

NAGNIATANIE POWIERZCHNI PŁASKICH ELEMENTÓW CZĘŚCI MASZYN OKRĘTOWYCH

W artykule przedstawiono klasyfikację procesu nagniatania powierzchni płaskich. Omówiono wpływ nagniatania na stopień względnego umocnienia (S_w) warstwy wierzchniej powierzchni płaskich typu kołnierz ze stali C45. Zaprezentowano tu wyniki badań, które stanowiły podstawę do określenia wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na umocnienie powierzchni. Po przeprowadzonych badaniach doświadczalnych określono, że największe umocnienie warstwy wierzchniej można uzyskać, stosując niskie wartości prędkości obrotowej i posuwowej dla dwóch przejść i możliwie maksymalnego dosuwu nagniataka.

Słowa kluczowe: nagniatanie powierzchni płaskich, stopień względny umocnienia, warstwa wierzchnia.

WPROWADZENIE

Obróbką nagniataniem można kształtować powierzchnie walcowe zewnętrzne, wewnętrzne, kształtowe i płaskie (np. powierzchnie płaskie typu płyty i prowadnice, powierzchnie boczne pierścieni oraz tulei oporowych i uszczelniających, części obrotowe z czołowymi powierzchniami płaskimi typu kołnierze armatury w instalacjach rurociągów okrętowych). Nagniatanie jest stosowane jako obróbka wykańczająca umacniająca i gładkościowa, która może być realizowana na uniwersalnych obrabiarkach i centrach obróbkowych. Skutecznie zastępuje takie operacje obróbki skrawaniem, jak: szlifowanie, rozwiercanie, gładzenie i docieranie. Proces nagniatania powierzchni płaskich odbywa się najczęściej z wykorzystaniem narzędzi, mających elementy toczne w postaci: kulek, rolek i krążków. Występowanie elementów ruchomych, będących w bezpośrednim styku z materiałem, kwalifikuje proces nagniatania do grupy nagniatania tocznego.

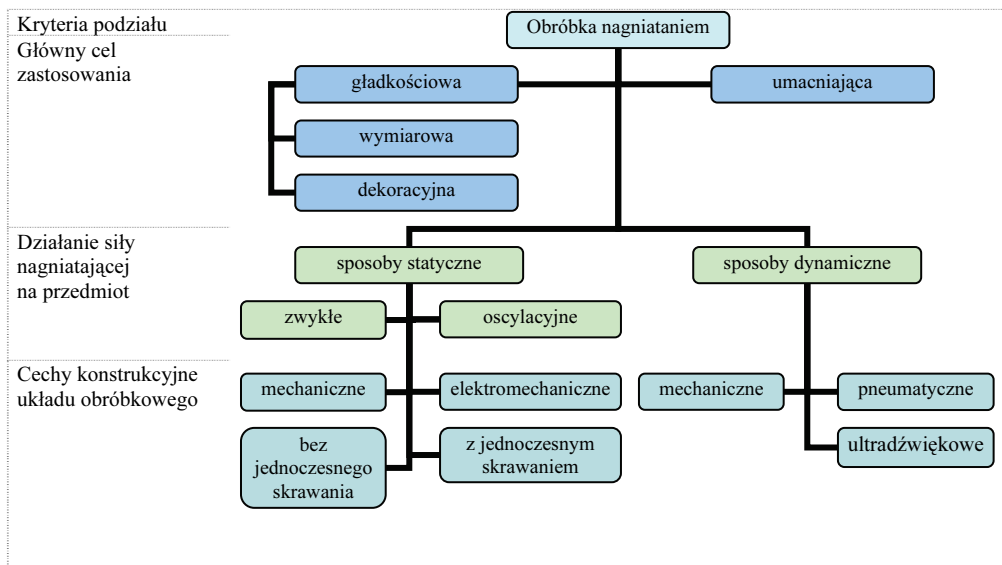
W nagniataniu ślizgowym elementem kształtującym właściwości obrabianej powierzchni jest element nagniatający na stałe przytwierdzony do uchwytu [11, 21].

Klasyfikacja obróbki nagniataniem pokazana na rysunku 1 wynika przede wszystkim z braku polskiej normy terminologicznej dotyczącej obróbki nagniatania, a także z uwzględnienia powszechnie przyjętego nazewnictwa oraz wielokryterialnego podziału.

Podczas klasyfikacji sposobów nagniatania przyjęto następujące kryteria [20, 21]:

- kształt i liczba elementów nagniatających;
- cechy kinematyczno-konstrukcyjne układu obróbkowego;

- sposób działania sił nagniatających wywieranych na przedmiot przez narzędzie podczas obróbki;
- rodzaj współpracy narzędzia z przedmiotem; rodzaj kontaktu elementu nagniatającego narzędzia z powierzchnią obrabianą.



Rys. 1. Klasyfikacja obróbki nagniataniem [21]

Fig. 1. The classification burnishing process [21]

W tabeli 1 ujęto klasyfikację sposobów nagniatania z uwzględnieniem narzędzi nagniatających, obróbkę nagniataniem przedstawiając w postaci uproszczonych schematów [21].

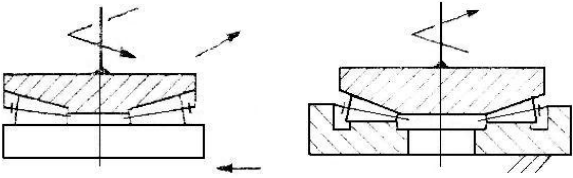
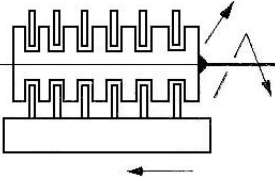
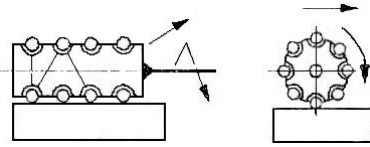
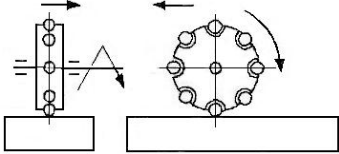
Narzędzia nagniatające dzielą się na nagniataki i głowice nagniatające. Rozgraniczenie to można nazwać podziałem ze względu na liczbę elementów nagniatających. Nagniatak jest prostym narzędziem w budowie, mającym jeden element nagniatający. Nagniatak jako narzędzie nie wykonuje ruchu obrotowego elementów nagniatających i może nosić nazwę np. imakowego nagniataka kulowego [20, 21, 22]. Głowicę nagniatającą od nagniataka odróżnia to, że posiada ona wiele elementów nagniatających, co czyni jej budowę bardziej skomplikowaną od nagniataka. Głowica nagniatająca oprócz posuwowego ruchu głównego wykonuje najczęściej dodatkowy ruch obrotowy elementów nagniatających. Oprócz narzędzi nagniatających spotkać można również urządzenia nagniatające, które mogą posiadać własny napęd, będąc jednocześnie sprzężone z maszynami obróbczymi, a także urządzenia nagniatające z własnym napędem [20, 22].

Metody nagniatania powierzchni płaskich
Methods of the surface flat burnishing

Tabela 1

Nazwa procesu	Schemat obróbki	Narzędzie
Stacyjne krążkowanie naporowe		Nagniatak krążkowy naporowy (imakowy)
Stacyjne kulkowanie naporowe		Nagniatak kulkowy naporowy (imakowy)
		Głowica naporowa kulkowa: a) sztywna; b) sprężysta
		Nagniatak kulkowy naporowy (imakowy)
		Głowica kulkowa tocząco-nagniatająca
Stacyjne kulkowanie naporowe oscylacyjne		Głowica kulkowa oscylacyjna (imakowy)
		Głowica kulkowa oscylacyjna

cd. tabeli 1

Statyczne rodkowanie naporowe		Głowica rodkowa
Statyczne krążkowanie odśrodkowe		Głowica krążkowa do nagiatania odśrodkowego
Dynamiczne kulowanie odśrodkowe		Głowica kulkowa wielorzędowa do nagiatania odśrodkowego
		Głowica kulkowa jednorzędowa do nagiatania odśrodkowego

1. METODYKA BADAŃ

Obróbka nagiataniem jest wykorzystywana do wytwarzania elementów, a także do regeneracji elementów części maszyn stosowanych w okrętownictwie, w przemyśle maszynowym i w przemyśle metalurgicznym. Rodzaj połączeń rurociągów okrętowych dobierany jest ze względu na:

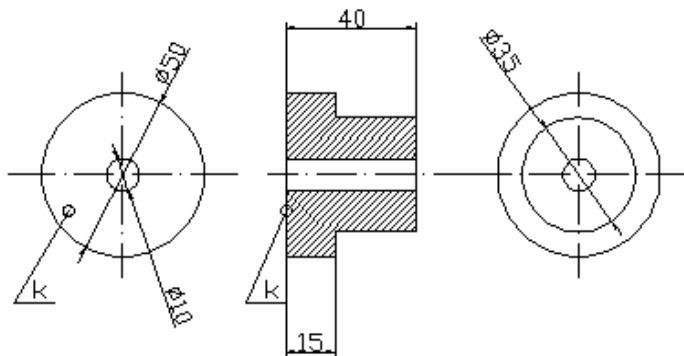
- parametry pracy i zależny od nich rodzaj materiału użytego do wyprodukowania rurociągu;
- bezwzględną konieczność zapewnienia szczelności instalacji w trakcie jej eksploatacji;
- zapewnienie dostępu do urządzeń wymagających zabiegów remontowych lub konserwacyjnych;
- warunki montażowe w trakcie budowy instalacji oraz w trakcie późniejszych remontów (wymian) jej elementów;
- częstotliwość tych remontów.

Przepisy Polskiego Rejestru Statków dopuszczają stosowanie następujących rodzajów połączeń odcinków rurociągów: bezpośrednio spawanych, kołnierzo-
wych, gwintowanych, mechanicznych. Połączenia kołnierzowe stosuje się wszę-

dzie tam, gdzie ze względu na agresywność transportowanego czynnika konieczne są częste wymiany odcinkowe rurociągu lub w celu zapewnienia w miarę łatwego i szybkiego dostępu do jego elementów (armatura, sita). Ponadto powodem stosowania tego rodzaju połączeń może być fakt wykonania rurociągu z materiałów o utrudnionej spawalności (zwłaszcza w warunkach montażowych) lub niespawalnych.

Do zalet połączeń kołnierzowych należy zaliczyć również ich znormalizowanie. Wymiary kołnierzy (średnica wewnętrzna, zewnętrzna, podziałowa, liczba i średnica otworów pod śruby złączne) są uzależnione od ciśnienia nominalnego danej instalacji, natomiast gatunek materiału, z jakiego jest wykonany kołnierz, zależy od temperatury roboczej transportowanego czynnika. Wadą połączeń kołnierzowych jest konieczność dokładnego montażu (w tym dobór właściwego materiału uszczelniającego), brak możliwości kontroli jakości połączenia bez próby ciśnieniowej instalacji oraz większa niż w przypadku rurociągów spawanych masa całego rurociągu. Ważne jest, aby zapewnić szczelność i wytrzymałość złączy kołnierzowych poprzez dobór odpowiedniej obróbki wykańczającej powierzchni płaskich kołnierzy. W tym celu proponowana jest powierzchniowa obróbka plastyczna powierzchni płaskich.

W pracy określono wpływ parametrów technologicznych obróbki nagniataniem (prędkość obrotowa – n , prędkość posuwu – f , dosuwu nagniataka – a_{nk} , liczba przejść obróbkowych – i) na stopień umocnienia płaskich powierzchni kołnierzy połączeń kołnierzowych rurociągów okrętowych.



Rys. 2. Wymiary próbek typu B – kołnierz; k – oznaczenie powierzchni płaskiej poddanej obróbce nagniataniem

Fig. 2. Dimensions type B samples – flange; k – marking the flat surface treated burnishing

Badania doświadczalne przeprowadzono dla próbek ze stali C45 o wymiarach podanych na rysunku 2. Próbki zostały odpowiednio przygotowane poprzez obróbkę mechaniczną, a następnie poddano je wyżarzaniu zupełnemu. Podczas toczenia poprzecznego zastosowano następujące parametry skrawania:

- prędkość posuwu $f = 0,05$ mm/obr;
- głębokość skrawania $a_p = 0,05$ mm;
- prędkość obrotową $n = 1400$ obr/min.

Do smarowania i chłodzenia zastosowano Emulgol ES-12. Toczenie wykonano nożem tokarskim z trójkątną płytką skrawającą TNMX 160408-WM z węgla spiekane go typu GC4015, mocowaną w oprawce DTG NR 2020K16 firmy Sandvik Coromant. Obróbkę nagniataniem powierzchni płaskich kołnierzy przeprowadzono według planu Hartleya za pomocą nagniataka krążkowego naporowego (imakowego) NK-01 z dociskiem sztywnym produkcji Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów.

Parametry nagniatania przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Parametry technologiczne nagniatania próbek płaskich oraz wartości twardości i stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej
Technological parameters of samples burnishing flat and the values of hardness and degree of the relative strengthening of the surface layer

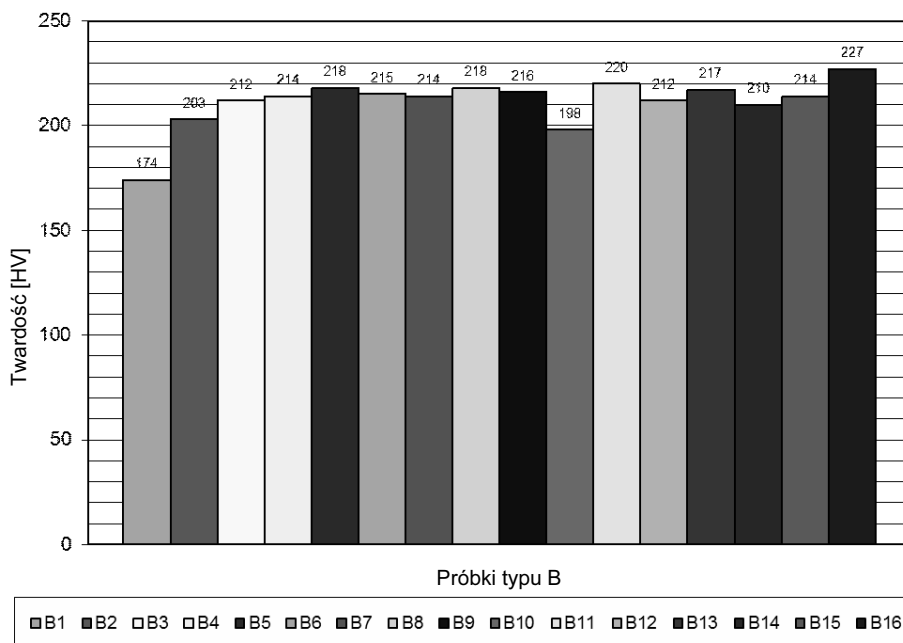
Próbka nr	n obr/min	f mm/obr	a_{nk} mm	i -	HV -	S_u %
B1	1400	0,05	0,05	-	174	-
B2	900	0,08	0,3	1	203	17,1
B3		0,03	0,3		212	21,8
B4		0,08	0,7		214	23,2
B5		710	0,03		0,7	218
B6	450	0,08	0,5		215	23,6
B7		0,03	0,5		214	23,0
B8		0,05	0,3		218	25,5
B9		0,05	0,7		216	24,1
B10	900	0,05	0,5		198	13,8
B11	710	0,05	0,5		220	26,4
B12	450	0,05	0,5		212	22,2
B13	450	0,08	0,5		2	217
B14		0,05	0,5	210		21,1
B15			0,3	214		23,4
B16			0,7	227		30,3

Pomiary twardości i mikrotwardości wykonano metodą Vickersa według PN-EN ISO 6507-1:1999, a następnie wyznaczono stopień względnego umocnienia (S_u) warstwy wierzchniej ze wzoru zamieszczonego w pracach [2–7, 15]. Pomiar mikrotwardości został przeprowadzony dla próbek nagniatanych czołowo za pomocą twardościomierza Vickersa typu H. Pomiary przeprowadzono na odpowiednio przygotowanych próbkach wzdłuż krawędzi bocznej próbki od powierzchni nagniatanej w głąb materiału.

2. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych określono, że po dwóch przejściach obróbkowych podczas procesu nagniatania uzyskano największe wartości twardości, a tym samym względne umocnienie warstwy wierzchniej wystąpiło w największym stopniu.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność średnich twardości warstwy wierzchniej próbek stalowych typu B (kołnierz), mierzonych metodą Vickersa na powierzchni obrobionej. Porównując wartości twardości otrzymane dla próbki B1, która była toczona z pozostałymi nagniatanymi próbkami, można zauważyć, że nastąpił wzrost twardości próbek po nagniataniu. Wartość uzyskanego umocnienia S_u osiąga wartości do 30,3% dla różnych próbek. Uzyskane różnice w średniej twardości próbek nagniatanych przede wszystkim zależą od zastosowania różnych wartości parametrów obróbki nagniataniem.



Rys. 3. Twardości próbek płaskich typu kołnierz

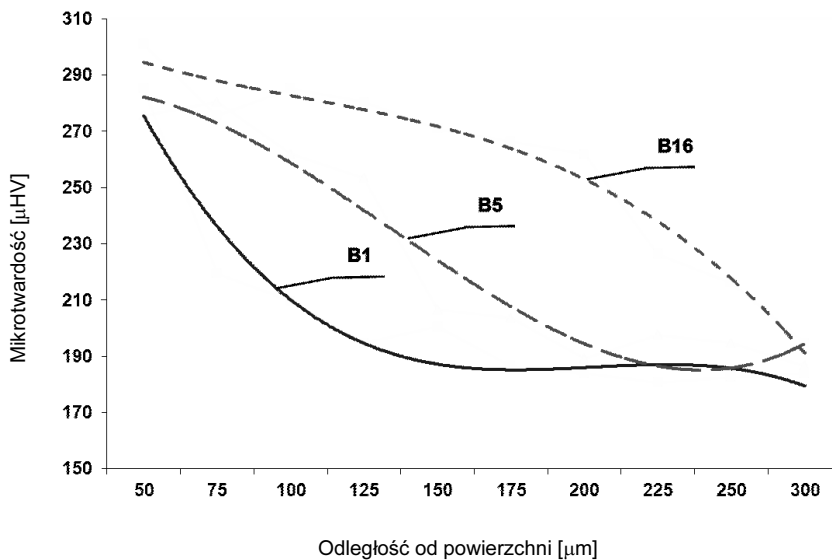
Fig. 3. Hardness of the sample flat flange type

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład mikroztwardości warstwy wierzchniej dla próbki po toczeniu (B1) i dwóch wybranych próbek po nagniataniu (B5 i B16). Można zauważyć, że największe wartości mikroztwardości występują w odległości 200 μm od powierzchni obrobionej, natomiast w odległości 300 μm od powierzchni obrobionej wartości mikroztwardości są ustabilizowane na poziomie równym twardości rdzenia. Największe wartości twardości (rys. 3) i mikroztwardości (rys. 4)

występują dla próbki po nagniataniu typu B16, która była poddana obróbce nagniataniem dla podanych parametrów:

- liczba przejść narzędzia $i = 2$;
- prędkość posuwu narzędzia $f = 0,05$ mm/obr, prędkość obrotowa powierzchni obrabianej $n = 450$ obr/min;
- wartość dosuwu nagniataka $a_{nk} = 0,7$ mm.

Można również zauważyć (tab. 2), że największe wartości umocnienia warstwy wierzchniej $S_u = 30,3\%$ występują dla próbki typu kołnierz B16.



Rys. 4. Mikrotwardości próbek płaskich typu kołnierz
Fig. 4. Microhardness of samples of flat-type flange

PODSUMOWANIE

Obecnie prowadzone są liczne badania, zarówno na świecie [1, 8–9, 16–17, 19], jak i w kraju [2–7, 10–15, 18, 20–26], dotyczące technologii nagniataniem i jej skutków w warstwie wierzchniej. Prace przede wszystkim podejmują tematykę stosowności obróbki wykańczającej dla żeliw stopowych, stopów aluminium, stopów tytanu, niektórych stopów żaroodpornych i stali nierdzewnych, powłok galwanicznych, dyfuzyjnych, natrykiwanych cieplnie i napawanych oraz części wykonywanych w technologii spiekanych proszków metali. Prowadzi się także badania nad zastosowaniem tej bezwiórowej obróbki wykańczającej dla głębokich otworów, otworów nieprzelotowych i powierzchni kształtowych. Można stwierdzić, że obróbka nagniataniem znajduje się w stadium intensywnego rozwoju, co

potwierdza wydawana literatura naukowo-techniczna oraz przyznawane patenty z zakresu technologii i narzędzi do obróbki nagniataniem na całym świecie. Prostość, zakres stosowalności i ekonomiczność obróbki wykańczającej metodą nagniatania umożliwia szerokie jej zastosowanie w większości zakładów branży metalowej.

W artykule przedstawiono wpływ procesu nagniatania na umocnienie warstwy wierzchniej stali C45, koncentrując się na technologii naporowego nagniatania tocznego – elementem nagniatającym był krążek. Szczególną uwagę zwrócono na charakterystyczne parametry obróbki nagniataniem, a także określono ich wpływ na uzyskiwane zmiany twardości w warstwie wierzchniej. Po przeprowadzonych próbach nagniatania powierzchni płaskich kołnierzy wyznaczono wpływ prędkości obrotowej – n , prędkości posuwu – f , dosuwu nagniataka – a_{nk} oraz liczby przejść obróbkowych – i na stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej. Najwyższa wartość umocnienia warstwy wierzchniej $S_u = 30,3\%$ występowała dla próbki typu B16 nagniatanej poprzecznie. Próbka była nagniatana z następującymi parametrami:

- liczba przejść narzędzia $i = 2$;
- prędkość posuwu narzędzia $f = 0,05$ mm/obr,
- prędkość obrotowa powierzchni obrabianej n równa 450 obr/min,
- wartość dosuwu nagniataka $a_{nk} = 0,7$ mm.

Przedstawione wartości parametrów należałoby uznać za wartości optymalne dla umacniającej obróbki nagniatającej powierzchni płaskich. Badania wykazały poprawność działania nagniataka krążkowego naporowego (imakowego) NK-01 z dociskiem sztywnym produkcji Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów, mimo jego prostej konstrukcji. Nagniatak z powodzeniem może być wykorzystywany jako narzędzie produkcyjne do nagniatania umacniającego oraz gładkościowego. Może mieć również zastosowanie do nagniatania przylgni dużych połączeń rurowych w celu zapewnienia ich większej szczelności i wytrzymałości na naciski powierzchniowe w miejscu styku lub do nagniatania opraw łożysk lub przylgni pierścieni.

LITERATURA

1. Brevern P.V., El-Tayeb N.S.M., Low K.O., *Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium*, Journal of Materials Processing Technology, 186 (2007), 272–278.
2. Dyl T., *The influence of effective strain on the reduce roughness and strain hardening surface layer ship machine elements*, Journal of Kones Powertrain and Transport, 2010, Vol. 17, No. 3, 75–78.
3. Dyl T., *Wpływ gniotu względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni powłok z faz międzymetalicznych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Wydawnictwo AM, Gdynia 2009, 94–99.
4. Dyl T., *Wpływ nagniatania na umocnienie elementów części maszyn okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 64, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2010, 36–42.

5. Dyl T., *Wpływ odkształcenia względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości i stopień umocnienia warstwy powierzchniowej po obróbce nagniataniem*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009, 100–104.
6. Dyl T., Starosta R., *Wstępna analiza możliwości zastosowania powłok stopowych Ni-Al na złącza kołnierzone rurociągów okrętowych*, Rudy i Metale Nieżelazne, R. 55 (2010), nr 11, 784–789.
7. Dyl T., Starosta R., Skoblik R., *Effect of the Unit Pressure on the Selection Parameters of Intermetallic Coatings NiAl and Ni3Al after Plastic Working*, Solid State Phenomena, 2010, Vol. 165, 19–24.
8. El-Axir M.H., El-Taweel T.A., *Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, Vol. 41, 301–310.
9. El-Tayeb N.S.M., Low K.O., Brevern P.V., *Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061*, Journal of Materials Processing Technology, 186 (2007), 272–278.
10. Korzyński M., *A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction*, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009), 625–633.
11. Korzyński M., *Nagniatanie ślizgowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
12. Korzyński M., *Sposób dogniatania powierzchni zwłaszcza płaskich pierścieniowych*, Pat. PRL 150914, 1990.
13. Korzyński M., Pacana A., Cwanek J., *Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing*, Surface & Coatings Technology, 203 (2009), 1670–1676.
14. Kukiełka L., *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin 1994.
15. 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 Powertrain and Transport, 2008, Vol. 15, No. 3, 259–267.
16. López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Muñoz J., Sánchez J.A., *Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (2005), 1659–1668.
17. López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Sánchez J.A., Arana J.L., *The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 32 (2007), 958–968.
18. Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W., *Tytan i jego stopy: gatunki, właściwości, zastosowanie, technologia obróbki, degradacja*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
19. Prabhu P.R., Kulkarni S.M., Sharma S.S., *Influence of deep cold rolling and low plasticity burnishing on surface hardness and surface roughness of AISI 4140 steel*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 72 (2010), 619–624.
20. Przybylski W., *Nagniatanie powierzchni cylindrycznych, płaskich i kształtowych na tokarkach*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
21. Przybylski W., *Technologia obróbki nagniataniem*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
22. Przybylski W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
23. Przybylski W., Rytlewski R., *Sposób obróbki nagniataniem stali*, Pat. PRL 123632, 1985.
24. Przybylski W., Zieliński J., *Narzędzie do nagniatania ślizgowego wewnętrznych powierzchni walcowych*, Pat. PL 61888 Y1, 2005.

25. Tubielewicz K., *Technologia i oprzyrządowanie w obróbce powierzchniowej*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1996.
26. Tubielewicz K., *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.

THE BURNISHING FLAT SURFACES OF MACHINE PARTS SHIP

Summary

The paper presents a classification of the burnishing process flat surfaces. The influence of burnishing at the strain hardening of steel C45 was presented. The research results have been presented in the paper and served as a basis for defining which parameters and values have greatest influence on the obtained hardness of the burnished surface. Finally conclusions related to the influence of burnishing on surface layer strengthening of a treated material have been drawn taking into account the results obtained in the research. After experimental studies determined that the greatest strengthening of the surface layer can be obtained with low values of speed and feeds for two possible transitions and the maximum infeed burnishing tool.

Keywords: *burnishing flat surfaces, degree of relative strain hardening, surface layer.*