

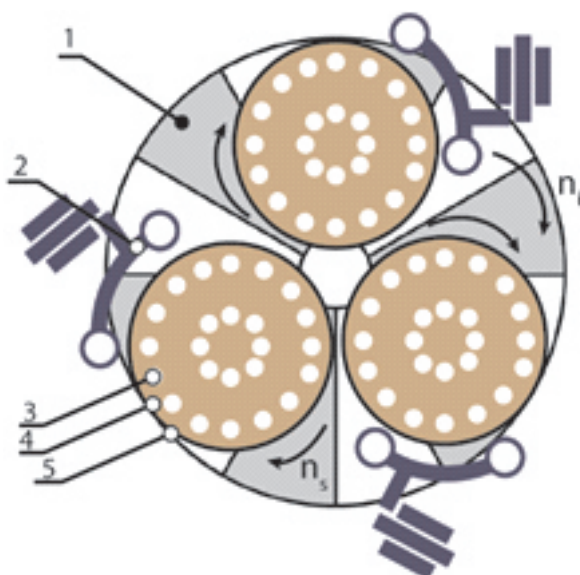
# Warunki kinematyczne obróbki powierzchni płaskich i walcowych na docierarkach tarczowych

ADAM BARYLSKI \*

Docieranie, jako ścierna obróbka bardzo dokładna, stosowane jest nie tylko w wytwarzaniu elementów metalowych i niemetalowych, ale i w procesie przygotowywania próbek do badań warstwy wierzchniej. Zwykle czynności te realizuje się w kilku etapach, począwszy od szlifowania, poprzez docieranie wstępne i wykończeniowe oraz polerowanie mechaniczne lub chemiczno-mechaniczne. Docieranie powierzchni płaskich wykonuje się na docierarkach jednotarczowych, zaś płasko-równoległych na obrabiarkach dwutarczowych. Docieranie powierzchni walcowych realizowane jest również między dwoma obracającymi się tarczami, jednak przy odmiennym układzie kinematycznym. Warunki kinematyczne docierania maszynowego mają zasadniczy wpływ na intensywność obróbki oraz jakość kształtowanej powierzchni. Przedstawienie kinematyki docierarek tarczowych jest głównym celem artykułu.

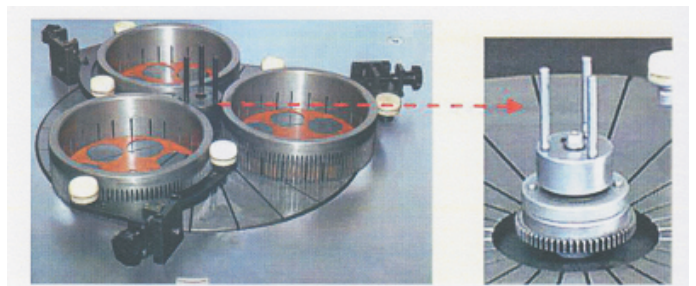
## Kinematyka docierarek jednotarczowych

Podstawowym układem kinematycznym docierania jednotarczowego powierzchni płaskich jest układ pierścieniowy (rys. 1), w którym elementy obrabiane ułożone są w indywidualnie zaprojektowanych separatorach i poruszane przez pierścienie prowadzące (od jednego do czterech – zależnie od średnicy tarczy docierającej). Pierścienie te obracają się



Rys. 1. Standardowy układ wykonawczy docierarki jednotarczowej ze swobodnym napędem pierścieni prowadzących: 1 – tarcza docierająca (docierak), 2 – dźwignia prowadząca, 3 – przedmiot docierany, 4 – separator przedmiotowy, 5 – pierścień prowadzący [3]

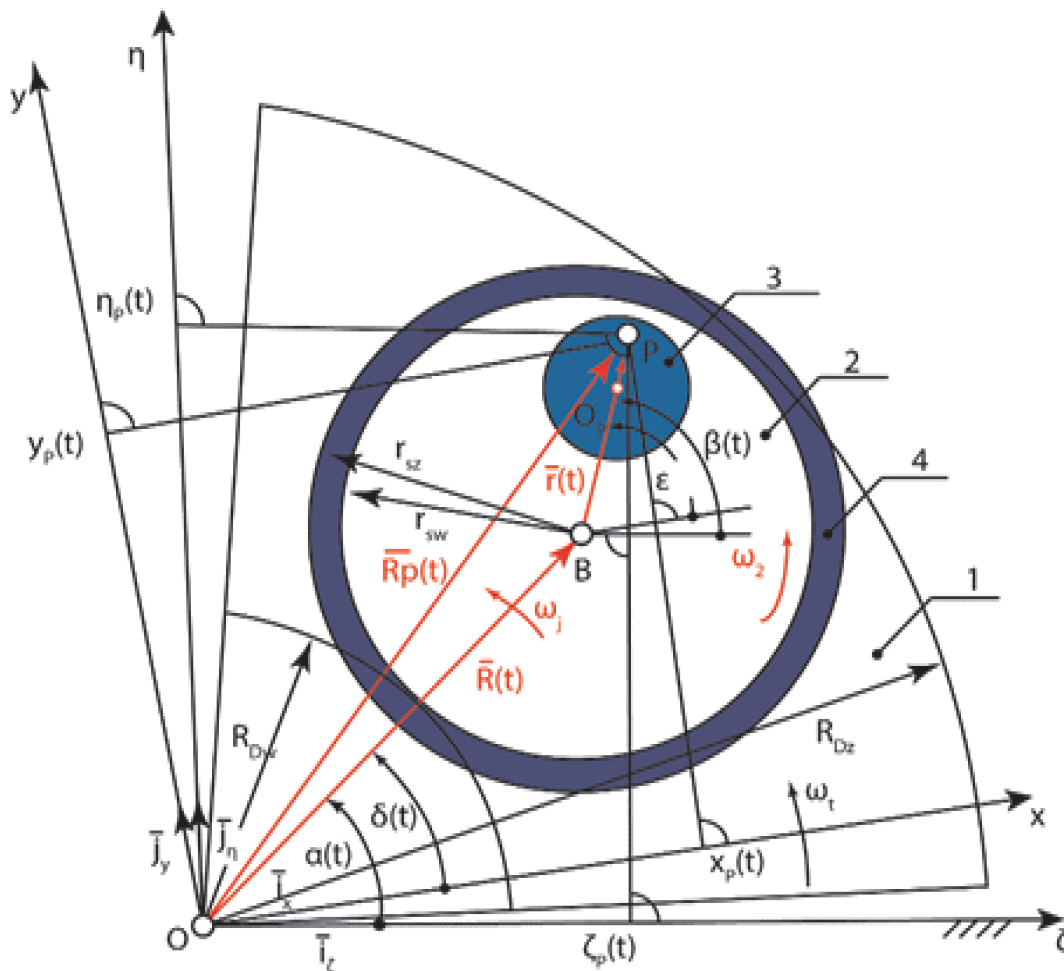
w wyniku współpracy z ruchomą tarczą docierającą. Ich prędkość obrotowa zależy od warunków tarcia w układzie wykonawczym obrabiarki, a więc między innymi od lepkości składników płynnych zawiesiny ścierniej i intensywności jej dawkowania oraz wywieranego obciążenia na obrabiane elementy. Jedynie nieliczni producenci docierarek jednotarczowych, przykładowo firma GMT, proponuje wymuszony (dodatkowy) napęd pierścieni prowadzących (rys. 2).



Rys. 2. Układ wykonawczy docierarki jednotarczowej z wymuszonym napędem pierścieni prowadzących [6]

W celu opisanego kinematyki docierania jednotarczowego należy wyznaczyć położenie dowolnego punktu  $P$  położonego na powierzchni przedmiotu obrabianego, określonego za pomocą promienia wodzącego  $\vec{R}_p(t)$  w układzie abso-

\* Prof. dr hab. inż. Adam Barylski, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Instytut Technologii Maszyn i Materiałów, abarylsk@pg.edu.pl.



Rys. 3. Schemat układu kinematycznego standardowej docierarki jednotarczowej: 1 – docierak (tarcza docierająca), 2 – separator, 3 – przedmiot obrabiany, 4 – pierścień prowadzący [3]

lutnym  $\zeta$ - $\eta$  i układzie względnym  $x$ - $y$ , związanym z obracającym się docierakiem (rys. 3). Ruch punktu  $P$  można opisać równaniami podanymi w tabeli 1.

Współrzędne  $x_p$  i  $y_p$  są ciągłymi funkcjami czasu i można je opisać równaniami:

$$x_p(t) = R \cdot \cos(\omega_j \cdot t - \omega_t \cdot t) + r \cdot \cos(\omega_2 \cdot t - \omega_t \cdot t) \quad (1)$$

$$y_p(t) = R \cdot \sin(\omega_j \cdot t - \omega_t \cdot t) + r \cdot \sin(\omega_2 \cdot t - \omega_t \cdot t) \quad (2)$$

Prędkość względną w układzie przedmiot-docierak wynika z różnicy prędkości kątowej pierścienia prowadzącego i prędkości kątowej tarczy docierającej. Można wprowadzić dodatkowy parametr  $k$ , w postaci:

$$k = \frac{\omega_2 - \omega_t}{\omega_j - \omega_t} \quad (3)$$

przy czym w standardowym układzie kinematycznym docierarki jednotarczowej ( $\omega_j = 0$ ):

$$k = \frac{\omega_2}{\omega_t} \quad (4)$$

Równania ruchu przyjmują wtedy postać:

$$x_p(t) = R \cdot \cos(-\omega_t \cdot t) + r \cdot \cos(-k \cdot \omega_t \cdot t) \quad (5)$$

$$y_p(t) = R \cdot \sin(-\omega_t \cdot t) + r \cdot \sin(-k \cdot \omega_t \cdot t) \quad (6)$$

Tabela 1. Równania ruchu dowolnego punktu  $P$  w czasie  $t$  [3]

W układzie absolutnym $\zeta$ - $\eta$	W układzie względnym $x$ - $y$
$\bar{R}_p(t) = \zeta_p(t)\bar{i}_\zeta + \eta_p(t)\bar{j}_\eta$	$\bar{R}_p(t) = x_p(t)\bar{i}_x + y_p(t)\bar{j}_y$
$\begin{bmatrix} \zeta_p(t) \\ \eta_p(t) \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos \varepsilon \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix}$
$\alpha(t) = \omega_j t$	$\delta(t) = (\omega_j - \omega_t)t$
$\beta(t) = \omega_2 t$	$\varepsilon(t) = (\omega_2 - \omega_t)t$
$\omega_t$ – prędkość kątowa tarczy docierającej $\omega_2$ – prędkość kątowa pierścienia prowadzącego $\omega_j$ – prędkość kątowa wyobraźni jarzma (w docierarkach jednotarczowych $\omega_j = 0$ )	

Wartość chwilowej prędkości punktu  $P$  wyraża się wzorem:

$$\bar{v}_p(t) = |\dot{\bar{v}}_p(t)| = \sqrt{\dot{x}_p(t)^2 + \dot{y}_p(t)^2} \quad (7)$$

Uwzględniając równanie (1) i (2) otrzymujemy wzór na prędkość chwilową:

$$v_p(t) = \sqrt{\omega_t^2 R^2 + (\omega_2 - \omega_t)^2 r^2 - 2\omega_t(\omega_2 - \omega_t)rR\cos(-\omega_2 t)} \quad (8)$$

zaś po uwzględnieniu wzoru (4) mamy:

$$v_p(t) = \sqrt{\omega_z R^2 + k^2 r^2 + 2rRk \cos(-\omega_2 t)} \quad (9)$$

Długość trajektorii punktu  $P$  w czasie  $t = t_2 - t_1$  można wyznaczyć ze wzoru:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v_p(t) dt \quad (10)$$

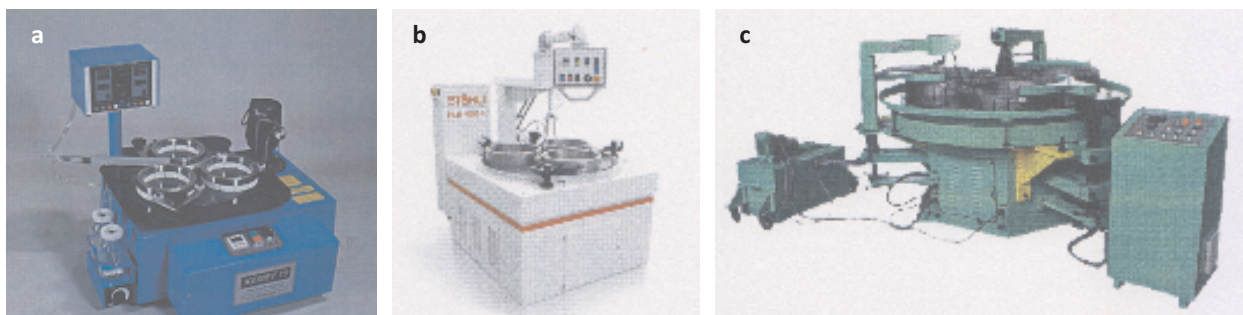
Średnią prędkość docierania  $v_{sr}$  dowolnego punktu  $P$  na powierzchni docieranej określa zależność:

$$v_{sr} = \frac{1}{T_z} \int_0^{T_z} v_p(t) dt \quad (11)$$

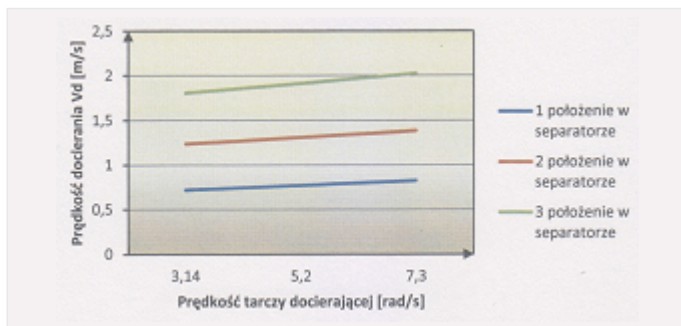
gdzie  $T_z = 2\pi / |\omega_2|$  jest czasem jednego cyklu ruchu (trajektorii).

Ocenę wpływu podstawowych warunków kinematycznych i geometrycznych na prędkość docierania jednotarczowego powierzchni płaskich przeprowadzono na przykładzie obrabiarek firm: Kemet, Stähli i GMT (rys. 4) [4].

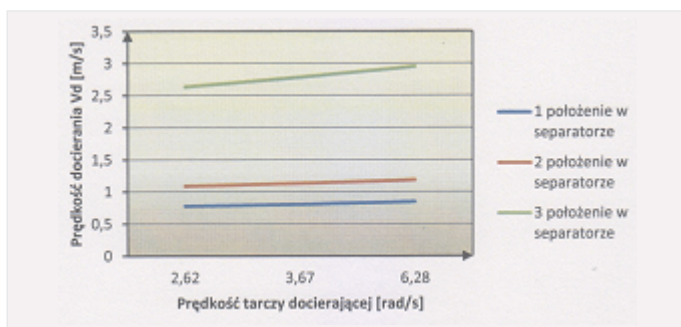
Docierarka Kemet 15 ma regulowany stół i automatyczny system dozujący zawieszinę ścierną z wymienną dyszą. Występuje płynna regulacja prędkości obrotowej tarczy docierającej (chłodzonej labiryntowo wodą) oraz wprowadzono ceramiczne zakończenie powierzchni stykowych trzech pierścieni prowadzących [7]. Docierarka FLM 1000 umożliwia stosunkowo szybką wymianę tarczy docierającej, która również jest chłodzona wodą, zaś odpowiednie ułożyskowanie narzędzia zapewnia cichą pracę obrabiarki. Zastosowany system dawkowania zapobiega nadmiernemu wydatkowi zawiesziny ścierniej w czasie obróbki [9]. Docierarka GMT 06-07



Rys. 4. Docierarka jednotarczowa: a) Kemet 15 (średnica zewnętrzna tarczy docierającej  $D_z = 381$  mm, maksymalna prędkość obrotowa tarczy docierającej  $n_z = 70$  min<sup>-1</sup>, liczba pierścieni prowadzących (separatorów)  $i = 3$ ) [7], b) FLM 1000 firmy Stähli ( $D_z = 1000$  mm,  $n_z = 60$  min<sup>-1</sup>,  $i = 3$ ) [9], c) GMT 06-07 ( $D_z = 1800$  mm,  $n_z = 10-32$  min<sup>-1</sup>,  $i = 4$ ) [6]



Rys. 5. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki Kemet 15 (położenie 1:  $r_p = 132$  mm, położenie 2:  $r_p = 150$  mm, położenie 3:  $r_p = 167$  mm)

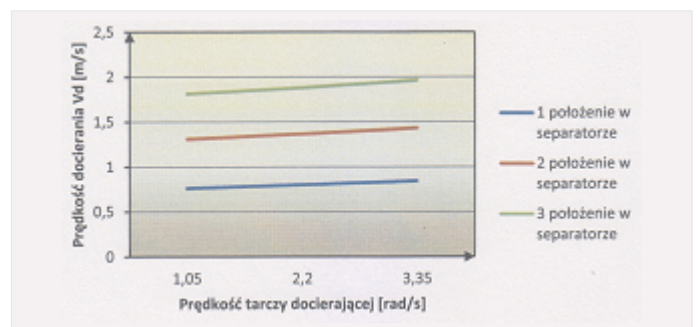


Rys. 6. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki FLM 1000 (położenie 1:  $r_p = 328$  mm, położenie 2:  $r_p = 378$  mm, położenie 3:  $r_p = 434$  mm)

posiada również regulowaną prędkość obrotową narzędzia oraz system chłodzenia wodnego [6].

Na rys. 5 przedstawiono wpływ odległości  $r_p$  środka kołowego elementu docieranego od osi obrotu tarczy docierającej i jej prędkości kątowej na prędkość docierania  $v_d$  w punkcie centralnym przedmiotu w przypadku docierarki Kemet 15.

Identyczne obliczenia wykonano dla docierarki FLM 1000 (rys. 6) oraz GMT 06-07 (rys. 7).



Rys. 7. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki GMT 06-07 (położenie 1:  $r_p = 605$  mm, położenie 2:  $r_p = 695$  mm, położenie 3:  $r_p = 787$  mm)

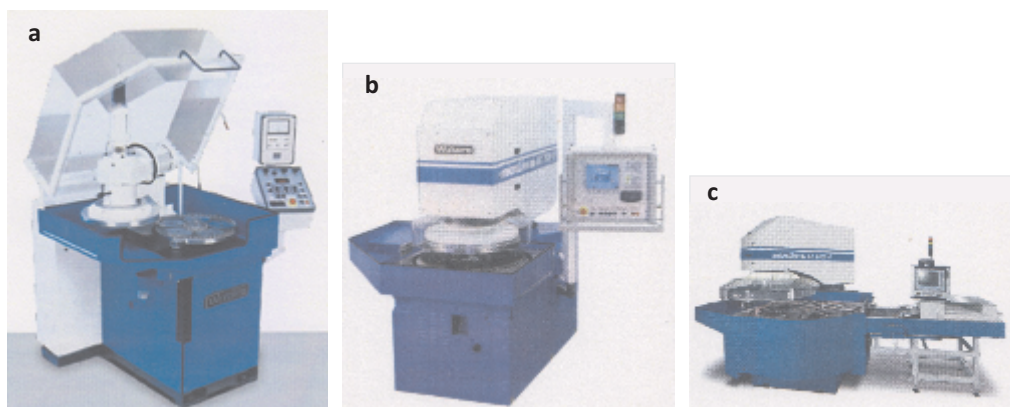
### Kinematyka docierarek dwutarczowych do obróbki powierzchni płasko-równoległych

Do analizy kinematyki docierania powierzchni płasko-równoległych na docierarkach dwutarczowych wybrano obrabiarki: AC 470F, AC 1000F i AC 2000F firmy Peter Wolters (rys. 8). Na rys. 9 zamieszczono schemat układu wykonawczego docierarki dwutarczowej oraz widok przestrzeni roboczej. Docierarki dwutarczowe do płaszczyzn posiadają często bezstopniowy napęd obydwóch tarcz docierających oraz we-

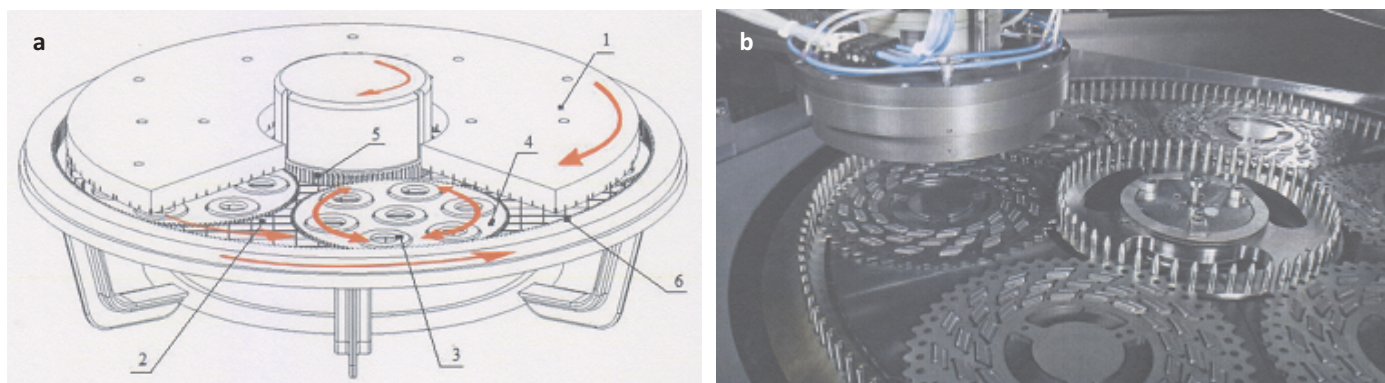
wnętrznego napędzającego pierścienia kołkowego (lub zębatego). Bardziej szczegółowo kinematykę docierania dwutarczowego przedstawiono w pracy [2].

Na rys. 10 przedstawiono wpływ odległości  $r_{ps}$  środka kołowego elementu docieranego od osi obrotu separatora i prędkości kątowej tarczy docierającej na prędkość docierania  $v_d$  w punkcie centralnym przedmiotu w przypadku docierarki AC 470F.

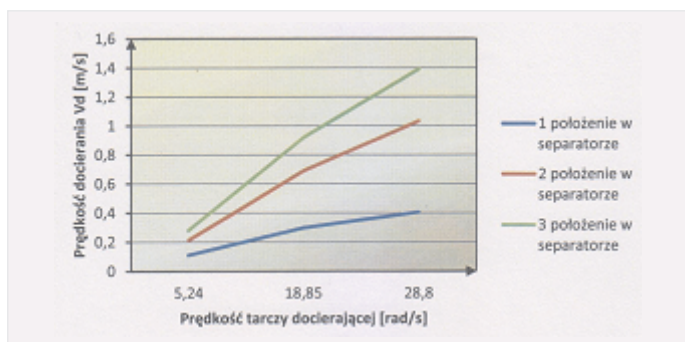
Identyczne obliczenia wykonano dla docierarki AC 1000F (rys. 11) oraz AC 2000F (rys. 12).



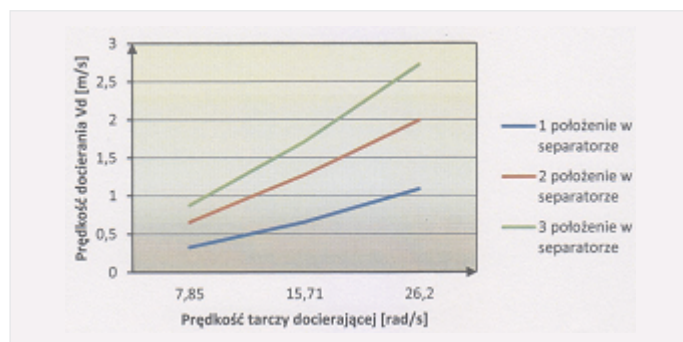
Rys. 8. Widok docierarki dwutarczowej firmy Peter Wolters: a) AC 470F ( $D_z = 475 \text{ mm}$ ,  $n_1 = 50-275 \text{ min}^{-1}$ ,  $i = 5$ ), b) AC 1000F ( $D_z = 1050 \text{ mm}$ ,  $n_1 = 150/250/250 \text{ min}^{-1}$ ,  $i = 5$ ), c) AC 2000F ( $D_z = 1809 \text{ mm}$ , wartość maksymalna  $n_1 = 40 \text{ min}^{-1}$ ,  $i = 5$ ) [8]



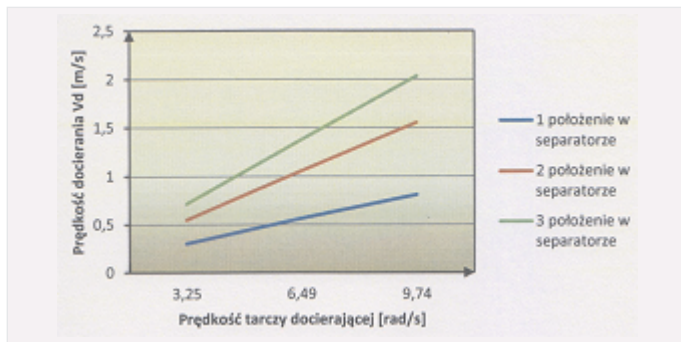
Rys. 9. Schemat standardowego układu wykonawczego docierarki dwutarczowej do obróbki powierzchni płasko-równoległych: 1 – górna tarcza docierająca, 2 – dolna tarcza docierająca, 3 – przedmiot docierany, 4 – separator, 5 – wewnętrzny pierścień napędzający układu obiegowego, 6 – nieruchomy pierścień zewnętrzny (a) oraz widok przestrzeni roboczej docierarki firmy Peter Wolters z sześcioma separatorami i przy uniesionym i odsuniętym docieraku górnym (b) [8]



Rys. 10. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki AC 470F (położenie 1:  $r_{ps} = 13,75 \text{ mm}$ , położenie 2:  $r_{ps} = 41,05 \text{ mm}$ , położenie 3:  $r_{ps} = 62,62 \text{ mm}$ )



Rys. 11. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki AC 1000F (położenie 1:  $r_{ps} = 27 \text{ mm}$ , położenie 2:  $r_{ps} = 78,77 \text{ mm}$ , położenie 3:  $r_{ps} = 139,56 \text{ mm}$ )



Rys. 12. Zmienność prędkości docierania  $v_d$  w zależności od prędkości kątowej tarczy docierającej i położenia docieranego elementu w separatorze docierarki AC 2000F (położenie 1:  $r_{ps} = 53,49$  mm, położenie 2:  $r_{ps} = 151,84$  mm, położenie 3:  $r_{ps} = 249,16$  mm)

**Kinematyka docierania maszynowego wałków**

Docieranie zewnętrznych powierzchni walcowych może odbywać się między dwiema tarczami w separatorze poruszającym się mimośrodowo względem obracających się narzędzi (rys. 13 a) lub w tzw. układzie bezkłowym (rys. 13 b) [5,10,11]. Na rys. 14 podano przykład docierania powierzchni walcowych w układzie dwutarczowym.

W tym układzie kinematycznym docierania wałków o promieniu  $r$  (rys. 15), rozpatrując punkt  $O_r(A)$  położony w połowie długości obrabianego przedmiotu, wyróżnić można: prędkość kątową tarczy docierającej  $\omega_a$  i separatora  $\omega_c$

względem jego środka  $O_c$ , prędkość kątową separatora  $\omega_{co}$  względem środka układu  $O$ , kąt pochylenia osi przedmiotu w gnieździe separatora  $\alpha$ , prędkość kątową docieranego wałka  $\omega_{roll}$ , odległość  $L_{co}$  środka separatora  $O_c$  od środka tarczy  $O$  i odległość  $L_{rc}$  punktu  $O_r(A)$  od środka separatora  $O_c$ , zaś punkt  $O_r$  leżący na osi wałka  $N$  jest oddalony od środka tarczy docierającej o wartość  $L_{ro}$ . Chwilowe położenie odpowiednich wektorów prędkości w ruchu względnym docierania pokazano na rys. 16.

Ponieważ prędkość docierania (poślizgu wałka) wynosi:

$$|V'_{Ar}| = |V_{Ao}| \cos \varphi_3 - |V_{ro}| \cos \varphi_5 \tag{12}$$

zaś:  $\varphi_{co} = \omega_{co}t$ ,  $\varphi_{rc} = \omega_{rc}t$  oraz  $\varphi_1 = 180^\circ - \omega_{co}t$  ( $t$  oznacza czas), zatem:

$$L_{ro} = [(L_{co})^2 + (L_{rc})^2 + 2L_{co}L_{rc} \cos(\omega_{rc}t)]^{1/2} \tag{13}$$

oraz

$$|V_{Ao}| = \omega_a L_{ro} \tag{14}$$

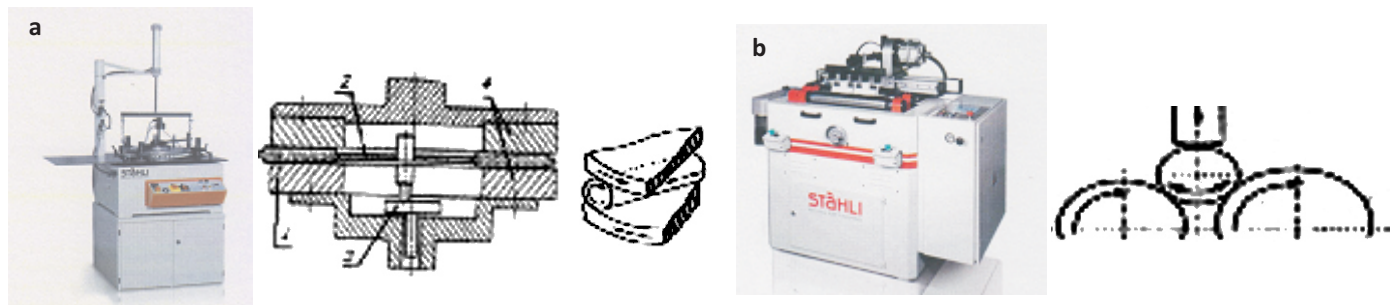
a więc:

$$|V_{ro}| = [(\omega_{co}L_{co})^2 + (\omega_{rc}L_{rc})^2 + 2\omega_{co}L_{co}\omega_{rc}L_{rc} \cos(\omega_{rc}t)]^{1/2} \tag{15}$$

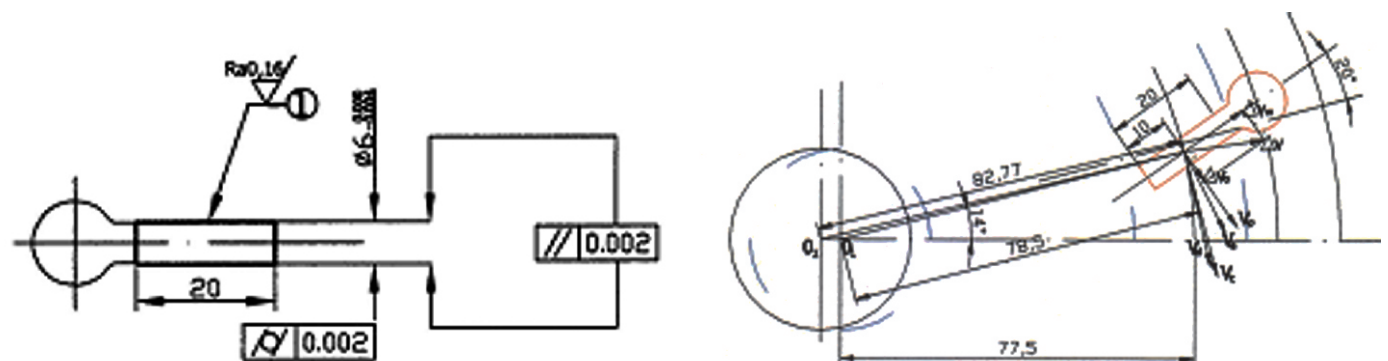
zatem:  $\varphi_2 = \arcsin[L_{rc} \sin(\omega_{rc}t)/L_{ro}]$ ,  $\varphi_3 = \alpha + \varphi_{rc} - \varphi_2$ ,

$\varphi_4 = \arctan[|V_{rc}| \sin \varphi_{rc} / (|V_{co}| + |V_{rc}| \cos \varphi_{rc})]$  i  $\varphi_5 = \varphi_{rc} + \alpha - \varphi_4$

oraz  $\omega_{roll} = V'_{Ar}/r$  (16)

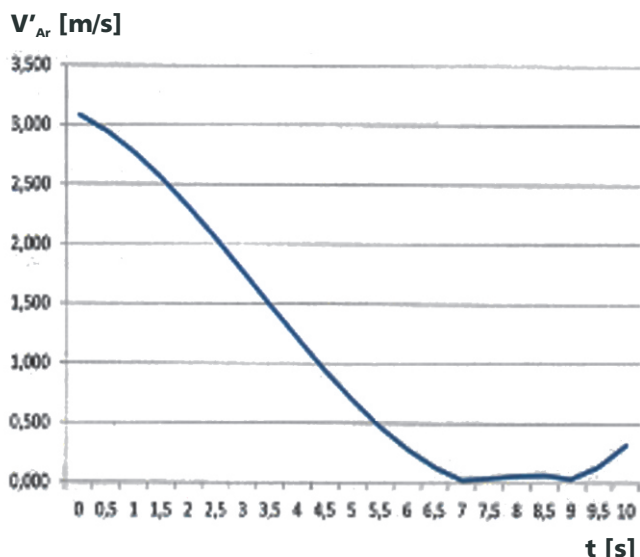


Rys. 13. Widok i charakterystyka ogólna obrabiarek firmy Stähli: a) docierarka dwutarczowa do wałków FLM 500-R ( $D_z = 500$  mm,  $n_1 = 0-75$  min<sup>-1</sup>, średnica docieranego wałka 0,7-30 mm, długość docieranego wałka 5-200 mm): 1 – docierany przedmiot, 2 – separator, 3 – napęd mimośrodowy separatora, 4 – tarcze docierające (górna i dolna) obracające się w kierunkach przeciwnych, b) docierarka CLM 500 pracująca wg. tzw. układu bezkłowego (wykorzystująca narzędzia w kształcie walców, średnica docieranego wałka 3-150 mm) [9]

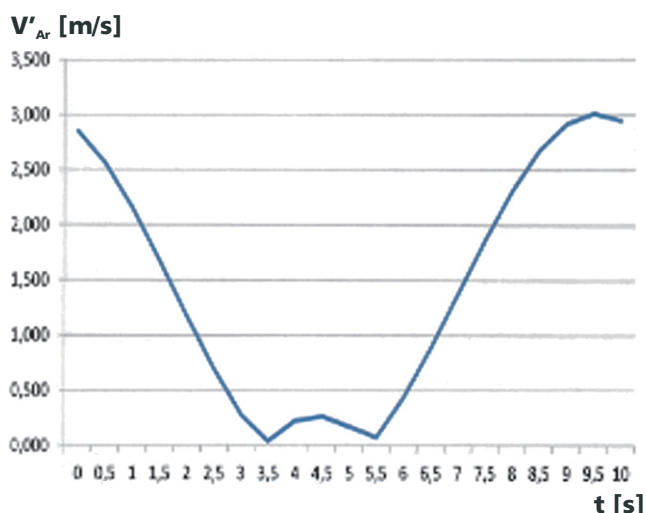


Rys. 14. Przykład docierania dwutarczowego powierzchni walcowej w separatorze mimośrodowym





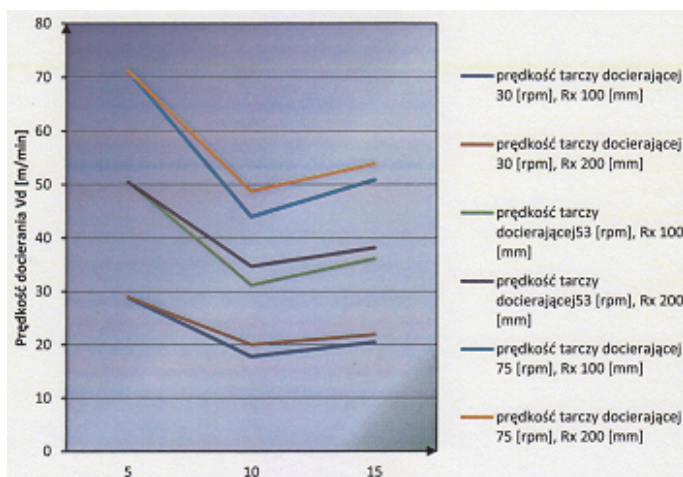
Rys. 17. Zależność prędkości  $V'_{Ar}$  w funkcji czasu  $t$  ( $L_{co} = 156$  i  $L_{ro} = 160$  mm,  $\alpha = 0,349$  rad,  $\omega_b = 10,5$ ,  $\omega_{rc} = 0,350$  i  $\omega_{co} = 0,339$  rad/s)



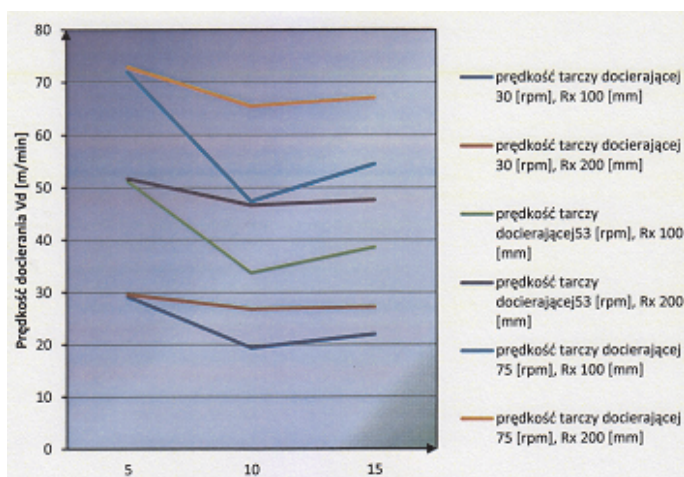
Rys. 18. Zależność prędkości  $V'_{Ar}$  w funkcji czasu  $t$  ( $L_{ro} = 140$  mm,  $\omega_{rc} = 0,628$  rad/s, pozostałe warunki jak dla rys. 23)

Na rys. 17 i 18 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń prędkości docierania wałków o średnicy 20 mm i długości 60 mm na docierarce AL00-1-Z.

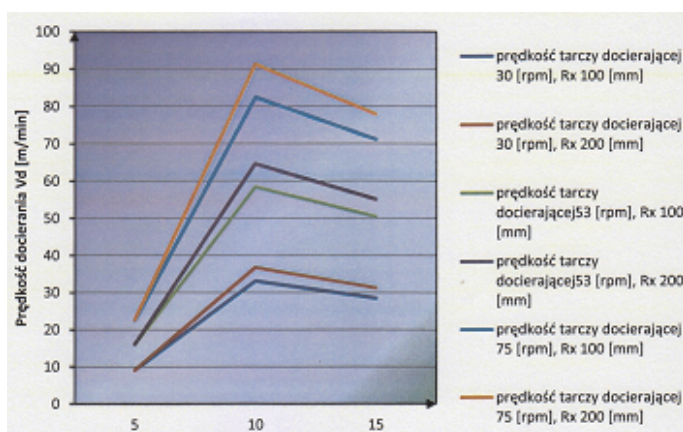
Na rys. 19–21 przedstawiono wyniki wykonanych analiz kinematyki dla docierarki FLM 500-R.



Rys. 19. Wpływ prędkości obrotowej tarczy docierającej i odległości  $R_x$  rozpatrywanego punktu obrabianego wałka (środek jego tworzącej) od osi obrotu separatora oraz kąta pochylenia  $\alpha$  (5, 10 i 15 stopni) na wypadkową prędkość docierania (dla  $N = 0,9n$ , gdzie:  $N$  – prędkość obrotowa górnej tarczy docierającej,  $n$  – prędkość obrotowa dolnej tarczy docierającej)



Rys. 20. Wpływ prędkości obrotowej tarczy docierającej i odległości  $R_x$  rozpatrywanego punktu obrabianego wałka (środek jego tworzącej) od osi obrotu separatora oraz kąta pochylenia  $\alpha$  (5, 10 i 15 stopni) na wypadkową prędkość docierania (dla  $N = 0,5n$ )



Rys. 21. Wpływ prędkości obrotowej dolnej tarczy docierającej i odległości  $R_x$  rozpatrywanego punktu obrabianego wałka (środek jego tworzącej) od osi obrotu separatora oraz kąta pochylenia  $\alpha$  (5, 10 i 15 stopni) na wypadkową prędkość docierania (dla  $N = 0$ )

## Uwagi ogólne

W procesie docierania oddziaływania zewnętrzne wpływają na obciążenie aktywnych mikroziaren ściernych (warunki sterowane: nacisk jednostkowy, koncentracja dawkowanych mikroziaren) oraz dotyczą kinematyki i dynamiki docierania (rozkład prędkości względnych w czasie jednego cyklu ruchu, rozkład przyspieszeń, siły skrawania, rozmieszczenie przedmiotów w separatorach, przemieszczanie separatorów). Kinematyka docierania wpływa na zużycie i stan płaskości powierzchni czynnych tarcz docierających, a więc warunkuje dokładność kształtu powierzchni obrobionej.

Docierarki tarczowe są zwykle wykorzystywane w sposób uniwersalny, jako przeznaczone do obróbki wstępnej lub wykończeniowej materiałów metalowych i ceramicznych, o małej lub dużej twardości. Sytuacja ta wymaga zmian prędkości docierania, jako jednego z głównych parametrów skrawania. Bezstopniowy napęd elementów układu wykonawczego docierarek ułatwia optymalny dobór kinematyki procesu, zaś opracowywane programy symulacyjne poszerzają spektrum układów kinematycznych docierarek jedno- i dwutarczowych, mogących mieć zastosowanie w ścierniej obróbce bardzo dokładnej powierzchni płaskich, płasko-równoległych i walcowych.

## Literatura

1. Barylski A.: Analiza możliwości docierania dwutarczowego wałków w aspekcie kinematyki. *Mechanik*. 2017, nr 8-9, s. 766-768.
2. Barylski A.: Docieranie i szlifowanie powierzchni płasko-równoległych na docierarkach dwutarczowych. *Obróbka Metalu*. 2024, nr 2, s. 22-29.
3. Barylski A.: Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013.
4. Jabłoński M.: Analiza kinematyki docierarek tarczowych. Praca dyplomowa, prowadzący pracę A. Barylski, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, 2013.
5. Jiang L., Yao W., He Y., Cheng Z., Yuan J., Luo J.: An experimental investigation of double-side processing of cylindrical rollers using chemical mechanical polishing technique. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 82. s. 523-534.
6. Materiały informacyjne firmy GMT.
7. Materiały informacyjne firmy Kemet.
8. Materiały informacyjne firmy Peter Wolters.
9. Materiały informacyjne firmy Stähli.
10. Yao W., Yuan J., Zhou F., Chen Z., Zhao T., Zhong M.: Trajectory analysis and experiments of both-sides cylindrical lapping in eccentric rotation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 88. s. 2849-2859.
11. Yuan J., Yao W., Zhao P., Lyu B., Chen Z., Zhong M.: Kinematics and trajectory of both-sides cylindrical lapping process in planetary motion type. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2015, vol. 92, s. 60-71. ■