależny od sposobu wywierania docisku elementów nagniatających do obrabianej powierzchni, który może być sprężysty lub sztywny.

Niezawodność pracy urządzeń i maszyn jest bardzo istotna w przemyśle maszynowym, energetycznym, metalurgicznym czy okrętowym. Przykładowo na jednostkach pływających dokonuje się napraw poszczególnych elementów maszyn okrętowych w trakcie rejsu. Często regeneruje się walcowe powierzchnie zewnętrzne (np. czopy wałów napędowych pomp wody morskiej) i wtedy jako obróbkę wykończeniową można zaproponować nagniatanie statyczne naporowe toczne (NSNT), które umożliwia spełnienie wymagań jakości technologicznej warstwy wierzchniej wyrobów.

Na rysunku 1 przedstawiono stanowisko laboratoryjne do nagniatania nagniataniem krążkowym (NK-01) z dociskiem sztywnym z możliwością użycia wymiennych elementów nagniatających o różnych promieniach zaokrągłej części roboczych [Dyl 2014, 2016].



**Rys. 1.** Nagniatanie statyczne naporowe toczne (NSNT):  
1 – nagniatak krążkowy (NK-01), 2 – wałek, 3 – krążek

**Fig. 1.** The burnishing rolling – pressuring process (BRP):  
1 – burnisher roller (BR-01), 2 – shaft, 3 – disk burnishing tool

Dobór warunków obróbki nagniataniem przeprowadza się na podstawie [Przybylski 1987; Kukiełka 1994; Korzyński 2007; Dyl 2014]: przybliżonych obliczeń sił i nacisków jednostkowych nagniatania, wyników eksperymentalnych badań materiałów o zbliżonych właściwościach, nomogramów uniwersalnych, normatywów specjalistycznych, prób wstępnych. Dla przypadków, w których brak dostatecznie pewnych zależności i nomogramów oraz dla nagniatania z jednoczesnym skrawaniem, dobór warunków nagniatania należy przeprowadzić na podstawie prób wstępnych [Przybylski 1987; Kukiełka 1994; Tubielewicz 1996; Dyl 2014, 2016].

Proces technologiczny, w którego wyniku uzyskać można niską chropowatość powierzchni, powinien być przeprowadzony z możliwie dużą siłą dociskającą element nagniatający do obrabianej powierzchni, natomiast prędkość nagniatania i posuw powinny przyjmować małe wartości. Nagniatanie zaś, które ma za zadanie zwiększenie właściwości wytrzymałościowych warstwy wierzchniej elementów maszyn, m.in. poprzez wzrost twardości, powinno cechować się stosowaniem dużej siły nagniatania dla niskich wartości posuwu i prędkości nagniatania.

Wartość siły docisku powinna być optymalna dla każdego rodzaju obróbki nagniataniem. Zbyt duża siła może doprowadzić do zjawiska łuszczenia powierzchni, któremu towarzyszy gwałtowne zwiększanie chropowatości. Natomiast zbyt mała jej wartość w stosunku do siły optymalnej nie zapewni odpowiednio niskiej chropowatości, ponieważ spowoduje niecałkowite odkształcenie nierówności pozostałych po wcześniejszych obróbkach. Zbyt duże siły docisku nagniatania mogą wpływać niekorzystnie na jakość powierzchni obrobionej ze względu na możliwość występowania wad powierzchniowych, ale również występowania korozji naprężeniowej [Ossowska i Łabanowski 2005].

Odporność na korozję elementów poddanych nagniataniu zależy od stopnia odkształcenia WW i wygładzenia. Ważne jest zatem prawidłowe określenie parametrów technologicznych obróbki nagniataniem w zależności od tego, czy ma to być obróbka gładkościowa czy też umacniająca.

Po przeprowadzonych wstępnych badaniach eksperymentalnych nagniatania staliwa GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 określono, że na twardość warstwy wierzchniej oraz chropowatość zewnętrznych powierzchni walcowych istotny wpływ mają parametry technologiczne obróbki (posuw i głębokość dosuwu nagniatania).

## **2. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH**

Do celów badawczych zmodernizowano stanowisko laboratoryjne do obróbki wykończeniowej poprzez nagniatanie statyczne naporowe toczne (NSNT) bazujące na istniejących obrabiarkach uniwersalnych. W artykule zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych, wykonanych w laboratorium Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów.

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla próbek ze staliwa w gatunku GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 (rys. 2), o podanym składzie chemicznym: 0,024% C; 25,62% Cr; 6,52% Ni; 2,98% Mo; 2,55% Cu; 0,97% Mn; 0,86% Si; 0,010% S; 0,008% P; 0,25% N [Stradomski 2016]. Staliwo dwufazowe ferrytyczno-austenityczne, nazywane duplexem, jest przedmiotem wielu badań materiałoznawczych i technologicznych. Cechuje się ono większą wytrzymałością na rozciąganie i lepszą odpornością na korozję naprężeniową w porównaniu do staliwa austenitycznego [Ossowska i Łabanowski 2005; Dyja i in. 2012; Konefał i in. 2013; Królczyk, Niesłony i Legutko 2015; Stradomski 2016].



**Rys. 2.** Widok wałka ze staliwa duplex GX2CrNiMoCuN25-6-3-3; czopy nr 01–08 po nagniataniu (tab. 1), czop nr 00 po toczeniu

**Fig. 2.** The view of the shaft with cast steel duplex series GX2CrNiMoCuN25-6-3-3; shaft neck No. 01–08 after burnishing (Tab. 1), shaft neck No. 00 after turning

Powierzchnie zewnętrzne walcowe przygotowano do nagniatania poprzez toczenie wzdłużne średniokokładne na tokarce uniwersalnej CDS 500×1000. Parametry technologiczne toczenia dobrano na podstawie literatury przedmiotu [Królczyk, Niesłony i Legutko 2015; Sandvik Coromant 2016] i badań własnych.

Podczas obróbki skrawaniem zastosowano następujące parametry skrawania: posuw  $f = 0,2$  mm/obr, głębokość skrawania  $a_p = 0,5$  mm, prędkość obrotowa  $n = 850$  obr/min, prędkość skrawania  $v_c = 70$  m/min. Do toczenia nie stosowano chłodzenia, wykonano obróbkę na sucho. Toczenie wzdłużne wykonano nożem tokarskim wyposażonym w płytki wielostrzowe CCMT 09T304-UM, wykonane z węglików spiekanych o gatunku 2025 z powłoką CVD Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN firmy Sandvik Coromant [Sandvik Coromant 2016].

Nagniatanie (NSNT) powierzchni walcowych zewnętrznych z dociskiem sztywnym wykonano za pomocą nagniataka krążkowego (NK-01), na tokarce uniwersalnej CDS 500×1000 poprzez wywieranie siły docisku suportem dla posuwu wzdłużnego.

Nagniatak NK-01 posiadał element nagniatający w postaci krążka o średnicy  $\phi 50$  mm i o promieniu zaokrąglenia części roboczej równym 3 mm. Twardość elementu nagniatającego, wykonanego ze stali narzędziowej stopowej NC6, wynosiła 66 HRC. Podczas obróbki nagniataniem zastosowano następujące parametry technologiczne: posuw  $f_n = 0,1$ – $1,2$  mm/obr; głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 0,5$ – $1,0$  mm; prędkość obrotową  $n = 500$ – $1700$  obr/min, prędkość nagniatania  $v_n = 40$ – $140$  m/min, liczbę przejść obróbkowych  $i = 1$ – $2$ . Do smarowania i chłodzenia użyto oleju maszynowego.

Po przeprowadzeniu obróbki WW dokonano pomiarów twardości w skali mikrometodą Vickersa według normy PN-EN ISO 6507-1:1999, przy sile nacisku wynoszącej 0,980 N (100 g) czas obciążenia wynosił 10 s. Do pomiaru używano twardościomierza Microhardness Tester FM-800, który umożliwia precyzyjne i półautomatyczne pomiary według metody Vickersa (HV) i Knoop (HK).

Po opracowaniu wyników pomiarów mikrotwardości wyznaczono stopień względnego umocnienia ( $S_u$ ) warstwy wierzchniej na podstawie równania:

$$S_u = \frac{\mu HV_1 - \mu HV_0}{\mu HV_0} \cdot 100, \quad (1)$$

gdzie:

$\mu HV_0$  – mikrotwardość WW przed nagniataniem 382 HV0,1,

$\mu HV_1$  – mikrotwardość WW po nagniataniu (tab. 1).

Parametry chropowatości przed i po nagniataniu mierzono w pięciu punktach pomiarowych równo rozmieszczonych na powierzchni i w czterech punktach na obwodzie próbek w Laboratorium Inżynierii Powierzchni Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni. Do tych pomiarów użyto profilometru Hommel Tester T1000. Odcinek pomiarowy miał długość równą 4,8 mm, a odcinek elementarny był równy 0,8 mm. Dokonano pomiarów parametrów chropowatości powierzchni, przeprowadzając m.in. pomiar średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości (parametr  $Ra$ ) i wyznaczając wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni z równania [Przybylski 1987; Dyl 2014]:

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

gdzie:

$R'a$  – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni przed nagniataniem,  $R'a = 3,03 \mu\text{m}$ ,

$Ra$  – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni po nagniataniu,  $\mu\text{m}$  (tab. 1).

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badanie eksperymentalne nagniatania statycznego naporowego tocznego przeprowadzono w Laboratorium Podstaw Inżynierii Wytwarzania, znajdującym się w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni. Po wstępnych badaniach własnych i dla zawężenia programu badań wytypowano następujące parametry nagniatania: posuw  $f_n = 0,1-1,2 \text{ mm/obr}$ ; głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 0,5-1,0 \text{ mm}$ , prędkość obrotowa  $n = 850 \text{ obr/min}$ , prędkość nagniatania  $v_n = 70 \text{ m/min}$  i liczba przejść obróbkowych  $i = 2$ .

Nagniatanie wykonano przy stałej prędkości dla różnych wartości posuwu oraz przy zastosowaniu dwóch wartości sił dociskających element nagniatający do obrabianej powierzchni. Czopy nr 01–04 były nagniatane przy większej wartości docisku (głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm) niż czopy nr 05–08 (głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 0,5$  mm).

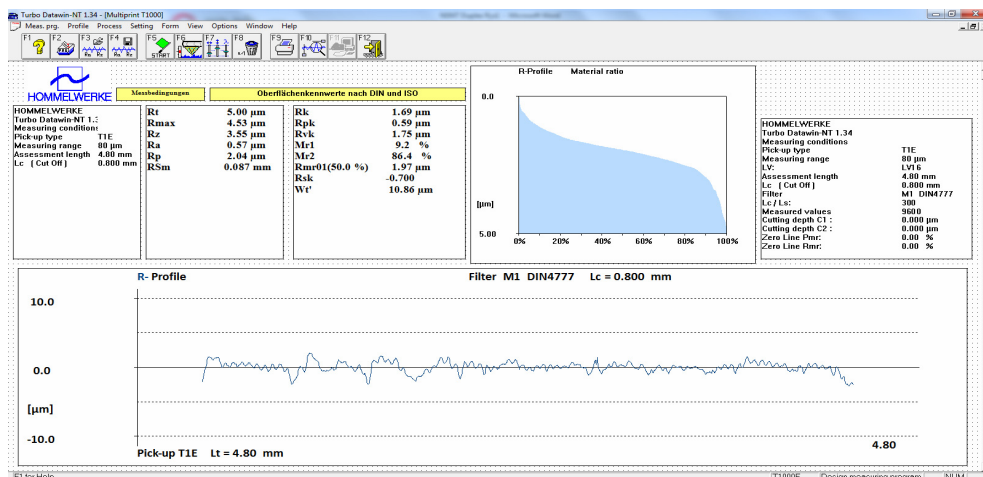
W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni i mikrotwardości po nagniataniu dla próbek ze staliwa duplex, dla stałej wartości prędkości nagniatania oraz dla różnych wartości głębokości dosuwu i posuwu nagniataka.

**Tabela 1.** Przykładowe wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni i mikrotwardości po nagniataniu dla próbek ze staliwa duplex GX2CrNiMoCuN25-6-3-3, dla prędkości nagniatania  $v_n = 70$  m/min oraz dla różnych wartości posuwu  $f_n$ , głębokości dosuwu nagniataka  $a_n$  i dla dwóch przejść nagniataka

**Table 1.** An example of measurements of the parameter of surface roughness and microhardness for the shaft with cast steel duplex GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 after burnishing for the speed  $v_n = 70$  m/min for different values of feed  $f_n$  and disk burnishing tool feed  $a_n$  after two passes

Numer czopa	$f_n$ , [mm/obr]	$a_n$ , [mm]	$R_a$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$K_{Ra}$	$\mu\text{HV}_1$	$S_u$ , [%]
01	0,1	1,0	0,55	5,5	488	27,7
02	0,2		0,57	5,3	489	28,1
03	0,6		2,13	1,4	480	25,7
04	1,2		2,34	1,3	447	17,1
05	0,1	0,5	0,57	5,3	478	25,1
06	0,2		0,62	4,9	477	24,9
07	0,6		1,49	2,1	469	22,8
08	1,2		1,52	1,9	445	16,5

Na rysunku 3 zamieszczono przykładowy profil chropowatości powierzchni wraz z krzywą udziału materiałowego dla badanego wałka ze staliwa duplex dla prędkości nagniatania  $v_n = 70$  m/min, posuwu  $f_n = 0,2$  mm/obr i głębokości dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm, po dwóch przejściach nagniataka.



**Rys. 3.** Przykładowy profil chropowatości powierzchni i krzywa udziału materiałowego dla wałka ze staliwa duplex GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 po obróbce nagniataniem dla prędkości  $v_n = 70$  m/min, posuwu  $f_n = 0,2$  mm/obr i głębokości dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm po dwóch przejściach nagniataka  $i = 2$  (czop nr 02, tab.1)

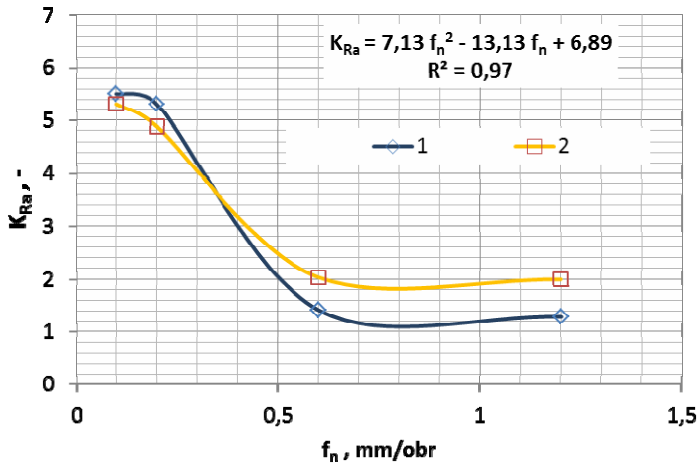
**Fig. 3.** The Abbott-Firestone curve and the profile roughness for the shaft with cast steel duplex GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 after burnishing for the speed  $v_n = 70$  m/min and feed  $f_n = 0.2$  mm/rev and disk burnishing tool feed  $a_n = 1.0$  mm after two passes  $i = 2$  (shaft neck No. 02, see Table 1)

Po przeprowadzonych badaniach doświadczalnych, przy zadanych parametrach technologicznych nagniatania statycznego naporowego tocznego powierzchni walcowych zewnętrznych, określono zależności pomiędzy posuwem nagniatania a wskaźnikiem zmniejszenia chropowatości powierzchni (rys. 4) i stopniem względnego umocnienia (rys. 5).

Z danych przedstawionych na rysunku 4 wynika, że wraz ze wzrostem wartości posuwu nagniatania zmniejsza się wartość wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni ( $K_{Ra}$ ). Najmniejsze wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni po nagniataniu, a tym samym maksymalne wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni, występują dla niskich wartości posuwu.

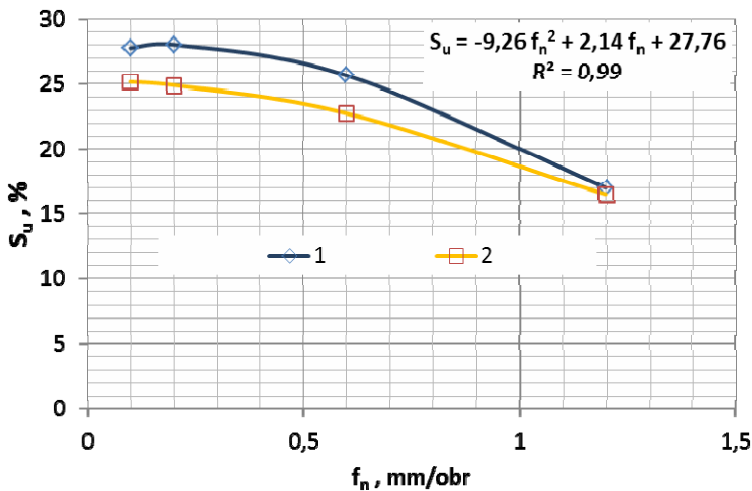
Na podstawie analizy wyników, zamieszczonych na rysunku 5, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem posuwu nagniatania stopień względnego umocnienia osiąga niższe wartości, natomiast dla mniejszych wartości posuwu i dla większych wartości głębokości dosuwu nagniataka stopień względny umocnienia warstwy wierzchniej uzyskuje maksymalne wartości.





**Rys. 4.** Wpływ posuwu  $f_n$  na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni ( $K_{Ra}$ ) po nagniataniu statycznym naporowym tocznym (NSNT) dla głębokości dosuwu nagniataka: 1 –  $a_n = 1,0$  mm i 2 –  $a_n = 0,5$  mm

**Fig. 4.** The influence of the feed  $f_n$  on surface roughness reduction ratio ( $K_{Ra}$ ) after burnishing rolling – pressuring process (BRP) for disk burnishing tool feed: 1 –  $a_n = 1.0$  mm and 2 –  $a_n = 0.5$  mm



**Rys. 5.** Wpływ posuwu  $f_n$  na stopień względnego umocnienia ( $S_u$ ) po nagniataniu statycznym naporowym tocznym (NSNT) dla głębokości dosuwu nagniataka: 1 –  $a_n = 1,0$  mm i 2 –  $a_n = 0,5$  mm

**Fig. 5.** The influence of the feed  $f_n$  on degree of relative strain hardening ( $S_u$ ) after burnishing rolling – pressuring process (BRP) for disk burnishing tool feed: 1 –  $a_n = 1.0$  mm and 2 –  $a_n = 0.5$  mm

Po przeanalizowaniu danych i zależności, zawartych na rysunkach 4 i 5, można stwierdzić, że aby uzyskać zmniejszenie chropowatości powierzchni i zwiększenie twardości warstwy wierzchniej po obróbce nagniataniem staliwa typu duplex w gatunku GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 dla zadanej prędkości nagniatania  $v_n = 70$  m/min i liczby przejść obróbkowych  $i = 2$ , należałoby stosować posuw nagniatania  $f_n = 0,2$  mm/obr i głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm.

#### **4. PODSUMOWANIE**

Zastosowanie odpowiedniego sposobu obróbki nagniataniem do zadanej obróbki wykończeniowej, w szczególności przy opracowywaniu technologii nowych wyrobów, wiąże się z przeprowadzeniem wstępnych badań eksperymentalnych do określenia parametrów technologicznych procesu. Po przeprowadzonych badaniach doświadczalnych nagniatania statycznego naporowego tocznego (NSNT) staliwa GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 stwierdzono, że na twardość warstwy wierzchniej oraz chropowatość zewnętrznych powierzchni walcowych mają wpływ parametry technologiczne obróbki (prędkość nagniatania, posuw i głębokość dosuwu nagniatania).

Po wykonaniu badań eksperymentalnych obróbki nagniataniem wyznaczono zależności pomiędzy posuwem nagniatania a wskaźnikiem zmniejszenia chropowatości powierzchni i stopniem względnego umocnienia. Po przeprowadzonej analizie wyników badań określono, że wraz ze wzrostem posuwu nagniatania zmniejszają się wartości stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej i wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni. Maksymalne wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni  $K_{Ra} = 5,3-5,5$  i stopnia względnego umocnienia  $S_u = 27,7-28,1\%$  występują dla posuwu nagniatania  $f_n = 0,1-0,2$  mm/obr i głębokości dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm. Stosując mniejsze wartości posuwu i większą wartość głębokości dosuwu nagniataka dla danego zakresu badań, można uzyskać największe wartości stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej, jak i również maksymalne wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni.

Aby zrealizować cele gładkościowe i umacniające obróbkę nagniataniem staliwa duplex, należałoby realizować przy zalecanych parametrach: posuw nagniatania  $f_n = 0,2$  mm/obr; głębokość dosuwu nagniataka  $a_n = 1,0$  mm, prędkość nagniatania  $v_n = 70$  m/min i liczba przejść obróbkowych  $i = 2$ .

#### **LITERATURA**

- Balland, P., Tabourot, L., Degre, F., Moreau, V., 2013, *Mechanics of the Burnishing Process*, Precision Engineering, vol. 37, s. 129-134.
- Czechowski, K., Polowski, W., Wrońska, I., Wszolek, J., Toboła, D., Kalisz, J., 2012, *Wykończeniowa obróbka nagniataniem tocznym i ślizgowym*, Obróbka Metalu, nr 1, s. 34-41.

- Dyja, D., Stradomski, Z., Kolan, C., Stradomski, G., 2012, *Eutectoid Decomposition of  $\delta$ -Ferrite in Ferritic-Austenitic Duplex Cast Steel – Structural and Morphological Study*, Materials Science Forum, vol. 706–709, s. 2314–2319.
- Dyl, T., 2014, *Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności*, Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- Dyl, T., 2016, *Analysis of the Burnishing Process Testing by the Methods – BRP*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 23, no. 3, s. 121–126.
- Konefał, K., Korzyński, M., Byczkowska, Z., Korzyńska, K., 2013, *Improved Corrosion Resistance of Stainless Steel X6CrNiMoTi17-12-2 by Slide Diamond Burnishing*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 213, no. 11, s. 1997–2004.
- Korzyński, M., 2007, *Nagniatanie ślizgowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Królczyk, G.M., Niesłony, P., Legutko, S., 2015, *Determination of Tool Life and Research Wear during Duplex Stainless Steel Turning*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 15, no. 2, s. 347–354.
- Kukielka, L., 1994, *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin.
- Kukielka, L., Szczesniak, M., Patyk, R., Kułakowska, A., Kukielka, K., Patyk, S., Gotowała, K., Kozak, D., 2016, *Analysis of the States of Deformation and Stress in the Surface Layer of the Product after the Burnishing Cold Rolling Operation*, Materials Science Forum, vol. 862, s. 278–287.
- Ossowska, A., Łabanowski, J., 2005, *Wpływ nagniatania na właściwości stali duplex stosowanych na element instalacji chemicznych*, Materiały i Technologie, nr 3, s. 141–146.
- Przybylski, W., 1987, *Technologia obróbki nagniataniem*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Sandvik Coromant, 2016, *Turning Insert. Tools for Metal Cutting, CoroTurn®107*, <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/tools.aspx>, [29.04.2016].
- Stradomski, G., 2016, *Oddziaływanie morfologii fazy sigma na kształtowania właściwości stali i staliwa duplex*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- Tubielewicz, K., 1996, *Technologia i oprzyrządowanie w obróbce powierzchniowej*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.