Nagniatanie toczne, plan eksperymentu,
zarys płasko-wierzchołkowy

Mariusz WOJTALIK[1]

KSZTAŁTOWANIE ZARYSÓW PŁASKO-WIERZCHOŁKOWYCH NAGNIATANIEM I ICH WYKORZYSTANIE W BUDOWIE POJAZDÓW

Przedstawiono możliwości tworzenia powierzchni płasko-wierzchołkowej metodą toczenia a następnie nagniatania osiowego tocznie. Badano wpływ parametrów symetrycznej nierówności trójkątnej po toczeniu i prędkości nagniatania na wybrane parametry zarysu powierzchni. Wyprowadzono równania regresji ujmujące wpływ kąta wierzchołkowego nierówności, odstępu den nierówności po toczeniu i prędkości nagniatania na zarysu powierzchni po nagniataniu tocznym.

FORMING OF FLAT-PEAKS OUTLINE BY BURNISHING ROLLING AND ITS USING IN VEHICLES BUILDING

In the paper possibility of forming flat-peaks surface by turning and then by burnishing rolling is presented. The influence of parameters of symmetrical, triangular asperity after turning and burnishing velocity on chosen parameters of the surface outline are considered. The regression functions are elaborated. The influence of vertical angles of asperity, distance between volleys after turning and burnishing velocity on the surface outline after burnishing rolling is presented.

1. WSTĘP

Obróbka powierzchniowa to świadome oddziaływanie różnymi metodami na powierzchnie materiału (półwyroby), celem wytworzenia warstwy wierzchniej, która przy określonych uwarunkowaniach techniczno–ekonomicznych spełnia wymagania eksploatacyjne [3]. Stan warstwy wierzchniej ma decydujący wpływ na procesy zużycia, a przez to na trwałość i niezawodność pojazdów (urządzeń). Największy wpływ na jakość użytkową, wyrobu, mają następujące właściwości warstwy wierzchniej: struktura geometryczna powierzchni, rodzaj i struktura materiału stref, utwardzenie (umocnienie) warstwy wierzchniej, naprężenia własne warstwy wierzchniej, wielkość i rozkład wad materiału. Części z naniesionym zarysem płasko–wierzchołkowym posiadają wiele zalet takich jak: praktycznie brak okresu docierania, dużo większa trwałość i odporność na zużycie w stosunku do części wykonanych metodami tradycyjnymi. W pracy

[1]Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Wałczu, Wydział Społeczno-Inżynieryjny; 78-600 Wałcz;
ul. Bydgoska 50. Tel: + 48 67 250-01-87, Fax: + 48 67 250-01-87, E-mail: mariusz.wojtalik@pwsz.eu

przedstawiono sposób tworzenia zarysu płasko–wierzchołkowego toczeniem i nagniataniem.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

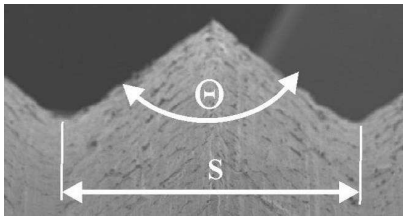
Do badań wytypowano stal C45 ze względu na jej szerokie zastosowanie w konstrukcji maszyn. Badania przeprowadzono w celu ustalenia zależności pomiędzy parametrami zarysu symetrycznej nierówności trójkątnej (s i θ) oraz prędkości nagniatania (v_n) na wybrane parametry powierzchni wyrobu po nagniataniu. Ustalono następującą postać jakościową funkcji regresji:

$$\hat{\bar{Y}} = \hat{\bar{Y}}(s, \theta, v_n) \tag{1}$$

gdzie: s - odstęp pomiędzy dnami nierówności, ,

θ - kąt wierzchołkowy nierówności,

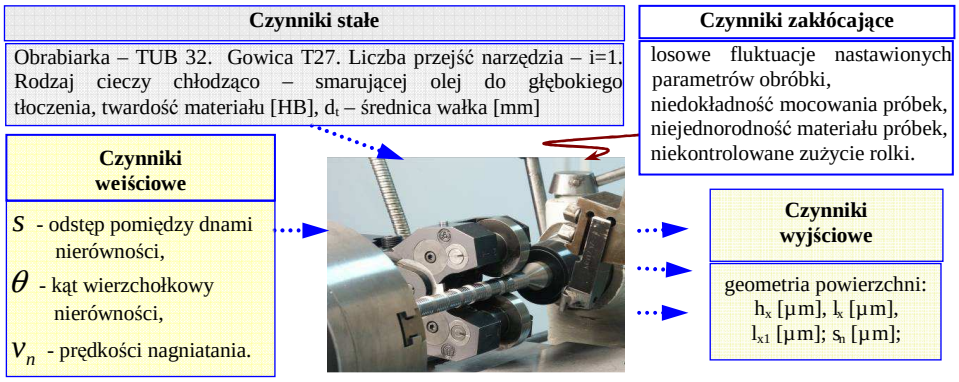
v_n - prędkości nagniatania.



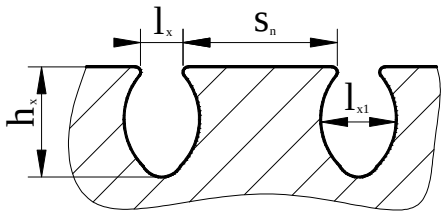
Rys.1. Widok zarysu nierówności i parametrów opisujących zarys :s – odstęp pomiędzy dnami nierówności; θ – kąt wierzchołkowy nierówności; h – wysokość nierówności

2.1 Określenie zbiorów czynników badanych, stałych, zakłócających i wynikowych

W wyniku przeprowadzonej analizy czynnikowej i badań rozpoznawczych określono zbiór czynników mających istotny wpływ na czynnik wynikowy (rys. 2), jakim jest zmiana wrębów nierówności powierzchni toczonej w skutek nagniatania h_x, l_x, l_{x1} i s_n (rys. 3).



Rys. 2. Czynniki występujące w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej



Rys.3. Parametry zarysu powierzchni regularnej trójkątnej po nagniataniu: h_x – wysokość nierówności; s_n – szerokość nierówności; l_x – odległość pomiędzy nierównościami górna część szczeliny; l_{x1} – odległość pomiędzy nierównościami środkowej część szczeliny

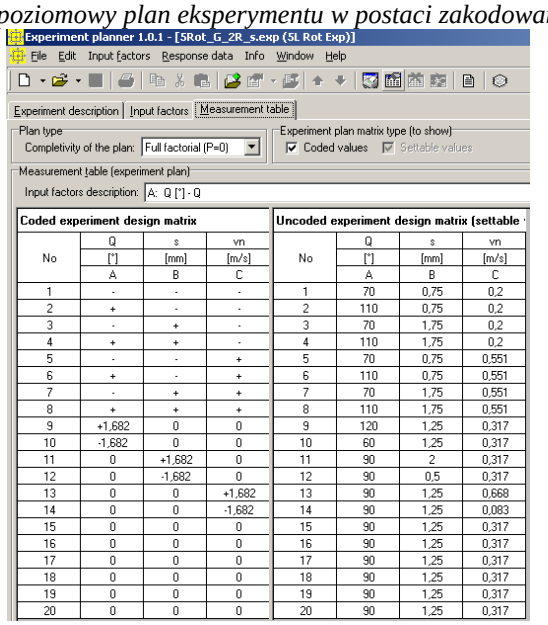
2.2 Ustalenie przedziału zmienności czynników badanych i plan eksperymentu

Przyjęty obszar badań w rozpatrywanym przypadku wynosi:

- $\overline{x}_1 = s$: 0,5÷2 [mm] – odstęp pomiędzy dnami nierówności,
- $\overline{x}_2 = \theta$: 60÷120 [°] – kąt wierzchołkowy nierówności,
- $\overline{x}_3 = v_n$: 0,083÷0,668 [m/s] – prędkości nagniatania.

Funkcja obiektu badań jest nieznana w postaci analitycznej. W celu określenia postaci tej funkcji oraz przedziału jej ufności posłużono się programem Experiment Planner [1], [2]. Program ten pozwala na zaplanowanie badań eksperymentalnych oraz przeprowadzenie analizy statystycznej otrzymanych wyników. Eksperyment zrealizowano zgodnie z planem pięciopoziomowym rotatabilnym (Tab. 1).

Tab. 1. Pięciopoziomowy plan eksperymentu w postaci zakodowanej i odkodowanej



Coded experiment design matrix

No	Q [°] A	s [mm] B	vn [m/s] C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
9	+1,682	0	0
10	-1,682	0	0
11	0	+1,682	0
12	0	-1,682	0
13	0	0	+1,682
14	0	0	-1,682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

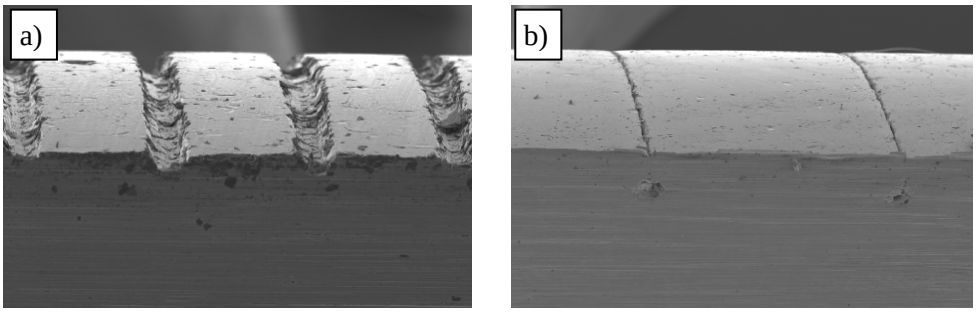
Uncoded experiment design matrix (settable

No	Q [°] A	s [mm] B	vn [m/s] C
1	70	0,75	0,2
2	110	0,75	0,2
3	70	1,75	0,2
4	110	1,75	0,2
5	70	0,75	0,551
6	110	0,75	0,551
7	70	1,75	0,551
8	110	1,75	0,551
9	120	1,25	0,317
10	60	1,25	0,317
11	90	2	0,317
12	90	0,5	0,317
13	90	1,25	0,668
14	90	1,25	0,083
15	90	1,25	0,317
16	90	1,25	0,317
17	90	1,25	0,317
18	90	1,25	0,317
19	90	1,25	0,317
20	90	1,25	0,317

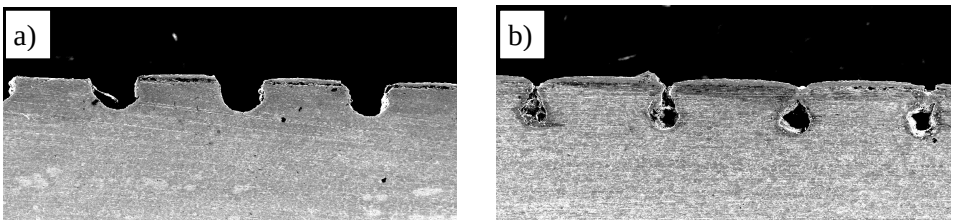
Badania przeprowadzono na tokarce uniwersalnej typ TUB 32, uzbrajanej w głowice dwukrążkową produkcji FETTE typu T27. Wcisk nagniatania, dla każdej próbki, obliczano oddzielnie, wynosił on połowę wysokości nierówności $w = \frac{1}{2}h$, gdzie h – wysokość nierówności. Próbki zostały przygotowane na tokarce TUM – 25B. Do ukształtowania nierówności o wymaganych kątach wierzchołkowych, w badanych próbkach użyte zostały noże ISO 10 z płytką E6 o kątach 60º, 70 º, 80 º, 90 º, 100 º, 110 º i 120º. Ostrza noży szlifowano w celu uzyskania żądanego kąta a następnie powierzchnie natarcia i przyłożenia ostrza noża dogładzano. Do badań zakwalifikowano tylko te noże, których krawędzie główna, przejściowa i pomocnicza nie posiadały szczerbatości. Odstęp den nierówności zależy od posuwu toczenia.

2.3 Wyniki badań

Po procesie nagniatania w celu obserwacji zarysu powierzchni, próbki zostały przecięte wzdłuż osi a następnie polerowane. Pomierzono parametry zarysu płasko-wierzchołkowego na poszczególnych próbkach. Wyniki badań opracowano statystycznie w programie Experiment Planner 1.0.1. Przykładowe zdjęcia zarysu powierzchni próbek przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Widok powierzchni: a) – θ =90 [º], s=0,5 [mm] v_n=0,317 [m/s] (x80); b) – θ =90 [º], s=2 [mm] v_n=0,317 [m/s] (x35)



Rys. 5. Widok powierzchni: a) – θ =90 [º], s=0,5 [mm] v_n=0,317 [m/s] (x80); b) – θ =70 [º], s=0,75 [mm] v_n=0,2 [m/s] (x45)

Wyniki pomiarów parametrów zarysu płasko-wierzchowego h_x, l_x, l_{x1} i s_n opracowano statystycznie w programie Experiment Planner, otrzymując następujące równania regresji:

a) $h_x = h_x(\theta, v_n, s)$:

$$h_x = -4748 + 119{,}6 \cdot \theta + 3230 \cdot s - 492{,}7 \cdot v_n - 11{,}33 \cdot \theta \cdot s + 4{,}582 \cdot \theta \cdot v_n - 243{,}1 \cdot s \cdot v_n + \\ -1{,}203 \cdot \theta^2 - 1608 \cdot s^2 + 181{,}9 \cdot v_n^2 + 1{,}519 \cdot \theta \cdot s \cdot v_n + 0{,}004 \cdot \theta^3 + 394{,}5 \cdot s^3, \quad R=0{,}98; \tag{2}$$

b) $l_x = l_x(\theta, v_n, s)$:

$$l_x = -4130 + 90{,}42 \cdot \theta + 3727 \cdot s + 415{,}6 \cdot v_n - 0{,}29 \cdot \theta \cdot s + 7{,}19 \cdot \theta \cdot v_n - 415 \cdot s \cdot v_n + \\ -0{,}887 \cdot \theta^2 - 3115 \cdot s^2 - 3561 \cdot v_n^2 + 1{,}61 \cdot \theta \cdot s \cdot v_n + 0{,}002 \cdot \theta^3 + 834{,}8 \cdot s^3 + 3681 \cdot v_n^3, \quad R=0{,}98; \tag{3}$$

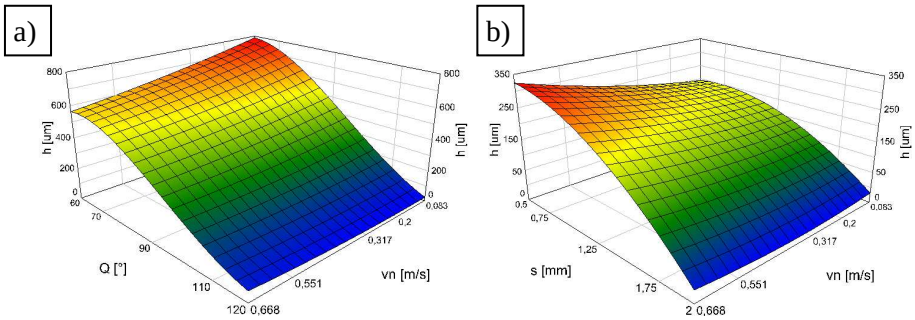
c) $l_{x1} = l_{x1}(\theta, v_n, s)$:

$$l_{x1} = -1421 + 20{,}52 \cdot \theta + 2827 \cdot s - 1228 \cdot v_n + 3{,}61 \cdot \theta \cdot s + 18{,}67 \cdot \theta \cdot v_n + 1392 \cdot s \cdot v_n + \\ -0{,}19 \cdot \theta^2 - 2669 \cdot s^2 - 2010 \cdot v_n^2 - 14{,}29 \cdot \theta \cdot s \cdot v_n - 0{,}0003 \cdot \theta^3 + 708{,}3 \cdot s^3 + 1762 \cdot v_n^3, \quad R=0{,}98; \tag{4}$$

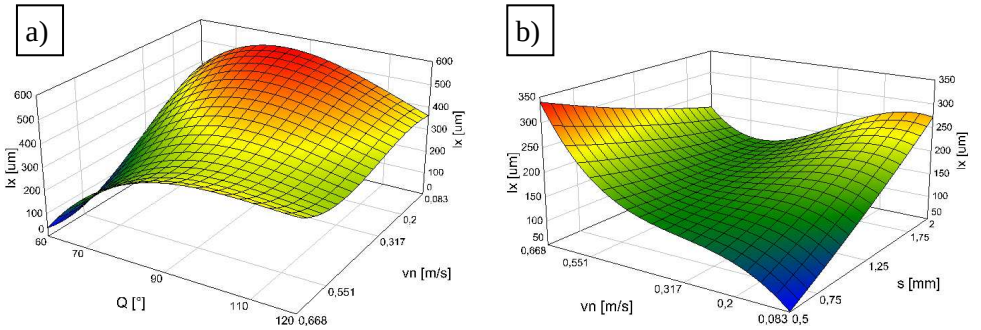
d) $s_n = s_n(\theta, v_n, s)$:

$$s_n = -5913 + 25{,}66 \cdot \theta + 14819 \cdot s - 1303 \cdot v_n - 47{,}27 \cdot \theta \cdot s - 1{,}781 \cdot \theta \cdot v_n + 633{,}4 \cdot s \cdot v_n + \\ +0{,}069 \cdot \theta^2 - 9262 \cdot s^2 + 6455 \cdot v_n^2 - 4{,}463 \cdot \theta \cdot s \cdot v_n - 0{,}0007 \cdot \theta^3 + 2756 \cdot s^3 - 7301 \cdot v_n^3, \quad R=0{,}99; \tag{5}$$

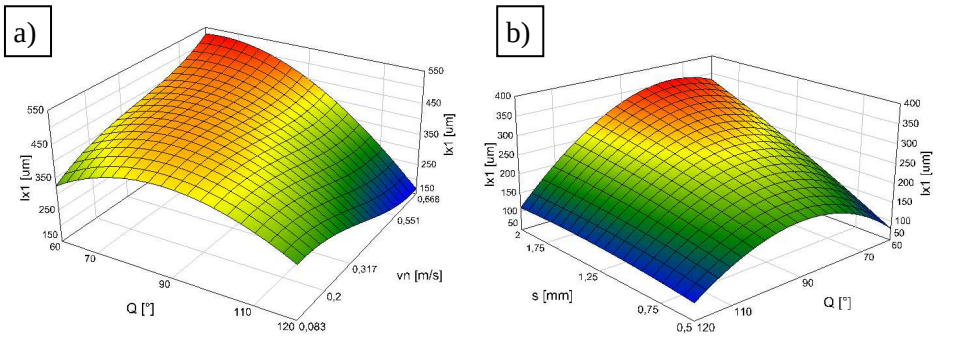
Duże (bliskie jedności) wartości współczynnika korelacji wielowymiarowej R świadczą o dobrym dopasowaniu funkcji regresji do wyników eksperymentu. Wykresy funkcji według wzorów (2)÷(5) przedstawiono na rysunkach 6 ÷ 9.



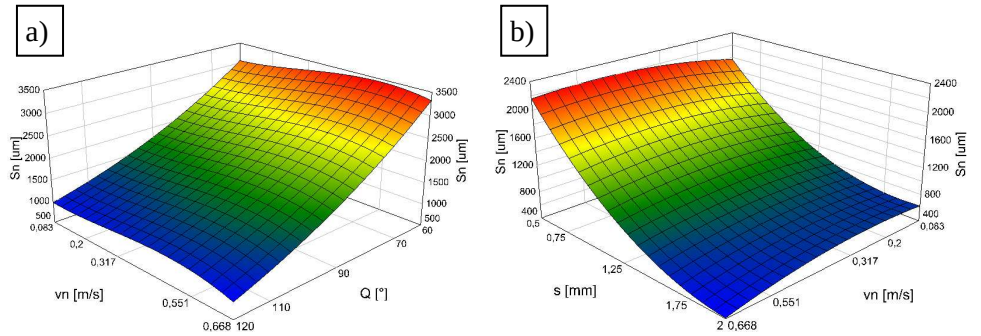
Rys. 6. Wykresy wysokości nierówności po nagniataniu w zależności od: a) kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu θ i prędkości nagniatania v_n b) odstępem pomiędzy dnami nierówności s i prędkości nagniatania v_n



Rys. 7. Wykresy odległości pomiędzy nierównościami po nagniataniu górnej część szczeliny w zależności od: a) kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu θ i prędkości nagniatania v_n b) odstępem pomiędzy dnami nierówności s i prędkości nagniatania v_n



Rys. 8. Wykresy odległości pomiędzy nierównościami po nagniataniu środkowej część szczeliny w zależności od: a) kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu θ i prędkości nagniatania v_n b) odstępem pomiędzy dnami nierówności s i kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu θ



Rys. 9. Wykresy szerokości nierówności po nagniataniu w zależności od: a) prędkości nagniatania v_n i kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu θ; b) odstępem pomiędzy dnami nierówności s i prędkości nagniatania v_n

3. WNIOSKI

Istnieje możliwość kształtowania zarysu płasko-wierzchołkowego w dwóch operacjach. W operacji pierwszej tworzy się nierówności regularne o odpowiednim zarysie, następnie w operacji drugiej nierówności te nagniata się z dociskiem sztywnym z odpowiednim wciskiem. Dzięki temu uzyskuje się zarówno dużą gładkość części nośnej zarysu płasko-wierzchołkowego oraz dużą dokładność wymiarów. W zakresie $60^o \div 120^o$ występują trzy odmiany zarysu płasko-weirzchołkowego powierzchni:

- zarys trapezowy, dla $l_x > l_{x1;}$
- zarys prostokątny, dla $l_x = l_{x1;}$
- zarys teowy, dla $l_x < l_{x1.}$

Zarówno kąt wierzchołkowy i odstęp pomiędzy dnami nierówności po toczeniu jak i prędkość nagniatania istotnie wpływa na parametry zarysu płasko-wierzchołkowego oraz na kształt i wymiary szczelin.

Wyprowadzone wzory empiryczne mogą być wykorzystane do optymalizacji procesu kształtowania zarysu ze względu na wymagany kształt i parametry zarysu płasko-wierzchołkowego.

Z przeprowadzonych badań wynika również celowość zastosowania w miejsce toczenia operacji wygniatania regularnych nierówności. Nastąpi wówczas dalsza zestrojenie dokładności kształtowej zarysu płasko-wierzchołkowego i ukształtowanie dodatkowych naprężeń ściskających.

Możliwość uzyskiwania różnych odmian zarysu płasko wierzchołkowego tj. zarysów: trapezowy, prostokątny i teowy jest wyjątkową właściwością opracowanej technologii. Umożliwia dostosowanie jakości technologicznej do jakości eksploatacyjnej wyrobu. Zarysy trapezowy i prostokątny są korzystne w połączeniach silnie obciążonych np. pary tłok-cylinder, wał korbowy-panewka, wał rozrządu-panewka, zawór-prowadnica itp., natomiast zarys teowy jest pożądany pod pokrycia galwaniczne lub metalizację natryskową (nanoszenie metali lub tworzyw sztucznych). Powierzchnia tak powstała może być wykorzystywana do zwiększenia przyczepności powłok nakładanych natryskowo na powierzchnie - zwiększając mechanicznie ich przyczepność np. na poręcze w autobusach, orurowanie samochodów terenowych itp..

4. BIBLIOGRAFIA

[1] Kukiełka L.: *Podstawy badań inżynierskich*, Warszawa, PWN 2002.

[2] Kukiełka L., Kukiełka S.: *Zastosowanie programu Experiment Planner 1.0 do wspomagania eksperymentu w technologii nagniatan*ia, Obróbka kształtująca i powierzchniowa nagniataniem, Koszalin 2004 Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 34, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, s.131-140.

[3] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT 1987.

[4] Wojtalik M.: *Wpływ parametrów regularnej nierówności powierzchni wyjściowej i parametrów technologicznych nagniatania tocznego na strukturę geometryczną powierzchni i stan naprężeń w warstwie wierzchniej wyrobu*, Koszalin, Rozprawa doktorska 2008.