

Tomasz DYL
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

ASPECTS OF UTILIZING BURNISHING FOR RECONDITIONING MACHINE COMPONENTS

Obróbka nagniataniem stosowana w aspekcie regeneracji elementów maszyn

Abstract: *The paper presents exemplary application of burnishing treatment as a technological process of reconditioning machine components. Empirical research of burnishing treatment was conducted on the most common cylindrical surfaces which are widely used in machine construction, for example in drive shafts of centrifugal pumps. Experimental tests were carried out and determined the influence of burnishing technology on strengthening the surface layer of cylindrical samples made of unalloyed C45 stainless steel. Burnishing was conducted by means of NK-01 roller burnisher, made in the Department of Marine Maintenance at Gdynia Maritime University. The burnishing is normally applied in manufacturing as well as reconditioning machine elements used in machine industry, metallurgic industry, power engineering industry or shipping and aviation industry where the safety and reliability of machine work is decisive.*

Keywords: burnishing, reconditioning, centrifugal pump shafts

Streszczenie: *W pracy przedstawiono przykładowe wykorzystanie obróbki nagniataniem jako proces technologiczny regeneracji elementów maszyn. Wykonano badania doświadczalne obróbki nagniataniem typowych powierzchni walcowych, które są szeroko stosowane w budowie maszyn, np. na wały napędowe pomp odśrodkowych. Przeprowadzono próby eksperymentalne i określono wpływ nagniatania na umocnienie warstwy wierzchniej próbek walcowych wykonanych ze stali niestopowej C45. Nagniatanie wykonano za pomocą nagniataka krążkowego z dociskiem sztywnym NK-01 wykonanego w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Nagniatanie ma zastosowanie do wytwarzania, jak i do regeneracji elementów maszyn stosowanych w przemyśle maszynowym, metalurgicznym, energetycznym, lotniczym i okrętowym, w których to bezpieczeństwo i niezawodność pracy maszyn są strategiczne.*

Słowa kluczowe: nagniatanie, regeneracja, wały pomp odśrodkowych

1. Introduction

Burnishing treatment of cylindrical surface layers is used as finish treatment of such parts as uniform and stepped shaft, crank pins, switches, long axes, piston rods and others. The purpose of applying a given means of burnishing treatment may be for instance the increase of uniformity and accuracy of the object, economic considerations as well as improving corrosion and fatigue resistance. The depth of plastic deformations deposition, the consolidation index and the treatment accuracy constitute main differences of machining results for particular types of burnishing. Burnishing treatment of shafts is usually performed in the operations that have so far used the process of centre-type grinding. For quenched steel the process of roller finishing or rolling, with fixed or variable pressure, seems to be more economic than grinding [1-5, 11-16]. Burnishing treatment is a technological process making use of local plastic deformation of the treated object obtained under the influence of contact interaction of smooth and hard tool on the treated surface (working element can have the shape of a sphere, disc, roller or cylinder). The main purpose of burnishing treatment is the : strengthening treatment, that is achieving proper physical properties of a material in its surface layer, which can among others reduce the material friction wear and improve its fatigue strength, its hardness, corrosion resistance etc. Surface finish machining aims at defined decrease of surface roughness and unevenness, while the dimensional – surface finish machining aims at achieving appropriate dimensional accuracy connected with obtaining lower surface roughness. Burnishing is often utilized to attain the reduction of material inner stresses after thermo-chemical treatment or to reach the increase of the fatigue or contact strength, to reduce the seals wear, to increase surface layers durability in slide bearings, to increase reflective quality, to lower susceptibility to thermal cracks in metal casting moulds or even to increase the adherence and uniformity of the applied galvanic layers [12-17]. The selection of burnishing conditions depends mainly on the purpose of utilizing burnish machining [5-11, 13, 14, 17-20] which can be as follows: strengthening treatment a specific and controlled rate of strengthening with the lower significance of surface roughness; surface finish machining, where the achievement of proper smoothness is crucial, and the dimensional accuracy or the strengthening index are of lower importance; dimensional – surface finish machining where the tolerances of dimensions and roughness are controlled.

When designing the technological process of manufacturing or reconditioning parts of machines it is important to choose the method of burnishing, machining conditions, as well as the shape and number of tool finishing elements. During designing the technological process with the use of roller radial finishing of stepping shafts passes, it is worth remembering that burnishing rollers moving on passes from lower to higher diameter is subjected to high longitudinal loads in a direction opposite to the pass. The selection of burnishing conditions depends on the ways of exerting pressure of the burnishing elements on the machined surface, which can be variable (force like) or fixed (based on stresses).

The safety and reliability of machine work are crucial in the machine industry, metallurgic industry, power engineering industry or shipping and aviation industry. For example many marine engine parts are repaired on board vessels during the voyage.

Reconditioning covers a set of operations carried out in a defined sequence in order to restore the utility of a given object. The technological process of machine part reconditioning is worked out based on data included in the construction drawing as well as technical conditions. Surface layers of cylindrical parts are often reconditioned (e.g. drive shaft pins) and in that case it is advisable to recommend static thrust rolling burnishing as finish machining which enables the fulfillment of the quality requirements for technological surface layers in treated objects.

The paper recommends the application of burnishing machining for the purpose of surface strengthening, in order to reduce friction wear and improve hardness, and consequently the increase of fatigue strength of outer cylindrical surfaces. Machine parts such as shafts can be applied as drive shafts of various devices, for instance of marine centrifugal pumps.

2. Empirical research methodology

For the purpose of the research, a laboratory station for static thrust rolling burnishing machining was designed and produced on the based on the existing universal machines. A totally new aspect of the laboratory station consisted of making a disc burnisher with fixed pressure and with replaceable burnishing elements of various radius of working parts rounding's.

The paper presents the empirical research conducted in the Laboratory of Production Engineering at the Department of Marine Maintenance at Gdynia Maritime University.

Experimental research was conducted on samples made of unalloyed C45 steel with an outer diameter of ϕ 48mm and other dimensions as shown in fig. 1. The chemical composition and mechanical properties of C45 steel are also shown in the tab. 1.

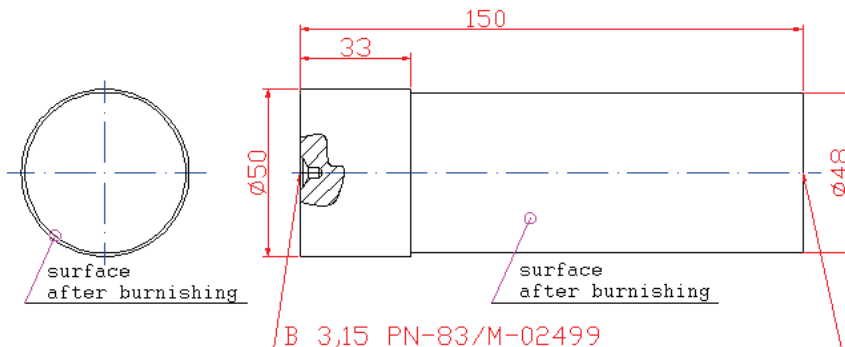


Fig. 1. Scheme of samples designed for the research of outer cylindrical surface burnishing

Outer cylindrical surfaces were prepared for burnishing by lathing. During machining the following parameters were used: feed $f = 0.5$ mm/rev, machining depth $a_p = 0.5$ mm, rotational speed $n = 1220$ rpm, machining speed $v_c = 190$ m/min. Emulgol ES-12 was applied for lubrication and cooling during machining. Lathing was performed by a lathe knife equipped with multiblade TNMX 160408-WM plates made of sintered carbides of GC4315 type.

Table 1

Chemical constitution and mechanical properties of C45 steel [5, 17]

| C [%] | Cr [%] | Mo [%] | Mn [%] | Si [%] | Ni [%] | P [%] | S [%] |
|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|-------|-------|
| 0.42-0.5 | 0.4 | 0.1 | 0.5-0.8 | 0.1-0.4 | 0.4 | 0.045 | 0.045 |
| R _e [MPa] | R _m [MPa] | A [%] | Z [%] | HV | KV [J] | | |
| 275-490 | 600-850 | 14-17 | 35-45 | 129 | 25 | | |

Burnishing of outer cylindrical surfaces was executed using of NK-01 burnisher disc a hardness of 870 HV (fig. 2) made at the Department of Marine Maintenance. A CDS 500x1000 universal lathe was used for the process of machining and burnishing. During burnishing the following parameters were applied: feed $f = 0.5$ mm/rev; burnisher pass depth $a_n = 0.5 \div 1.0$ mm; burnishing force $F = 1.5 \div 3.0$ kN; rotational speed $n = 900$ rpm, burnishing speed $v_n = 140$ m/min, maximum number of machining passes equal to 3. Machine oil was used for lubrication and cooling.

Moreover, the operations of hybrid machining were conducted, that is the combination of mechanical and thermal treatment. The samples underwent burnishing and afterwards quenching. Experimental research was carried out and the influence of machining on the surface layer of steel samples was determined after the following processes: full annealing (A); turning (T), burnishing (B); full annealing and hardening (A+H); turning and hardening (T+B); burnishing and hardening (B+H); hardening (H). Heat treatment was conducted at the technological processes according to with standard guidelines. The hardening and annealing was carried out using a chamber furnace heating a batch without a cover. The hardening samples was annealed for 120 minutes at 860°C and then cooled in cold water. The article defined the influence of burnishing technology as well as burnishing with subsequent quenching on the strengthening of steel samples surface layers. The measurements results of surface layer hardness of the samples that were subjected to burnishing were compared with the results of hardness results of samples that underwent full annealing. Also the measurements results of the surface layer hardness of the samples that were subjected to burnishing and then quenching were compared to the hardness measurement results of samples that were quenched. To measure hardness a FM-800 hardness testing machine was used. It enabled precise and semi-automatic measurements according to the Vickers method (HV). Hardness and micro-hardness measurements were

conducted by the Vickers method according to PN-EN ISO 6507-1:1999 standard, at the thrust force of 20 N and the load time of 10 s. Then the relative strength index (S_u) of the surface layer was calculated on the based on equation (1).

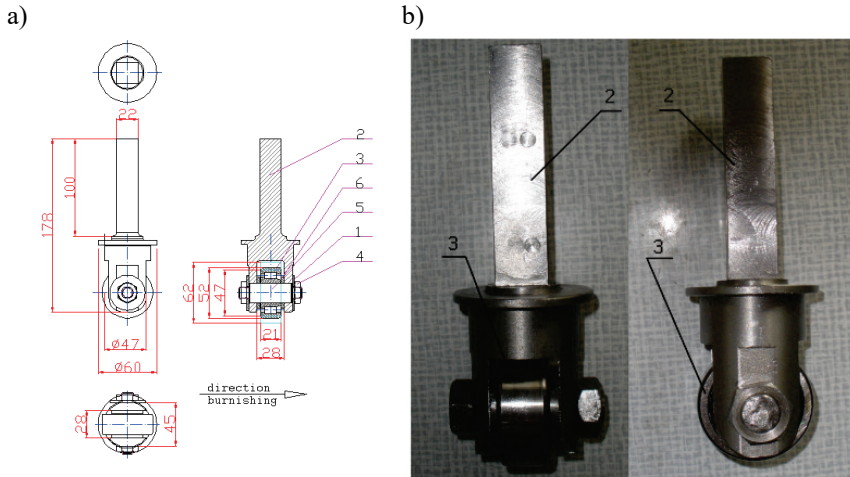


Fig. 2. Burnisher NK-01, a) schematic diagram, b) view of burnishing tool: 1 – washer; 2 – grip; 3 – burnishing element with a diameter of ϕ 52 mm; 4 – M12 nut; 5 – fitted pin with a diameter of ϕ 20 mm; 6 – spacers

The purpose of conducting the assessment of the influence of technological processes on the strength of machined surface was to define the relative strength index of the surface layer, based on the equation [5, 17]:

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

where:

HV_0 – surface layer hardness before burnishing,

HV_1 – surface layer hardness after burnishing.

The SGP stereo metric parameters before and after burnishing were measured in 5 measurement points distributed evenly on the sample surfaces in the laboratory of Surface Engineering at the Faculty of Marine Engineering of Gdynia Maritime University. For the purpose of these measurements, a special Hommel - Etamic T8000 profile meter was utilized. The measuring length was equal to 4.8 mm while the sampling length was 0,8 mm. The measurements of many stereo metric parameters of surfaces that underwent plastic machining were made, for instance the measurement of arithmetic mean of roughness profile ordinates (Ra parameter) was taken and the surface roughness decrease index was worked out from the following equation [5, 17]:

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

where:

$R'a$ – arithmetic mean of surface roughness profile ordinates before burnishing,

Ra – arithmetic mean of surface roughness profile ordinates after burnishing.

3. Research results

After conducting the burnishing process, the relative hardness index of steel samples surface layer was determined based on the measurements taken. Samples that were fully annealed showed the lowest hardness, while samples that underwent burnishing and samples which underwent quenching showed higher hardness. On the other hand, samples that were subjected to both burnishing and quenching were characterized by the highest hardness. It is possible to state that based on data included in the tab. 2, the highest relative hardness index was found in the surfaces first treated by burnishing and afterwards subjected to heat treatment by quenching. In this way it was possible to achieve five times higher hardening of the material surface layer. The surface layer relative hardness index was equal to $S_{ii} = 422.48\%$. So it can be concluded that if the main aim is to achieve a surface of high hardness for reconditioning purposes, these surfaces can be burnished and afterwards subjected to quenching.

Table 2

Micro-hardness measurement results for various types of machining for samples made of unalloyed C45 steel

| Sample No. | Treatment | Micro-hardness HV | Surface layer relative hardness index S_u [%] |
|------------|-----------|-------------------|---|
| 00 | A | 129 | - |
| 11 | T | 135 | 4.65 |
| 22 | B | 155 | 20.16 |
| 33 | A+H | 526 | 307.75 |
| 33 | T+H | 628 | 386.82 |
| 33 | B+H | 674 | 422.48 |
| 44 | H | 526 | 307.75 |

Where: A – full annealing; T – turning, B – burnishing; A+H – full annealing and hardening; T+B – turning and hardening; B+H – burnishing and hardening; H – hardening;

Figure 3 presents the mean values of micro-hardness values obtained for consecutive stages of machining samples number 22 and 33. It can be observed that there has been

a considerable growth of hardness after burnishing compared to surface layer hardness after turning and after full annealing.

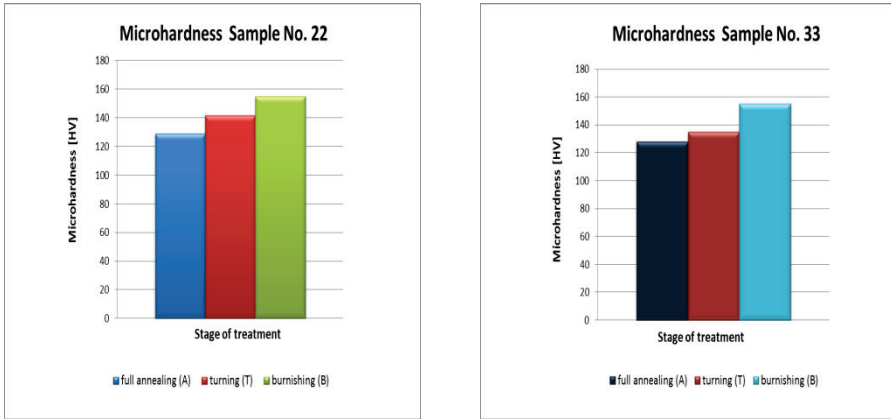


Fig. 3. Micro-hardness of samples No. 22 and No. 33 made of unalloyed C45 steel after consecutive stages of machining, before hardening

Figure 4 depicts the graph of mean micro-hardness values for particular stages of treatment after quenching. The graph presents the increase in the surface layer micro-hardness of a tested sample after burnishing when compared to turned surface. Moreover, the increase of hardness in the part of the sample was turned in comparison to a fully annealed part. A cumulative graph of the mean results of micro-hardness measurements for sample 33 after consecutive stages of machining and heat treatment are shown in Figure 4. These results indicate that the increase of surface layer hardness of a sample made of unalloyed C45 steel after particular treatment stages before quenching has a big influence on achieving higher values of hardness after quenching.

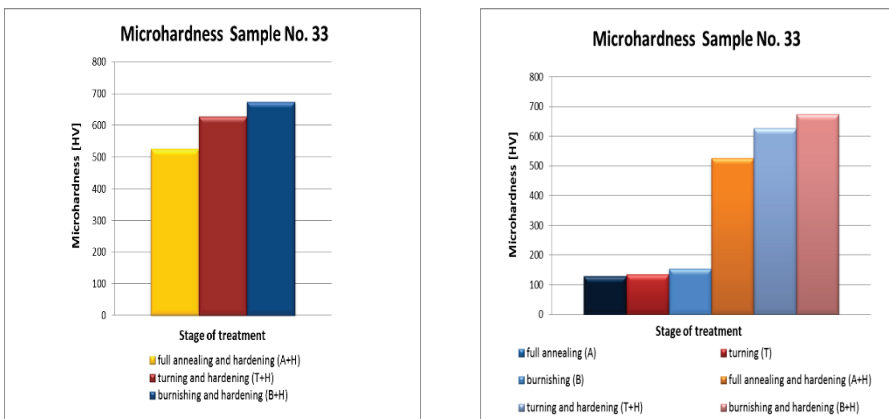


Fig. 4. Micro-hardness of sample No. 33 made of unalloyed C45 steel after further processing steps after hardening

Figure 5 shows the results of the mean micro-hardness of sample 44 after heat treatment by annealing and quenching. Hardness measurements after full annealing of material surface layer were carried out along line A and B, and then they were averaged out, however the measurements after quenching were conducted along with two lines A and B on the cross-section.

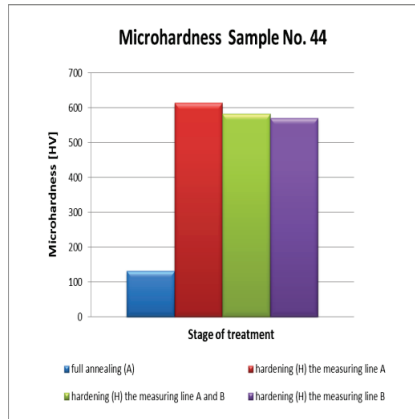


Fig. 5. Micro-hardness of sample No. 44 made of unalloyed C45 steel after subsequent stages of full annealing and hardening

The effect of thermal treatment achieved for sample 44 understood as the hardness increase after quenching compared to that of initial hardness is considerably lower than in the case of hardness values obtained for samples 33. Based on basis of the graph we can conclude that the mean hardness value achieved after quenching on line A is considerably higher than the one obtained on line B. Most probably line B of sample 44 was the line contacting the furnace chamber.

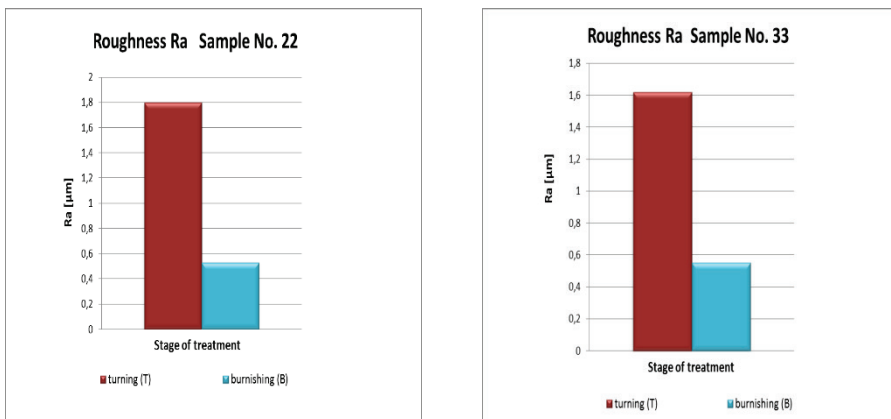


Fig. 6. Surface roughness for samples No. 22 and No. 33 after consecutive treatment stages, after turning and burnishing

Figures 6 and 7 presents the measurement results of the Ra roughness parameter. The arithmetic mean surface roughness profile ordinates after burnishing reached much lower values compared to the surface roughness parameter after turning.

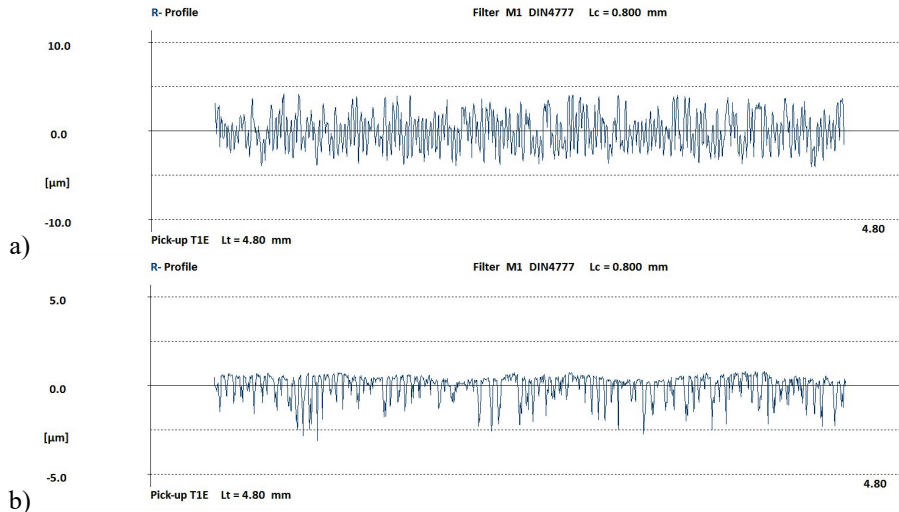


Fig. 7. The surface profile roughness after treatment: a) turning and b) burnishing

The surface roughness decrease index for sample 22 was equal to $K_{Ra} = 3.39$. Whereas for sample 33, which was burnished and afterwards quenched, the roughness test was conducted before quenching. It was stated that for sample 33 the surface roughness decrease index was $K_{Ra} = 2.95$. Thus the decrease of hardness after burnishing is approximately triple. Therefore it is possible to conclude that burnishing treatment can be applied for smoothness purposes without the necessity of quenching. However, after heat treatment using quenching, the hardness of sample 33 increases considerably, while the index of surface layer relative strength is equal to $S_u = 422.48\%$. The strength of sample 22 subjected only to burnishing is much lower and is equal to $S_u = 20.16\%$.

4. Summary

Machine elements in the shape of cylinders such as drive shafts are widely used as machine components and devices in the machine industry, metallurgic industry or shipping and aviation industry. They require proper manufacturing by the application of shaping and finish treatment machining.

They lose their functional properties during operation and therefore it is required to subject them to reconditioning technological processes taking into account the technological and economic aspects.

The burnishing seems to be an advisable method to recondition machine elements. Burnishing is normally used to reduce roughness surface, but also in order to increase strengthening surface layers. Based on experimental research performed it is possible to state that: the conditions of burnishing treatment and heat treatment actually influence the surface layer strength. The paper presented the hybrid treatment (combining mechanical and thermal treatment where the cylindrical surfaces underwent burnishing and subsequent quenching) and its influence on the index of relative surface layer strength of an unalloyed C45 steel.

5. Conclusions

Based on the experimental research results, it is possible to draw the following conclusions and form the following statements:

- Burnishing technology causes surface strengthening and the decrease of roughness;
- The Burnishing process of unalloyed C45 steel considerably influences the increase of surface layer hardness, as shown in the results of micro hardness measurements conducted for various stages, before and after thermal treatment by means of using quenching;
- The highest index of strength can be achieved after burnishing and subsequent quenching. Almost five times higher strength of material surface layer can be observed;
- Burnishing technology can be applied for reconditioning machine components used in the shipping industry in order to obtain better strength of the material surface layer.

It is therefore considered appropriate to utilize the hybrid treatment of burnishing and quenching in order to achieve the considerable strengthening of the material surface layer.

6. References

1. Balland P., Tabourot L., Degre F., Moreau V.: Mechanics of the burnishing process, *Precision Engineering*, vol. 37, 2013.
2. Czechowski K., Polowski W., Wszolek J.: The burnishing rolling as a method of finishing, *Design and Engineering Constructions*, nr 6, 2009.
3. Charchalis A., Dyl T., Rydz D., Stradomski G.: The effect of burnishing process on the change of the duplex cast steel surface properties, *Inżynieria Materiałowa Materials Engineering* 6 (226), 2018.
4. Charchalis A., Starosta R., Labuda W.: The influence of burnishing parameters on the roughness, plastic strain and shape deviations of marine pumps crankshaft pins in fresh water installations. *Journal of KONBiN*, Vol. 9-10, Issue 1, 2009.

5. Dyl T.: Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności. Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2014.
6. Dyl T.: Analysis of the burnishing process testing by the methods – BRP. Journal of KONES, Vol. 23, No. 3, 2016.
7. Dyl T.: The burnishing process of the stainless steel in aspect of the reduction roughness and surface hardening. Journal of KONES, Vol. 24, No. 3, 2017.
8. Dyl T.: The influence of burnishing parameters on the hardness and roughness on the surface layer stainless steel. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 82/2, 2017.
9. Dyl T., Charchalis A., Stradomski G., Rydz D.: Impact of processing parameters on surface roughness and strain hardening of two-phase stainless steel, Journal of KONES, Vol. 26, No. 2, 2019.
10. Labuda W., Starosta R., Dyl T.: Estimation of the influence of burnishing parameters on steel X5CrNi18-10 surface layers strengthening and roughness changes, Journal of KONES, Vol. 15, No. 3, 2008.
11. Kolmogorov V.L., Fedotov V.P., Gorshkov A.V.: Three-dimensional analysis of the stress-strain state in the process of plastic deformation of metals. Journal of Materials Processing Technology, vol. 95, 1999.
12. Korzyński M.: A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. Journal of Materials Processing Technology 209, 2009.
13. Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
14. Korzyński M.: Predicting the height of uneven surface after ball-peening machining. International Journal of Mechanical Sciences, 150, 2019.
15. Kukielka L.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin 1994.
16. Kukielka L. et al.: 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, 2016.
17. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1987.
18. Przybylski W.: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, tom 2. Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
19. Tubielewicz K.: Technologia i oprzyrządowanie w obróbce powierzchniowej. Politechnika Częstochowska. Częstochowa 1996.
20. Zaleski K.: Technologia nagniatania dynamicznego. Monografie – Politechnika Lubelska, Lublin 2018.

OBRÓBKA NAGNIATANIEM STOSOWANA W ASPEKCIE REGENERACJI ELEMENTÓW MASZYN

1. Wprowadzenie

Obróbka nagniataniem zewnętrznych powierzchni walcowych jest stosowana jako wykończeniowa obróbka elementów typu: wały gładkie i stopniowe, czopy wałów korbowych, zwrotnic oraz długich osi, tłoczysk i innych. Celem stosowania danego sposobu obróbki nagniataniem może być np. zwiększenie gładkości i dokładności przedmiotu, względy ekonomiczne oraz zwiększenie odporności na korozję i na zmęczenie. Głębokość zalegania odkształceń plastycznych i stopień umocnienia oraz dokładność obróbki to główne różnice efektów obróbkowych dla poszczególnych sposobów nagniatania. Obróbkę nagniataniem z dociskiem sztywnym lub sprężystym wałków ze stali ulepszanych stosuje się najczęściej w zamian za operacje szlifowania [1–5, 11–16]. Obróbka nagniataniem jest to proces technologiczny wykorzystujący miejscowe odkształcenie plastyczne przedmiotu obrabianego, uzyskane pod wpływem stykowego oddziaływania twardego i gładkiego narzędzia (element roboczy ma postać: kulki, krążka, rolki, wałka) na powierzchnię obrabianą. Główne cele stosowania obróbki nagniataniem to: obróbka umacniająca – uzyskanie zmian właściwości fizycznych materiału w warstwie wierzchniej, najczęściej przez wzrost twardości, obróbka gładkościowa – ma na celu zmniejszenie nierówności i chropowatości powierzchni, obróbka wymiarowo-gładkościowa – uzyskanie odpowiedniej dokładności wymiarowej, połączone z otrzymaniem określonej niższej chropowatości powierzchni [12–17].

Wybór warunków nagniatania zależy w dużym stopniu od celu zastosowania obróbki nagniataniem [5–11, 13, 14, 17–20]: obróbka umacniająca o danym i kontrolowanym stopniu umocnienia przy mniejszym znaczeniu chropowatości powierzchni, obróbka gładkościowa, gdzie mniejsze znaczenie ma dokładność wymiarowa oraz stopień umocnienia warstwy wierzchniej, a istotne jest uzyskanie danej chropowatości powierzchni, obróbka gładkościowo-wymiarowa o kontrolowanej tolerancji wymiarów i chropowatości.

Podczas projektowania procesu technologicznego wytwarzania lub regeneracji elementów maszyn należy wybrać sposób nagniatania, warunki obróbkowe oraz kształt i liczbę elementów nagniatających narzędzia. Projektując proces technologiczny z zastosowaniem krążkowania promieni przejść wałków stopniowych, warto pamiętać, że rolki nagniatające przemieszczając się po przejściach ze średnicy mniejszej na większą, są obciążone dużą siłą wzdłużną skierowaną w kierunku przeciwnym do posuwu.

Dobór warunków nagniatania naporowego jest zależny od sposobu wywierania docisku elementów nagniatających do obrabianej powierzchni, który może być sprężysty (siłowy) lub sztywny (naprężeniowy).

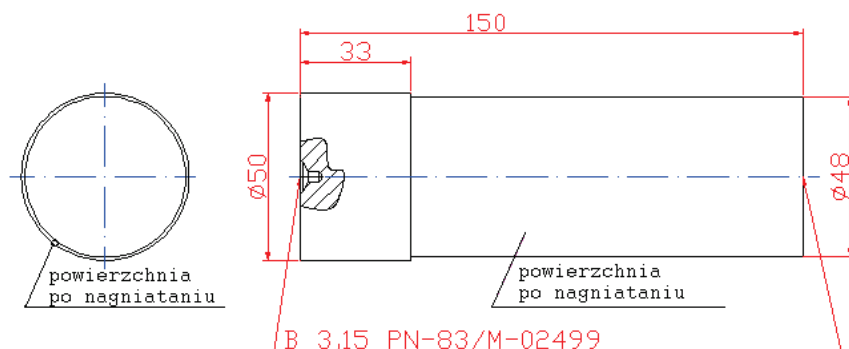
Bezpieczeństwo i niezawodność pracy urządzeń i maszyn jest bardzo istotna w przemyśle maszynowym, energetycznym, metalurgicznym, lotniczym czy okrętowym.

Regeneracja jest to zbiór operacji wykonywanych w określonej kolejności w celu przywrócenia wartości użytkowej danemu obiektowi. Proces technologiczny regeneracji elementu maszyny jest opracowywany na podstawie danych zawartych na rysunku konstrukcyjnym oraz w warunkach technicznych. Często regeneruje się walcowe powierzchnie zewnętrzne (np. czopy wału napędowego), można wtedy zaproponować jako obróbkę wykończeniową nagniatanie statyczne naporowe toczne, które umożliwi spełnienie wymagań jakości technologicznej warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych.

W pracy zaproponowano zastosowanie technologii nagniataniem, aby uzyskać zwiększenie twardości powierzchni walcowych zewnętrznych. Elementy maszyn typu wałek mogą mieć zastosowanie jako wały napędowe różnych urządzeń, przykładowo odśrodkowych pomp okrętowych.

2. Metodyka badań doświadczalnych

Do celów badawczych zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko laboratoryjne do obróbki wykończeniowej poprzez nagniatanie statyczne naporowo-toczone bazujące na istniejących obrabiarkach uniwersalnych. Całkowicie nowym aspektem stanowiska laboratoryjnego było wykonanie nagniataka krążkowego z dociskiem sztywnym z wymiennymi elementami nagniatającymi o różnych promieniach zaokrąglenia części roboczych.



Rys. 1. Schemat próbek przeznaczonych do badań obróbki nagniataniem powierzchni walcowych zewnętrznych

W pracy zaprezentowano badania doświadczalne wykonane w Laboratorium Inżynierii Produkcji Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla próbek ze stali niestopowej C45 o średnicy zewnętrznej $\phi 48\text{mm}$ i o wymiarach podanych na rys. 1. Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali C45 przedstawiono w tab. 1.

Powierzchnie zewnętrzne walcowe przygotowano do nagniatania poprzez toczenie. Podczas obróbki zastosowano parametry skrawania: posuw $f = 0,5 \text{ mm/obr}$, głębokość skrawania $a_p = 0,5 \text{ mm}$, prędkość obrotową $n = 1220 \text{ obr/min}$, prędkość skrawania $v_c = 190 \text{ m/min}$. Do smarowania i chłodzenia podczas toczenia zastosowano Emulgoł ES-12. Toczenie wykonano nożem tokarskim wyposażonym w płytki wielostrzowe TNMX 160408-WM wykonane z węglików spiekanych typu GC4315.

Tabela 1

Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali C45 [5, 17]

| C [%] | Cr [%] | Mo [%] | Mn [%] | Si [%] | Ni [%] | P [%] | S [%] |
|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|-------|-------|
| 0.42-0.5 | 0.4 | 0.1 | 0.5-0.8 | 0.1-0.4 | 0.4 | 0.045 | 0.045 |
| R _e [MPa] | R _m [MPa] | A [%] | Z [%] | HV | KV [J] | | |
| 275-490 | 600-850 | 14-17 | 35-45 | 129 | 25 | | |

Nagniatanie statyczne naporowo toczne powierzchni walcowych zewnętrznych zrealizowano za pomocą nagniataka NK-01 (rys. 2) o twardości krążka 870 HV, wykonanego w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów. Do obróbki skrawaniem i nagniataniem zastosowano tokarkę uniwersalną CDS 500x1000. Podczas obróbki nagniataniem zastosowano parametry: posuw $f = 0,5 \text{ mm/obr}$; głębokość dosuwu nagniataka $a_n = 0,5 \div 1,0 \text{ mm}$; siła nagniatania $F = 1,5 \div 3,0 \text{ kN}$; prędkość obrotową $n = 900 \text{ obr/min}$, prędkość nagniatania $v_n = 140 \text{ m/min}$, liczba przejść obróbkowych maksymalnie równa 3. Do smarowania i chłodzenia użyto oleju maszynowego. Wykonano także operacje obróbki hybrydowej poprzez połączenie obróbki mechanicznej i cieplnej. Próbki były poddane nagniataniu, a następnie hartowaniu. Przeprowadzono badania doświadczalne i określono wpływ obróbki na właściwości warstwy wierzchniej próbek stalowych po wyżarzaniu zupełnym (W), po toczeniu (T), po nagniataniu (N), po wyżarzaniu zupełnym i po hartowaniu (W+H); po toczeniu i po hartowaniu (T+H), po nagniataniu i po następnym hartowaniu (N+H), po hartowaniu (H). Obróbkę cieplną wykonano dla parametrów technologicznych zgodnych z wytycznymi znormalizowanymi. Hartowanie i wyżarzanie przeprowadzono w piecu komorowym. Próbki poddane hartowaniu wygrzewano przez 120 minut w 860°C , a następnie schładzano w zimnej wodzie. W artykule określono wpływ technologii nagniataniem, jak i nagniataniem z późniejszym hartowaniem na umocnienie warstwy wierzchniej próbek stalowych. Wyniki

Parametry stereometryczne SGP przed i po nagniataniu mierzono w pięciu punktach pomiarowych równo rozmieszczonych na powierzchni próbek w laboratorium Inżynierii Powierzchni znajdującym się na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Do tych pomiarów użyto profilometru Hommel - Etamic T8000. Odcinek pomiarowy był o długości równej 4,8 mm, a odcinek elementarny był równy 0,8 mm. Dokonano pomiarów wielu parametrów stereometrycznych powierzchni po powierzchniowej obróbce plastycznej, między innymi przeprowadzono pomiar średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości (parametr R_a) i wyznaczono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni z równania [5, 17]:

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

gdzie:

$R'a$ – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni przed obróbką nagniataniem,

R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni po obróbce nagniataniem.

3. Wyniki badań

Po przeprowadzonej obróbce nagniataniem określono na podstawie pomiarów twardości stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej próbek stalowych. Próbki poddane wyżarzaniu pełnemu miały najmniejszą twardość, natomiast próbki poddane nagniataniu i próbki po hartowaniu uzyskiwały większe twardości. Zaś próbki poddane uprzednio nagniataniu, a potem hartowaniu uzyskały największą twardość. Można zatem zauważyć, na podstawie danych zawartych w tab. 2, że największym stopniem umocnienia cechują się powierzchnie obrobione poprzez nagniatanie, a następnie poddane obróbce cieplnej poprzez hartowanie. Uzyskać można wtedy ponad pięciokrotne umocnienie warstwy wierzchniej materiału. Stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej wynosi $S_u = 422,48\%$. Można zatem stwierdzić, że aby uzyskać powierzchnie w celach regeneracyjnych, o dużym stopniu umocnienia, można je nagniatąć, a następnie poddać hartowaniu.

Na rys. 3 przedstawiono średnie wartości uzyskanych mikrotwardości dla kolejnych etapów obróbki próbek nr 22 i 33. Na wykresie widać, że nastąpił znaczny przyrost twardości po nagniataniu względem twardości warstwy wierzchniej po toczeniu, a także i po wyżarzaniu pełnym.

Tabela 2

Wyniki pomiarów mikrotwardości dla różnych metod obróbki dla próbek ze stali niestopowej C45

| Nr próbki | Obróbka | Mikrotwardość HV | Stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej S_u [%] |
|-----------|---------|------------------|---|
| 00 | A | 129 | - |
| 11 | T | 135 | 4,65 |
| 22 | B | 155 | 20,16 |
| 33 | A+H | 526 | 307,75 |
| 33 | T+H | 628 | 386,82 |
| 33 | B+H | 674 | 422,48 |
| 44 | H | 526 | 307,75 |

gdzie: W – po wyżarzaniu zupełnym; T – po toczeniu, N – po nagniataniu; W+H – po wyżarzaniu zupełnym i po hartowaniu; T+H – po toczeniu i po hartowaniu; N+H – po nagniataniu i po następnym hartowaniu; H – po hartowaniu;

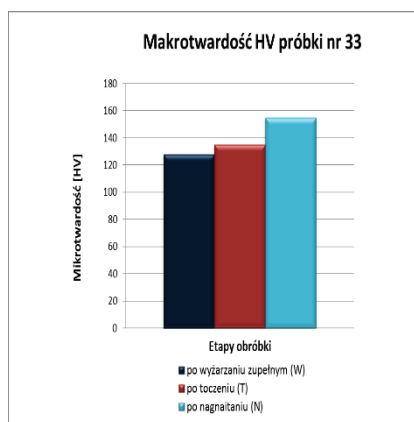
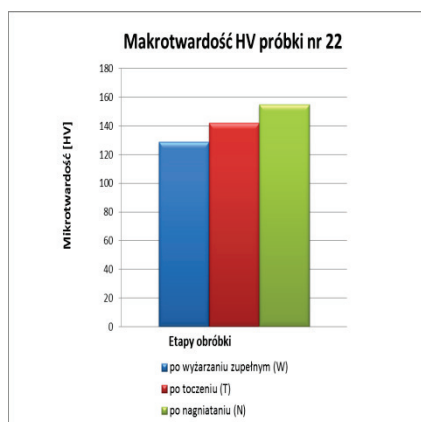


Fig. 3. Mikrotwardość HV próbek nr 22 i 33 ze stali niestopowej C45 po kolejnych etapach obróbki, przed hartowaniem

Na rys. 4 został przedstawiony wykres średniej wartości mikrotwardości dla poszczególnych etapów obróbki po hartowaniu. Na wykresie widoczny jest przyrost mikrotwardości warstwy wierzchniej badanej próbki po nagniataniu względem powierzchni toczonej. Nastąpiło także zwiększenie twardości w części próbki toczonej względem części wyżarzanej zupełnie. Zaznaczono zbiorcze zestawienie średnich wyników z pomiarów

mikrotwardości dla próbki nr 33 po kolejnych etapach obróbki mechanicznej i obróbki cieplnej. Wyniki te wskazują na to, że wzrost twardości w warstwie wierzchniej próbki wykonanej ze stali niestopowej C45 po poszczególnych etapach obróbki przed hartowaniem mają wpływ na uzyskiwane wyższych wartości twardości po hartowaniu.

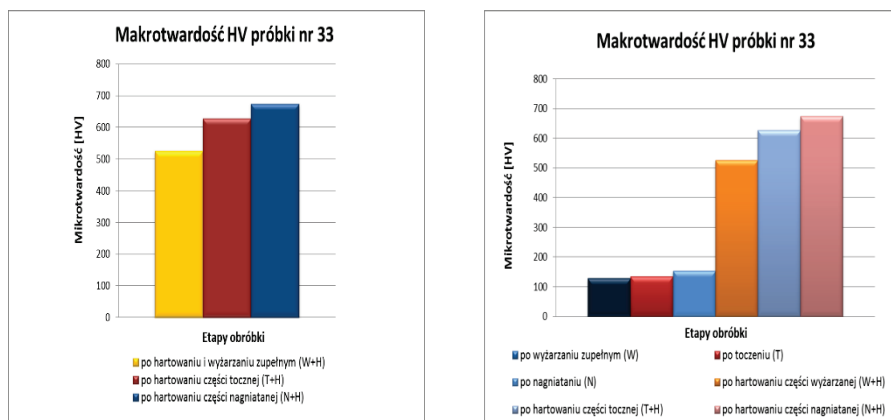


Fig. 4. Mikrotwardość HV próbki nr 33 ze stali niestopowej C45 po kolejnych etapach obróbki, po hartowaniu

Na rys. 5 przedstawiono wyniki średniej mikrotwardości próbki nr 44 po obróbce cieplnej poprzez wyżarzanie i hartowanie. Pomiary twardości po wyżarzeniu zupełnym warstwy wierzchniej materiału zostały przeprowadzone wzdłuż krawędzi A i B, a następnie je uśredniono, natomiast po hartowaniu zostały przeprowadzone wzdłuż dwóch krawędzi A i B na przekroju poprzecznym.

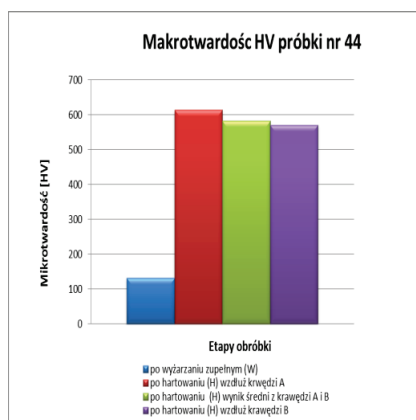
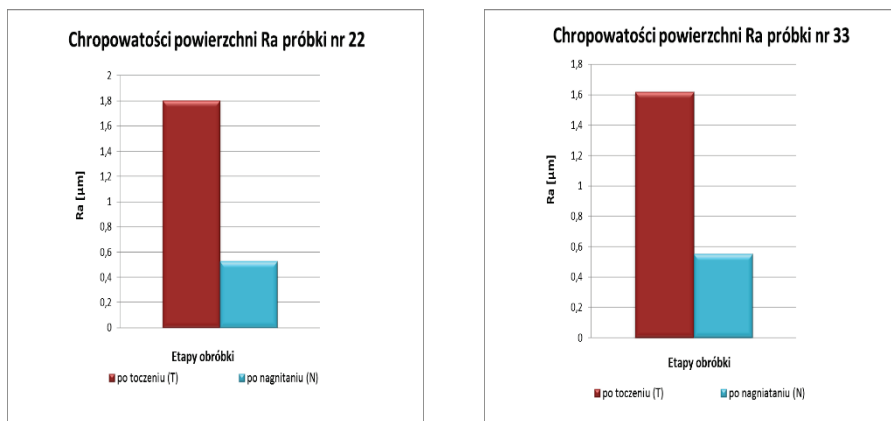


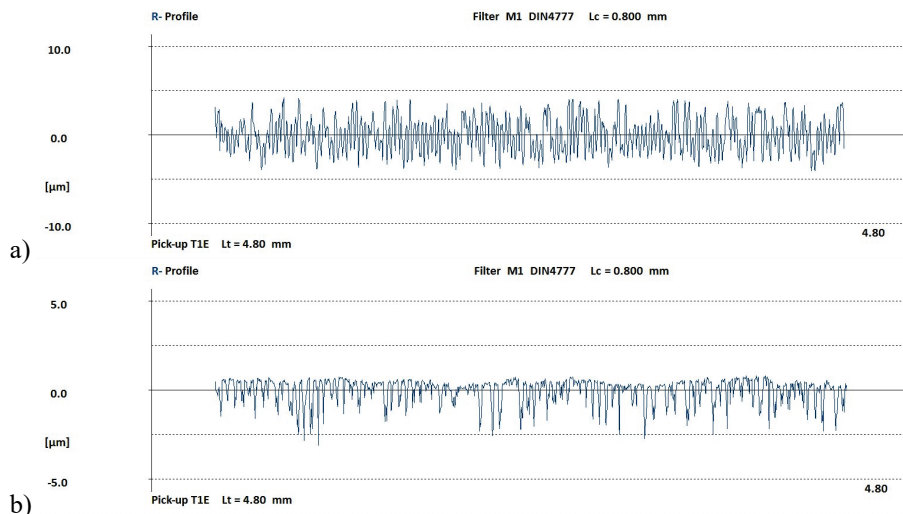
Fig. 5. Mikrotwardość HV próbki nr 44 ze stali niestopowej C45 po kolejnych etapach obróbki, po wyżarzeniu zupełnym i po hartowaniu

Uzyskany efekt obróbki cieplnej dla próbki nr 44 rozumiany jako wzrost twardości po hartowaniu względem twardości początkowej jest znacznie mniejszy niż w przypadku twardości uzyskanych dla próbek nr 33. Z wykresu wynika, że średnia twardość uzyskana po hartowaniu na krawędzi A jest znacznie większa niż ta uzyskana na krawędzi B. Prawdopodobnie krawędź B była krawędzią styku próbki nr 44 z komorą pieca.

Na rys. 6 i 7 przedstawiono wyniki pomiarów parametru chropowości Ra.



Rys. 6. Chropowość powierzchni dla próbek nr 22 i nr 33 ze stali niestopowej C45 po kolejnych etapach obróbki, po toczeniu i nagniataniu



Rys. 7. Przykładowe profile chropowości powierzchni po obróbce poprzez: a) toczenie oraz b) nagniatanie

Średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni po obróbce nagniataniem uzyskała dużo mniejsze wartości w porównaniu do parametru chropowatości powierzchni po toczeniu. Dla próbki nr 22 wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni był równy $K_{Ra} = 3,39$. Natomiast próbka nr 33 była nagniatana, a następnie hartowana. Dokonano pomiaru jej chropowatości przed hartowaniem. Wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni wyniósł $K_{Ra} = 2,95$, zatem zmniejszenie chropowatości po nagniataniu jest ok. trzykrotne. Wobec tego można wnioskować, że obróbkę nagniataniem w celach gładkościowych można stosować bez konieczności hartowania. Jednak po obróbce cieplnej poprzez hartowanie znacznie wzrosła twardość próbki nr 33, kiedy to stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej wyniósł $S_u = 422,48\%$. Natomiast umocnienie próbki nr 22 poddanej jedynie obróbce nagniataniem jest znacznie mniejsze i wynosi $S_u = 20,16\%$.

4. Podsumowanie

W maszynach i urządzeniach stosowanych w przemyśle maszynowym, metalurgicznym, lotniczym, okrętowym itp. znajdują zastosowanie elementy maszyn typu wały napędowe. Wymagają one odpowiedniego wykonania poprzez obróbkę kształtującą i wykończeniową. W eksploatacji tracą swoje właściwości użytkowe, dlatego wymagane jest, aby ze względu na aspekt technologiczny i ekonomiczny poddane zostały procesowi technologicznemu regeneracji. Dlatego obróbka nagniataniem wydaje się odpowiednią technologią do stosowania w celach regeneracji elementów maszyn. Obróbkę nagniataniem stosuje się jako obróbkę wykończeniową, aby uzyskać zmniejszenie chropowatości powierzchni, a także zwiększenie twardości warstw wierzchnich.

Na podstawie wykonanych badań doświadczalnych można stwierdzić, że: warunki obróbki nagniataniem po uprzedniej obróbce cieplnej mają wpływ na umocnienie warstwy wierzchniej. W pracy przedstawiono wpływ obróbki hybrydowej (poprzez połączenie obróbki mechanicznej i cieplnej, gdzie powierzchnie walcowe były poddane nagniataniu, następnie hartowaniu), na stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej stali niestopowej C45.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można wysnuć następujące wnioski i sformułować następujące stwierdzenia:

- Technologia nagniataniem powoduje powierzchniowe umocnienie, a także zmniejszenie chropowatości.

- Wyniki pomiaru mikrotwardości dla różnych etapów przed obróbką cieplną i po niej poprzez hartowanie wykazały, że proces nagniatania dla stali niestopowej C45 znacząco wpływa na wzrost twardości w warstwie wierzchniej.
- Największy stopień umocnienia można uzyskać po nagniataniu i po następnym hartowaniu, występuje wtedy ponad pięciokrotne umocnienie warstwy wierzchniej materiału.
- Można stosować technologię nagniataniem do regeneracji elementów maszyn używanych w okrętownictwie w celu uzyskania umocnienia warstwy wierzchniej materiału.

Celowe jest zatem, do uzyskania znacznego umocnienia warstwy wierzchniej materiału, stosowanie hybrydowej obróbki nagniataniem i hartowania.

6. Literatura

1. Balland P., Tabourot L., Degre F., Moreau V.: Mechanics of the burnishing process, Precision Engineering, Vol. 37, 2013.
2. Czechowski K., Polowski W., Wszolek J.: The burnishing rolling as a method of finishing, Design and Engineering Constructions, nr 6, 2009.
3. Charchalis A., Dyl T., Rydz D., Stradomski G.: The effect of burnishing process on the change of the duplex cast steel surface properties, Inżynieria Materiałowa Materials Engineering 6 (226), 2018.
4. Charchalis A., Starosta R., Labuda W.: The influence of burnishing parameters on the roughness, plastic strain and shape deviations of marine pumps crankshaft pins in fresh water installations. Journal of KONBiN, Vol. 9-10, Iss. 1, 2009.
5. Dyl T.: Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności. Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2014.
6. Dyl T.: Analysis of the burnishing process testing by the methods – BRP. Journal of KONES, Vol. 23, No. 3, 2016.
7. Dyl T.: The burnishing process of the stainless steel in aspect of the reduction roughness and surface hardening. Journal of KONES, Vol. 24, No. 3, 2017.
8. Dyl T.: The influence of burnishing parameters on the hardness and roughness on the surface layer stainless steel. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 82/2, 2017.
9. Dyl T., Charchalis A., Stradomski G., Rydz D.: Impact of processing parameters on surface roughness and strain hardening of two-phase stainless steel, Journal of KONES, Vol. 26, No. 2, 2019.
10. Labuda W., Starosta R., Dyl T.: Estimation of the influence of burnishing parameters on steel X5CrNi18-10 surface layers strengthening and roughness changes, Journal of KONES, Vol. 15, No. 3, 2008.

11. Kolmogorov V.L., Fedotov V.P., Gorshkov A.V.: Three-dimensional analysis of the stress-strain state in the process of plastic deformation of metals. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, 1999.
12. Korzyński M.: A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009.
13. Korzyński M.: *Nagiatanie ślizgowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
14. Korzyński M.: Predicting the height of uneven surface after ball-peening machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 2019.
15. Kukielka L.: *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagiatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin 1994.
16. Kukielka L. et al.: 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, 2016.
17. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagiataniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1987.
18. Przybylski W.: *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagiatanie*, tom 2. Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
19. Tubielewicz K.: *Technologia i oprzyrządowanie w obróbce powierzchniowej*. Politechnika Częstochowska. Częstochowa 1996.
20. Zaleski K.: *Technologia nagiatania dynamicznego*. Monografie – Politechnika Lubelska, Lublin 2018.