



Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem

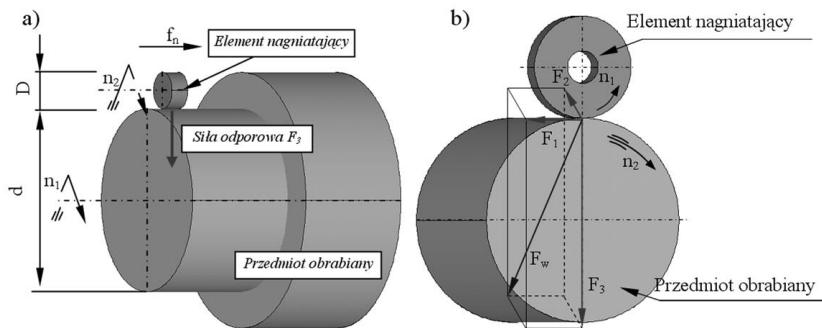
Radosław Patyk, Agnieszka Kułakowska, Łukasz Bohdal
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Współczesne firmy produkcyjne aby sprostać wymogom rynku i obowiązującemu prawu muszą spełnić wiele kryteriów. Aktualnie najistotniejszym kryterium (zgodnie z intencją Unii Europejskiej) jest wytwarzanie wyrobów przede wszystkim ekologicznych [12]. W planie działania na rzecz zasobooszczędnej Europy wyznaczono cel, aby na rok 2020 zapewnić obywatelom i organom publicznym odpowiednie bodźce skłaniające do wyboru najbardziej zasobooszczędnych produktów, dzięki odpowiednim sygnałom ekonomicznym i zrozumiałym informacjom środowiskowym. W planie działania uznano również, że rynek wewnętrzny odgrywa ważną rolę pod względem nagradzania produktów charakteryzujących się oszczędnym zużyciem zasobów. Udział w rynku produktów charakteryzujących się oszczędnym zużyciem zasobów jest aktualnie na niskim poziomie, pomimo możliwości dostarczania takich produktów przez przemysł i rolnictwo i rosnącego popytu wśród konsumentów.

Podstawowym problemem współczesnych technik wytwarzania jest kształtowanie zasobooszczędnego wyrobu o z góry określonych właściwościach eksploatacyjnych. Na jakość części maszyn największy wpływ ma warstwa wierzchnia (skrót: WW) i jej właściwości. Podczas obróbki wykończeniowej zostają ostatecznie ukształtowane podstawowe właściwości warstwy wierzchniej, które w określonych warunkach eksploatacyjnych decydują o trwałości i niezawodności części maszyn.

Jedną z metod obróbki wykańczeniowej części maszyn, pozwalającej uzyskać warstwę wierzchnią o korzystnych właściwościach jest obróbka nagniataniem. Polega ona na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego, zachodzącego w warstwie wierzchniej przedmiotu wskutek określonego termodynamicznego działania twardego i gładkiego elementu nagniatającego w kształcie rolki, krążka, kulki lub koła zębatego, na nierówności powierzchni obrabianej [11]. Schemat elastycznego nagniatania powierzchni walcowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Proces elastycznego nagniatania toczonego powierzchni walcowych: a) schemat procesu, b) rozkład sił działających w strefie nagniatania toczonego, F_w – siła wypadkowa oraz F_1, F_2, F_3 jej składowe: $F_w = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}$, gdzie, F_1 – siła styczna, F_2 – siła osiowa (wzdłużna), F_3 – siła normalna (odporowa, główna)

Fig. 1. The elastic burnishing rolling process of cylindrical surface: a) schema of process, b) distribution of burnishing force in contact zone F_w – resultant force, and F_1, F_2, F_3 her components $F_w = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}$, for F_1 – tangential force, F_2 – axial force, F_3 – normal force (general)

Odształcenia plastyczne wywołane tą metodą obróbki powstają w wyniku działania układu sił wywołujących naprężenia w przedmiocie obrabianym przekraczające wartość naprężenia uplastyczniającego. Daje to możliwość otrzymania przedmiotu o dużej gładkości powierzchni połączonej z umocnieniem mechanicznym warstwy wierzchniej oraz konstituowania w niej naprężeń ściskających, powodując zwiększenie odporności na zużycie w warunkach eksploatacyjnych [1–3, 8–11].

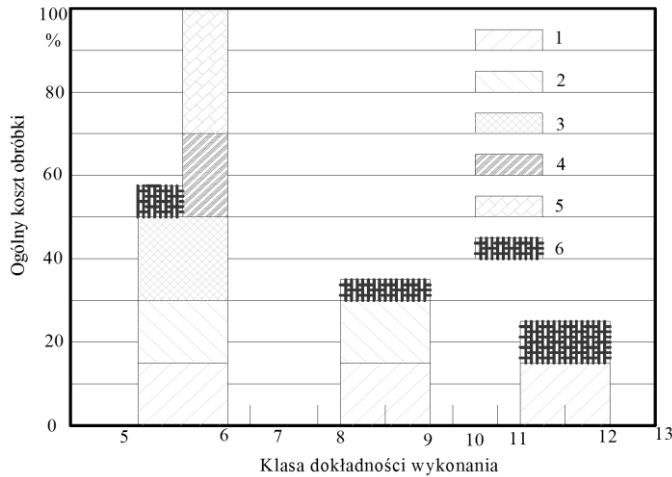
Różnorodność przeznaczenia części oraz różnorodność warunków ich eksploatacji powodują, że wymagania odnośnie do stanu warstwy wierzchniej i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane. Wia-

domo, że istotny wpływ na jakość produktu ma jakość półfabrykatu. Dotychczas tradycyjne nagniatanie rzadko stosowano na skalę przemysłową. Głównym powodem takiego stanu jest brak wytycznych dotyczących doboru parametrów technologicznych procesu nagniatania oraz niejednoznaczne dane dotyczące umiejscowienia tej operacji w procesie wytwarzania, co uniemożliwia tym samym sterowanie jakością WW wyrobu. Istotny wpływ na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego mają parametry technologiczne obróbki, współczynnik tarcia oraz zarys nierówności (trójkątny, trapezowy itd.) powierzchni nagniatanej powstały w obróbce poprzedzającej [3, 8–10]. Podstawowym problemem w projektowaniu procesu nagniatania jest dobór parametrów technologicznych, z których najważniejszym jest główna siła nagniatania F_3 , która jest składową normalną wypadkowej siły nagniatania F . Nieprawidłowy dobór tego parametru powoduje niezamierzone zmiany wymiarowe i kształtowanie warstwy wierzchniej o właściwościach niezgodnych z wymaganymi. W skrajnych przypadkach może nastąpić zniszczenie WW przedmiotu.

Dlatego też pomimo mnogości technologii wytwarzania ciągle istnieje potrzeba opracowywania nowych oraz ulepszania istniejących technologii szczególnie tych zasobooszczędnych w celu uzyskiwania wyrobów względnie tanich o dużej odporności na różne rodzaje zużycia eksploatacyjnego.

2. Ekonomiczne aspekty stosowania obróbki nagniataniem

Przemysł maszynowy śledzi dokonania naukowców w zakresie powierzchniowej obróbki plastycznej ze względu na czynniki takie jak: możliwość łatwego kształtowania na obrabianej powierzchni regularnych nierówności, możliwość sterowania właściwościami WW, możliwość wygniatania na powierzchni obrabianej mikrorowków smarnych o dowolnym układzie, które zapobiegają zacieraniu i zmniejszają zużycie ściernie, szczególnie w obecności zanieczyszczeń, możliwość zastosowania w pewnych przypadkach do regeneracji wymiarowej części maszyn; możliwość stosowania nagniatania oscylacyjnego, jako obróbki poprzedzającej klejenie części metalowych, obróbka w celach dekoracyjnych, zastępująca pracochłonne polerowanie (np. miękkich stopów aluminium), oraz wytwarzanie ozdobnych reliefów [11].



Rys. 2. Udział kosztu nagniatania i innych metod obróbki w ogólnym koszcie obróbki w zależności od wymaganej dokładności przedmiotu: 1 – toczenie kształtujące zgrubne, 2 – toczenie wykańczające, 3 – szlifowanie, 4 – szlifowanie wykańczające, 5 – docieranie, dogładzanie, gładzenie (honowanie), 6 – nagniatanie [11]

Fig. 2. Participation of the burnishing cost and other treatments in the overall cost of treatment, depending on the required accuracy of the object: 1 – shaping turning, 2 – finishing turning, 3 – grinding, 4 – finish grinding, 5 – lapping, superfinish, calendaring (honing), 6 – burnishing [11]

Z wieloletnich wyników badań wynika, nagniatanie w stosunku do tradycyjnych metod obróbki wykańczającej (obróbki ścierne) jest znacznie tańsze, przy uzyskiwaniu tych samych klas dokładności. Cechą charakterystyczną dla procesu nagniatania jest praktycznie stały koszt operacji, który nie zależy od wymaganej dokładności [11]. Udział kosztów w zależności od wymaganej dokładności przedmiotów przedstawia rysunek 2. Najlepsze jednak rezultaty ekonomiczne można uzyskać, łącząc operację skrawania z nagniataniem.

2.1. Porównanie wyników badań szlifowania bezkłowego i nagniatania rur ze stali nierdzewnej

Stale nierdzewne według normy PN-EN 10088-1 dzieli się na stale ferrytyczne, półferrytyczne, stale martenzytyczne, stale umacniane wydzieleniowo, stale austenityczne, stale ferrytyczno-austenityczne

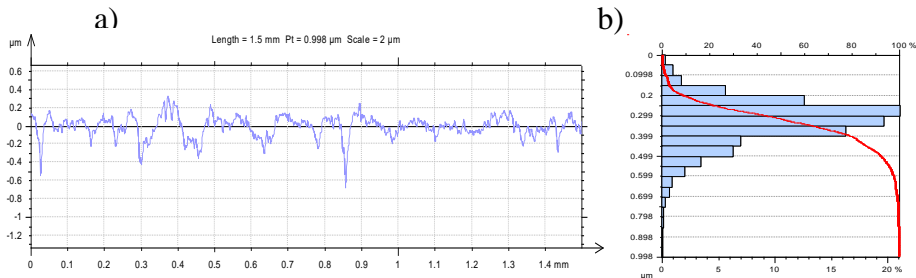
(dwufazowe). Podstawowymi zaletami stali nierdzewnych są: wysoka odporność korozyjna na działanie czynników zewnętrznych, wysoka wytrzymałość i sztywność materiału, niska rozszerzalność termiczna, wysoka temperatura topnienia. Ze względu na te cechy stale nierdzewne znajdują zastosowanie w przemyśle spożywczym, gdzie normą jest zatwierdzony materiał konstrukcyjny, przemyśle chemicznym, przemyśle celulozowo-papierniczym, przemyśle transportowym i motoryzacyjnym oraz przemyśle sanitarnym. Najpopularniejsze (tradycyjne) metody obróbek wykończeniowych półfabrykatów wykonanych ze stali to: obróbki ściernie (szlifowanie, polerowanie, szczotkowanie) oraz obróbki chemiczne (wytrawianie, pasywacja i elektropolerowanie). Ze względu na swoje korzystne właściwości eksploatacyjne niestety stale nierdzewne należą do materiałów trudnoobrabialnych. Największymi problemami podczas obróbki ubytkowej stali nierdzewnej są: skłonność do mechanicznego umacniania i utwardzania się podczas obróbki, co powoduje powstawanie twardych powierzchni i długich, twardych wiórów, które mają tendencje do tworzenia narostów oraz niska przewodność cieplna powodująca duże trudności w utrzymaniu stałej niskiej temperatury obróbki. W artykule przedstawiono wyniki badań uzyskiwanej jakości powierzchni po dwóch rodzajach obróbek rur ze stali nierdzewnej. Obróbki klasycznej (szlifowanie bezkłowe) oraz rozwiązanie alternatywne – nagniatanie. W obydwu przypadkach obróbce wykończeniowej poddawano rury ze stali 1.4301 o średnicy $d = 18$ mm o chropowatości powierzchni w stanie dostawy $R_a = 2,5$ μm . Tego rodzaju rury po obróbce powierzchniowej obróbce wygładzającej do $R_a < 0,1$ μm znajdują szerokie zastosowanie w wyrobach armatury, poręczach, ozdobnych regałach, karniszach i inne.

Obróbka szlifowaniem

W celu uzyskania wymaganej chropowatość końcowej $R_a < 0,1$ μm należy przeprowadzić kilku etapowe (5–7 a nawet do 12) szlifowanie bezkłowe na szlifierkach taśmowych, gdzie jedno wrzeciono posiada moc ok. 5–10 kW. Dla takich linii szlifierskich uzyskuje się wydajność do 3 mb/min. Badania eksperymentalne przeprowadzono na linii szlifierskiej składającej się z pięciu szlifierek taśmowych o mocy nominalnej każda $P = 10$ kW. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok linii szlifierskiej do obróbki rur
Fig. 3. View of the grinding line for pipe processing



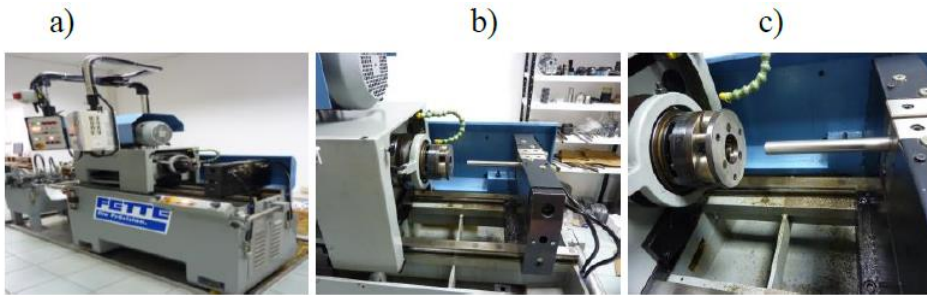
Rys. 4. Profil chropowatości powierzchni (a) oraz udział nośny liniowy (b) po szlifowaniu
Fig. 4. Surface roughness profile (a) and linear bearing part (b) after grinding

Po prawidłowo wykonanym procesie szlifowania uzyskano powierzchnię gładką o parametrze chropowatości $R_a = 0,09 \mu\text{m}$ oraz wydajność $W = 2,5 \text{ mb/min}$. Przykładowy profilogram powierzchni oraz udział nośny liniowy wraz z krzywą Abbotta po szlifowaniu przedstawiono na rysunku 4.

Obróbka nagniataniem

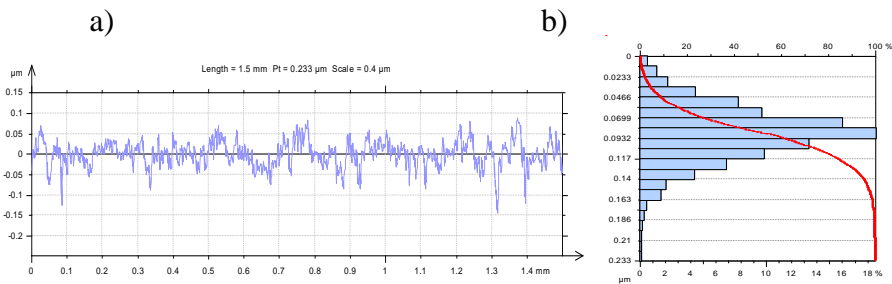
W celu uzyskania wymaganej chropowatości końcowej $Ra < 0,1$ μm możliwe jest zastosowanie bezużytkowej metody kształtowania powierzchni – powierzchniowej obróbki plastycznej. Wówczas możliwe jest uzyskiwanie porównywalnych lub mniejszych chropowatości powierzchni bez nadmiernego (bezużytecznego) tracenia energii. Na rysunku 5 przedstawiono stanowisko badawcze do nagniatania gładkościowego powierzchni walcowych.

Prezentowane stanowisko posiada tylko jedno wrzeciono o mocy $P = 3$ kW. Przeprowadzono badania procesu nagniatania rur wykonanych ze stali nierdzewnej 1.4301 o średnicy $d = 18$ mm.



Rys. 5. Stanowisko do nagniatania gładkościowego: a) widok ogólny, b) widok układu OUPN, c) widok ogólny głowicy typ FU3 firmy FETTE

Fig. 5. Position for smooth burnishing: a) general view, b) detail view, c) general view of the head type FU3 FETTE



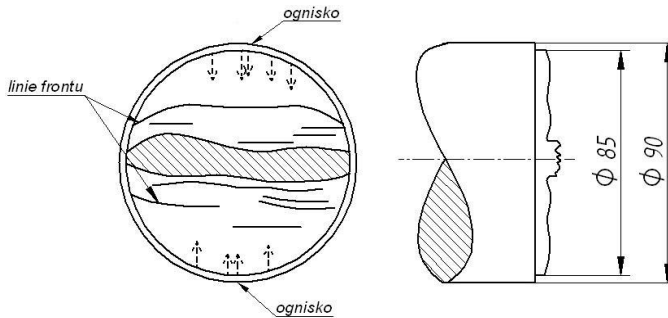
Rys. 6. Profil chropowatości powierzchni (a) oraz udział nośny liniowy (b) po nagniataniu

Fig. 6. Surface roughness profile (a) and linear bearing part (b), after burnishing

Uzyskano powierzchnię gładką o parametrze chropowatości $R_a = 0,018 \mu\text{m}$ oraz wydajność $W = 9 \text{ mb/min}$. Przykładowy profilogram powierzchni oraz udział nośny liniowy wraz z krzywą Abbotta po nagniataniu przedstawiono na rysunku 6.

3. Eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem

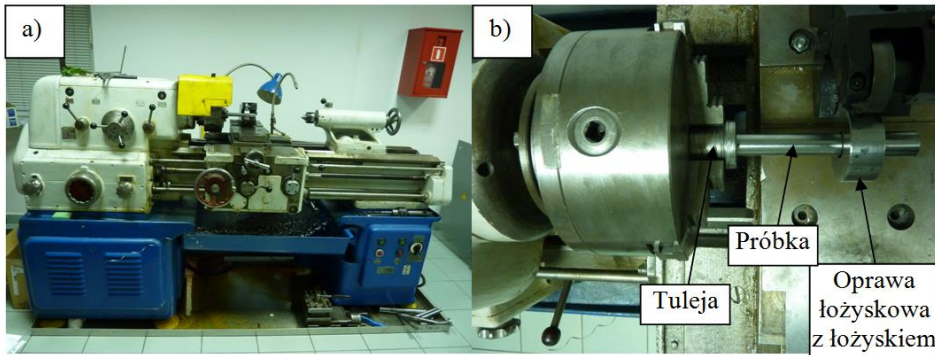
Obróbki wykończeniowe stosuje się w celu ostatecznego ukształtowania właściwości eksploatacyjnych wyrobów. Najczęściej wygładza się powierzchnię uzyskując większą odporność korozyjną, większą odporność na zużycie ściernie oraz zmęczeniowe. Zwiększenie odporności na zużycie zmęczeniowe można również uzyskać stosując umocnienie powierzchniowe części. Jedną z metod powierzchniowego umocnienia mechanicznego części jest powierzchniowa obróbka plastyczna. Zjawisko zmęczenia materiału (rys. 7) jest to utrata spójności i związane z nią ubytki materiału spowodowane cyklicznym oddziaływaniem obciążeń nieprzekraczających statycznych obciążeń krytycznych. Odporność części na zużycie zmęczeniowe można zwiększać na dwa sposoby: unikać wad powierzchniowych i wpływu karbów i mikrokarbów (w obróbkach wykończeniowych uzyskiwać wysokie gładkości powierzchni) oraz wprowadzając korzystny rozkład naprężeń własnych. W pracy przeprowadzono badania procesu odporności na zużycie zmęczeniowe wałków przygotowanych przy pomocy nagniatania tocznego. W tym celu przygotowane wałki poddano wielokrotnemu zginaniu obrotowemu. Badania eksperymentalne przeprowadzono na tokarce konwencjonalne TUB 32. W samocentrującym uchwycie trójszczękowym zamocowano zaprojektowaną i wykonaną specjalną tuleję. Na próbkę walcową montowano podporę obrotową składającą się z oprawy łożyskowej oraz zamontowanego w niej tocznego jednorzędowego łożyska kulowego poprzecznego o oznaczeniu 6204.



Rys. 7. Zjawisko zmęczenia postaciowego: a) przełom, b) schemat procesu pękania

Fig. 7. Fatigue amorphous phenomenon: a) breakthrough, b) diagram of the cracking process

Odgięcie obrotowej podpory realizowane było poprzez zamontowanie na suporcie poprzecznym tokarki płyty z układem krążków obrotowych mających na celu zniwelowanie naprężeń zginających występujących w podporze podczas jej prostopadłego odchylenia od osi obrotu próbki. Widok stanowiska badawczego do badań odporności na zużycie zmęczeniowe wałków przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Stanowisko badawcze do badania odporności na zużycie zmęczeniowe wałków po obróbce: a) widok ogólny, b) widok szczegółowy

Fig. 8. Test stand to examine roller fatigue resistance after working: a) general view, b) detailed view

Badania odporności na zużycie zmęczeniowe przeprowadzono na wałkach o średnicy $d = 20$ mm wykonanych ze stali C45. Porównywano trwałość wałków po toczeniu z wałkami po nagniataniu. Przykładowe złomy zmęczeniowe wałka po toczeniu przedstawiono na rysunku 9 a, natomiast po nagniataniu na rysunku 9 b.



Rys. 9. Widok złomu zmęczeniowego próbek: a) po toczeniu, b) po nagniataniu
Fig. 9. View of the fatigue scrap metal of the samples: a) after turning, b) after burnishing

Uzyskano średni czas odporności na zużycie zmęczeniowe na stanowisku badawczym dla próbek po toczeniu równy $t_t = 15$ s, natomiast po nagniataniu $t_n = 189$ s, co odpowiada odpowiednio średniej liczbie cykli $n_t = 8$ oraz $n_n = 352,8$.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz opracowano następujące wnioski:

- 1) Niechęć przedsiębiorstw przemysłowych do wdrażania nowych technologii obróbczych powoduje duże marnotrawstwo czasu i energii. Zatem stworzenie odpowiednich mechanizmów rynkowych wymuszających poszukiwanie i wdrażanie technologii ekologicznych i zasobooszczędnych jest problemem priorytetowym.
- 2) Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że możliwe jest stosowanie metod ekologicznych i zasobooszczędnych w produkcji części maszyn przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ich produkcji i polepszeniu właściwości eksploatacyjnych.

Literatura

1. **Bohdal Ł.:** *Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using elastic/visco-plastic damage model.* Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 1419–1422 (2012).
2. **Bohdal Ł., Walczak P.:** *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 15, 863–872 (2013).
3. **Kukielka L., Kulakowska A., Patyk R.:** *Numerical analysis of embossing process of regular inequalities with triangular outline on cylindrical semi product,* Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. Vol. 8/3, 36–41 (2010).
4. **Kulakowska A., Kukielka L.:** *Numerical analysis and experimental researches of burnishing rolling process with taking into account deviations in the surface asperities outline after previous treatment.* Steel Research International, 2, 42–48 (2008).
5. **Kulakowska A.:** *Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality.* Steel Research International, vol. 81/9, 218–221 (2010).
6. **Kulakowska A.:** *Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process.* Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 127–131 (2012).
7. **Legutko S., Nosal S.:** *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn,* Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2004.
8. **Patyk R.:** *Theoretical and experimental basis of regular asperities about triangular outline embossing technology.* Steel Research International, vol. 81/9, 190–193 (2010).
9. **Patyk R., Kukielka L.:** *Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing.* Steel Research International, 2, 642–647 (2008).
10. **Patyk R.:** *New method of technological surface layer shaping of machine parts during duplex burnishing rolling process.* Steel Research International, Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 115–117 (2012).
11. **Przybylski W.:** *Technologia obróbki nagniataniem,* WNT, Warsaw 1987.

12. Komunikat komisji do parlamentu europejskiego i rady : Tworzenie jednolitego rynku dla produktów ekologicznych. Poprawa sposobu informowania o efektywności środowiskowej produktów i organizacji. Bruksela, dnia 9.4.2013, COM(2013) 196 final.

Environmental, Economic and Exploitation Aspects of the Use of Burnishing Rolling Treatments

Abstract

The paper presents the environmental, economic and exploitation aspects of the use of burnishing rolling treatments. The validity of the application of the plastic surface treatment in modern technological processes by replacing expensive, energy-intensive defects processing (grinding, turning) was shown. One confirmed the possibility of obtaining resource saving products using burnishing with not worsen their utility quality as well as a lower unit price compared to products prepared using conventional technology.

Słowa kluczowe: proces nagniatania, ekologia, aspekt ekonomiczny, eksploatacja
Key words: burnishing process, ecology, economic aspect, exploitation