

## **SILY WYSTĘPUJĄCE W PROCESIE NAGNIATANIA TOCZNEGO I ŚLIZGOWEGO**

**Stefan DZIONK, Bogdan ŚCIBIORSKI, Piotr WASZCZUR,  
Włodzimierz PRZYBYLSKI**

**Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn  
i Automatykacji Produkcji**

### **STRESZCZENIE**

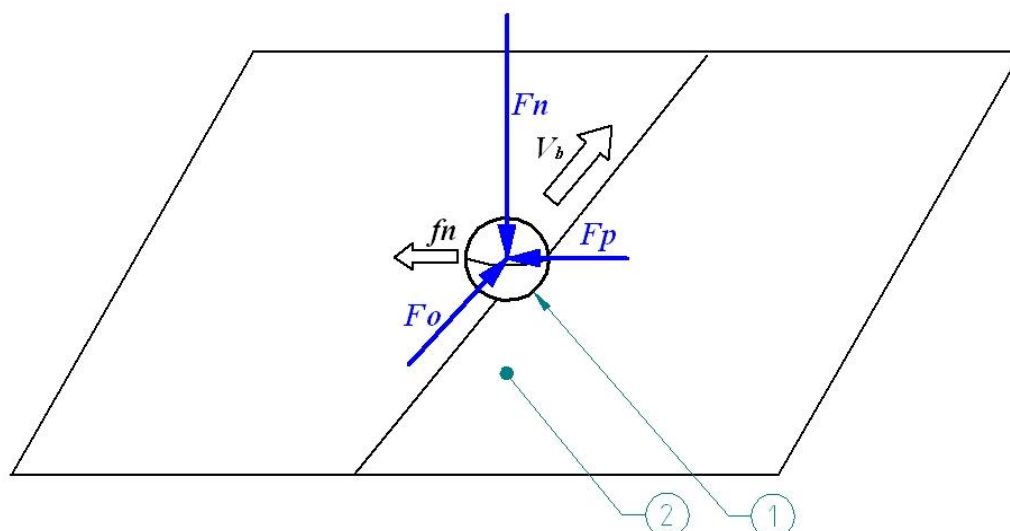
*W artykule przedstawiono wyniki z badań eksperymentalnych dotyczących analizy sił nagniatania tocznego i ślizgowego kulkami ceramicznymi wałków ze stali Cf53 w stanie utwardzonym. W przypadku nagniatania tocznego zastosowano docisk hydrostatyczny, natomiast podczas nagniatania ślizgowego docisk sprężysty elementu roboczego. W obu przypadkach siły pomierzono stosując czujnik siły firmy Kistler. W badaniach analizowano zmiany występujących sił podczas nagniatania powierzchni walcowych. Rezultaty badań przedstawiono w postaci wykresów zmian sił w trakcie procesu.*

**Słowa kluczowe:** nagniatanie, chropowatość powierzchni, parametry nagniatania, narzędzia z dociskiem hydrostatycznym, nagniatanie ślizgowe

### **1. WPROWADZENIE**

Jakość powierzchni obrabianej w procesie nagniatania zależy w głównej mierze od stabilności parametrów obróbki [2]. Jednym z istotnych parametrów jest siła nagniatania i dąży się do jej stabilizacji [7]. W dotychczasowej praktyce ten parametr określa się zazwyczaj poprzez statyczne ustawienie siły sprężyny dociskającej bądź wartości ciśnienia w przypadku docisku realizowanego za pomocą układu hydraulicznego [1]. W badaniach siłę wiąże się z efektami nagniatania między innymi z głębokością utwardzenia strefy deformacji [5, 6, 11]. Te efekty są przedmiotem modelowania matematycznego [3, 4, 10]. W literaturze nie spotyka się badań określających siły nagniatania w układzie dynamicznym tj. ich przebiegu w trakcie cyklu obróbkowego. Stąd też istnieje potrzeba określenia wartości siły występującej w miejscu odkształcania materiału z pominięciem zakłóceń spowodowanych przez układ docisku mechanicznego. W niniejszym artykule zaprezentowano przebiegi zmienności sił nagniatania w układzie współrzędnych w okresie cyklu obróbkowego.

W literaturze [5] generalnie spotyka się definicję siły nagniatania, jako siły dociskającej element nagniatający do materiału. W rzeczywistości ten element przemieszcza się w związku z tym musi występować siła przesuwająca element nagniatający na powierzchni obrabianej. Dodatkową siłę należy też zastosować podczas przemieszczania elementu nagniatającego o wielkość posuwu. Realizacja tego rodzaju ruchu elementu nagniatającego jest możliwa, gdy siła wypadkowa tego procesu jest ustawiona w przestrzeni i nachylona względem wszystkich osi układu współrzędnych. Przy takim położeniu siły nagniatającej łatwiej opisywać proces operując siłami składowymi względem przyjętego układu współrzędnych. Taki sposób analizy sił nagniatania spotyka się również w literaturze [8, 9]. Schemat występujących sił składowych przedstawiono na rys. 1.



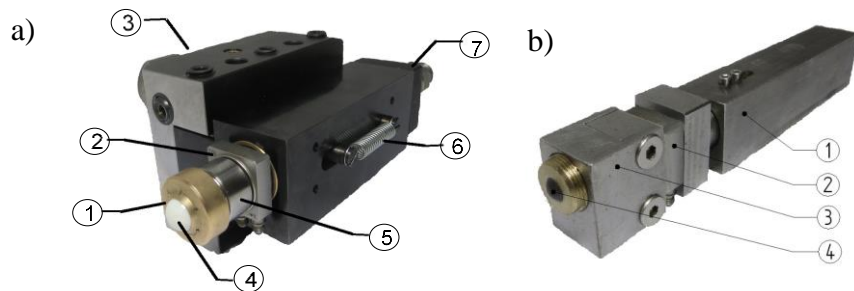
Rys. 1. Schemat sił występujących podczas nagniatania: 1- element nagniatający, 2- powierzchnia nagniatana,  $F_n$ - siła nagniatająca (normalna),  $F_o$ - siła odporowa,  $F_p$ - siła posuwowa,  $V_b$ - prędkość nagniatania,  $f_n$ - posuw nagniatania

W praktyce siły występujące podczas procesu nagniatania najłatwiej definiuje się w układzie współrzędnych maszyny. W przypadku nagniatania na tokarce, siłę nagniatającą (normalną)  $F_n$  najłatwiej zdefiniować w osi X maszyny, siłę odporową  $F_o$  w osi Y (można ją określić jako siłę przy wyłączonym posuwie, i występuje tylko podczas pierwszego obrotu wałka). Wartość siły posuwowej  $F_p$  określamy w osi Z. Wartość tej siły jest zazwyczaj mała, gdyż podczas nagniatania stosowany jest bardzo mały posuw.

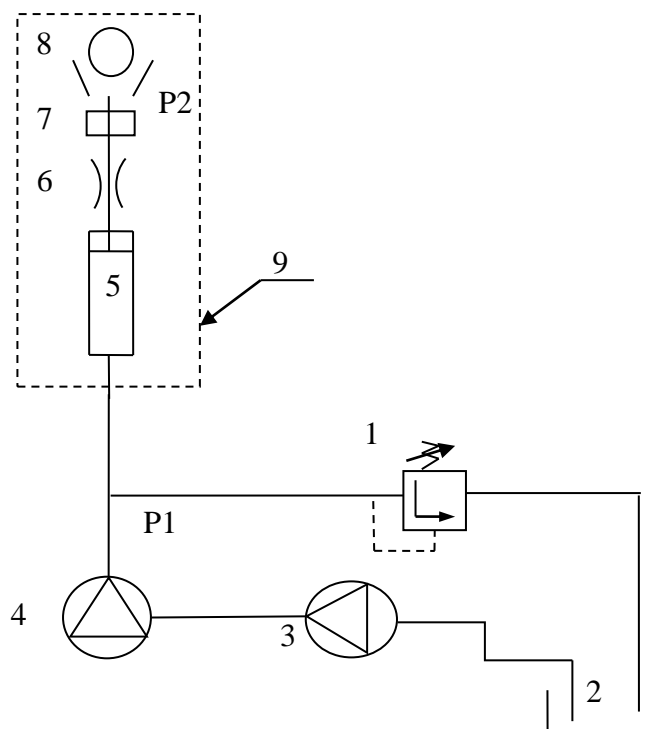
Ponadto wartości sił można określać w układzie statycznym (bez uwzględniania sił masowych wynikających z lokalnych przyspieszeń elementów konstrukcyjnych narzędzia jak i układzie dynamicznym, w którym uwzględnia się te siły.

## 2. METODYKA POMIARÓW SIŁ W PROCESIE NAGNIATANIA

W procesie nagniatania zastosowano dynamiczny pomiar sił wykorzystujący czujnik pojemnościowy siły typu 9251A firmy „KISTLER” [12]. Czujnik ten został zabudowany w specjalnie zaprojektowanych narzędziach nagniatających tocznie z dociskiem hydrostatycznym (rys. 2a) i ślizgowo z dociskiem sprężystym (rys. 2b). W celu przygotowania narzędzia z dociskiem hydrostatycznym (rys. 3) do pracy należało nastawić ciśnienie robocze  $P_1$  na zaworze przelewowym (1). Ciśnienie  $P_1$  generowane było z pompy wysokiego ciśnienia (4) zasilanej z pomocniczej pompy zasilającej (3) pobierającej ze zbiornika (2) olej „Hysol R”. Maksymalne ustawione - wytwarzane ciśnienie na agregacie HPG 6.0 firmy „Ecoroll” wynosiło 400 bar. Podane ciśnienie  $P_1$  przesuwało tłoczek w siłowniku (5) aż do kontaktu kulki z materiałem i wytworzenia się ciśnienia  $P_2$  umożliwiającego utworzenie się poduszki hydrostatycznej. Elementy: docisku, dławienia, pomiaru siły i hydrostatycznego łożyskowania kulki nagniatającej (poz. 9 na rys. 3) zabudowano w narzędziu przedstawionym na rys. 2a. W celu uzyskania odpowiedniego ciśnienia  $P_2$  i utworzenia się poduszki hydrostatycznej przepływ cieczy regulowany był dławikiem (6). Na rysunku 2b przedstawiono narzędzie do nagniatania ślizgowego kulkami ceramicznymi z zamontowanym czujnikiem siły. Narzędzie to ma wymienne końcówki, umożliwiające stosowanie kulek nagniatających o różnych średnicach.



Rys. 2. Narzędzia z wbudowanym czujnikiem siły do nagniatania: a) tocznego z dociskiem hydrostatycznym: 1- obudowa kulki z łożyskiem hydrostatycznym, 2- czujnik siły, 3- uchwyt VDI, 4- kulka nagniatająca, 5- tłocznisko, 6- sprężyna odciągająca, 7- zasilanie hydrauliczne; b) ślizgowego z dociskiem sprężystym: 1- część chwytowa narzędzia z osadzoną wewnątrz sprężyną dociskającą, 2- czujnik siły, 3- część robocza narzędzia, 4- kulka nagniatająca

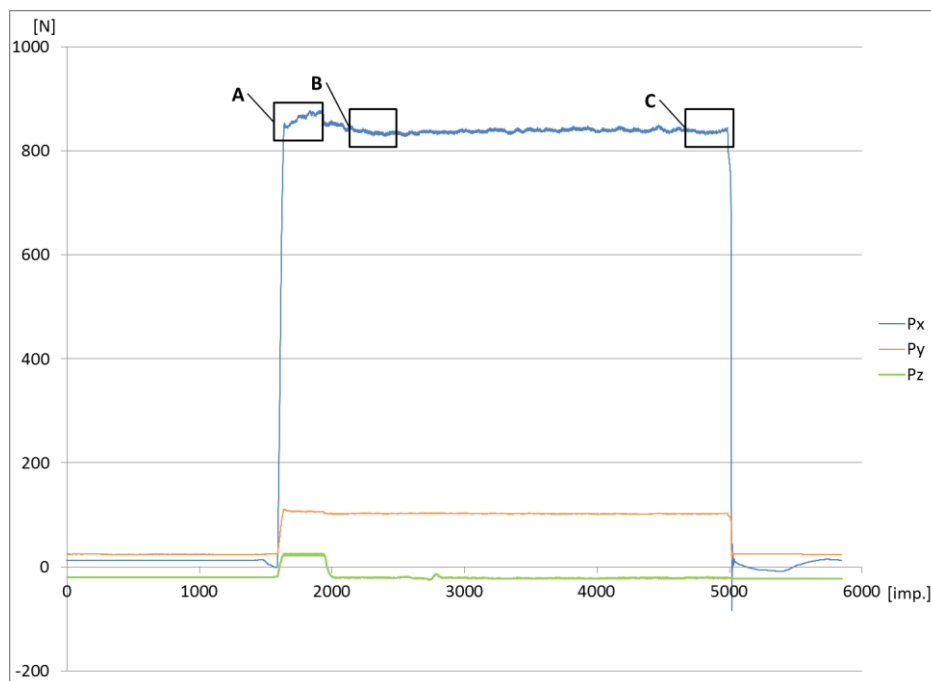


Rys. 3. Schemat hydrauliczny zestawu nagniatającego: 1- zawór przelewowy, 2- zbiornik z płynem chłodząco-smarującym, 3- pomocnicza pompa zasilająca agregat, 4- pompa wysokociśnieniowa, 5- siłownik w narzędziu, 6- dławik, 7- czujnik siły, 8- gniazdo z kulką nagniatającą, 9- zespół narzędzia

Nagniataniu poddano wałki po toczeniu na twardo płytką CBN (WNGA 080408 WZ-LS TB 650),  $ap=0,1\text{mm}$ ,  $vc=150\text{m/min}$ ,  $f=0,15\text{mm}$  o średnicy  $\phi 50\text{ mm}$  i długości  $245\text{ mm}$  oraz chropowości powierzchni  $Ra = 0,9\text{ }\mu\text{m}$  wykonanych ze stali Cf53 (C53), której twardość po zahartowaniu wynosiła  $62\pm 2\text{HRC}$ . Na wałkach nagniatano powierzchnie, których długość wynosiła po  $50\text{ mm}$ .

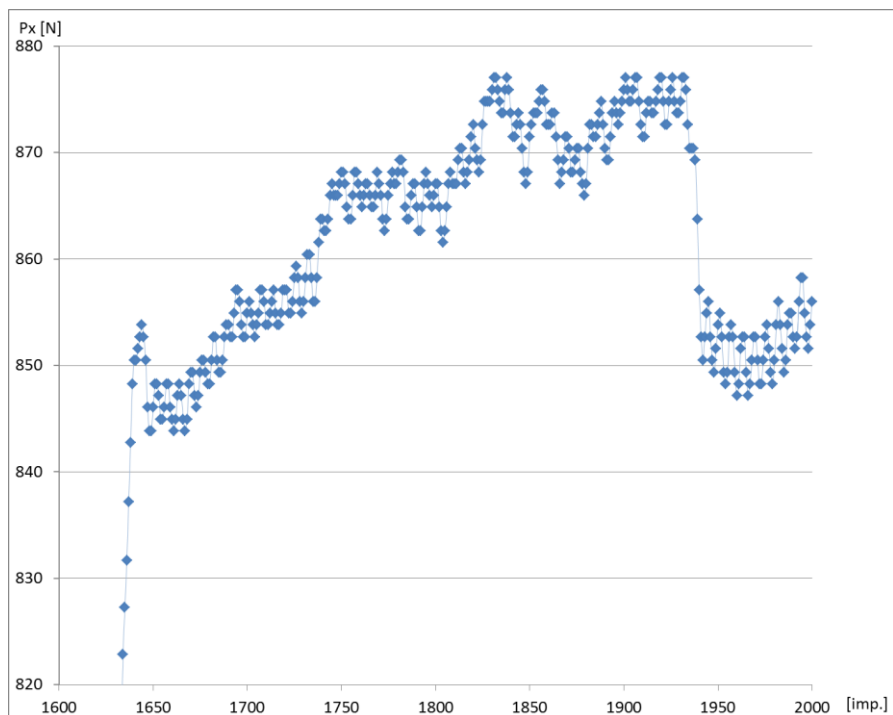
### 3. POMIAR SIŁ WYSTĘPUJĄCYCH PODCZAS NAGNIATANIA TOCZNEGO Z DOCISKIEM HYDROSTATYCZNYM

Nagniatanie z dociskiem hydrostatycznym wykonano dla prędkości nagniatania  $v_n=150\text{m/min}$  przy posuwie nagniatania  $f_n=0,1\text{mm/obrót}$ . Próby wykonywano dla różnych ciśnień ustawianych na agregacie hydraulicznym, a tym samym różnych sił nagniatania. W artykule zaprezentowano badania dla zastosowanego ciśnienia na agregacie 200 bar. Do nagniatania jako elementy obróbkowe wykorzystano kulki ceramiczne o średnicy  $\phi 1/2''$  z ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [13].



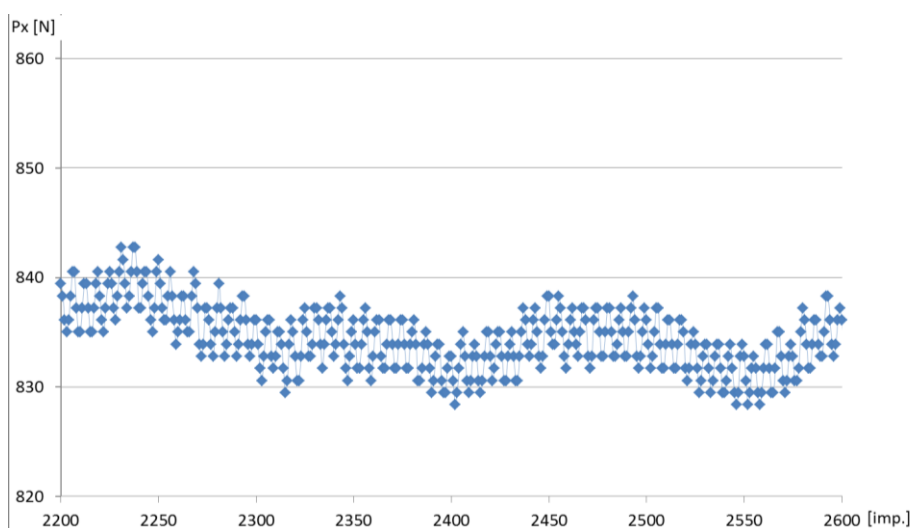
Rys. 4. Wykres sił dla nagniatania z dociskiem hydrostatycznym dla kulki  $\phi 1/2''$   $v=150\text{m/min}$ ,  $f_n=0,1\text{mm/obrót}$

Na rysunku 4 przedstawiono typowy wykres sił nagniatania wykonany dla zastosowanej głównej siły dociskającej oznaczonej na rysunku jako  $P_x$  wynoszącej ok. 860N (ciśnienie na agregacie hydraulicznym 200 bar). Można na nim zauważyć, że główna siła dociskająca  $P_x$  gwałtownie rośnie w momencie dojazdu narzędzia do powierzchni i następnie stabilizuje się. Występują pewne wahania ciśnienia wywołane zjawiskami dynamicznymi w układzie hydraulicznym. Siła  $P_y$  utrzymuje kulkę na osi przedmiotu nagniatanego, następuje lekki jej wzrost w momencie zetknięcia się kulki z materiałem i następnie siła ta stabilizuje się. Natomiast siła  $P_z$  czyli siła realizująca posuw wzdłużny pojawia się tylko w momencie zetknięcia kulki z materiałem a następnie ustala się stan równowagi, czyli przemieszczanie kulki realizowane jest za pomocą sił  $P_x$  i  $P_y$  natomiast siła  $P_z$  zmniejsza się do niewielkiej wartości. W trakcie posuwu wzdłużnego mogą powstawać zakłócenia, które oddziałują na kierunek działania siły  $P_z$  lecz nie mają one charakteru trwałego.



Rys. 5. Wykres sił dla nagniatania dla szczegółu „A” z rys. 6.12

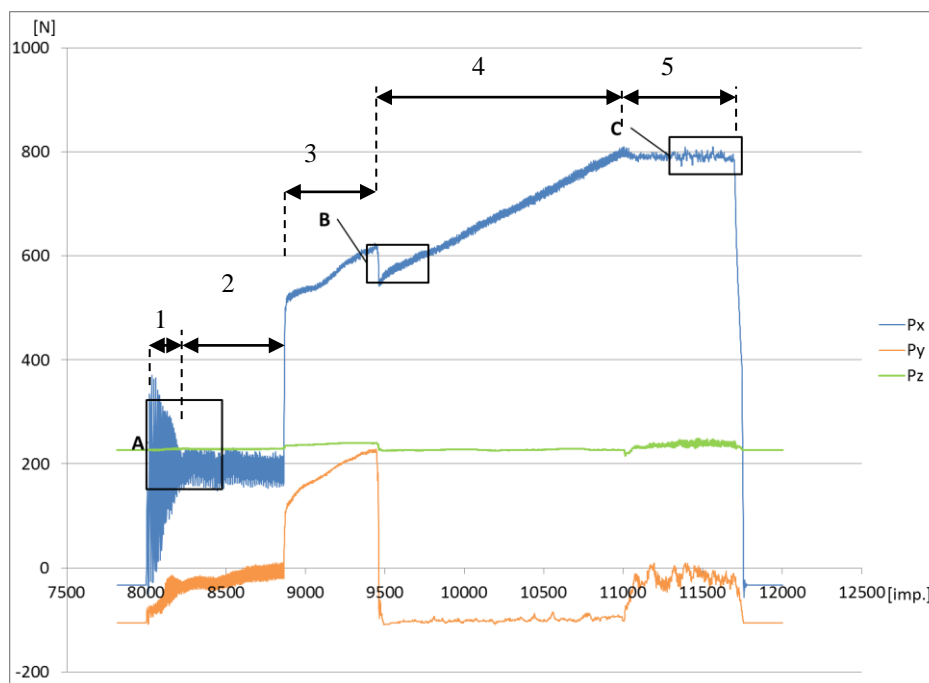
Na rysunkach 5 i 6, przedstawiono zmiany siły  $P_x$  (główna siła dociskająca) spowodowane różnymi zakłóceniami w układzie hydraulicznym. Rysunek 5 przedstawia zmiany siły  $P_x$  spowodowane wejściem kulki w obszar pracy. Można zauważyć na tym rysunku chwilowy przyrost siły. Jest on spowodowany zmniejszeniem się szczeliny hydrostatycznej łożyskującej kulkę a tym samym powodującym chwilowe zmiany ciśnienia w układzie. Zmiany te zostają szybko wytłumione poprzez układ dławienia hydrostatycznego zamontowanego w narzędziu. Zmiany ciśnienia wywołane pracą pompy i fluktuacje ciśnienia w układzie hydraulicznym wpływają na zmiany siły  $P_x$  w procesie nagniatania, co przedstawiono na rys. 6. Szczegół „C” rys. 4 obejmuje zmiany siły  $P_x$  przy odsunięciu narzędzia od przedmiotu.



Rys. 6. Wykres sił dla nagniatania dla szczegółu „B” z rys. 4

#### 4. POMIAR SIŁ WYSTĘPUJĄCYCH PODCZAS NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO

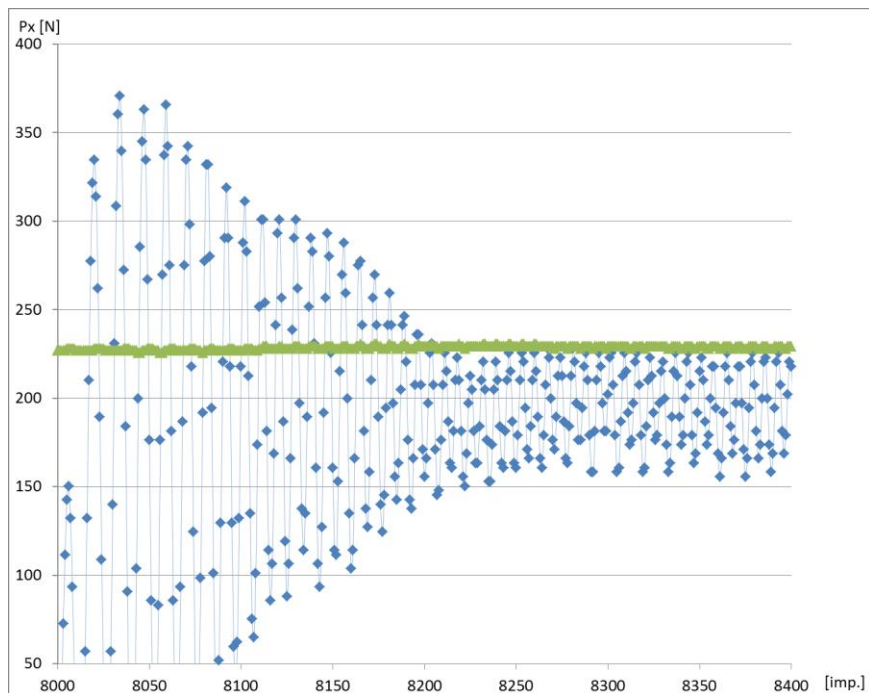
Nagniatanie ślizgowe przeprowadzono za pomocą narzędzia przedstawionego na rys. 2b, w którym zamocowano kulkę ceramiczną  $\text{Si}_3\text{N}_4$  o średnicy  $\phi 3/8''$ . Nagniatanie wykonano z różnymi siłami docisku kulki. Prędkość nagniatania wynosiła  $v=150\text{m/min}$ , posuw nagniatania  $fn=0,1\text{mm}$ . Na rysunku 7 przedstawiono wykres sił nagniatania ślizgowego kulką nową (wcześniej nieużywaną). Na tym rysunku można wyróżnić kilka charakterystycznych rodzajów zachowań narzędzia. W pierwszym okresie, kiedy narzędzie weszło w obszar pracy wpadło ono w drgania na kierunku siły  $P_x$  o początkowej amplitudzie ok 400N. Wielkość amplitudy drgań maleje wraz z czasem w tym kierunku natomiast w kierunku  $P_y$  wzrasta siła w niewielkim stopniu. Takie zachowanie narzędzia w tym okresie wynika z własności kulki, która jeszcze nie ma powierzchni zużycia i zachowuje się niestabilnie. W okresie drugim stabilizuje się amplituda drań w kierunku  $P_x$  i zmniejsza się do około 50 N, natomiast na kierunku  $P_y$  nieznacznie rośnie siła wraz ze występowaniem drań o amplitudzie ok 30N. Nagle cały proces się zatrzymuje następuje skok siły w kierunku  $P_x$ ,  $P_y$ , i nieznacznie  $P_z$  i następnie w okresie 3 siła  $P_x$  i  $P_y$  cały czas rośnie.



Rys. 7. Wykres sił dla nagniatania ślizgowego z dociskiem sprężystym dla kulki  $\phi 3/8''$   
 $vn=150\text{m/min}$ ,  $fn=0,1\text{mm/obrót}$

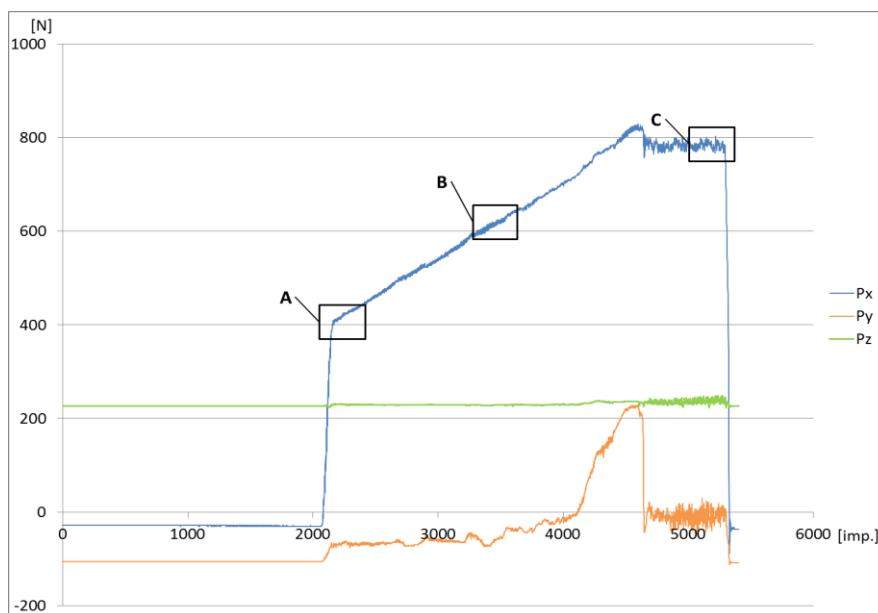
Na koniec okresu trzeciego siła  $P_y$  spada praktycznie do zera, co powoduje spadek siły  $P_x$  i  $P_z$ . Taki przebieg zmienności sił spowodowany jest powrotem narzędzia do pozycji wyjściowej. Następnie siła  $P_x$  dalej wzrasta. W tym okresie w zakresie siły  $P_y$  występują tylko niewielkie fluktuacje, natomiast w kierunku  $P_z$  nie występują zmiany. Takie zmiany siły mogą wynikać z konstrukcji narzędzia i występujących w nim sił tarcia, które wpływają na siłę docisku narzędzia do powierzchni. Wzrost siły  $P_x$  następuje aż do wartości 800N. Po osiągnięciu tej wartości narzędzie zaczyna pracować zgodnie z ustawieniami. Siła  $P_x$  ma stałą wartość z niewielkimi fluktuacjami oraz pojawia się siła  $P_y$ , której wartość podlega pewnym fluktuacjom natomiast fluktuacje siły  $P_z$ , są bardzo małej wartości.

Na rysunku 8 przedstawiono szczegóły zmian sił nagniatania w segmencie A przedstawionym na rys. 7.



Rys. 8. Wykres sił dla nagniatania dla szczegółu „A” z rys. 7

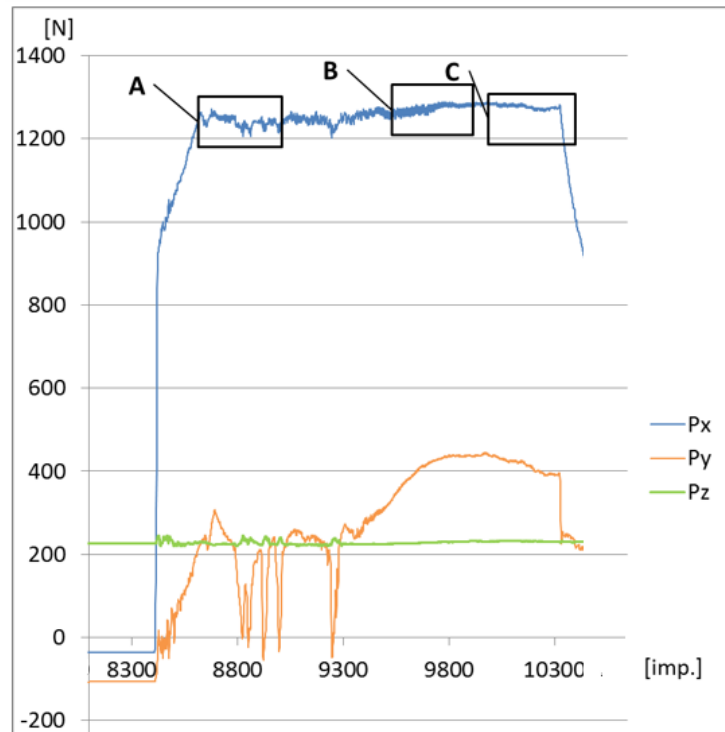
Na rysunku 9 przedstawiono wykres sił dla kulki używanej. W tym przypadku nie wystąpiły segmenty 1-3 opisane na rys. 7. Wykres ma tylko dwie fazy: fazę wzrostu siły  $P_x$  i fazę stabilizacji. W zakresie siły  $P_y$  następuje lekki wzrost w momencie rozpoczęcia pracy przez narzędzie aż do momentu pracy ustabilizowanej. W fazie pracy ustabilizowanej następuje stabilizacja siły  $P_x$ ,  $P_y$  i  $P_z$ , lecz podlegają one w tym okresie zmianom (fluktuacjom) przy stabilnej wartości średniej.



Rys. 9. Wykres sił dla nagniatania ślizgowego z dociskiem sprężystym dla kulki  $\phi 3/8''$   
 $v_n=150\text{m/min}$ ,  $f_n=0,1\text{mm/obrót}$



Na rysunku 10 przedstawiono wykres sił dla nagniatania ślizgowego, przy czym w tym przypadku zwiększono znacznie siłę nagniatania (docisku narzędzia do powierzchni). W tym przypadku faza wzrostu siły  $P_x$  znacznie się skróciła. W fazie stabilizacji występują fluktuacje sił, lecz w tym przypadku dużym wartościom zmian podlega siła  $P_y$ .



Rys. 10. Wykres sił dla nagniatania ślizgowego z dociskiem sprężystym dla kulki  $\phi 3/8''$   
 $v_n=150\text{m/min}$ ,  $f_n=0,1\text{mm/obrót}$

## 5. WNIOSKI

W nagniataniu z dociskiem hydrostatycznym wartość siły nagniatania realizowana jest przez zmiany ciśnienia w układzie hydraulicznym. Jest to łatwy sposób sterowania a otrzymane charakterystyki sił są zgodne z oczekiwaniami, co do przebiegu sił w trakcie procesu nagniatania powierzchni. Ponadto w badaniach stwierdzono:

- Nastawiony poziom sił ulega pewnym fluktuacjom, co jest spowodowane zmianami ciśnienia w układzie hydraulicznym, można to zmieniać poprzez dostosowywanie poziomu dławienia w układzie hydraulicznym, gdyż zbyt duży poziom dławienia zmniejsza poduszkę hydrostatyczną kulki, co może powodować zacieranie się jej w gnieździe narzędzia.
- Podczas nagniatania największą wartość ma siła nagniatająca  $P_x$  (dociskająca kulkę do powierzchni), ponadto występuje siła odporowa  $P_y$  (umożliwiająca przemieszczanie kulki po powierzchni) w stanach nieustalonych pojawia się również siła posuwowa  $P_z$ . Są to głównie przypadki wyjścia narzędzia w obszar pracy oraz zakłócenia wywołane przez nierównomierności struktury powierzchni nagniatanej. Poza stanami nieustalonymi wartość siły  $P_z$  ma małą wartość, którą można pominąć w analizach.
- Wartość siły odporowej  $P_y$  w procesie nagniatania hydrostatycznego nie przekracza 15% wartości siły nagniatania  $P_x$ .



W procesie nagniatania ślizgowego z dociskiem sprężystym przy zastosowaniu kulek ceramicznych jako elementów nagniatających, występujące siły można scharakteryzować w następujących wnioskach:

- Stwierdzono występowanie drgań o znacznej amplitudzie w szczególności w początkowym okresie procesu nagniatania podczas stosowania kulek „nowych” (wcześniej nieużywanych do nagniatania).
- Występuje proces narastania siły nagniatania  $P_x$  aż do osiągnięcia wartości nominalnej. Takie zjawisko narastania siły związane jest z konstrukcją narzędzia i występujących w nim sił tarcia pomiędzy ruchomymi elementami, przy czym zauważono, że podczas zwiększania siły nagniatania poprzez zwiększanie napięcia wstępnej sprężyny okres narastania siły znacznie się skraca.
- W procesie nagniatania ślizgowego występują duże wahania składowych sił nagniatania: siły nagniatającej  $P_x$  jak i siły odporowej  $P_y$  i posuwowej  $P_z$ . Zauważono, że w stanach nieustalonych siła  $P_y$  może przyjmować wartości do 30% wartości siły  $P_x$ .
- Narzędzie w określonych warunkach może pracować w układzie występujących drgań we wszystkich składowych sił występujących w procesie (drgania występują zarówno na kierunku sił  $P_x$ ,  $P_y$  i  $P_z$ ).
- Amplituda i częstość drgań zależą też od konstrukcji narzędzia. Zamontowanie czujnika sił zmienia charakterystykę narzędzia pod tym względem, co należy uwzględnić w interpretacji otrzymanych wyników.

## LITERATURA

- [1] Chmielewski K., Grochała D., Olszak W.: Wyniki badań nagniatania narzędziem hydrostatycznym po frezowaniu stali 42CrMo4 o twardości 35 HRC. Współczesne problemy technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. prof. W. Przybylskiego, tom III, KTMiAP WM, Gdańsk 2011, s. 18-30.
- [2] Fang-Jung Shoiu, Chien-Hua Chen: Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process, Journal of materials processing technology 140 (2003) 248-254.
- [3] Korzyński M.: Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing with a spherical tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) pp. 1956-1964.
- [4] Korzyński M.: Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing with a spherical tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) pp. 1956-1964.
- [5] Laber A., Laber S.: Właściwości sprężysto-plastyczne stali 1H18N9T warunkowane siłą nagniatania, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. W. Przybylskiego, tom II, KTMiAP, WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s.255-261.
- [6] Małąg L., Kukiełka L.: Analiza wpływu niedokładności określania własności mechanicznych materiałów metalowych stali na dokładność obliczeń parametrów siłowych procesu nagniatania, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. W. Przybylskiego, tom II, KTMiAP, WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s.67-76.
- [7] Olszak W., Chmielewski K., Kwaczyński W., Grochała D.: Stabilizacja siły nagniatania powierzchni 3D narzędziem hydrostatycznym ze sprężystym miechem, Współczesne problemy technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. prof. W. Przybylskiego, tom III, KTMiAP WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2011, s. 9-17.

- [8] Patyk S., Patyk R., Kukielka L.: Analiza sił w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatych, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. W. Przybylskiego, tom II, KTMiAP, WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s.85-95.
- [9] Patyk S., Patyk R., Kukielka L.: Badanie głównej siły nagniatania tocznego powierzchni chropowatej, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. W. Przybylskiego, tom II, KTMiAP, WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s.97-103.
- [10] Yen Y.C, Sartkulvanich, Altan T.: Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process, CIRP Annals - Manufacturing Technology 01/2005
- [11] Zaborski A.: Analiza formowania strefy deformacji w procesie nagniatania. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Seria Monografie nr 260, Częstochowa 2013.
- [12] Instrukcja firmy Kistler "Quartz Force Links Type 9301B ... 9371B."
- [13] Materiały promocyjne firmy CERAMIT [dostęp 20.02.2014]: „Własności tworzyw ceramicznych w porównaniu ze stalą stopową”. Dostęp w Internecie: <http://ceramit.pl/images/wlasnosci.pdf>

## **FORCES OCCURRING DURING THE ROLLING AND SLIDING BURNISHING PROCESS**

### **SUMMARY**

*The article presents the results of experimental studies concerning the analysis of forces while rolling burnishing as well as sliding burnishing of shafts made of hardened steel Cf53 using ceramic balls. With regard to rolling burnishing the hydrostatic pressure of balls was applied whereas in the case of sliding burnishing the elastic pressure of the working element was used. In both cases, the forces were measured using a dynamometer produced by "Kistler" company. The changes of forces occurring during burnishing of cylindrical surfaces were analysed. The results are presented in the form of diagrams describing changes of the forces versus process time.*

**Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.**