

Leon KUKIEŁKA, Agnieszka KUŁAKOWSKA, Radosław PATYK
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

Problematyka kształtowania jakości technologicznej części w procesie nagniatania powierzchniowego

Prof. dr hab inż. Leon KUKIEŁKA

Profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Członek organizacji naukowych międzynarodowych (GAMM) i krajowych: Komisja Budowy Maszyn o/PAN w Poznaniu, Sekcja Teorii Procesów Przeróbki Plastycznej Komitetu Metalurgii PAN. Autor lub współautor 10 książek i ponad 260 publikacji. Aktualnie specjalizuje się w komputerowym modelowaniu i symulacji wielokrotnie nieliniowych zagadnień kontaktowych w zastosowaniach do procesów technologicznych wytwarzania.

e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl



Dr inż. Radosław PATYK

Asiunkt w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej; od 7 lat zajmuje się badaniem procesu powierzchniowego nagniatania tocznego z zastosowaniem metod statystycznych i numerycznych, współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych w zeszytach naukowych, materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych. Od roku 2007 jest kierownikiem Laboratorium Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów Wydziału Mechanicznego.

e-mail: radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl



Dr inż. Agnieszka KUŁAKOWSKA

Doktor nauk technicznych; zatrudniona w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej na stanowisku adiunkta; od 7 lat zajmuje się obróbką nagniatania naporowego tocznego z uwzględnieniem stanu powierzchni wyrobu po obróbkach poprzedzających; autorka lub współautorka kilkudziesięciu publikacji w zeszytach naukowych, w materiałach konferencyjnych zarówno krajowych jak i zagranicznych.

e-mail: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl



Streszczenie

Praca dotyczy problematyki zwiększenia jakości technologicznej i użytkowej wyrobu nagniatanego tocznie. Wykazano istotność tych rodzajów jakości od stanu powierzchni przedmiotu po obróbkach poprzedzających nagniatanie. Badano dwa technologiczne sposoby przygotowania powierzchni do nagniatania: toczenie i wygniatanie plastyczne. Przedstawiono przykładowe wyniki kształtowania stereometrii powierzchni o zarysie symetrycznych nierówności trójkątnych oraz dokładności odwzorowania powierzchni czynnej narzędzia w tych procesach. Wykazano, że stan powierzchni pod dalsze nagniatanie po plastycznym wygniataniu jest korzystniejszy w porównaniu ze stanem powierzchni po toczeniu.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, nagniatanie, stan powierzchni.

Problematics of parts technological quality forming in burnishing rolling process

Abstract

The paper concerns problematics of increasing technological and useable quality of burnished products. The significance of these qualities from the state of workpiece surface after previous treatment but before burnishing rolling was indicated. Two technological methods of surface preparation before burnishing: turning and plastic embossing processes. The results of surface stereometry forming with symmetrical triangular outline of asperities and accuracy of projection of tool active surface in these processes are shown as an example. The paper shows that the state of surface before burnishing rolling after plastic embossing is favorable to state of surface after turning.

Keywords: surface layer, burnishing rolling, surface state.

1. Wprowadzenie

Powierzchniowa obróbka nagniataniem jest jedną z metod obróbki wykańczeniowej metali i ich stopów, spieków oraz tworzyw sztucznych, polegająca na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego, zachodzącego w warstwie wierzchniej przedmiotu, wskutek określonego kinetycznego działania twardego i gładkiego elementu nagniatającego w kształcie kulki, krążka, rolki lub koła zębatego, na nierówności powierzchni obrabianej [11, 12].

Efektom nagniatania jest zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz utwardzenie warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu i kształtowanie w niej naprężeń ściskających. Jednocześnie występowanie tych efektów obróbki powoduje, że elementy nagniatane mają lepsze właściwości użytkowe niż elementy obrabiane w sposób konwencjonalny np. szlifowane i polerowane [11, 12]. Różnorodność przeznaczenia części oraz warunków ich eksploatacji powodują, że wymagania odnośnie do stanu jej warstwy wierzchniej (WW) i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane [1 ÷ 3, 5, 13]. Zachodzi, więc potrzeba poszukiwania, badania i wdrażania takich sposobów nagniatania, które pozwalają na kształtowanie różnej, lecz optymalnej ze względu na przyjęte kryteria, jakości wyrobu. Spośród dużej liczby znanych obecnie sposobów nagniatania [11, 12], największe możliwości kształtowania wyrobu o zróżnicowanej jakości technologicznej posiadają sposoby nagniatania na półgorąco i gorąco, gdyż obok oddziaływania mechanicznego występują w nich zjawiska cieplne. Nagniatanie półwyrobu wykonanego z określonego materiału powoduje tworzenie pewnej jakości technologicznej, która z kolei, zapewnia powstanie określonych właściwości użytkowych wyrobu [3, 5 ÷ 8, 10, 13]. Jakość wyrobu zależy zarówno od warunków realizacji procesu nagniatania, jak i od stanu przedmiotu po obróbce poprzedzającej. Nieodpowiedni stan przedmiotu po obróbce poprzedzającej jest przyczyną nie tylko określonych zmian odchylek wymiarów i kształtów wyrobu nagniatanego, ale i określonych zmian jakości jego warstwy wierzchniej. Dlatego też problemy zapewnienia odpowiedniego stanu przedmiotu po obróbce poprzedzającej i technologiczne nagniatania należy rozpatrywać wspólnie [7, 10].

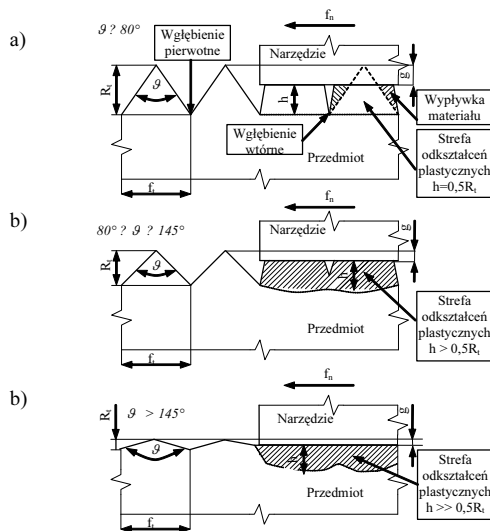
2. Stan powierzchni do nagniatania

Czynnikami istotnie wpływającymi na jakość wyrobu po nagniataniu są: struktura geometryczna powierzchni do nagniatania, stosunek posuwu nagniatania do posuwu w obróbce poprzedzającej, zarys elementu nagniatającego i stan poślizgu w obszarach kontaktu, głębokość nagniatania oraz ustawienie elementu nagniatającego względem nierówności przedmiotu obrabianego. W pracy szczegółowo analizowano dwa czynniki, tj. wymaganą strukturę geometryczną powierzchni do nagniatania oraz kąta wierzchołkowego trójkątnej nierówności powierzchni. Aktualnie brak jest jednoznacznych wytycznych dotyczących przygotowania powierzchni pod nagniatanie. Autorzy zalecają różne wymagania odnośnie do struktury geometrycznej jak i zarysu chropowatości powierzchni przedmiotu pod powierzchniową obróbkę nagniataniem.

Z badań zespołu [3, 5 ÷ 7, 10] wynika, że istnieje korelacja pomiędzy stanem przedmiotu po obróbce poprzedzającej a jakością technologiczną wyrobu, na przykład pomiędzy wyjściowym zarysem nierówności a stanem naprężeń i zmianą wymiarów części po nagniataniu. Zalecaną strukturą geometryczną powierzchni do nagniatania jest zarys regularny, zdeterminowany i okresowy.

Autorzy [3, 7, 10], przy założeniu że nierówność powierzchni po obróbkach poprzedzających jest regularna, symetryczna i trójkątna (skrót: RST) oraz jest symetrycznie odkształcana, wyodrębniają trzy jakościowo różne przypadki płynięcia materiału w WW przedmiotu w procesie nagniatania zależne jedynie od kąta wierzchołkowego ϑ nierówności (rys. 1):

- 1) Dla kątów wierzchołkowych $\vartheta \leq 80^\circ$ odkształcenie materiału następuje jedynie w obrębie nierówności. Wgłębienia nierówności nie podnoszą się. Rdzeń materiału pozostaje nieodkształcony. Przy całkowitym odkształceniu widoczne są zdeformowane nierówności oddzielone od siebie szczelinami (płaszczyznami nieciągłości) o głębokości $g = 0,5R_r$. Wyrównanie powierzchni następuje w wyniku płynięcia materiału nierówności na boki (rys. 1 a).
- 2) Dla kątów $80^\circ < \vartheta < 145^\circ$ następuje zwiększenie strefy odkształceń plastycznych, które obejmują również rdzeń materiału. Wgłębienia nierówności podnoszą się, przy czym przy całkowitym odkształceniu, na styku sąsiednich wypływek, widoczne są szczeliny, lecz o mniejszej niż uprzednio głębokości (rys. 1 b).
- 3) Dla kątów $\vartheta \geq 145^\circ$ wyrównanie powierzchni następuje w wyniku odkształcenia nierówności i rdzenia materiału a nie kosztem wypływek materiału w kierunku boków nierówności. Wartość obniżenia wierzchołka nierówności równa jest wartości, o jaką podnosi się jej wgłębienie. W warstwie wierzchniej nie ma płaszczyzn nieciągłości materiału (rys. 1 c).



Rys. 1. Wpływ kąta wierzchołkowego symetrycznej nierówności trójkątnej na stan odkształceń i profil chropowatości powierzchni po nagniataniu

Fig. 1. Influence of vertical angle of triangular symmetrical asperity on the state of strain and surface roughness profile after burnishing

Zatem istotne jest, aby w obróbce poprzedzającej nagniatanie uzyskać nie tylko regularność zarysu, lecz również odpowiedni kąt wierzchołkowy ϑ kształtowanych nierówności RST. Wartości kąta wierzchołkowego ϑ nierówności RST, jak i wartość posuwu f_t w obróbce poprzedzającej należy dobierać każdorazowo dla typu części obrabianej i jej przeznaczenia. Badano dwa sposoby przygotowania powierzchni do nagniatania, tj. obróbkę toczeniem oraz wygniatanie plastyczne.

3. Operacje poprzedzające nagniatanie

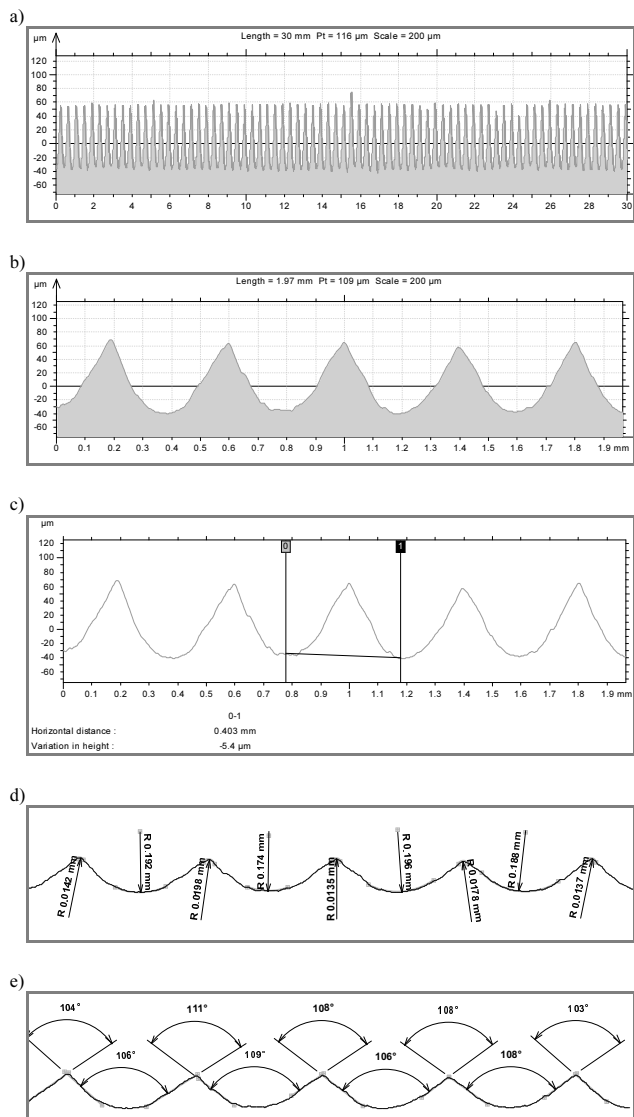
3.1. Toczenie

Wartości parametrów stanu warstwy wierzchniej elementów obrabianych typowymi sposobami obróbki w typowych warunkach dostępne są w literaturze np. [9]. Dane te należy traktować jako orientacyjne, gdyż w konkretnych warunkach obróbki, szczególnie materiałów nietypowych, otrzymane wartości parametrów

WW mogą się znacznie różnić od tych zamieszczonych w literaturze [9]. Brak możliwości technicznych do bezpośredniej obserwacji zjawisk zachodzących na powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej wymaga weryfikacji metodą pośrednią, przez obserwację i analizę wyników obróbki. Dlatego też wykonano własne badania dokładności odwzorowania ostrza noża oraz określono odchyłki zarysu nierówności powierzchni po obróbce toczeniem.

Do badań wytypowano noże tokarskie ISO 10. Ostrza noży szlifowano, a powierzchnie natarcia i przyłożenia doglądano. Do badań zakwalifikowano tylko te noże, których krawędzie główna, przejściowa i pomocnicza nie posiadały szczyratości. Parametry toczenia powierzchni ustalono zgodnie z pięciopoziomowym planem eksperymentu [4] dla czynników wejściowych w zakresach: kąt wierzchołkowy ostrza noża $\varepsilon = 75^\circ \div 105^\circ$, posuw $f = 0,2 \div 1$ [mm/obr], promień zaokrąglenia ostrza $r = 0 \div 0,2$, prędkość $v = 7 \div 42,3$ [m/s]. Próbki walcowe ze stali S235JRG2 toczono na tokarce TUM 25B. Stosowano pięciokrotną powtarzalność badań. W trakcie badań zaobserwowano tworzenie się na ostrzu noża narostu, który każdorazowo usuwano.

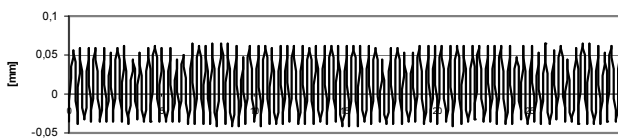
Przykładowy profilogram powierzchni po toczeniu otrzymany na profilometrze T8000 wraz z powiększeniem w skali 1x1 i metodyką pomiarów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy profilogram powierzchni toczonej (a), powiększenie powierzchni w skali 1x1 (b), pomiar posuwu (c), pomiar kąta wierzchołkowego nierówności (d), pomiar promienia zaokrąglenia dna między nierównościami oraz wierzchołka nierówności (e)

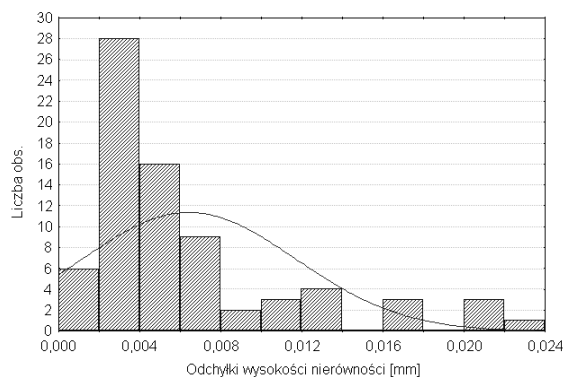
Fig. 2. Exemplary profile of turned surface (a), surface zoom in scale 1x1 (b), measurement of the feed (c), measurement of asperity vertical angle (d), measurement of rounding radius of valley between asperities as well as asperity's vertex (e)

Dokładność odwzorowania stereometryczno-kinematycznego ostrza noża ustalono porównując parametry teoretycznego zarysu nierówności z parametrami zarysów rzeczywistych po toczeniu. Profil chropowatości powierzchni charakteryzowano przez podanie wartości średnich następujących parametrów stałych: R_{sm} – średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości, R_t – maksymalna wysokość wzniesienie-wgłębienie profilu chropowatości, φ – kąt wierzchołkowy nierówności, $\varphi_{1,2}$ – kąt pochylenia lewego i prawego boku nierówności, r_d – promień zaokrąglenia dna między nierównościami, r_w – promień zaokrąglenia wierzchołka nierówności. Analizując profilogramy stwierdzono, że w przypadku, gdy kąty przystawienia ostrza noża wynosiły $\chi = \chi_1 = 45^\circ$ a posuw $f = 0,2$ [mm/obr], występowały znaczne różnice pomiędzy zarysem teoretycznym a rzeczywistym. Profile są pod większym wpływem oddziaływań losowych niż zdeterminowanych, przez co ich charakter jest stochastyczny. Analiza wyników wskazuje na różnice między parametrami profilu teoretycznego i rzeczywistego. Rozbieżności te dotyczą wszystkich badanych parametrów profilu. Występują odchyłki zarysu badanych nierówności. Dalszą analizą statystyczną objęto rozkłady wzniesień i wgłębień profilu. Dane z programu TURBO Roughness zamieniono na kody ASCII, a następnie wprowadzono do programu Microsoft Excel XP i sporządzono wykresy składające się ok. 9000 punktów. Do analizy wzniesień i wgłębień wybrano punkty najdalej wysunięte zarówno w przypadku wzniesień jak i wgłębień (rys. 3), stąd też dane dotyczące wzniesień są wartościami dodatnimi i nazywane są wysokościami wzniesień, natomiast wgłębienia są wartościami ujemnymi i nazywane są głębokościami wgłębień.



Rys. 3. Położenie wzniesień i wgłębień profilu powierzchni próbki po toczeniu
Fig. 3. Position of surface profile hills and valleys of the sample after turning

Obliczono odchyłki wysokości nierówności i wgłębień profilu w odniesieniu do najwyższej nierówności i najgłębszego dna. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy histogram odchyłek wysokości nierówności powierzchni.

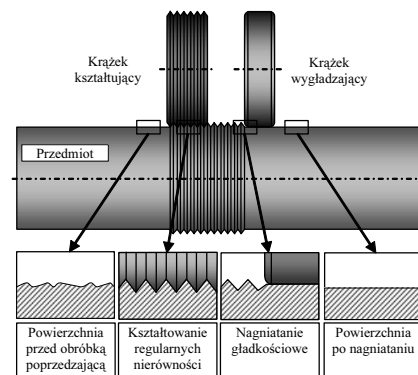


Rys. 4. Histogram odchyłek wysokości nierówności powierzchni po toczeniu
Fig. 4. Histogram of height deviations surface asperities after turning

Ze względu na ograniczoną trwałość narzędzi skrawających oraz ze względu na sztywność układu OUPN toczenie jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie można stosować do części niezbyt długich. Dla elementów o znacznej długości zaproponowano nowy sposób uzyskiwania regularnych nierówności o zarysie trójkątnym.

3.2. Wygniatanie plastyczne

Schemat ideowy połączonych operacji technologicznych, tj. plastycznego kształtowania nierówności RST (nowej operacji technologicznej) oraz nagniatania tak przygotowanej powierzchni przedstawiono na rysunku 5.

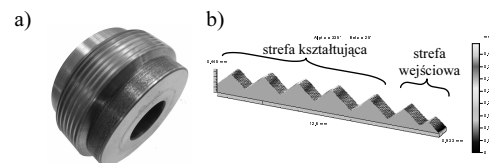


Rys. 5. Schemat połączonych procesów wygniatania nierówności RST oraz ich nagniatania

Fig. 5. Diagram of the connected processes of the RST asperities embossing and their burnishing

Plastycznego kształtowanie nierówności RST wykonano na tarkarce konwencjonalnej TUB 32 na próbkach walcowych o średnicy $d = 50$ [mm] wykonanych ze stali S235JRG2 oraz C45. Rozwiązanie to jest proste (i tanie) w realizacji, ponieważ nie trzeba specjalnie przebudowywać istniejących obrabiarek.

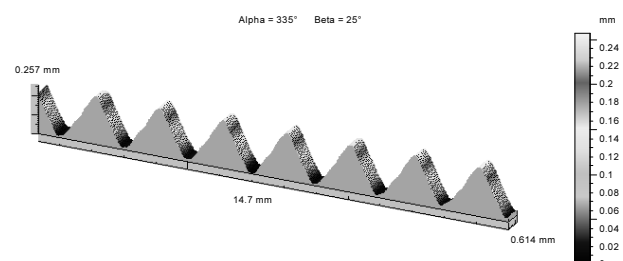
Krażek do wygniatania o zarysie przedstawionym na rysunku 6 wykonano w klasie dokładności IT 6 ze stali NC6 zahartowanej do twardości 65 HRC.



Rys. 6. Krażek do wygniatania nierówności RST: a) widok ogólny; b) stereometria części roboczej

Fig. 6. Roller for embossing RST asperities: a) general view; b) stereometry of working element

Po procesie wygniatania uzyskano powierzchnię z regularnymi nierównościami trójkątnymi. Przykładowe wyniki przedstawiono w postaci stereometrii powierzchni (rys. 7). Pomiary wykonano na urządzeniu TallyScan 150 firmy Talor – Hobson Precision.



Rys. 7. Stereometria wygniecionych nierówności RST
Fig. 7. Stereometry of embossed RST asperities

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne kształtowania zarysu zdeterminowanego toczeniem wykazały, że rzeczywista wysokość chropowatości jest różna od teoretycznej, gdyż ta ostatnia nie uwzględnia wpływu: właściwości materiału obrabianego i materiału ostrza, szczyratości krawędzi skrawającej, zużycia ostrza, odkształceń plastycznych zachodzących podczas skrawania odkształceń sprężystych, drgań narzędzia, rysowania powierzchni przez wiór i chłodzenia, jeśli ma ono miejsce.

Podczas toczenia powierzchni pod nagniatanie wymaga się spełnienia warunków dotyczących odpowiedniej geometrii ostrza noża, symetrycznego pozycjonowania noża oraz doboru posuwu i prędkości toczenia.

Uzyskanie zarysu zdeterminowanego nie zawsze jest możliwe. Gdy kąty przystawienia ostrza wynoszą $\chi = \chi_1 = 45^\circ$ a posuw $f = 0,2$ [mm/obr], przewaga czynników losowych procesu powoduje, że zarys powierzchni ma charakter losowy.

Dobierając odpowiednią geometrię ostrza noża tokarskiego oraz posuw większy od posuwu granicznego i odpowiednią prędkość powoduje się, że wpływ zjawisk losowych jest nieistotny. Pomimo, że na przyjętym poziomie istotności, wynoszącym $\alpha = 0,05$, parametry zarysu teoretycznego nie różnią się istotnie od parametrów zarysu rzeczywistego, to występują odchyłki parametrów zarysu, które są największe dla parametru wysokościowego chropowatości (R_t).

Zaproponowana nowa operacja technologiczna umożliwia uzyskiwanie nierówności RST zalecanych do dalszego procesu nagniatania. Uzyskane nierówności charakteryzują się wysoką dokładnością odwzorowania narzędzia wygniatającego dla posuwu wygniatań f oraz kąta wierzchołkowego ϑ wygnięcionej nierówności RST. Opracowana nowa operacja technologiczna może znaleźć zastosowanie w procesach obróbkowych wyrobów długich i wiotkich poddanych nagniataniu.

5. Literatura

- [1] Bowden F.P., Tabor D.: Wprowadzenie do trybologii. WNT, Warszawa, 1980.
- [2] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa, 1980.
- [3] Kukielka L.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Monografia WM nr 47. WSI Koszalin, 1994.
- [4] Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich, PWN Warszawa 2002.
- [5] Kukielka L., Patyk R., Wojtalik M.: Badanie odporności na zacieranie powierzchni nagniatanej tocznie z prądem. V Słupskie Forum Motoryzacji. Słupsk 2002, 123 – 135.
- [6] Kukielka L., Grabarczyk A., Falana A.: Wybrane problemy przygotowania powierzchni do pod nagniatanie w aspekcie jakości wyrobu. V Słupskie Forum Motoryzacji. Słupsk 2002, 151 – 163.
- [7] Kułakowska A.: Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego tocznie. Praca doktorska. Koszalin 2006.
- [8] Laber S.: Analiza współzależności pomiędzy stanem warstwy wierzchniej a właściwościami użytkowymi żeliwnych elementów maszyn obrabianych nagniataniem. Monografia 32, WSI im. Jurija Gagarina w Zielonej Górze, Zielona Góra 1985.
- [9] Nowicki B.: Struktura geometryczna – chropowatość i falistość. WNT, W – wa 1991,
- [10] Patyk R.: Kształtowanie regularnych nierówności o zarysie trójkątnym w procesie nagniatania naporowego tocznego wałków stalowych. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska 2006.
- [11] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem Technologia i oprzyrządowanie. WNT, Warszawa 1979.
- [12] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa, 1987.
- [13] Wieczorowski K., Kodym K.: Krażkowanie powierzchni walcowych na gorąco. Krajowa Konferencja Naukowo – Techniczna nt. Technologia obróbki przez nagniatanie, Bydgoszcz 1974, 199-202.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA



specjalizuje się w wydawaniu czasopisma i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa
ul. Świętokrzyska 14A
tel./fax 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice
ul. Akademicka 10, p. 30b
tel./fax 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl