

Sylwia PATYK<sup>1</sup>  
Radosław PATYK<sup>2</sup>

### **METODYKI OKREŚLANIA PARAMETRÓW SIŁOWYCH W PROCESIE NAGNIATANIA TOCZNEGO POWIERZCHNI CHROPOWATYCH**

*W artykule przedstawiono metody określania parametrów siłowych w procesie statycznego nagniatania tocznego z dociskiem elastycznym powierzchni chropowatych. Założono, że nagniatana powierzchnia posiada zdeterminowany, regularny i okresowy profil chropowatości (przyjęto regularne symetryczne nierówności o zarysie trójkątnym). Przedstawiono trzy metodyki analityczne z różniące się zakresem stosowalności, metodykę numeryczną opartą o Metodę Elementów Skończonych oraz metodykę eksperymentalną, dla której przedstawiono schemat zbudowanego stanowiska badawczego.*

### **THE METHODOLOGIES OF FORCE PARAMETERS DETERMINATION IN BURNISHING ROLLING PROCESS OF ROUGH SURFACE**

*The methods of force parameters determination in static burnishing rolling process with elastic pressure of rough surface are presented in article. Put, that burnishing process the surface possesses determined, the regular and periodical profile of roughness (the regular symmetrical unevennesses about triangular outline were accepted). The three analytical methodologies from differing with range of applicability, numerical methodology leaning about Finite Element Method and experimental methodology, why the schema are presented was the built investigative position.*

## **1. WSTĘP**

Podstawowym problemem współczesnych technik wytwarzania jest kształtowanie wyrobu o z góry określonych właściwościach eksploatacyjnych. Podczas obróbki wykończeniowej zostają ostatecznie ukształtowane podstawowe właściwości warstwy wierzchniej (WW), które w określonych warunkach eksploatacyjnych decydują o trwałości i niezawodności części maszyn. Jedną z metod obróbki wykończeniowej części maszyn,

<sup>1</sup>Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów  
75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, E-mail: sylwia.patyk@interia.pl

<sup>2</sup>Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów  
75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, E-mail: radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl, radekpatyk@interia.pl,  
tel. +48 0 94 34 78 201

pozwalającej uzyskać WW o korzystnych właściwościach jest obróbka nagniataniem. Polega ona na wywołaniu miejscowego odkształcenia plastycznego w celu poprawienia gładkości powierzchni i/lub umocnienia mechanicznego WW połączonego z konstytuowaniem w niej naprężeń ściskających, powodujących zwiększenie odporności na zużycie. Efektem oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię obrabianą części jest poprawienie jakości technologicznej oraz użytkowej [4, 5]. Obróbce tej poddaje się te części pojazdów, maszyn i urządzeń, które są szczególnie narażone na zużycie. Niestety zastosowanie tej metody obróbkowej w przemyśle krajowym jest niewielkie, spowodowane jest to przede wszystkim brakiem wytycznych dotyczących przygotowania powierzchni po obróbkach poprzedzających oraz brakiem wytycznych doboru parametrów technologicznych samego procesu nagniatania. Parametrami technologicznymi analizowanego procesu nagniatania są: główna siła nagniatania ( $F_3$ ), posuw ( $f_n$ ) i prędkość ( $v_n$ ). Nieprawidłowy dobór szczególnie głównej siły nagniatania może prowadzić do zniszczenia WW wyrobu już na etapie wytwarzania. Artykuł dotyczy metod wyznaczania parametrów siłowych podczas nagniatania tocznego wałków z elastycznym dociskiem elementów nagniatających. Stwierdzono, że najbardziej pożądana pod obróbkę nagniataniem jest powierzchnia charakteryzująca się równomiernym kształtem i wysokością nierówności tworzącymi kąt wierzchołkowy  $90^\circ \div 120^\circ$  i zaokrąglonymi wgłębieniami, a najkorzystniejszą pod tym względem jako obróbka poprzedzająca jest toczenie lub wytaczanie. Analizowano przypadki, dla których uwzględniono chropowatość powierzchni po obróbkach poprzedzających (regularne symetryczne nierówności o zarysie trójkątnym). Zaprezentowano analityczne, numeryczną oraz eksperymentalną metodę określania parametrów siłowych w procesie nagniatania powierzchni chropowatych.

## 2. METODYKI ANALITYCZNE

Zaprezentowano trzy analityczne metodyki określania głównej siły nagniatania. Metodyka I ma zastosowanie dla przypadku nagniatania materiałów idealnie sztywno – plastycznych oraz dla niewielkich głębokości nagniatania tzn. do głębokości nie przekraczających pierwszej głębokości granicznej [4÷6]. Pierwsza głębokość graniczna występuje wówczas, gdy powierzchnie swobodne odkształczanych sąsiednich nierówności spotkają się w jednym punkcie, natomiast przy drugiej głębokości granicznej następuje całkowite wypełnienie wgłębienia po obróbce poprzedzającej. Metoda II umożliwia wyznaczenie głównej siły nagniatania dla materiałów sprężysto/plastycznych lecz również tylko do głębokości nagniatania nie przekraczającej pierwszej głębokości granicznej. Analityczna metoda III ma zastosowanie dla materiałów idealnie sztywno-plastycznych, lecz do głębokości większych od pierwszej głębokości granicznej. Rozpatrywany będzie proces zginięcia jednej nierówności o wysokości  $R_t$  na głębokość  $g \leq g_2$ , gdzie  $g_2$  jest drugą graniczną głębokością nagniatania. Głębokość ta, przy założeniu, że odkształcenia sprężyste są pomijalnie małe, równa jest połowie wysokości nierówności (rys. 1):

$$g_1 = \frac{1}{2} R_t. \quad (1)$$

Wysokość obszaru kontaktu elementu nagniatającego z nierównością wynosi:

$$2s = \frac{\sqrt{H^2 \cdot D^2 - [H^2 + 0,25 \cdot (D^2 - d^2)]^2}}{H}, \quad (2)$$

gdzie  $D$  jest średnicą elementu nagniatanego,  $d$  jest średnicą przedmiotu nagniatanego, zaś  $H$  jest odległością osi obrotu narzędzia od przedmiotu nagniatanego, opisaną wzorem:

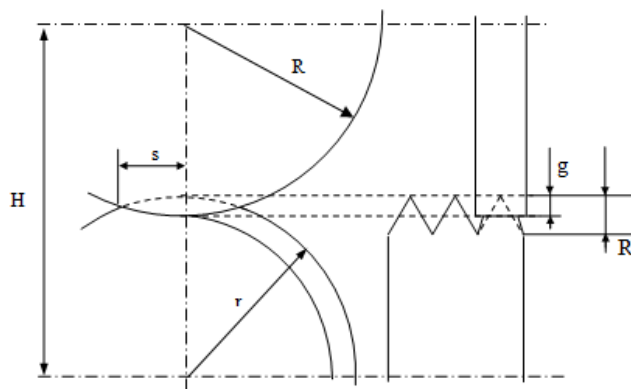
$$H = R + r - g. \quad (3)$$

W obszarze kontaktu  $k$ -tej nierówności z elementem nagniatającym wydziela się  $N_k$  klinów o jednakowej szerokości  $s_n$  (rys. 4), wyliczanej ze wzoru:

$$s_n = \frac{s}{N_k}. \quad (4)$$

Zagłębienie  $g_n$  elementu nagniatającego w  $n$ -ty klin zmienia się w przedziale  $[0 \rightarrow g]$  i wynosi:

$$g_n = \sqrt{R^2 - n^2 s_n^2} - R - r + \sqrt{r^2 - n^2 s_n^2} + g. \quad (5)$$



Rys. 1. Schemat procesu nagniatania

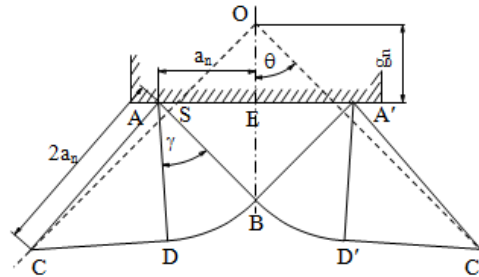
Przy odpowiednim zagęszczeniu wydzielonych klinów można pominąć zmienne zagłębienie elementu nagniatającego w materiał na szerokości klina, zakrzywienie grzbietu nierówności i jej pochylenie. Wówczas proces odkształcania wydzielonego  $n$ -tego klina podczas nagniatania sprowadza się do problemu analizy procesu zgniatania klina o szerokości  $s_n$  płaskim stemplem. Zakłada się również, że siły nacisku w obszarze kontaktu stempla z nierównością są stałe na całej jego powierzchni. Zatem główna siła nagniatania jest sumą sił działających na poszczególne kliny, zgodnie ze wzorem:

$$F_3 = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} F_{3k} = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} \sum_{n=1}^{N_k} 2a_n p_n s_n \quad (6)$$

gdzie  $F_{3k}$  jest siłą normalną działającą na  $k$ -tą nierówność,  $F_{3kn}$  jest siłą normalną działającą na  $n$ -ty klin  $k$ -tej nierówności,  $p_n$  jest naciskiem jednostkowym na powierzchni kontaktu stempla z  $n$ -tym klinem,  $2a_n$  jest długością linii kontaktu, zaś  $s_n$  jest szerokością klina. Proponowane metody obliczenia głównej siły nagniatania różnią się sposobem obliczania nacisków  $p_n$  obciążających klin oraz długości  $2a_n$  linii kontaktu elementu nagniatającego z  $n$ -tym klinem.

**Metodyka I.** Do obliczenia długości  $2a_n$  wykorzystuje się metodę charakterystyk. W literaturze [2, 3, 6] istnieją dwa rozwiązania tego zagadnienia: z tarciami występującym w obszarze kontaktu między przedmiotem a narzędziem, jak i bez tarcia. W pracy pominięto drugi przypadek (bez tarcia) ze względu na jego małą przydatność w praktyce inżynierskiej,

gdyż błąd obliczeń przekracza 80%. W wyniku ściskania materiał klina doznaje odkształceń plastycznych przy jednoczesnym wydłużaniu się linii kontaktu  $AEA'$  (rys. 2).



Rys. 2. Schemat ściskania plastycznej nierówności płaskim stemplem z występującym tarcie w strefie kontaktu

Założono, że granica odkształconego obszaru  $AC$  i  $AB$  jest prostoliniowa, co pozwala przyjąć, że obszary plastyczne zachowują geometryczne podobieństwo przy różnych położeniach stempla. Przy zachowaniu warunku stałej objętości materiału w przypadku płaskiego stanu odkształcenia trójkąty  $OES$  i  $ACS$  mają jednakową powierzchnię. Wykorzystując warunek zachowania stałej objętości oraz warunek, aby punkt  $C$  leżał na początkowej powierzchni płynięcia otrzymuje się układ równań:

$$\begin{cases} g_n^2 \operatorname{tg} \theta = (a_n - g_n \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \theta)_n \cos \gamma \\ a_n + 2a_n \sin \gamma = (g_n + 2a_n \cos \gamma \operatorname{tg} \theta) t \end{cases} \quad (7)$$

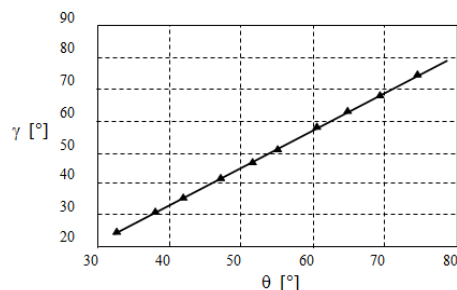
Rozwiązując układ (7), otrzymuje się wzór na długość obszaru kontaktu nierówności ze stemplem:

$$2a_n = 2g_n \frac{1 + 2\sin \gamma}{2\cos \gamma} \quad (8)$$

oraz związek pomiędzy kątami  $\gamma$  i  $\theta$ :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{(1 + 2\sin \gamma)^2}{4\cos \gamma \operatorname{tg} \theta + \sin \gamma}, \quad (9)$$

gdzie, kąt  $\theta$  jest połową kąta wierzchołkowego, zaś kąt  $\gamma$  jest kątem wycinka biegunowego  $ABD$ . Ze względu na trudności z przekształceniem zależności (9) względem kąta  $\gamma$  wygodnie jest kąt ten wyznaczyć graficznie z opracowanego wykresu (rys. 3) lub z opracowanej funkcji  $\gamma = f(\theta) = 1,1517 \theta - 13,159$ , dla której współczynnik korelacji wynosi  $R^2 = 0,9999$ .



Rys. 3. Wykres zależności  $\gamma = f(\theta)$  dla ściskania plastycznej nierówności płaskim stemplem z występującym tarcieniem

Zakłada się, że nacisk  $p_n$  stempla na materiał klina jest równomiernie rozłożony wzdłuż linii styku AA' zgodnie zależnością [2, 3, 6]:

$$p = 2k(1 + \gamma), \quad (10)$$

gdzie,  $k$  jest granicą plastyczności na ścinanie i dla nieliniowego warunku plastyczności Hubera – Misesa – Hencky'ego wynosi [2, 3, 6]:

$$k = \frac{R_e}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

gdzie,  $R_e$  jest granicą plastyczności materiału. Zatem nacisk  $p_n$  zależy jedynie od geometrii klina i granicy plastyczności materiału a nie zależy od stopnia zawansowania procesu deformacji, czyli  $p_n = p = \text{const}$ . Dotyczy to materiałów idealnie sztywno-plastycznych, bez umocnienia. Po podstawieniu otrzymuje się wzór na obliczanie siły nacisku stempla na  $n$ -ty klin:

$$F_{3kn} = 4s_n k g_n \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma). \quad (12)$$

Natomiast siła nacisku elementu nagniatającego na  $k$ -tą nierówność wynosi:

$$F_{3k} = \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} = 4s_n \frac{R_e}{\sqrt{3}} \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma) \sum_{n=1}^{N_k} g_n. \quad (13)$$

Całkowitą siłę nagniatania opisuje równanie:

$$F = 4 \frac{R_e}{\sqrt{3}} \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma) \sum_{k=0}^{\rho_0-1} s_k \sum_{n=1}^{N_k} g_n. \quad (14)$$

**Metodyka II.** Dotyczy przypadku, gdy materiał umacnia się. Wówczas naciski w obszarze kontaktu zależą od stopnia deformacji nierówności - intensywności odkształceń. Długość  $2a_n$  obszaru kontaktu nierówności ze stemplem oblicza się z zależności (8) identycznie jak w metodyce I. Zakłada się, że nacisk  $p_n$  stempla na materiał klina jest równomiernie rozłożony wzdłuż linii styku AA' zgodnie zależnością:

$$p = 2k(1 + \gamma), \quad (15)$$

gdzie,  $k$  jest granicą plastyczności na ścinanie i dla nieliniowego warunku plastyczności Hubera – Misesa – Hencky'ego i materiału umacniającego się, wynosi [2, 3, 4]:

$$k = \frac{\sigma_p(\varepsilon_i)}{\sqrt{3}}, \quad (16)$$

gdzie  $\sigma_p(\varepsilon_i) = R_e(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}$  jest naprężeniem uplastyczniającym materiał. Zatem nacisk  $p_n$  zależy od geometrii klina, początkowej granicy plastyczności materiału  $R_e$  (rodzaju materiału i jego historii) oraz od stopnia zawansowania procesu deformacji  $\varepsilon_i$ .

Po podstawieniu otrzymuje się wzór na obliczanie siły nacisku stempla na  $n$ -ty klin:

$$F_{3kn} = 4s_n g_n \frac{R_e(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}}{\sqrt{3}} \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma). \quad (17)$$

Natomiast siła nacisku elementu nagniatającego na  $k$ -tą nierówność wynosi:

$$F_{3k} = \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} = 4s_n \frac{R_e}{\sqrt{3}} \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma) \sum_{n=1}^{N_k} g_n (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}. \quad (18)$$

Całkowitą siłę nagniatania opisuje równanie:

$$F = 4 \frac{R_e}{\sqrt{3}} \frac{1 + 2\sin\gamma}{2\cos\gamma} (1 + \gamma) \sum_{k=0}^{p_0-1} s_k \sum_{n=1}^{N_k} g_n (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}. \quad (19)$$

**Metodyka III.** Zakłada się, że nacisk  $p_n$  stempla na materiał klina jest równomiernie rozłożony wzdłuż linii styku  $AA'$  i obliczany jest z identycznych zależności jak w metodzie II. Natomiast do obliczenia długości  $2a_n$  obszaru kontaktu nierówności ze stemplem wykorzystuje się warunek zachowania stałej objętości materiału. Założono, że boki  $AC$  i  $A'C'$  wypływek są prostoliniowe a punkty  $C$  i  $C'$  leżą we wgłębieniach nierówności. Wówczas [4]:

$$2a_n = \frac{g_n f_n}{R_t - g_n} \quad (20)$$

Ostatecznie otrzymuje się wzór na obliczanie siły nacisku stempla na  $n$ -ty klin:

$$F_{3kn} = \frac{2}{\sqrt{3}} s_n g_n R_e (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1} \frac{f_n}{R_t - g_n}, \quad (21)$$

natomiast siła nacisku elementu nagniatającego na  $k$ -tą nierówność wynosi:

$$F_{3k} = \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} = \frac{2}{\sqrt{3}} s_n R_e f_n \sum_{n=1}^{N_k} \frac{g_n}{R_t - g_n} (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}. \quad (22)$$

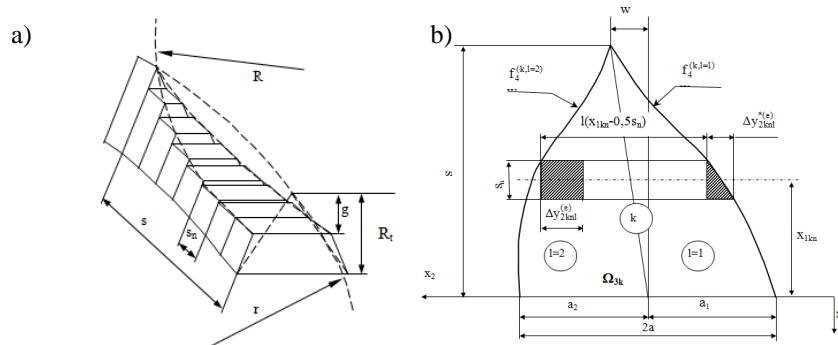
Całkowitą siłę nagniatania opisuje równanie:

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} R_e f_n \sum_{k=0}^{p_0-1} s_k \sum_{n=1}^{N_k} \frac{g_n}{R_t - g_n} (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}. \quad (23)$$

### 3. METODYKA NUMERYCZNA

W celu numerycznego obliczania głównej siły nagniatania dowolną nierówność  $k$  traktuje się jako zbiór  $N_k$  elementarnych objętości („klinów”) o bardzo małej szerokości  $s_n$  (rys. 4a). Wówczas pochylenie nierówności, zakrzywienie jej grzbietu i zmienne zagłębienie w nią elementu nagniatającego na szerokości  $s_n$  można pominąć. Każdy taki  $n$ -ty klin wydzielony

jest dwoma płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny  $x_2x_3$  odległymi od siebie o wartość  $s_n$ .



Rys. 4. Schemat dyskretyzacji  $k$ -tej nierówności w obszarze kontaktu (a) oraz zależności geometryczne w strefie kontaktu elementu nagniatającego z  $k$ -tą nierównością (b)

Każdy wyodrębniony  $n$ -ty klin dzieli się elementami skończonymi. Wówczas składową siłę nagniatania dla układu dyskretnego oblicza się ze wzoru:

$$F_i = \sum_{k=0}^{\rho_n-1} \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{e=1}^E F_{ikn}^{(e)}, \quad (24)$$

gdzie  $E$  jest liczbą elementów kontaktowych  $n$ -tego klina,  $F_{ikn}^{(e)}$  jest siłą cząstkową działającą na kontaktowy  $e$ -ty element skończony,  $k$ -tej nierówności i wynosi:

$$F_{ikn}^{(e)} = q_{kn}^{(e)} \Delta \Omega_{ikn}^{(e)}, \quad (25)$$

natomiast  $q_{kn}^{(e)}$  jest jednostkową siłą wypadkową działającą na bok rozpatrywanego kontaktowego elementu skończonego,  $\Delta \Omega_{ikn}^{(e)}$  jest powierzchnią rzutu boku tego elementu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku działania siły  $F_{ikn}^{(e)}$ .

Obliczanie głównej siły nagniatania  $F_3$  odbywa się według następującej kolejności:

- 1). Obliczenie wymiarów obszaru kontaktu elementu nagniatającego (narzędzia) z  $k$ -tą nierównością.
  - a) Obliczenie wysokości  $s$  obszaru kontaktu elementu nagniatającego z  $k$ -tą nierównością (rys. 4). Przykładowo dla przypadku nagniatania naporowego tocznego wałków wykorzystuje się wzór:

$$s = \frac{\sqrt{H^2 D^2 - [H^2 + 0,25(D^2 - d^2)]^2}}{2H}, \quad (26)$$

gdzie  $H$  jest odległością osi przedmiotu od osi narzędzia,  $D$  jest średnicą narzędzia,  $d$  średnicą wałka.

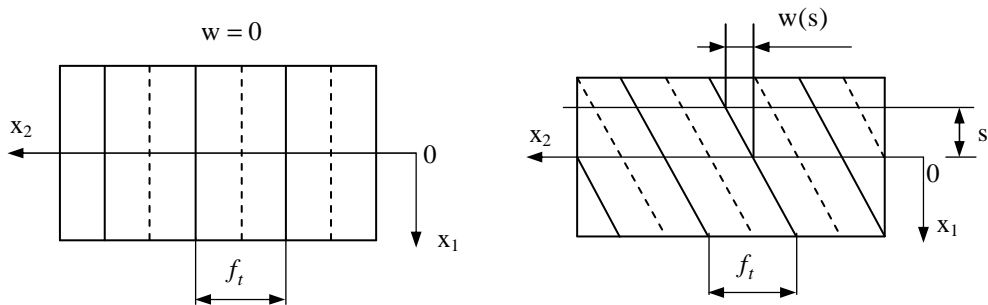
- b) Obliczenie długości podstawy obszaru kontaktu. W przypadku nagniatania nierówności trójkątnych wzór ma postać:

$$2a = \frac{g \cdot f_t}{R_t - g}, \quad (27)$$

gdzie  $g$  jest głębokością nagniatania,  $f_t$  jest posuwem nagniatania,  $R_t$  jest teoretyczną wysokością chropowatości.

c) Obliczenie pochylenia obszaru kontaktu (rys. 5):

$$w=0, \text{ dla części płaskiej oraz } w = \frac{f_t}{360} \arcsin \frac{2s}{d}, \text{ dla części obrotowej.} \quad (28)$$



Rys. 5. Pochylenie linii grzbietowej nierówności dla części płaskiej (a) i obrotowej (b)

2). Przyjęcie liczby klinów  $N_k$  i obliczenie ich szerokości  $s_n$ :

$$s_n = \frac{s}{N_k}, \quad \text{gdzie } N_k \in \mathbb{N} \quad (29)$$

3). Obliczenie współrzędnej  $x_{1kn}$ , dla  $1 \leq n \leq N_k$ :

$$x_{1kn} = \frac{2n-1}{2} s_n, \quad (30)$$

4). Obliczenie wartości funkcji  $l(x_{1kn} - 0,5s_n)$ :

$$l(x_{1kn} - 0,5s_n) = f_4^{(k,l=2)}(x_{1kn} - 0,5s_n) - f_4^{(k,l=1)}(x_{1kn} - 0,5s_n) \quad (31)$$

gdzie  $f_4^{(k,l=1)}(x_1)$ ,  $f_4^{(k,l=2)}(x_1)$  są liniami ograniczającymi obszar  $\Omega_{3k}$ .

5). Przyjęcie liczby  $E$  elementów kontaktowych  $n$ -tego klina i obliczenie długości boku

$\Delta y_{2kn}^{(e)}$ :

$$\Delta y_{2kn}^{(e)} = \frac{l(x_{1kn} - 0,5s_n)}{E}, \quad \text{gdzie } E \in \mathbb{N} \quad (32)$$

6). Obliczenie długości podstawy pól trójkątnych  $\Delta y_{2knl}^{*(e)}$ :

$$\Delta y_{2knl}^{*(e)} = c [f_4^{(k,l)}(x_{1kn}^{(e)} + 0,5s_n) - f_4^{(k,l)}(x_{1kn}^{(e)} - 0,5s_n)] \quad (33)$$

7). Obliczenie sił jednostkowych  $q_{kn}^{(e)}$  działających na  $e$ -ty kontaktowy element skończony,  $n$ -tego klina,  $k$ -tej nierówności, zgodnie z metodyką podaną w [3].

a) obliczenie intensywności odkształceń plastycznych  $\epsilon_i$ ,

b) obliczenie intensywności prędkości odkształceń  $\dot{\epsilon}_i$ ,



- c) obliczenie temperatury  $T$ ,
- d) obliczenie termodynamicznych naprężeń uplastyczniających  $\sigma_p(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)$ ,
- e) obliczenie sił jednostkowych  $q_{kn}^{(e)}$  – rozwiązanie warunku brzegowego dla naprężeń.

- 8). Obliczenie sił cząstkowych działających na e-ty element skończony:

$$F_{3kn}^{(e)} = q_{kn}^{(e)} s_n \Delta y_{2knl}^{(e)}, \text{ dla elementów prostokątnych,} \quad (34a)$$

$$F_{3kn}^{(e)} = 0,5q_{kn}^{(e)} s_n \Delta y_{2knl}^{*(e)}, \text{ dla elementów trójkątnych,} \quad (34b)$$

- 9). Obliczenie sił cząstkowych działających na n-ty klin:

$$F_{3kn} = \sum_{e=1}^E F_{3kn}^{(e)} \quad (35)$$

- 10). Obliczenie siły normalnej działającej na k-tą nierówność:

$$F_{3k} = \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} \quad (36)$$

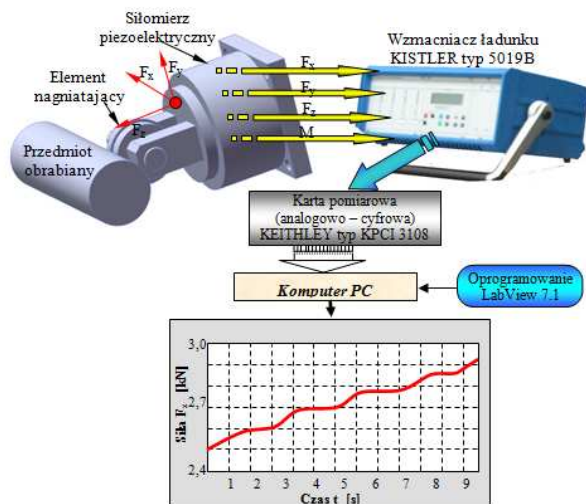
- 11). Obliczenie głównej siły nagniatania

$$F_3 = \sum_{k=0}^{p_0-1} F_{3k}. \quad (37)$$

Przedstawiono algorytm ma zastosowane w Metodzie Elementów Skończonych [1, 3, 4]. W Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej opracowano aplikację w programie ANSYS/LS-DYNA umożliwiającą wyznaczenie głównej siły nagniatania oraz rozkładu nacisków kontaktowych oraz wielkości strefy kontaktu powierzchni chropowatej dla różnych modeli materiałowych, różnych zmiennych warunków tarcia, różnych temperatur i prędkości odkształcenia.

#### 4. METODYKA EKSPERYMENTALNA

W celu weryfikacji przedstawionych metodyk zbudowano stanowisko badawcze. Stanowisko składa się z następujących podzespołów: tokarka, piezoelektryczny siłomierz typu 9272 firmy Kistler, wielokanałowy wzmacniacz ładunku typu 5019B firmy Kistler, komputer PC wyposażony w kartę pomiarową oraz niezbędne oprogramowanie. Do piezoelektrycznego siłomierza zamocowano głowicę nagniatającą wyposażoną w krążek nagniatający. Siłomierz wraz z głowicą nagniatającą zamocowano do tokarki w miejscu narzędzia. 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. Następnie sygnał podawany jest do karty analogowo cyfrowej, gdzie następuje zamiana sygnału analogowego (napięcia) na odpowiadające sygnałowi wartości sił (sygnał cyfrowy). Schemat blokowy stanowiska do pomiaru sił nagniatania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru siły nagiatacia

## 5. WNIOSKI

Przedstawiono metodyki wyznaczania parametrów siłowych w procesie nagiatacia tocznego z dociskiem elastycznym. Przedstawiono dwie własne metodyki analityczne (Metodyka II i Metodyka III). Ze względu na ograniczenia metodyk analitycznych zaproponowano metodykę numeryczną, dla której opracowano algorytm postępowania przy wyznaczaniu parametrów siłowych oraz opracowano aplikację w programie ANSYS/LS-DYNA. W celu weryfikacji przedstawionych metodyk opracowano metodykę eksperymentalną. Zbudowano stanowisko badawcze z podzespołów komercyjnych, opracowano technikę przesyłania, zapisu i weryfikacji uzyskiwanych danych pomiarowych. Kompleksowo rozwiązane zagadnienie szacowania wielkości sił nagiatacia niezbędnych do prawidłowego przeprowadzenia operacji technologicznych jest niezwykle przydatne do projektowania procesu technologicznego części z zastosowaniem nagiatacia jako obróbki wykończeniowej.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bathe K.J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice – Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982
- [2] Hill R.: *The mathematical theory of plasticity*. Oxford At The Clarendon Press 1986
- [3] Johnson K.L.: *Contact mechanics*. Cambridge University Press 1985
- [4] Kukiełka L.: *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagiatacia tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*. Monografia WM nr 47, WSInż, Koszalin 1994
- [5] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagiataciem*. WNT, Warszawa 1987
- [6] Szczepiński W.: *Mechanika plastycznego płynięcia*. PWN, Warszawa 1978