

## **OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA NA PODSTAWIE RÓWNAŃ REGRESJI PROCESU NAGNIATANIA WYBRANYCH CZĘŚCI MASZYN ROLNICZYCH**

Krzysztof Kukiełka

*Katedra Inżynierii Produkcji, Politechnika Koszalińska*

Leon Kukiełka, Radosław Patyk, Katarzyna Szczepanik

*Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Koszalińska*

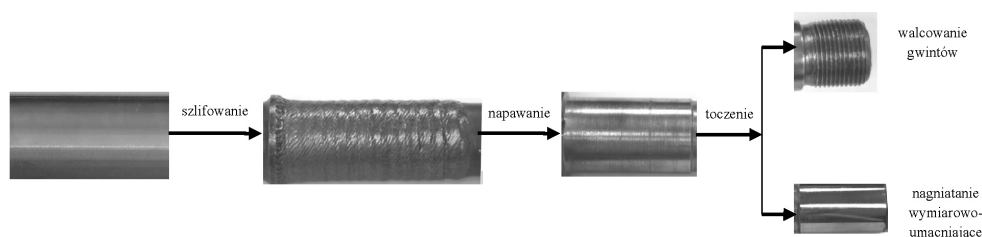
**Streszczenie.** Praca dotyczy określania optymalnych wartości parametrów technologicznych nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem, w procesie wytwarzania lub regeneracji części maszyn rolniczych. Badane zmienne wyjściowe w postaci najważniejszych wskaźników eksploatacyjnych (odporność na zacieranie, współczynnik tarcia ślizgowego i zużycie ściernie liniowe) opisano równaniami regresji od parametrów technologicznych. Równania te zastosowano w optymalizacji wielokryterialnej, przy pomocy napisanych skryptów w programie Matlab, na przykładzie części nowej ze stali C55. Opracowano zbiór rozwiązań dopuszczalnych na płaszczyźnie zmiennych sterowalnych (parametrów technologicznych) ze względu na przyjęte kryteria (wskaźniki eksploatacyjne) i ograniczenia.

**Słowa kluczowe:** wytwarzanie, regeneracja, nagniatanie, warstwa wierzchnia, optymalizacja wielokryterialna

### **Wprowadzenie**

Zmienność warunków pracy poszczególnych części maszyn rolniczych wymaga nadawania zróżnicowanych, lecz odpowiednich ze względu na charakter ich pracy właściwości warstwy wierzchniej. Jedną z metod obróbki wykończeniowej, szczególnie przydatnej do wytwarzania lub regeneracji części (szczególnie pracujących w trudnych warunkach), posiadającej największe możliwości sterowania właściwościami warstwy wierzchniej jest nagniatanie toczne z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Przykładowo, proponowana technologia regeneracji części maszyn rolniczych przebiegała w czterech operacjach (rys. 1). W przypadku powierzchni gwintowanych zaproponowano zamiast obróbki ubytkowej, walcowanie gwintów na zimno. Nagniatanie półwyrobu wykonanego z określonego materiału powoduje tworzenie pewnej jakości technologicznej, która z kolei, zapewnia powstanie określonych właściwości użytkowych wyrobu. 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 odchyłek wymiarów i kształtów wyrobu nagniatanego, ale i okre-

ślonych zmian jakości jego warstwy wierzchniej. Dlatego też problemy zapewnienia odpowiedniego stanu przedmiotu po obróbce poprzedzającej i technologiczne nagniatania należy rozpatrywać wspólnie [Kukielka 1994].



Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 1. Proponowana technologia regeneracji części maszyn rolniczych  
Fig. 1. The suggested regeneration technology of agricultural machinery parts

Procesowi nagniatania towarzyszy szereg czynników zakłócających, najczęściej niemierzalnych i niesterowalnych. Czynniki te powodują, że w rzeczywistości proces nagniatania nie jest procesem zdeterminowanym, lecz procesem losowym a parametry określające jakość technologiczną wyrobu – zmiennymi losowymi.

Losowość procesu nagniatania powoduje, że najczęściej modeluje się go za pomocą równań statystyczno-doświadczalnych. Modele te (równania regresji) ujmują zależność określonego parametru stanu części po nagniataniu od parametrów technologicznych nagniatania, dla stałych wartości parametrów określających pozostałe warunki nagniatania i stan części po obróbce poprzedzającej. Dokładność tych modeli można zwiększyć głównie poprzez zmniejszenie rozrzutu parametrów stanu części po obróbce poprzedzającej oraz przez znajomość przebiegu zjawisk fizycznych, towarzyszących nagniataniu. W efekcie takiego postępowania możliwe jest uzyskanie wyrobu o wysokiej i stabilnej jakości technologicznej.

## Cel pracy

Nagniatanie toczne z elektokontaktowym nagrzewaniem kształtuje warstwę wierzchnią wyrobu o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych [Kukielka 1994], lecz trudności związane z uzyskiwaniem powtarzalnych i zgodnych z założeniami wyników powodują, że zastosowanie tej metody obróbki w polskim przemyśle wytwarzającym nowe części maszyn rolniczych oraz w zakładach ich regeneracji jest niewystarczające. Wynika to głównie z dużego stopnia skomplikowania procesu.

Dla zastosowań praktycznych, ważnym jest sterowanie właściwościami użytkowymi wyrobu (odporność na zacieranie -  $t_z$ , współczynnik tarcia ślizgowego -  $\mu$  i zużycie ściernic liniowe  $z_L$ ) już na etapie jego wytwarzania. Dlatego też niezbędne jest określenie optymalnych warunków realizacji procesu ze względu na określone kryteria i warunki ograniczające, najkorzystniej stosując istniejące programy komputerowe np. Matlab. W tym celu opra-

cowano modele matematyczne w postaci równań regresji oraz autorskie skrypty optymalizacyjne.

## Metodyka badań

Badania wskaźników eksploatacyjnych autorzy przeprowadzili na próbkach o średnicy zewnętrznej  $d_0 = 18$  mm, długości  $l = 50$  mm wykonanych ze stali C55, które w pierwszej operacji toczono, uzyskując trójkątny profil chropowatości powierzchni (średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej  $R_a = 1,9$   $\mu\text{m}$ ). Następnie próbki poddano normalizacji oraz nagniatano tocznie z elektokontaktowym nagrzewaniem na stanowisku badawczym znajdującym się w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Krążki nagniatające wykonano ze stali SW18 o twardości HRC = 62. Wymiary krążków toroidalno-stożkowych: średnica zewnętrzna  $D_0 = 54$  mm, szerokość części roboczej  $b = 3$  mm, promień zaokrąglenia zarysu  $r_g = 0,3$  mm, kąt pochylenia tworzącej stożka  $\alpha = 1^\circ 15'$ . Warunki nagniatania dobierano zgodnie z planem statycznym zdeterminowanym pięciopoziomowym wieloczynnikowym rotalnym, wykorzystując program komputerowy PLANEKS - STAT [Kukiełka 2000].

Badanie odporności na zacieranie próbek nagniatanych z prądem, przeprowadzono w układzie jednowałeczkowym. Przeciwpróbkę wykonano również ze stali C55 o wymiarach  $\phi 10 \times 10$  i chropowatości  $R_a = 0,63$   $\mu\text{m}$ . Czas trwania jednej próby zatarcia, przy stałej wartości siły normalnej dociskającej przeciwpróbkę, wynosił 15 s.

Wartość współczynnika tarcia określono metodą pośrednią. Dokonywano pomiaru tarcia pary cierniej składającej się z walcowej próbki współpracującej z płaską przeciwpróbką żeliwną ZINi0,8.

Pomiar zużycia ściernego przeprowadzono zgodnie z normą PN-75/M-04305. Do próbki dociskano żeliwną przeciwpróbkę ZINi0,8 ze stałą siłą  $P = 30$  N, uzyskując w ten sposób układ cierny „wałek-płaszczyzna”.

Wyniki badań zostały poddane weryfikacji statystycznej. Istnienie błędów grubych sprawdzano za pomocą statystyk  $B_6$ , natomiast jednorodność wariancji - za pomocą testu Cochra. Otrzymane wyniki odporności części na zacieranie i odporności na zużycie ściernie liniowe aproksymowano równaniem regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia z podwójnymi interakcjami, natomiast współczynnik tarcia aproksymowano funkcją wykładniczą:

$$\hat{t}_z = 7,440 - 0,021 \cdot \bar{F} + 90,479 \cdot \bar{p} - 1,042 \cdot \bar{v} + 0,092 \cdot \bar{I} - 0,018 \cdot \bar{F} \cdot \bar{p} + 0,008 \cdot \bar{F} \cdot \bar{v} + 0,00003 \cdot \bar{F} \cdot \bar{I} - 35,256 \cdot \bar{p} \cdot \bar{v} - 0,128 \cdot \bar{p} \cdot \bar{I} + 0,033 \cdot \bar{v} \cdot \bar{I} - 0,0000001 \cdot \bar{F}^2 + 48,809 \cdot \bar{p}^2 + 5,687 \cdot \bar{v}^2 - 0,0001 \cdot \bar{I}^2, \quad [\text{s}] \quad (1)$$

$$\hat{\mu} = \exp(-1,9304 - 0,0010 \cdot \bar{F} + 3,7487 \cdot \bar{p} + 0,8336 \cdot \bar{v} - 0,0066 \cdot \bar{I} - 0,0016 \cdot \bar{p} \cdot \bar{F} + 0,0002 \cdot \bar{F} \cdot \bar{v} + 0,00000322 \cdot \bar{F} \cdot \bar{I} + 0,7694 \cdot \bar{p} \cdot \bar{v} - 0,0072 \cdot \bar{p} \cdot \bar{I} - 0,0015 \cdot \bar{v} \cdot \bar{I} - 0,00000011 \cdot \bar{F}^2 + 1,9785 \cdot \bar{p}^2 + 0,1413 \cdot \bar{v}^2 + 0,00000519 \cdot \bar{I}^2). \quad [-] \quad (2)$$

$$\hat{z}_L = 19,1959 - 0,0067 \cdot \bar{F} + 23,0402 \cdot \bar{p} + 2,0381 \cdot \bar{v} - 0,0520 \cdot \bar{I} - 0,0059 \cdot \bar{F} \cdot \bar{p} + 0,0011 \cdot \bar{F} \cdot \bar{v} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{F} \cdot \bar{I} - 4,4871 \cdot \bar{p} \cdot \bar{v} - 0,0307 \cdot \bar{p} \cdot \bar{I} + 0,0000 \cdot \bar{v} \cdot \bar{I} - 18 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{F}^2 + 4,1834 \cdot \bar{p}^2 + 1,0637 \cdot \bar{v}^2 + 34 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{I}^2, \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

Poprawność dobranych funkcji sprawdzano badając istotność współczynnika korelacji wielowymiarowej testem F-Snedecora.

### Optymalizacja wielokryterialna procesu nagniatania

Dla otrzymanych funkcji regresji nie można podjąć decyzji odnośnie najlepszego doboru czynników sterujących – parametrów technologicznych. Pomocne w tym celu może być przeprowadzenie optymalizacji procesu nagniatania tocznego z elektrokonaktowym nagrzewaniem strefy obróbkowej. W rzeczywistości mamy do czynienia z optymalizacją pięciokryterialną przy czterech ograniczeniach. Natomiast, jeśli za kryterium dominujące przyjmujemy koszt obróbki to dla takiego kryterium należy uwzględnić wydajność procesu, którą uzyskuje się dla maksymalnych wartości posuwu  $p=0,56 \text{ mm} \cdot \text{obr}^{-1}$  ( $\bar{x}_2 = +2$ ) i prędkości  $v=1,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\bar{x}_3 = +2$ ). Wtedy zadanie optymalizacji można zredukować do problemu optymalizacji czterokryterialnej z czterema ograniczeniami, w układzie dwóch zmiennych decyzyjnych: siły nagniatania  $F \text{ N}$  ( $\bar{x}_1$ ) oraz natężenia prądu elektrycznego  $I \text{ A}$  ( $\bar{x}_4$ ). Matematyczny zapis kryteriów w układzie zmiennych siła i natężenie prądu ma postać:

$$K_1 = t_z = 10,858 - 1,248 \cdot \bar{x}_1 - 1,878 \cdot \bar{x}_4 + 2 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 - 0,015 \cdot \bar{x}_1^2 - 0,99 \cdot \bar{x}_4^2 \rightarrow \max! \quad (4)$$

$$K_2 = \mu = \exp(-3,488 - 0,302 \cdot \bar{x}_1 - 0,258 \cdot \bar{x}_4 + 0,162 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 - 0,05 \cdot \bar{x}_1 + 0,029 \cdot \bar{x}_4) \rightarrow \min! \quad (5)$$

$$K_3 = z_L = 4,125 - 0,916 \cdot \bar{x}_1 - 0,899 \cdot \bar{x}_4 + 0,85 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 - 0,079 \cdot \bar{x}_1^2 - 0,195 \cdot \bar{x}_4^2 \rightarrow \min! \quad (6)$$

$$K_4 = \bar{x}_4 \rightarrow \min! \quad (7)$$

Jest to optymalizacja statyczna ze skalarną funkcją celu, postaci:

$$K = w_1 \mu + w_2 t_z + w_3 z_L + w_4 I = \min! \quad (8)$$

gdzie  $w_i, i=1 \div 4$ , są współczynnikami wagi danego kryterium.

Wyodrębniono następujące ograniczenia:

– chropowatość powierzchni:

$$0,3 \leq R_z = 1,367 - 0,61 \cdot \bar{x}_1 - 0,29 \cdot \bar{x}_4 + 0,2 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 - 0,03 \cdot \bar{x}_1^2 - 0,15 \cdot \bar{x}_4^2 \leq 1,367,$$

– odchyłka średnicy:

$$-21 \leq \Delta d = 27,36 - 1,55 \cdot \bar{x}_1 + 0,79 \cdot \bar{x}_4 - 1,76 \cdot \bar{x}_1^2 - 1,77 \cdot \bar{x}_4^2 \leq 0,$$

– siła:  $-2 \leq \bar{x}_1 \leq +2$ ,

– natężenie prądu:  $-2 \leq \bar{x}_4 \leq +2$ .

Optymalizację procesu nagniatania przeprowadzono przy użyciu programu Matlab z użyciem toolbox Optimization. Procedurę iteracyjną powtarzano wielokrotnie zmieniając punkt startowy, który dobierano tak, aby spełniał wszystkie ograniczenia. Opracowane autorskie skrypty w programie Matlab dla tak postawionego zadania przedstawia tablica 1.

Tablica 1. Skrypty Matlab do optymalizacji wielokryterialnej procesu nagniatania  
Table 1. Matlab files for multiobjective optimization of the burnishing process

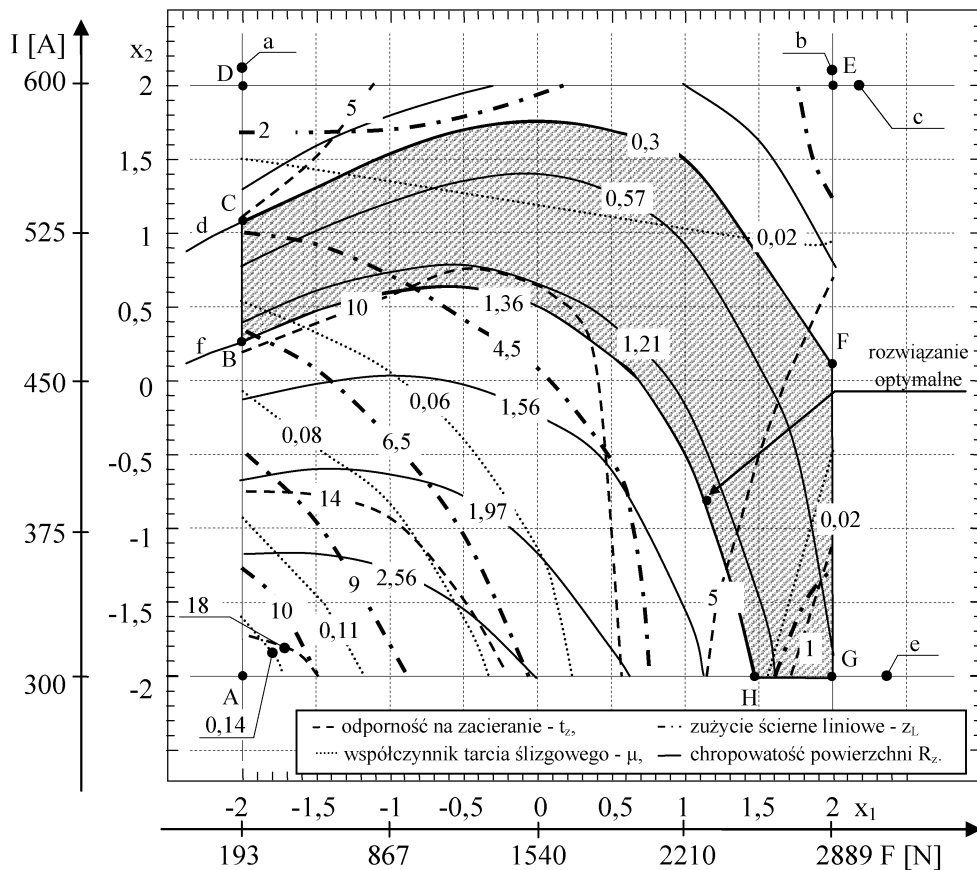
```

Plik fcelu.m
function [f]=fcelu(x)
% x(1)- zapis w Matlabi'e - siła nagniatania F=x(1)
% x(2)- zapis w Matlabi'e - natężenie prądu I=x(4)
w=[0.3,0.3,0.4];
%% waga kryterium
k(1)=exp(-3.488-0.302*x(1)-0.258*x(2)+0.162*x(1)*x(2)-0.05*x(1)^2+0.029*x(2)^2);
%% współczynnik tarcia
k(2)=4.125-0.916*x(1)-0.899*x(2)+0.85*x(1)*x(2)-0.079*x(1)^2+0.195*x(2)^2;
%% zużycie ściernie liniowe
k(3)=10.858-1.248*x(1)-1.878*x(2)+2*x(1)*x(2)-0.015*x(1)^2-0.99*x(2)^2;
%% czas odporności na zacieranie
k(4)=-(27.96-1.55*x(1)+0.79*x(2)-1.76*x(1)^2-1.77*x(2)^2);
% odchyłka średnicy %
k(5)=1.367-0.609*x(1)-0.292*x(2)+0.196*x(1)*x(2)-0.026*x(1)^2-0.152*x(2)^2;
% chropowatość Rz%
f=w(1)*k(1)+w(2)*k(2)+x(2)*w(3);
% funkcja celu minimalizacja f.
Plik ograniczenia.m
function [C,Ceq]=ograniczenia(x)
C(1)=0.3-(1.367-0.609*x(1)-0.292*x(2)+0.196*x(1)*x(2)-0.026*x(1)^2-0.152*x(2)^2);
C(2)=-1.367+(1.367-0.609*x(1)-0.292*x(2)+0.196*x(1)*x(2)-0.026*x(1)^2-0.152*x(2)^2);
C(3)=21-(27.36-1.55*x(1)+0.79*x(2)-1.76*x(1)^2-1.77*x(2)^2);
C(4)=- (27.36-1.55*x(1)+0.79*x(2)-1.76*x(1)^2-1.77*x(2)^2);
Ceq=[];
end
Plik skrypt.m
%skrypt
ogr_g=[2,2];
ogr_d=[-2,-2];
x_pocz=[-2,-2];
[X,fvalue] = FMINCON(@fcelu,x_pocz, [], [], [], [], ogr_d,ogr_g,@ograniczenia)
    
```

Źródło: obliczenia własne autorów

Otrzymano następujący zestaw optymalnych parametrów nastaw czynników sterujących:  $F=2360 \text{ N}$  ( $\bar{x}_1 = 1,2212$ ) oraz  $I=389 \text{ A}$  ( $\bar{x}_4 = -0,8213$ ), dla których kryteria przyjmują następujące wartości:  $\mu = 0,021$ ,  $z_l = 2,906 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t_s = 8,181 \text{ s}$  oraz ograniczenia:  $\Delta d = -21 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_z = 1,36 \text{ }\mu\text{m}$ . Rozwiązanie to oznaczono na rysunku 2 jako rozwiązanie optymalne.

Dla rozpatrywanego procesu nagniatania, zbiór wariantów dopuszczalnych w obszarze zmiennych sterowalnych siła i natężenie prądu wyznaczają linie a, b, c, d, e, f, które są graficzną reprezentacją ograniczeń nierównościowych (rys. 2). Natomiast zbiór rozwiązań polioptymalnych wyznacza obszar B-C-F-G-H.



Źródło: obliczenia własne autorów

Rys. 2. Zbiór wariantów na płaszczyźnie zmiennych sterowalnych siły nacisku krążka  $\bar{F}_3$  i natężenia prądu  $\bar{I}$ , dla stałych wartości posuwu nagniatania  $\bar{p}_n=0,56$  mm·obr<sup>-1</sup> ( $\bar{x}_2 = +2$ ) i prędkości nagniatania  $\bar{v}_n=1,55$  m·s<sup>-1</sup> ( $\bar{x}_3 = +2$ ); a, b, d, e, f – ograniczenia, B-C-F-G-H – zbiór wariantów polioptymalnych

Fig. 2. A set of variants on the plane of controllible variables of the roll force  $\bar{F}_3$  and current intensity  $\bar{I}$ , for constant values of burnishing feed  $\bar{p}_n=0,56$  mm·rot<sup>-1</sup> ( $\bar{x}_2 = +2$ ) and burnishing speed  $\bar{v}_n=1,55$  m·s<sup>-1</sup> ( $\bar{x}_3 = +2$ ); a, b, d, e, f – restrictions, B-C-F-G-H – a set of poly-optimal options.

## Podsumowanie

Proces produkcji i regeneracji części maszyn rolniczych jest zagadnieniem wieloetapowym. Zaproponowano nowy sposób regeneracji, wybranych części maszyn rolniczych, realizowany w czterech operacjach: 1) szlifowanie, 2) napawanie, 3) toczenie, 4) nagniatanie wymiarowo-umacniające czopów gładkich lub walcowanie gwintów na zimno.

Projektując proces wytwarzania lub regeneracji części, w którym występuje nagniatanie z elektrokontaktowym nagrzewaniem, często zachodzi konieczność wyznaczenia stanu optymalnego procesu ze względu na przeznaczenie wymagane właściwości użytkowe wyrobu. Pokazano sposób formułowania zadania optymalizacji wielokryterialnej oraz jego rozwiązania przy pomocy opracowanych skryptów, w programie Matlab (toolbox Optimization).

Z opracowanego w pracy zbioru rozwiązań dopuszczalnych wynika, że funkcje kryterialne są funkcjami monotonicznymi ze względu na zmienne sterujące (parametry technologiczne). Wykres ten ułatwia wybór przez technologa najlepszego rozwiązania dla innych warunków nagniatania i kryteriów optymalizacji.

## Bibliografia

- Przybylski W.** 1979. Obróbka nagniataniem Technologia i oprzyrządowanie. WNT. Warszawa. ISBN 83-204-0742-7.
- Tarnowski W.** 2001. Symulacja i optymalizacja w MATLAB'ie. WSM. Gdynia. ISBN 83-874-3881-2.
- Zalewski A., Cegiela R.** 2001. Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania. Poznań. ISBN 83-850-6085-5.
- Kukielka L.** 1994. Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Monografia WM Nr 47. WSI. Koszalin. ISBN 83-900-5108-7.
- Kukielka L.** 2000. Podstawy badań inżynierskich. Podręcznik akademicki. Politechnika Koszalińska. ISBN 83-882-8326-X

## **MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF THE BURNISHING PROCESS ON THE BASIS OF REGRESSION EQUATIONS FOR PARTICULAR AGRICULTURAL MACHINERY PARTS**

**Abstract.** This paper concerns determination of the optimal technological parameters of burnishing rolling with electrical current, in the production or regeneration of agricultural machinery parts. Examined dependent variables, as the most important operational indicators (scuffing resistance, sliding friction coefficient and linear abrasive wear) were described by regression equations from technological parameters. These equations were used in multi-objective optimization process with delivered scripts in Matlab program, for example a new part made of steel C55. A set of acceptable solutions was developed on the plane of controllable variables (of technological parameters) on account of accepted criteria (operational indicators) and limitations.

**Key words:** production, regeneration, burnishing, surface layer, multi-objective optimization

**Adres do korespondencji:**

Krzysztof Kukielka; e-mail: [krzysztof.kukielka@tu.koszalin.pl](mailto:krzysztof.kukielka@tu.koszalin.pl)

Katedra Inżynierii Produkcji

Politechnika Koszalińska

ul: Raławicka 15-17

75- 620 Koszalin