

# Optymalizacja parametrów kinematycznych w docieraniu powierzchni płaskich

## Optimization of kinematic parameters in single-sided lapping

ADAM BARYLSKI  
NORBERT PIOTROWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.134>  
English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Przedstawiono wpływ wybranych parametrów kinematycznych na geometryczne wyniki procesu docierania 1-tarczowego. W celu poprawy płaskości oraz jakości obrabianych powierzchni przeprowadzono optymalizację tych parametrów. Podstawowym kryterium optymalizacji jest równomierność zużycia narzędzia. Zaprezentowano wyniki symulacji, a następnie porównano je z wynikami badań eksperymentalnych. **SŁOWA KLUCZOWE:** docieranie 1-tarczowe, kinematyka docierania, zużycie ściernie, optymalizacja parametrów

*In this paper the influence of selected kinematic parameters on the geometrical results of the single-sided lapping process was presented. The purpose of parameters optimization is to improve the flatness and quality of the machined surfaces. The basic optimization criterion is the uniformity of tool wear. The simulation and experimental results were presented and compared.*

**KEYWORDS:** single-sided lapping, lapping kinematics, abrasive wear, parameters optimization

W docieraniu powierzchni płaskich kluczowe znaczenie ma utrzymanie właściwego stanu narzędzia. Tarcza docierająca ma istotny wpływ na dokładność wymiarową i kształtową, a także na jakość wykończenia powierzchni przedmiotów obrabianych. Głównym problemem, który występuje w docieraniu 1-tarczowym, jest nierównomierne zużycie tarczy docierającej, powodujące występowanie następujących odchyłek płaskości: wklęsłości, wypukłości lub osiowego bicia powierzchni roboczej [1–3]. Ponadto proces docierania zależy od wielu parametrów wejściowych. Aby uzyskać lepsze wyniki procesu, badania powinny się koncentrować na poprawie jego elementów składowych lub na opracowaniu nowych rozwiązań kinematycznych.

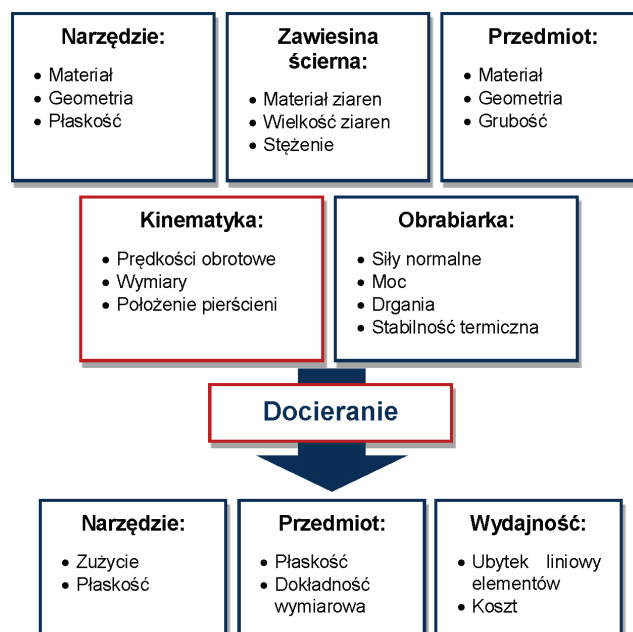
Jednym z podstawowych mechanizmów w procesie docierania jest mikroskrawanie materiału przez ziarna ściernie. W celu określenia wpływu parametrów kinematycznych na równomierność skrawania wykonywane są symulacje numeryczne trajektorii poruszających się ziaren. Zmiana parametrów kinematycznych, np. prędkości obrotowych narzędzia i pierścieni prowadzących lub zmiana położenia pierścieni na tarczy, powoduje zmianę kształtu tych trajektorii i tym samym ich zagęszczenia [3–5]. W praktyce w docieraniu 1-tarczowym do utrzymania płaskości tarczy docierającej wykorzystywane są jedynie pierścienie prowadzące. Czas kondycjonowania oraz położenie pierścieni są kontrolowane i ustawiane przez operatora obrabiarki [1, 6].

Celem pracy jest weryfikacja wpływu dodatkowych ruchów pierścienia prowadzącego w układzie docierania powierzchni płaskich oraz opracowanie niekonwencjo-

nalnego systemu docierania 1-tarczowego, który pozwoli kontrolować położenie, prędkość oraz przyspieszenie pierścienia prowadzącego. Układ ma za zadanie zminimalizować błędy i zniekształcenia występujące na powierzchni roboczej tarczy docierającej. W artykule przedstawiono wpływ wybranych parametrów kinematycznych na wyniki procesu docierania oraz przeprowadzono optymalizację tych parametrów. Podstawowym kryterium była równomierność zużycia narzędzia.

### Parametry docierania 1-tarczowego

Proces docierania jest bardzo złożony i wpływa na niego wiele czynników. Parametry wejściowe oraz wyjściowe docierania 1-tarczowego zostały przedstawione na rys. 1. Jakość struktury geometrycznej powierzchni, zużycie narzędzia, a także wydajność procesu zależą w dużej mierze (podobnie jak we wszystkich procesach obróbki skrawaniem) od samego narzędzia (tj. od jego geometrii oraz materiału, z jakiego je wykonano). Ponadto płaskość narzędzia odwzorowywana jest na powierzchni przedmiotu obrabianego [7]. W obróbce ścierniej ważna jest również zawieszina ścierna – jej stężenie i objętość oraz rodzaj i wielkość ziaren [8]. Znaczenie mają także geometria i materiał przedmiotów obrabianych. Ponadto siła docisku [9] oraz prędkości obrotowe, które są ściśle związane z parametrami i kinematyką obrabiarki, mają istotny wpływ na stan narzędzia, jakość oraz wydajność procesu obróbkowego [5, 7, 10].



Rys. 1. Parametry wejściowe i wyjściowe procesu docierania 1-tarczowego

\* Prof. dr hab. inż. Adam Barylski (abarylsk@pg.gda.pl), mgr inż. Norbert Piotrowski (np.piotrowski@gmail.com) – Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

## Model zużycia tarczy docierającej

Większość opracowanych modeli zużycia tarczy docierającej zakłada, że intensywność zużycia zależy od intensywności styku narzędzia z obrabianymi przedmiotami poprzez ziarna ściernie [7, 10]. Jednym ze sposobów określenia intensywności kontaktu jest obliczenie gęstości ścieżek ziaren ściernych. Można przewidzieć, że podczas procesu docierania aktywnych ponad milion ziaren ściernych. Jednakże ze względu na czas obliczeń należy określić odpowiednią liczbę ziaren, która odzwierciedla liczbę rzeczywistą.

Na rys. 2 przedstawiono przykład obliczenia zużycia tarczy docierającej dla 5 losowo wybranych ziaren. Na początkowym etapie rozmieszczenie ziaren w pierścieniu prowadzącym jest generowane za pomocą funkcji losowej (rys. 2a). Następnie trajektorie ziaren są obliczane na podstawie wyprowadzonych równań kinematycznych [4, 5] (rys. 2b–c). Funkcja interpolacji służy do obliczania zbioru punktów, które są jednakowo oddalone od siebie (rys. 2d). Pole tarczy dzielone jest na niewielkie kwadraty o jednakowym polu. Na ostatnim etapie gęstość ścieżek jest obliczana za pomocą funkcji statystycznej, która zlicza całkowitą liczbę punktów w każdym kwadracie powierzchni tarczy docierającej (rys. 2e).

Aby ustalić, czy zużycie powoduje wklęsłość lub wypukłość tarczy, intensywność kontaktu jest określana dla profilu tarczy docierającej. Można to osiągnąć przez podzielenie jej powierzchni na równe pierścienie o szerokości  $r$ . Gęstość trajektorii jest miarą punktów w odpowiednim obszarze (rys. 2e) i można ją wyznaczyć z równania:

$$D_i = \frac{n_i}{A_i - A_{i-1}} = \frac{n_i}{(2i-1)\pi r^2} \quad (1)$$

gdzie:  $n_i$  – liczba punktów na polu  $A_i$ ,

Wielkość zużycia tarczy w docieraniu może być opisana za pomocą tribologicznego modelu Prestona [11]. Natomiast równanie intensywności ścierania materiału przez ziarna w obrębie każdego pierścienia, które uwzględnia intensywność kontaktu oraz prędkość dowolnego punktu na płycie docierającej, ma postać:

$$H_i = \frac{kp \sum v_i}{(2i-1)\pi r^2} \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik Prestona,  $p$  – nacisk jednostkowy,  $v$  – prędkość analizowanego punktu.

W docieraniu 1-tarczowym współczynnik  $k$  oraz nacisk  $p$  są stałe w czasie. Dlatego przy porównywaniu różnych układów wielkości te mogą zostać pominięte. Odchylenie standardowe  $S_D$  wszystkich wartości  $H_i$  określa wzór:

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_i^N (H_i - \bar{H})^2}{N-1}}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots N) \quad (3)$$

gdzie:  $\bar{H}$  – wartość średnia intensywności ścierania,  $N$  – całkowita liczba obszarów, na które podzielono tarczę docierającą [10].

## Optymalizacja parametrów kinematycznych

Analiza kinematyki docierania 1-tarczowego pokazała, że podstawowe parametry kinematyczne mają duży wpływ na rozkład trajektorii ziaren ściernych oraz ich prędkości. Aby zachować odpowiednią płaskość narzędzia, kluczowe są odpowiedni dobór tych parametrów oraz ich optymalizacja.

Głównym kryterium optymalizacji jest równomierność zużycia tarczy docierającej  $U$  (poszukiwana jest wartość maksymalna):

$$U = \left(1 - \frac{S_D}{\bar{H}}\right) \cdot 100\% \quad (4)$$

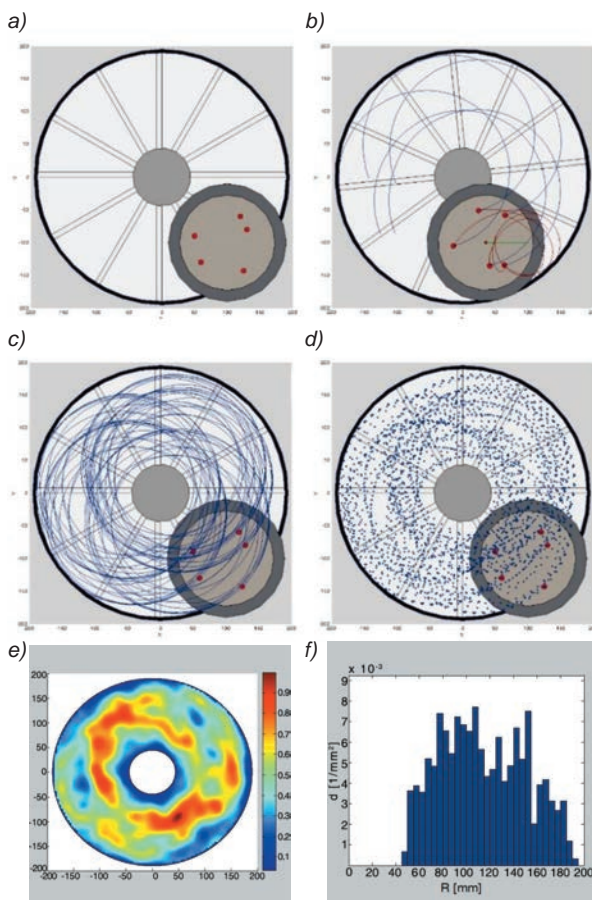
W celu uproszczenia optymalizacji parametrów kinematycznych dla układów docierania 1-tarczowego – standardowego i z ruchem posuwisto-zwrotnym [5] – określono 2 bezwymiarowe parametry –  $k_1$  i  $k_2$ :

$$k_1 = \frac{\omega_s}{\omega_t} \quad (5)$$

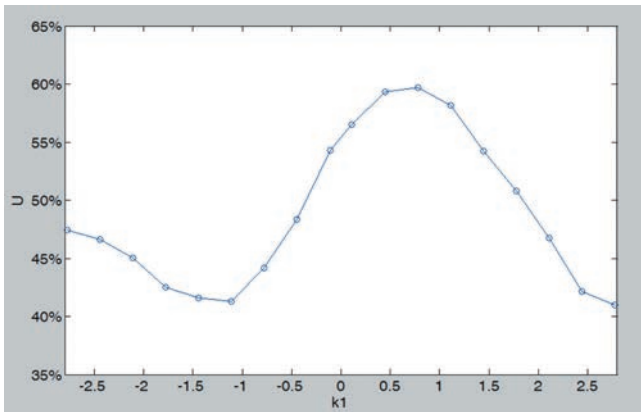
$$k_2 = \frac{T_R}{T_T} = \frac{d}{v_R} \frac{\omega_t}{\pi} \quad (6)$$

gdzie:  $\omega_s$  – prędkość kątowa pierścienia prowadzącego,  $\omega_t$  – prędkość tarczy docierającej,  $d$  – długość ruchu posuwisto-zwrotnego,  $T_R$  – okres pojedynczego ruchu pierścienia prowadzącego,  $T_T$  – okres pojedynczego obrotu tarczy docierającej.

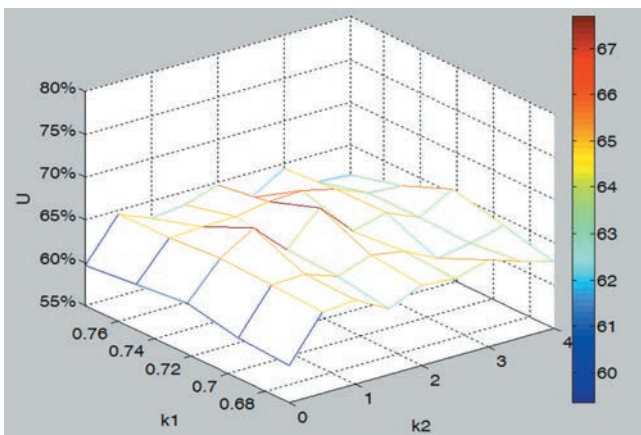
Wyniki symulacji równomierności zużycia tarczy docierającej dla 1000 losowo wygenerowanych ziaren ściernych przedstawiono na rys. 3 i 4. Równomierność obliczono dla tarczy o średnicy zewnętrznej 350 mm i średnicy wewnętrznej 88 mm. Czas symulacji wyniósł 60 s. Wyniki wskazują, że w celu uzyskania wyższych wartości równomierności zużycia w standardowym systemie parametr  $k_1$  powinien wynosić ok.  $0,6 \pm 0,9$ . Zauważono, że trajektorie ziaren ściernych dla tych wartości mają kształt pericykloid. Dla układu z ruchem posuwisto-zwrotnym sugerowane



Rys. 2. Etapy wyznaczania gęstości trajektorii na tarczy docierającej: a) generowanie losowych ziaren ściernych, b–c) generowanie trajektorii, d) interpolacja trajektorii, e) obliczanie gęstości trajektorii na tarczy docierającej, f) profilowa gęstość trajektorii



Rys. 3. Wykres równomierności zużycia  $U$  względem parametru  $k_1$  dla standardowego układu docierania 1-tarczowego (1000 losowych ziaren ściernych, położenie promieniowe pierścienia prowadzącego  $R = 125$  mm, czas symulacji  $t = 60$  s)



Rys. 4. Wykres równomierności zużycia  $U$  względem parametrów  $k_1$  i  $k_2$  dla układu docierania 1-tarczowego z ruchem posuwisto-zwrotnym pierścienia prowadzącego (1000 losowych ziaren ściernych, czas symulacji  $t = 60$  s)

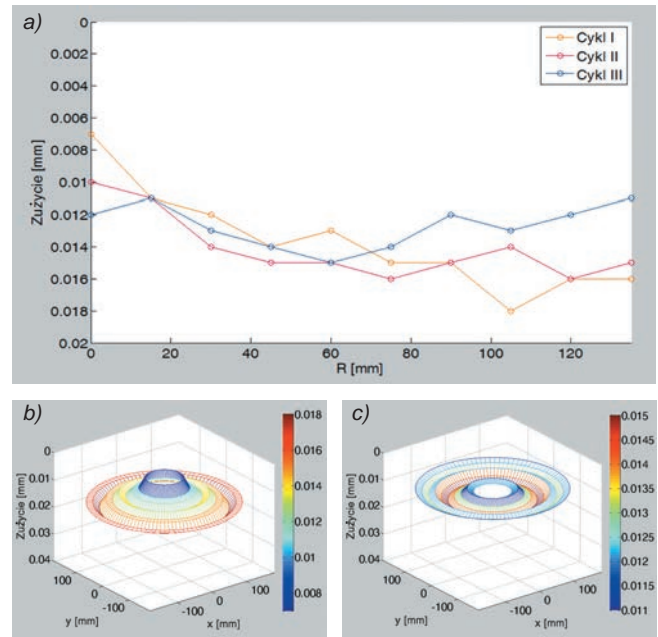
parametry to  $k_1 = 0,7 \div 0,75$  i  $k_2 = 1 \div 2$ . Uzyskana równomierność jest o 10% większa niż w przypadku układu konwencjonalnego.

## Wyniki eksperymentu

Badania eksperymentalne zostały podzielone na 3 cykle i przeprowadzono je na specjalnie zbudowanym stanowisku laboratoryjnym [5]. Parametry dla każdego cyklu przedstawiono w tabelicy. W każdym z nich tarcze docierano przez 30 min. Mierzono wielkość zużycia tarczy za pomocą czujnika, który stanowi część stanowiska badawczego. Pomiary wykonano w 10 punktach oddalonych od siebie o 15 mm. Wyniki przedstawiono na rys. 5. W celu określenia równomierności zużycia tarczy docierającej wzdłuż promienia dla każdego cyklu obliczono odchylenie standardowe, które wynosiło odpowiednio: 0,0031 mm, 0,0020 mm i 0,0013 mm.

**TABLICA. Parametry kinematyczne w kolejnych cyklach badań eksperymentalnych**

Cykl docierania	I	II	III
Prędkość obrotowa tarczy $\omega_t$ , obr/min	55	55	55
Prędkość obrotowa pierścienia $\omega_s$ , obr/min	35	35	35
Odległość minimalna pierścienia od środka tarczy $R_{min}$ , mm	125	125	125
Długość ruchu liniowego $d$ , mm	0	150	150
Prędkość maksymalna ruchu liniowego $v$ , mm/s	0	275	550



Rys. 5. Zużycie tarczy docierającej po 3 cyklach obróbki: a) zużycie profilowe, b) kształt zużycia po pierwszym cyklu (bez dodatkowego ruchu pierścienia prowadzącego), c) kształt zużycia po trzecim cyklu (z ruchem posuwisto-zwrotnym pierścienia prowadzącego)

## Podsumowanie

Zauważono, że wprowadzenie dodatkowego ruchu pierścienia prowadzącego w układzie docierania 1-tarczowego pozwala na uzyskanie bardziej równomiernego zużycia tarczy docierającej. Preferowanymi parametrami kinematycznymi dla systemu z ruchem posuwisto-zwrotnym są  $k_1 = 0,7 \div 0,75$  i  $k_2 = 1 \div 2$ . Ponadto przeprowadzono badania eksperymentalne dla układu standardowego i z ruchem posuwisto-zwrotnym. Spośród wszystkich cykli odchylenie standardowe osiągnęło najniższą wartość dla cyklu III, w którym zastosowano preferowane parametry – w tym przypadku profil zużycia był najbardziej równomierny.

## LITERATURA

- Uhlmann E., Ardelt T., Spur G. "Influence of kinematics on the face grinding process on lapping machines". *CIRP Annals*. 48, 1 (1999): s. 281–284.
- Barylski A. „Podstawy docierania jednotarczowego powierzchni płaskich”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Mechanika*. 67 (1992).
- Barylski A. „Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach”. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2013.
- Barylski A., Piotrowski N. „Koncepcje niekonwencjonalnych układów kinematycznych docierania jednotarczowego z wykorzystaniem robota”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 36–33.
- Barylski A., Piotrowski N. „Badania i analiza dokładności powierzchni docierarki jednotarczowej z ruchem posuwowym pierścienia prowadzącego”. *Mechanik*. 89, 8–9 (2016): s. 1076–1077.
- Marinescu I.D., Uhlmann E., Doi T. „*Handbook of Lapping and Polishing*”. Taylor & Francis Publishing House, 2007.
- Ichikawa K., Ishikawa K., Suwabe H. “A basic study on corrective techniques to recovering accuracy of deteriorated lapping plate”. *Japan Society of Precision Engineering*. 3 (1988): s. 234–236.
- Neauport J., Destribats J., Maunier C., Ambard C., Cormont P., Pintault B., Rondeauet O. “Loose abrasive slurries for optical glass lapping”. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 49 (2010): s. 5736–5745.
- Heisel U., Jakob P. “Research on the workpiece kinematics in face lapping with friction drive”. *Advanced Materials Research*. 565 (2012): s. 318–323.
- Zhao D., Wang T., He Y., Lu X. “Kinematic optimization for chemical mechanical polishing based on statistical analysis of particle trajectories”. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 26, 4 (2013): s. 556–563.