

Sylwia PATYK, Radosław PATYK, Leon KUKIEŁKA, Agnieszka KUŁAKOWSKA
 POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

Eksperymentalne i numeryczne metody określania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej

Mgr inż. Sylwia PATYK

Od 2002 roku związana z Katedrą Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Zajmuje się analizą sił oraz rozkładu nacisków w strefie kontaktu narzędzia z przedmiotem w procesie nagniatania tocznego. Jest współautorką wielu publikacji w zeszytach naukowych, w materiałach konferencyjnych zarówno krajowych jak i zagranicznych.



e-mail: sylwia.patyk@interia.pl

Dr inż. Radosław PATYK

Doktor nauk technicznych, adiunkt w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej; od 8 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. Członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej.



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

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 członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. 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. Agnieszka KUŁAKOWSKA

Doktor nauk technicznych; zatrudniona w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej na stanowisku adiunkta; od 8 lat zajmuje się obróbką nagniatania naporowego tocznego z uwzględnieniem stanu powierzchni wyrobu po obróbkach poprzedzających; członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, autorka lub współautorka kilkudziesięciu publikacji w zeszytach naukowych i w materiałach konferencyjnych.



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

Streszczenie

Znajomość głównej siły nagniatania oraz wartości i rozkładu nacisków w strefie kontaktu narzędzia z przedmiotem w procesie precyzyjnego nagniatania tocznego stanowi wiedzę podstawową, niezbędną do prawidłowego projektowania procesu technologicznego oraz maszyn i narzędzi. Analityczne obliczenie głównej siły nagniatania z wymaganą dokładnością jest niemożliwe, a wykorzystanie istniejących wzorów podawanych w literaturze obarczone jest zbyt dużym błędem. Zatem istnieje potrzeba opracowania dokładniejszego sposobu obliczania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego. Opracowano model fizyczny, matematyczny oraz komputerowy procesu nagniatania w uaktualnionym opisie Lagrange'a, z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Opracowano aplikację w programie Ansys/LS-DYNA, która umożliwia analizę różnych zjawisk fizycznych, również sił kontaktowych, występujących w procesie nagniatania w dowolnej chwili jego realizacji. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznej. Obliczone wartości sił w procesie tocznego nagniatania gładkościowego weryfikowano eksperymentalnie na nowoczesnym stanowisku do pomiaru sił i momentu.

Słowa kluczowe: nagniatanie, pomiar, główna siła nagniatania, warstwa wierzchnia, metoda elementów skończonych.

Experimental and numerical methods of force parameter determinations in burnishing rolling process of rough surface

Abstract

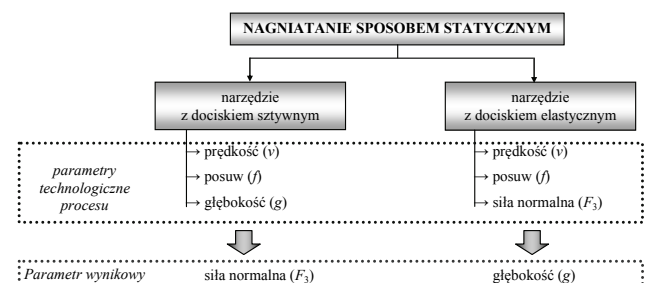
Acquaintance of forces and contact pressure distribution in tool-object contact zone during precise burnishing rolling process determine the basic knowledge, essential to proper design a technological process, machines and tools. Calculations of the burnishing force with desirable accuracy are not possible, because the formulas given in literature are loaded by significant errors. There is still necessity to elaborate better, more precise way of force parameter calculations for burnishing rolling. The physical, mathematical and computer model of burnishing rolling process in updated Lagrange's description, considering the geometrical and physical nonlinearity, was elaborated. The application in Ansys/LS-DYNA program was elaborated, allowing to analyze different physical phenomena appearing during process as well as contact forces, in each time of realization process. Exemplary results of computer simulation are presented. Calculated force

values in burnishing rolling process were verified by experiment carried out on modern measuring site, designed for force and moment measurements.

Keywords: burnishing, principal force of burnishing, surface layer, finite element method.

1. Wprowadzenie

Znajomość głównej siły nagniatania oraz wartości i rozkładu nacisków w strefie kontaktu narzędzia z przedmiotem w procesie nagniatania tocznego stanowi wiedzę podstawową, niezbędną do prawidłowego projektowania. W pracach [2÷5, 8] przedstawiono analizę sił w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej. Przedstawiono analityczne metodyki wyznaczania głównej siły nagniatania. W procesie nagniatania sposobem statycznym, siła naporu (docisku) może być wywierana w sposób sztywny lub sprężysty (podatny, elastyczny) przez odpowiednie elementy konstrukcyjne narzędzia (rys. 1). Dla przypadku nagniatania z dociskiem sztywnym, siła wywołwana jest poprzez wzajemne oddziaływanie naprężeniowe narzędzia i przedmiotu, co jest spowodowane sztywnością układu OUPN lub wielkością nadatku na nagniatanie [2÷4].

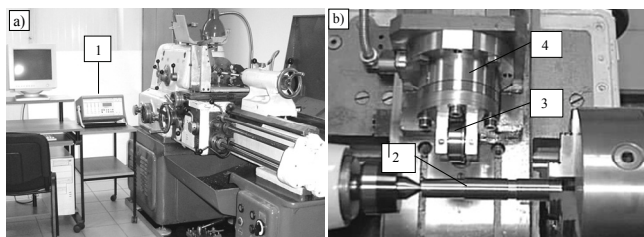


Rys. 1. Podział nagniatania za względu na sposób wywierania docisku narzędzia
 Fig. 1. Classification of burnishing process parameters with considering the way of tool pressure exert

Nagniatanie toczne ze sztywnym dociskiem elementu nagniatającego powoduje wzrost dokładności wymiarowo – kształtowej, ale jego warstwa wierzchnia (WW) charakteryzuje się nieregularnością chropowatości, nośności i umocnienia, co może niekorzystnie wpływać na właściwości eksploatacyjne wyrobu. Natomiast dla przypadku nagniatania z dociskiem sprężystym siła nagniatania nie zależy od wielkości nadkładu na nagniatanie, natomiast zależy od nastaw elementów sprężystych narzędzia takich jak sprężyny, siłowniki pneumatyczne czy hydrauliczne. Powstała wówczas siła przyjmuje stałą wartość podczas obróbki. Nieodpowiedni dobór parametrów technologicznych, głównie sił nagniatania może doprowadzić do zniszczenia WW przedmiotu obrabianego w postaci jej złuszczenia, pęknięć powierzchniowych itp. Dotychczas zastosowanie nagniatania, jako obróbki wykończeniowej oraz bardzo dokładnej wiązało się z przeprowadzeniem każdorazowo badań eksperymentalnych procesu i na ich podstawie określenia parametrów technologicznych. Dlatego podawane w literaturze wzory na obliczanie sił nagniatania są wzorami empirycznymi. Mnogość proponowanych rozwiązań skłania do porównania wyników obliczonych sił według różnych wzorów empirycznych. Analizowano przykład nagniatania powierzchni czopa wałka. Do najbardziej znanych rozwiązań na główną siłę nagniatania F_3 należą wzory podawane przez firmę Hegenscheidt, Kudriawcewa, Chejfica, Kudriawcewa – Chejfica, Drozda, Iwanowa, które są zamieszczone między innymi w pracach [4–6, 9]. Wartości sił F_3 niezbędnych do umocnienia WW na głębokość $\delta=3$ mm obliczone na podstawie tych zależności dla przypadku nagniatania wałka o średnicy czopa $d=500$ mm, twardości materiału części HB=250, granicy plastyczności $R_e=400$ MPa, wytrzymałości na rozciąganie $R_m=600\div 710$ MPa, elementem nagniatającym w postaci krążka dwutoroidalno – walcowym, o średnicy $D=100$ mm wynoszą odpowiednio: 417,2; 7,2; 9,5; 93,8; 53 oraz 430 kN. Można stwierdzić, że wartości te istotnie różnią się od siebie i dlatego należy każdorazowo przeprowadzać badania własne w celu ustalenia parametrów technologicznych procesu. Uzyskane wyniki na podstawie analizy literatury wskazują, że celowe jest prowadzenie dalszych badań nad opracowaniem dokładniejszych metod obliczania głównej siły nagniatania z uwzględnieniem rzeczywistych warunków procesu.

2. Stanowisko badawcze

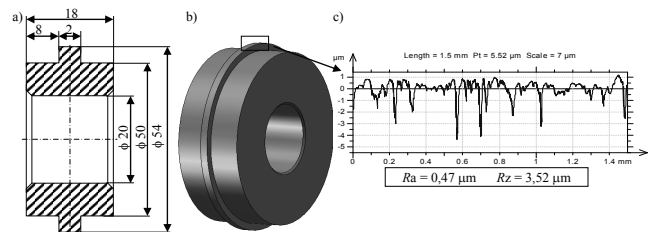
Stanowisko badawcze do pomiaru parametrów siłowych podczas procesu nagniatania tocznego z dociskiem elastycznym powierzchni chropowatej przedstawiono na rysunku 2. Stanowisko składa się z następujących podzespołów: tokarki konwencjonalnej TUB32, piezoelektrycznego siłomierza typu 9272 firmy Kistler, wielokanałowego wzmacniacza ładunku typu 5019B firmy Kistler, komputera PC wyposażonego w kartę pomiarową oraz niezbędne oprogramowanie.



Rys. 2. Widok ogólny (a) i widok szczegółowy (b) stanowiska do pomiaru składowych siły i momentu nagniatania: 1 – wzmacniacz sygnału, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – krążek nagniatający, 4 – czujnik piezoelektryczny

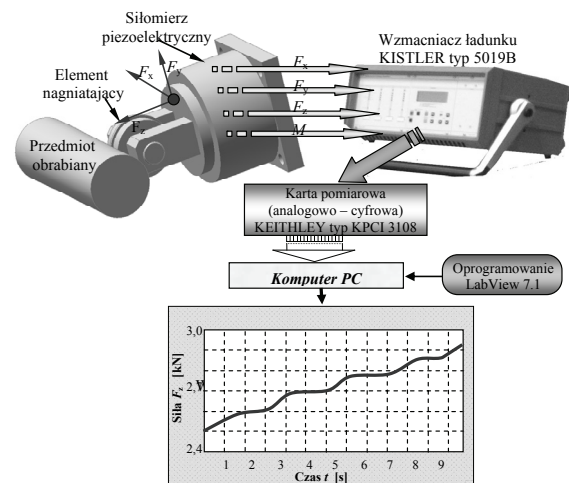
Fig. 2. General view (a) and detailed view (b) of measurement site to measurements of burnishing force and moment components: 1 – signal amplifier, 2 – worked object, 3 – burnishing roller, 4 – piezoelectric sensor

Do piezoelektrycznego siłomierza zamocowano głowicę nagniatającą wyposażoną w krążek nagniatający przedstawiony na rysunku 3. Siłomierz wraz z głowicą nagniatającą zamocowano za pomocą tarczy dystansowej w miejscu imaka nożowego. Akwizycji danych dokonano za pomocą karty analogowo – cyfrowej KPCI 3108 firmy Keithley oraz oprogramowania LabView wersji 7.1 firmy National Instruments. Z piezoelektrycznego czujnika siły przekazywany jest sygnał (różnica potencjałów elektrycznych) na wzmacniacz sygnału firmy Kistler, gdzie następuje jego wzmocnienie częstotliwość próbkowania można regulować w zakresie od 1 ms do 50 ms. Następnie sygnał podawany jest do karty pomiarowej, gdzie następuje zamiana i automatyczne przeliczenie sygnału analogowego (napięcia) na odpowiadające sygnałowi wartości sił. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru sił nagniatania przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Krążek nagniatający zastosowany w badaniach a) geometria, b) widok ogólny, c) profil chropowatości powierzchni czynnej

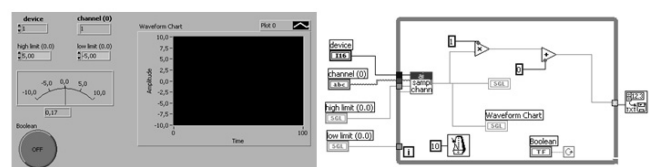
Fig. 3. Burnishing roller used in experiments a) geometry, b) general view, c) roughness profile of active surface



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru składowych siły nagniatania

Fig. 4. Block diagram of the measuring site to burnishing component force measurements

Opracowano pulpit pomiarowy wraz z schematem toru pomiarowego w programie Labview wersji 7.1. Widok panelu sterowania i pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.

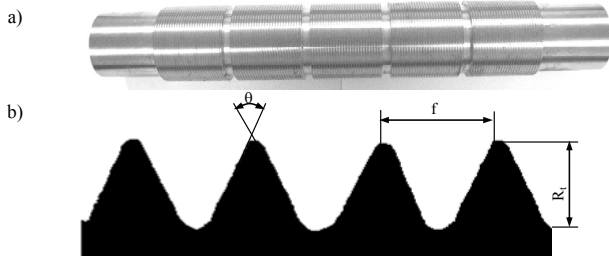


Rys. 5. Panel sterowania opracowany w programie LabView 7.1

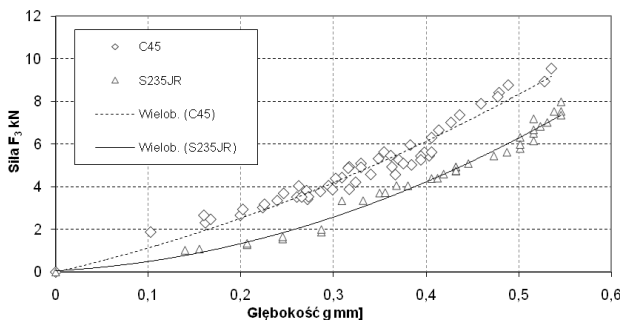
Fig. 5. Steering panel elaborated in LabView 7.1 program

3. Badania eksperymentalne

Próbki do badań eksperymentalnych wykonano w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Koszalińskiej na tokarce sterowanej numerycznie firmy Gildemeister typ NEF 400 ze sterowaniem Fanuc 210i. Do toczenia zastosowano nóż o kącie wierzchołkowym 60° typ R166.4FG-2525-16 z płytką z węgla spiekane go typ R166.0G-16MMO1-15. Próbki w postaci wałków stalowych ze stali S235JR oraz C45 miały średnicę $d=45$ mm oraz długość $l=300$ mm. Na wałkach naniesiono regularne nierówności o zarysie trójkątnym i o kącie wierzchołkowym $\theta=60^\circ$. Odległości pomiędzy poszczególnymi nierównościami wynosiły $f=1,5$ mm. Widok próbki do badań przedstawiono na rysunku 6. Badania eksperymentalne wykonano na stanowisku do nagniatania tocznego wałków. Nierówności powierzchni nagniatano na głębokości g z przedziału $0 < g \leq 0,5 R_t$, gdzie R_t jest znaną wysokością nierówności. Wyniki zmian głównej składowej siły nagniatania F_3 w zależności od głębokości nagniatania dla kąta wierzchołkowego $\theta=60^\circ$, dla dwóch gatunków stali przedstawiono na wykresie (rys. 7).

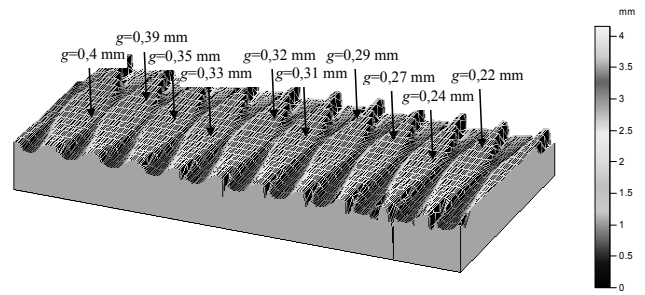


Rys. 6. Próbką do badań procesu nagniatania: a) widok ogólny, b) trójkątny zarys nierówności powierzchni próbki o kącie wierzchołkowym $\theta=60^\circ$, skoku $f=1,5$ mm oraz $R_t=1,1$ mm
 Fig. 6. Samples used to burnishing rolling process researches: a) general view, b) triangular outline of surface asperities about vertical angle $\theta=60^\circ$, feed 1,5 mm and $R_t=1,1$ mm



Rys. 7. Zmiany głównej siły nagniatania w zależności od głębokości nagniatania dla kąta wierzchołkowego profilu chropowatości $\theta=60^\circ$, dla materiałów C45 oraz S235JR
 Fig. 7. Changes of principal burnishing force depending on burnishing depth for vertical angle of the asperity $\theta=60^\circ$, for materials C45 and S235JR

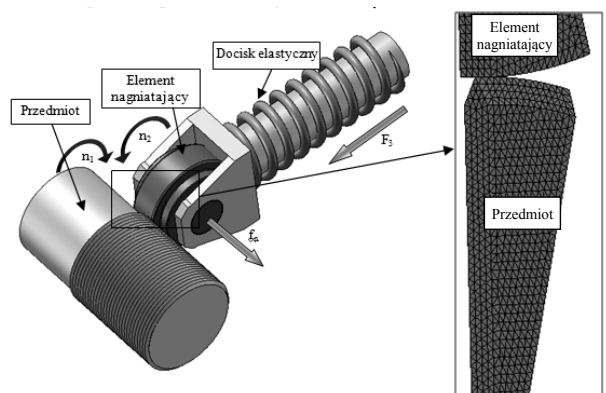
Przykładowe widoki odcisków obszaru kontaktu przedstawiono na rysunku 8. Topografię powierzchni próbek mierzono na urządzeniu TallyScan 150 firmy Talor – Hobson precision znajdującym się na wyposażeniu Katedry Inżynierii Mechanicznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Urządzenie to umożliwia bezstykowy pomiar stereometrii powierzchni przy użyciu wiązki laserowej.



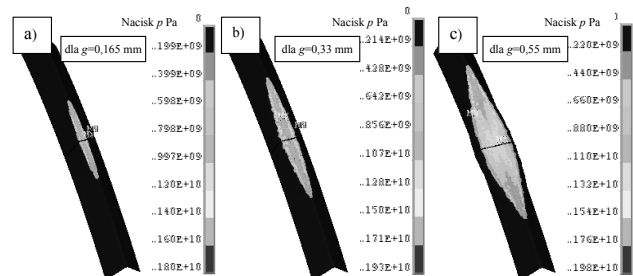
Rys. 8. Stereometria obszaru kontaktu dla różnych głębokości nagniatania
 Fig. 8. Stereometry of contact zone for different burnishing depth

4. Badania numeryczne z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych

Numeryczne określenie rozkładu nacisków w strefie kontaktu narzędzia z nierównościami powierzchni przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych w programie Ansys/LS-DYNA. Na rysunku 9 przedstawiono schemat procesu nagniatania tocznego oraz jego opracowany model dyskretny. Narzędzie i przedmiot obrabiany posiadało geometrię podobną jak w przeprowadzonym eksperymencie. Na powierzchni przedmiotu ukształtowano regularne nierówności o zarysie trójkątnym o parametrach takich jak w eksperymencie. Pominięto wpływ chropowatości powierzchni przedmiotu (za wyjątkiem makro nierówności) oraz elementu nagniatającego. Element nagniatający traktowano jako ciało idealnie sztywne ($E \rightarrow \infty$), przedmiot obrabiany jako ciało sprężysto-plastyczne [1, 7]. Narzędzie dyskretyzowano elementami typu Targe 170, przedmiot obrabiany dyskretyzowano elementami typu Solid 95. Do elementu nagniatającego przykładano siły F_3 wywołujące głębokości nagniatania g z przedziału $0 < g \leq 0,5 R_t$. Wyniki symulacji dla wartości i rozkładu nacisków kontaktowych w wybranych chwilach zaawansowania procesu przedstawia rysunku 10.



Rys. 9. Model komputerowy procesu nagniatania powierzchni chropowatej
 Fig. 9. Computer model of rolling process of rough surface burnishing



Rys. 10. Naciski kontaktowe p dla a) 30%, b) 60% i c) 100% zaawansowania procesu
 Fig. 10. Contact pressure p for a) 30%, b) 60% and c) 100% of process progression

5. Podsumowanie

Jakość wyrobu nagniatanego istotnie zależy od dokładności określenia wartości parametrów technologicznych, głównie składowych siły i/lub głębokości nagniatania. Pośrednio wpływa na nie kształt i pole obszaru styku narzędzia z przedmiotem. Jednym z podstawowych problemów przy projektowaniu procesu technologicznego jest dokładność określenia sił nagniatania, głównie składowej normalnej. Nagniatanie z siłami różnymi od wymaganej powoduje, że rzeczywista głębokość nagniatania różni się od głębokości požądanej. Analityczne obliczenie sił nagniatania z wymaganą dokładnością jest niemożliwe, a wykorzystanie istniejących wzorów podawanych w literaturze obarczone jest zbyt dużym błędem. Dlatego autorzy od wielu lat prowadzą badania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatych. W tym celu zbudowano unikatowe stanowisko badawcze, w którym wykorzystano dobre jakościowo podzespoły i oprogramowanie. Ponadto opracowano aplikację w systemie Ansys/LS-DYNA do wyznaczania kształtu i obszaru kontaktu oraz wartości i rozkładu nacisków kontaktowych narzędzia nagniatającego z przedmiotem obrabianym o powierzchni z naniesionymi makro nierównościami o zarysie trójkątnym. Aplikacja umożliwia symulację dla różnych warunków realizacji procesu i różnych modeli materiałowych oraz warunków tarcia. Otrzymane wyniki symulacji komputerowej zostały porównane z wynikami badań eksperymentalnych. Porównaniu poddano kształt i obszar kontaktu oraz wartości sił w strefie kontaktu. Uzyskane w analizie numerycznej wartości nacisków należało pomnożyć przez wielkość pola obszaru kontaktu uzyskując wartość siły wywołującej dane zagłębienie narzędzia.

Uzyskane wyniki nie różniły się istotnie od siebie (na poziomie istotności $\alpha=0,05$), co świadczy o poprawnie przeprowadzonym procesie modelowania oraz obliczeń numerycznych. Opracowana metodyka może być przydatna do projektowania procesu technologicznego z zastosowaniem precyzyjnej obróbki nagniataniem.

6. Literatura

- [1] Hill R.: The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford At The Clarendon Press 1986.
- [2] Huryn S., Kukielka L.: Metodyka numerycznego obliczania sił nagniatania. ZN WM nr 34 Obróbka Kształtująca i Powierzchniowa Nagniataniem. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2003, ss. 43 – 54.
- [3] Huryn S., Kukielka L.: Badanie głównej siły nagniatania tocznego powierzchni chropowatych. ZN WM nr 34 Obróbka Kształtująca i Powierzchniowa Nagniataniem. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2003, ss. 67 – 73.
- [4] Kukielka L.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Monografia WM nr 47, WSInz, Koszalin 1994.
- [5] Patyk S.: Analiza sił nagniatania tocznego powierzchni chropowatych o trójkątnym zarysie nierówności. Rozprawa doktorska (w przygotowaniu).
- [6] Patyk S., Kukielka L.: Określanie kształtu i pola obszarów kontaktu narzędzia z chropowatą powierzchnią przedmiotu w procesie nagniatania. Tarnowski W., Kiczowski T.: Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania. Politechnika Koszalińska. Mielno 2005, ss. 147 – 154.
- [7] Patyk S., Błaszczków R., Kukielka L.: Wpływ modułu umocnienia materiału, współczynnika tarcia i głębokości nagniatania tocznego na wartość i rozkład nacisków kontaktowych. Przybylski W.: Technologia Obróbki przez Nagniatanie: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Politechnika Gdańska. Gdańsk 2005, ss. 47 – 56.
- [8] Patyk S., Patyk R., Kukielka L.: Analiza sił w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatych. Materiały konferencyjne TON 2008, Gdańsk – Sopot 2008.
- [9] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa 1987.

otrzymano / received: 16.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Cennik publikacji artykułów technicznych w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

ARTYKUŁ TECHNICZNY	w skali odcieni szarości [ceny netto]	kolor [ceny netto]
Jedna strona	500,00	700,00
Dwie strony	650,00	850,00
Trzy strony	800,00	1 000,00
Cztery strony	950,00	1 150,00
pięć stron i więcej	cena do indywidualnego uzgodnienia	

Artykuł techniczny należy przygotować zgodnie z obowiązującymi wytycznymi znajdującymi się na stronie internetowej: www.pak.info.pl.