

# Rozwój obrabiarek skrawających – aktualne trendy\*

MACIEJ MATUSZEWSKI, IVAN L. OBORSKI, OLEG POLISHCHUK, MICHAŁ STYP-REKOWSKI\*\*

Obrabiarki skrawające to dominująca grupa maszyn technologicznych. Stosowane były w procesach produkcyjnych już od wieków, cały czas zmieniając swoją formę. W artykule przedstawiono rozwój wybranych zespołów funkcyjnych: sterującego, wrzeciennika i prowadnic. Ich rozwój w największym stopniu przyczynił się do stwierdzonych zmian. Przedstawiono także trendy jakie aktualnie obserwuje się w budowie obrabiarek.

## Wprowadzenie

Wśród szeroko pojętych maszyn technologicznych najliczniejszą grupę tworzą obrabiarki skrawające. Stanowią one istotne elementy w strukturze przedsiębiorstw, gdyż są niezbędne do realizacji przyjętych przez nie zadań. Obrabiarki skrawające występują począwszy od zakładów wytwarzających wszelkiego rodzaju maszyny, urządzenia bądź elementy do nich (a więc realizujące zasadnicze dla danej branży procesy technologiczne), do przedsiębiorstw utrzymujących te maszyny w zdadności eksploatacyjnej, poprzez zakłady realizujące naprawy i remonty, a więc tę zdadność obrabiarkom przywracających. Z tego powodu poniższe rozważania przepro-

wadzono właśnie na przykładzie tej grupy maszyn.

Celem niniejszego opracowania jest wskazanie obszarów, w których obserwuje się najwyraźniejsze trendy w zakresie budowy obrabiarek skrawających. Są to obszary, w których producenci obrabiarek dostrzegają potrzebę, ale też i możliwości doskonalenia swoich produktów finalnych. Ze względów oczywistych najczęściej uwagi i środków poświęca się tym zespołom, które mają największy wpływ na wydajność, dokładność i powtarzalność obróbki. Dążenie do osiągnięcia najlepszych rezultatów obróbki jest jednym z czynników zróżnicowanego zaangażowania producentów obrabiarek w badania mające na

celu doskonalenie funkcjonowania poszczególnych zespołów, a tym samym i całych maszyn.

## Rozwój obrabiarek skrawających – rys historyczny

Już ok. 4000 roku p.n.e w Mezopotamii powstał mechanizm, który można uznać za pierwowzór obrabiarki. Powstała wówczas wiertarka z napędem ręcznym, tzw. sznurkowym. Jego ciągłość, lecz o zmiennym kierunku, można było uzyskać gdy sznurek stanowił cięciwę łożka. W taki napęd, nazywany smyczkowym, była wyposażona pierwsza tokarka, która powstała w Grecji ok. 1900 roku p.n.e.

Do średniowiecza konstrukcja obrabiarek skrawających zmieniała się ewolucyjnie – rys. 1a. Zmiany skokowe nastąpiły gdy do budowy obrabiarek użyto metali, a do napędu obrabiarek wykorzystano energię zewnętrzną:

– wody, dzięki stosowaniu do tego celu kół wodnych,

– maszyny parowej (rok 1763).

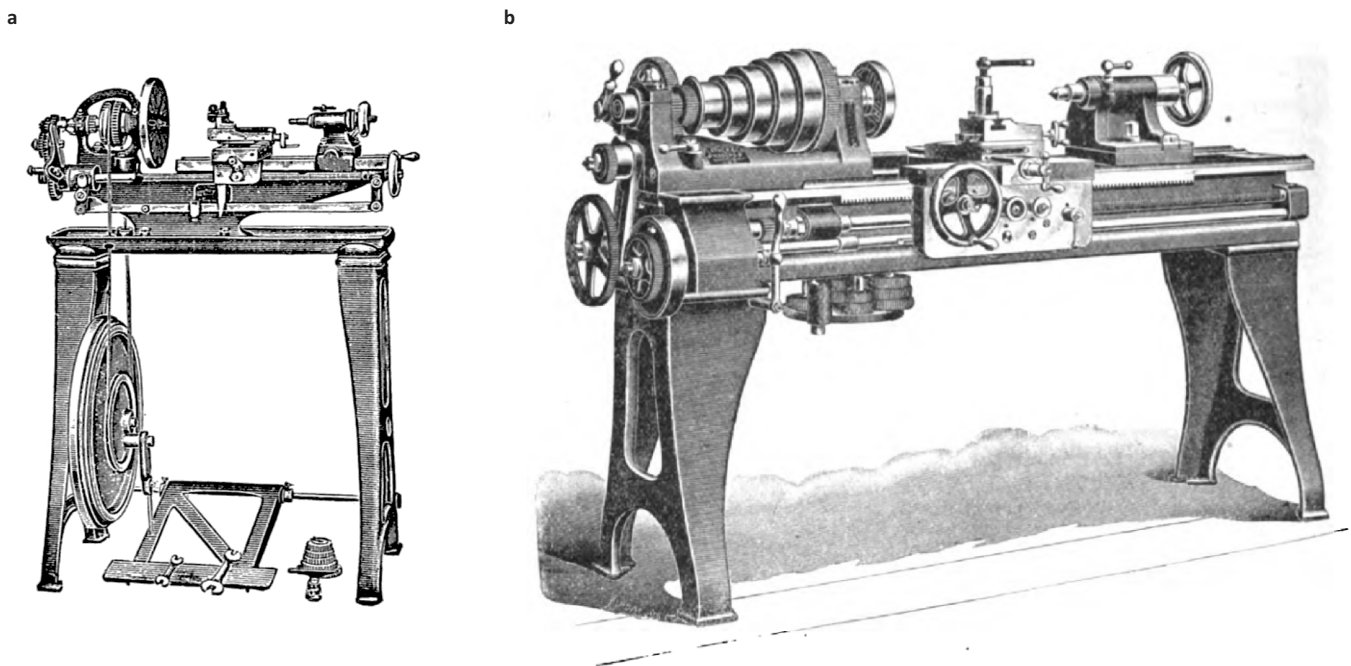
\* Artykuł był prezentowany na XI Seminarium *Twórczość inżynierska dla współczesnej Europy* organizowanym cyklicznie przez Bydgoski Oddział Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP).

\*\* Dr hab. inż. M. Matuszewski, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Prof. I.L. Oborski – Narodowy Uniwersytet Technologii i Wzornictwa, Kijów, Ukraina, Prof. O. Polishchuk – Narodowy Uniwersytet Techniczny, Chmielnicki, Ukraina, Prof. dr hab. inż. M. Styp-Rekowski, Bydgoska Szkoła Wyższa.

W obydwóch przypadkach napęd od źródła przekazywany był za pomocą przekładni pasowych – rys. 1b. Taki też napęd miała skonstruowana w 1797 roku przez Anglika Henry Maudslaya pierwsza tokarka wykonana z metalu, wyposażona w suport krzyżowy napędzany śrubą pociągową za pośrednictwem kół zmianowych. Po raz pierwszy w obrabiarce zastosowano więc wymuszone prowadzenie narzędzia.

Można przyjąć, że zastosowanie w strukturze konstrukcyjnej silników elektrycznych zakończyło praktycznie bezpośrednie wykorzystanie energii mięśni człowieka w procesie obróbki (w zakresie ruchu obrabianego elementu i narzędzi), a więc proces mechanizacji. Zaczął się jednak nowy etap, którego celem było zminimalizowanie, a docelowo wyeliminowanie udziału człowieka w sterowaniu procesem obróbki, czyli procesy

jego skomplikowania wyrażają liczby: na powierzchni 12 na 6 metrów ustawione były 42 szafy o wysokości 3 m zawierające 18.800 lamp szesnastu rodzajów. W obwodach elektrycznych połączono 6.000 komparatorów, 1.500 przełączników 50.000 oporników, których montaż wymagał wykonania ręcznie ok. 500.000 połączeń lutowanych. Całość ważyła ok. 30 Mg i miała zainstalowane odbiorniki o łącznej mocy 140 kW [6],



Rys. 1. Tokarki: a) z napędem siłami mięśni ludzkich (połowa XIX wieku), b) z napędem pasowym od centralnego wału transmisyjnego (1901 r.)

Pierwszą frezarkę z napędem pasowym opracował w 1818 roku Amerykanin Eli Whitney.

Kolejny znaczący krok w rozwoju obrabiarek spowodowany był opracowaniem silnika elektrycznego. W 1822 roku, na bazie doświadczeń Michaela Faradaya, Anglik Peter Barlow skonstruował prototyp silnika elektrycznego, zwany później *Kołem Barlowa*. Pierwszy pracujący silnik elektryczny na prąd stały zbudowano i opatentowano w 1837 r. w USA, a jego wynalazcą był Thomas Davenport. Silnik osiągał prędkość obrotową  $n=450$  obr/min. Kolejne rozwiązania konstrukcyjne silników, a także używane do ich budowy materiały powodowały, że stawały się one coraz doskonalsze, a proces ten obserwuje się do dzisiaj.

automatyzacji i robotyzacji obrabiarek i obróbki [1].

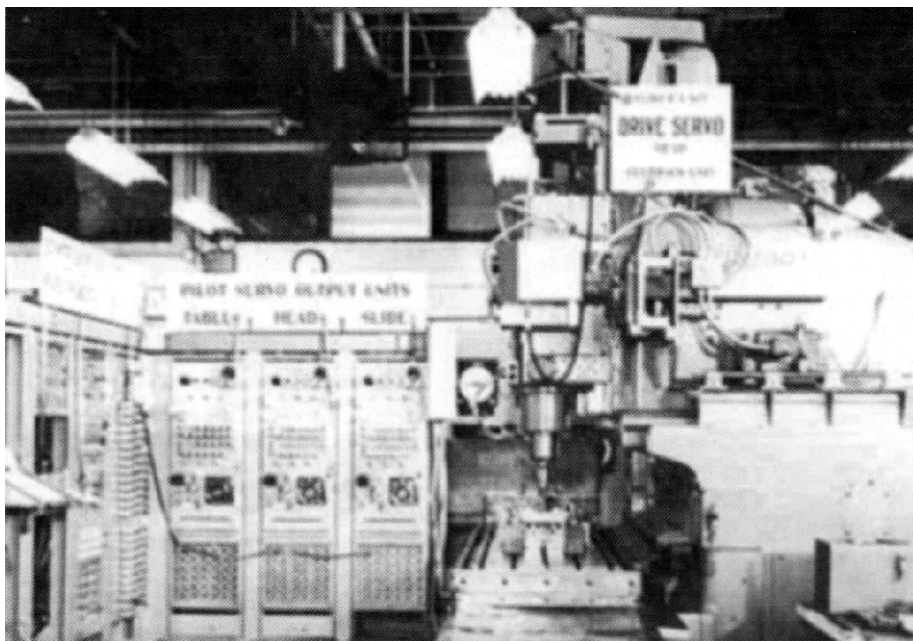
W początkowej fazie tego etapu najistotniejszym problemem był sposób zapisywania poleceń dla maszyny. Do chwili, gdy do tego celu zaczęto używać komputerów, zapisywano je najpierw na nośnikach perforowanych: na kartach (od 1805 roku), a następnie, od 1858 roku – na taśmach [6].

Wynalezienie komputerów otworzyło nowy rozdział w budowie obrabiarek, ponieważ stworzyło warunki do stosowania w nich zupełnie nowego rodzaju sterowania. Pierwszy, lampowy programowalny komputer ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) zbudowano w 1942 roku na uniwersytecie w Pensylwanii (USA). Stopień

lecz jego możliwości były nieporównywalnie mniejsze choćby z dzisiejszym kieszonkowym iPad-em.

W roku 1949 dla celów wojskowych zbudowano w USA pierwszą obrabiarkę numeryczną. Komputerem była maszyna licząca, pracująca w oparciu o taśmę perforowaną. Sterował on silnikami dodanymi do tradycyjnej frezarki, umożliwiające obróbkę w trzech osiach. Obrabiarka obsługiwana była przez człowieka, a komputer obliczał jedynie drogę narzędzi niezbędną do uzyskania oczekiwanego kształtu. Obrabiarka z tamtych czasów zajmowała wiele miejsca – rys.2.

Należy jednak zauważyć, że obrabiarka zajmowała tylko niewielką część całkowitej przestrzeni; pozostała – zajęta była



Rys. 2. Pierwsza obrabiarka (frezarka) z napędem NC – rok 1949

przez komputer. W rezultacie wynaleźnienia tranzystorów (rok 1947) wyeliminowano ze struktury komputerów lampy, co spowodowało, że znacznie uproszczyła się struktura nowszych ich wariantów.

Dalszy rozwój obrabiarek przejawiał się zmianami praktycznie we wszystkich ich zespołach funkcyjnych, co doprowadziło do zupełnej zmiany obrazu współczesnych obrabiarek skrawających. Widoczne jest to wyraźnie na fotografii – rys. 3.

W dalszej części tego opracowania zmiany te przedstawione zostaną w odniesieniu do zespołów, które zdaniem

autorów w największym stopniu przyczyniły się do postępu w zakresie budowy obrabiarek.

### Rozwój wybranych zespołów funkcyjnych obrabiarek, współczesne trendy

W rezultacie zachodzącego postępu technicznego cechy konstrukcyjne obrabiarek skrawających ulegały ciągłym zmianom. W swojej strukturze konstrukcyjnej mają one jednak wciąż zespoły spełniające te same lub bardzo podobne funkcje. Bardzo istotnie różnią się natomiast rozwiązaniami konstrukcyjnymi tych zespołów, co powoduje, że

zakres realizowanych przez nie zadań i sposób ich realizacji jest inny. Wynika to w sposób oczywisty z różnicy czasu, w jakim porównywane obrabiarki powstały. Szczegółowa analiza różnic wykazuje, że w największym stopniu różnią się one sterowaniem i to zarówno ruchu narzędzi jak też przemieszczania się obrabianego przedmiotu.

Analizując strukturę tej grupy maszyn technologicznych zidentyfikować można zespoły realizujące podczas obróbki różne zadania. Każdy z tych zespołów ma duży wpływ na rezultaty końcowe obróbki, przy czym jest on w dużym stopniu zróżnicowany w odniesieniu do poszczególnych zespołów funkcyjnych. W pierwszym przypadku, a więc obrabiarki sprzed prawie dwóch stuleci, był to układ sterowania całkowicie ręcznego, w drugim zaś – obrabiarki współczesnej – w pełni automatycznego (CNC). Obserwując dynamikę zmian można stwierdzić, że najistotniejsze zmiany – zmiany jakościowe, następowały skokowo, jako skutek wynalazków, a w czasie między nimi miały one charakter ewolucyjny [2].

Poniżej przedstawiono przykłady ewolucji wybranych zespołów funkcyjnych, przy czym wybrano te, których postęp przyczynił się zdaniem autorów w największym stopniu do zwiększenia efektywności, jakości i powtarzalności procesów wytwarzania.

### Zespół sterowania

Potrzeba zmian w układach sterowania obrabiarek wynikała z dążenia człowieka do wytwarzania produktów w sposób powtarzalny, gdyż w przypadku sterowania ręcznego praktycznie było to nieosiągalne. Najbardziej efektywne działania w tym zakresie przedstawiono w poprzednim rozdziale. Można przyjąć, że od lat 70-tych XX wieku następuje doskonalenie układów sterowania obrabiarek ze sterowaniem typu NC.

W tym rozwoju zidentyfikować można dwa bardzo znaczące kroki. Na początku tej dekady zastosowano po raz pierwszy układy scalone w układzie sterowania numerycznego obrabiarek, a w 1972 roku, w obrabiarkowych układach sterowania po raz pierwszy



Rys. 3. Współczesne centrum obróbkowe CNC

zastosowano mikrokomputer – był to zatem początek sterowania CNC.

Rozwój układów sterowania CNC odbywa się dwutorowo. Pierwszy z obserwowanych kierunków wynika z dynamicznego rozwoju komputerów (mini- i mikro-), m.in. w rezultacie stosowania coraz doskonalszych układów scalonych (hardware). Postęp jest także rezultatem wdrażania nowych, coraz bardziej uniwersalnych i prostszych języków programowania (software). Działania te zwiększają w znaczący sposób możliwości i wydajność obrabiarki, a także jakość obróbki.

Drugi kierunek rozwoju układów wynika z równie dynamicznego postępu w zakresie elementów wykonawczych, np. stosowanie nowych typów silników elektrycznych, doskonalenie systemów mocowania, zarówno narzędzi jak i przedmiotów obrabianych, a także doskonalenie układów pomiarowych. Działania te przyczyniają się do zwiększenia dokładności i powtarzalności wytwarzanych produktów.

Podsumowując można stwierdzić, że rezultatem wymienionych wyżej zmian współczesne obrabiarkowe układy sterowania CNC charakteryzują się dwiema podstawowymi cechami [6]:

- są to układy sterowania programowego, w programie których w formie alfanumerycznej opisano parametry technologiczne realizowanego procesu technologicznego, np.: prędkość skrawania, jego głębokość, posuw, oraz funkcji pomocniczych, jak: włączanie i wyłączanie mediów chłodząco-smarujących, obrót stołu. Program zawiera także wartości cech geometrycznych produktu dotyczące jego wymiarów i kształtów. Program jest więc planem pracy obrabiarki, w rezultacie której wykonany zostanie element o zdefiniowanych kształtach i wymiarach, a także o oczekiwanej strukturze powierzchni (chropowatości i kierunkowości);
- są to układy charakteryzujące się elastycznością programu sterującego. Dla sterowania CNC wymieniony wyżej wymóg sterowania programowego jest zatem jedynie warunkiem koniecznym, lecz nie wystarczającym. Tym drugim warunkiem jest możliwość szybkiej

modyfikacji programu, np. w celu skorygowania zauważonych błędów lub zmiany wymiarów obrabianego elementu.

Wymienione cechy powodują, że obrabiarki ze sterowaniem CNC mogą być wykorzystywane zarówno w produkcji powtarzalnej (mało- i średnioseryjnej) jak również w coraz częściej realizowanej produkcji jednostkowej. W przypadku obróbki jednostkowej obrabiarki te, dzięki swoim cechom, mogą stanowić elementy elastycznych systemów wytwarzania FEM (*Flexible Manufacturing System*) zapewniających realizację procesu w warunkach produkcji powtarzalnej [7].

Pomimo znaczącego już rozwoju sterowania CNC obrabiarek obserwuje się dalsze intensywne działania w tym zakresie, a w nich zauważyć można następujące trendy:

- rozwój cyfrowych układów sterujących. Zastosowanie w układach sterujących minikomputerów lub mikrokomputerów znacznie zwiększa możliwości i jakość sterowania;
- wdrażanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych w samych obrabiarkach, głównie w zakresie układów napędowych i pomiarowych obrabiarek dzięki czemu obrabiarki są coraz lepiej dostosowane do sterowania cyfrowego;
- postęp w zakresie działań dotyczących przygotowania produkcji, przede wszystkim rozwój języków i systemów programowania z jednoczesnym ich upraszczaniem. Dąży się przy tym do tego, aby nowe wersje języków były kompatybilne z dotychczas używanymi.

### Zespół wrzecionowy

Drugim zespołem funkcyjnym obrabiarek, w którym zaszły bardzo istotne zmiany jest zespół wrzeciona obrabiarki. Postęp w zakresie inżynierii materiałowej spowodował, że do obróbki skrawaniem używa się obecnie materiałów narzędziowych pozwalających na obróbkę ze znacząco większymi niż w latach ubiegłych wartościami parametrów obróbki. Do tego trendu musieli się dostosować konstruktorzy obrabiarek. Wymagania dotyczące dokład-

ności obróbki oraz dużych prędkości skrawania stanowiły przesłankę dla poszukiwania nowych jakościowo rozwiązań zespołów wrzecionowych. W wyniku tego, powstały m.in. wrzecienniki kompaktowe, których przykłady przedstawiono na rys. 4.

Elektrowrzeciona szybkoobrotowe wyposażone są w łożyska ceramiczne. Dzięki temu znacząco poprawiają się warunki pracy, m.in. zmniejsza się temperatura robocza pracujących w ekstremalnych warunkach łożysk, a w efekcie zwiększa się ich trwałość.

Synergiczne wykorzystanie elementów wrzeciennika polega na tym, że korpus pełni dwojakie funkcje. Z jednej strony wyznacza on przestrzeń, w której rozmieszczone są podpory łożyskowe i inne, niezbędne w danym rozwiązaniu konstrukcyjnym elementy wrzeciennika oraz umożliwia trwałe połączenie wrzeciennika z korpusem obrabiarki. Z drugiej strony, wykorzystywany jest on jako obudowa silnika, w której rozmieszczone są uzwojenia stojana. Podwójną funkcję spełnia też wrzeciono – oprócz tradycyjnej, jest także wałkiem wirnika silnika z umieszczonymi na nim uzwojeniami. W prezentowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym wrzeciennika kompaktowego obydwie elementy są więc wsparte na jednych łożyskach. W sposób istotny zmniejsza to opory ruchu, a tym samym ilość ciepła, które powoduje niekorzystną zmianę warunków pracy wrzeciennika.

W efekcie synergicznego wykorzystania elementów tradycyjnego wrzeciennika oraz zastosowaniu łożysk szybko-obrotowych, uzyskuje się dwa istotne dla wrzecion parametry na wysokim poziomie, a więc prędkość obrotową wrzeciona – do  $1700 \text{ s}^{-1}$  oraz sztywność –  $460 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  [7]. Obydwie te wielkości bezpośrednio dobrze świadczą o jakości obrabiarki mierzonej jej wydajnością i jakością obróbki. Dodatkowo, wynikająca z konstrukcji mała podatność na drgania, zapewnia dużą trwałość, zarówno obrabiarki jak i używanych w obróbce narzędzi.

Podsumowując tę część rozważań można stwierdzić, że w zakresie budowy wrzecienników obserwuje się dążenie do uzyskania możliwie dużej sztywności

i prędkości obrotowej zespołu wrzecionowego, czego efektem jest stosowanie wrzecion kompaktowych, które dzięki stosowaniu specjalnych łożysk wrzecionowych są w stanie tak duże obroty uzyskiwać.

### Zespół prowadnic

Jest to zespół bezpośrednio determinujący dokładność obróbki ponieważ zespoły przemieszczające się podczas obróbki powielają drogę jaką wykonują

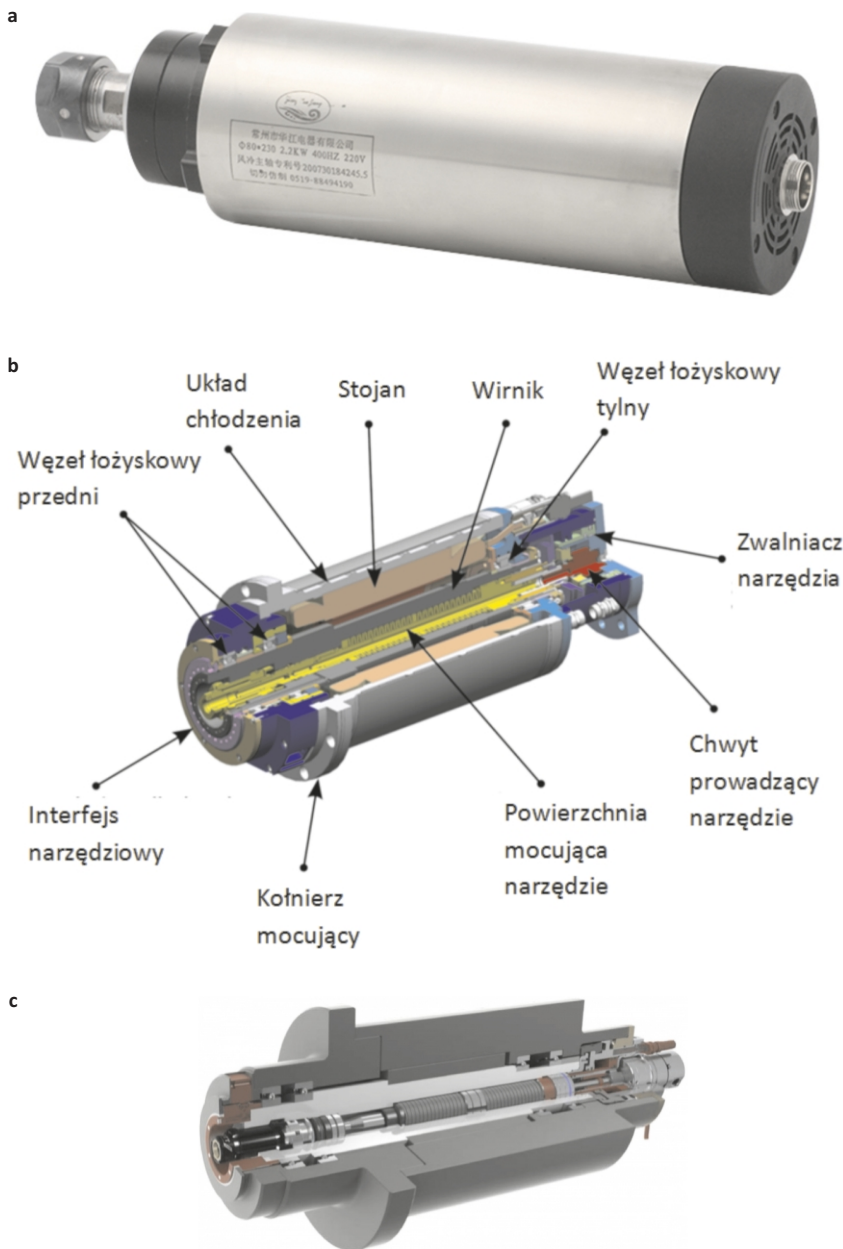
elementy prowadnic. W tym aspekcie przyczynami niedokładności przemieszczeń mogą być przede wszystkim odchyłki makrogeometrii, np. prostoliniowości, falistości, lecz w pewnym stopniu także i mikro-geometrii, gdyż elementy topografii powierzchni mogą być czynnikiem sprzyjającym powstawaniu drgań [5]. W tym obszarze obserwuje się działania mające na celu zminimalizowanie wyżej wymienionych czynników. W procesie wytwórczym prowadnic obrabiarkowym coraz częściej wykorzystywana jest ceramika techniczna rys. 5.

Przedstawione na rysunku 5a prowadnice wykonane są z dwutlenku cyrkonu ( $ZrO_2$ ) o twardości ok. 1300 HV i mogą pracować w wysokiej próżni ( $10^{-10}$  Pa), są niemagnetyczne i odporne na korozję. Podsumowując, można stwierdzić, że stosowanie ceramiki na elementy prowadnic liniowych skutkuje, m.in.:

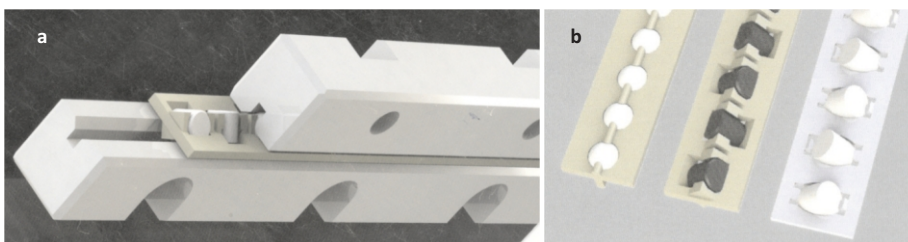
- większą trwałością oraz mniejszym ciężarem w porównaniu do stalowych prowadnic toczonej,
- dużą odpornością na ścieranie i korozję,
- odpornością na wysoką temperaturę (nawet do 800°C),
- obojętnością biologiczną.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe zastosowanie liniowych prowadnic w strukturze konstrukcyjnej stołu, np. przedmiotowego obrabiarki. Zastosowanie ceramiki technicznej na elementy prowadnic, oprócz oczywistego zwiększenia ich trwałości, pozwala ponadto na zwiększenie prędkości przemieszczania obrabianych elementów do 1 m/s przy przyspieszeniach rzędu 300 m/s<sup>2</sup>. Ponieważ ceramika jest dużo lżejsza od stali zastosowanie prowadnic ceramicznych ma także pozytywny wymiar energetyczny.

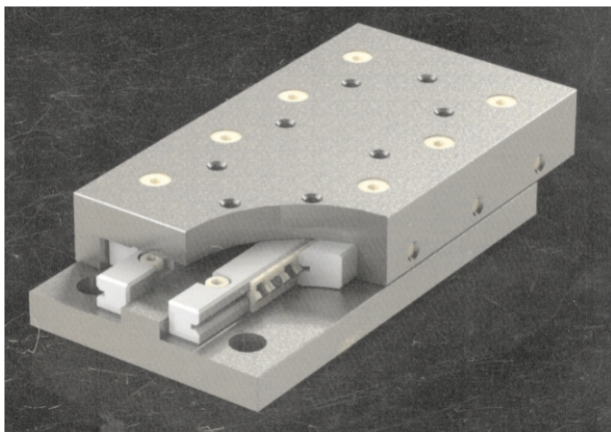
Na skutek, m.in. drgań oraz szybkozmiennych co do kierunku przemieszczeń, następuje tzw. pełzanie koszyka prowadnic liniowych. Zjawisko to może znacznie pogarszać efektywność stosowania prowadnic, zarówno w zakresie energetycznym jak i dokładności obróbki. W celu wyeliminowania skutków tego zjawiska opracowano wersję konstrukcyjną prowadnic liniowych z wymuszonym prowadzeniem koszyka – rys. 7.



Rys. 4. Przykłady wrzecienników kompaktowych: a) widok ( $\varphi 80 \times 200$  mm,  $N=2,2$  kW,  $n=400$  s<sup>-1</sup>), b i c) przekroje



Rys. 5. Ceramiczne prowadnice liniowe: a) struktura konstrukcyjna w złożeniu, b) przykładowe elementy składowe [3]



Rys. 6. Stół przedmiotowy usytuowany na ceramicznych przewodnicach liniowych [3]

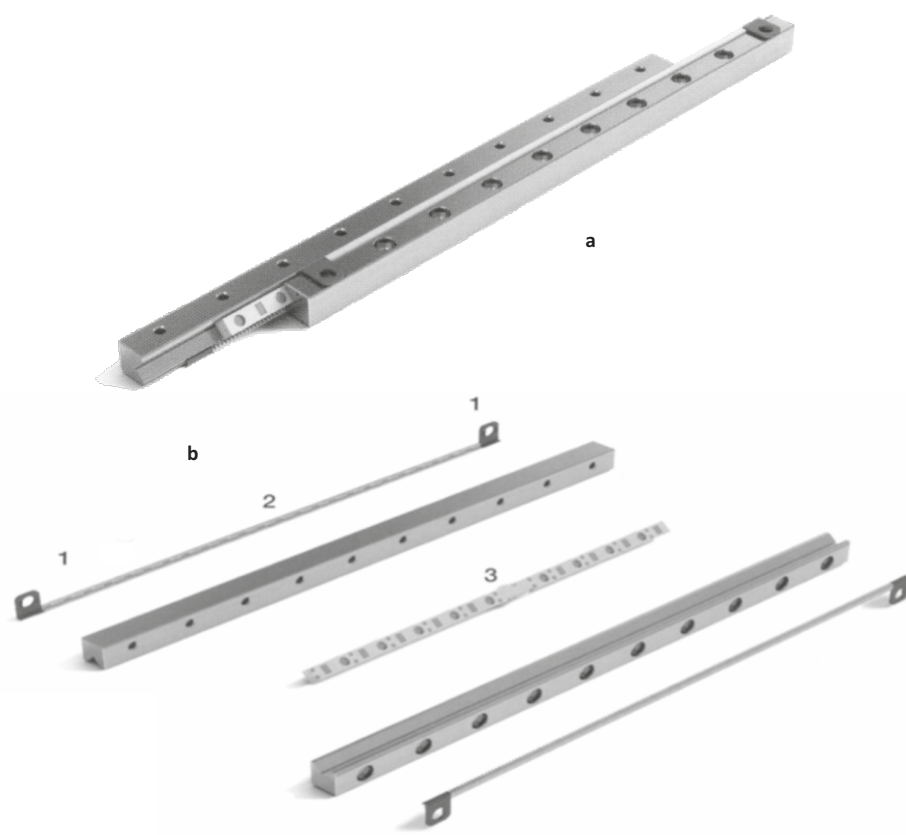
Zastosowanie takiej odmiany przewodnic liniowych powoduje lepszy, w porównaniu do przewodnic tradycyjnych, rozkład obciążenia, co w efekcie wydłuża czas poprawnej ich eksploatacji.

Reasumując, można stwierdzić, że w zakresie zespołów przewodnicowych dąży się przede wszystkim do optymalizacji materiałowych cech konstrukcyjnych elementów przewodnic, czego przejawem jest stosowanie w tym zakresie ceramiki technicznej.

## Podsumowanie

Dążenie do osiągnięcia najlepszych rezultatów obróbki jest jednym z podstawowych bodźców powodujących duże zaangażowanie producentów obrabiarek w badania mające na celu doskonalenie efektów pracy wytwarzanych przez nich obrabiarek, co jest wynikiem optymalizacji funkcjonowania poszczególnych ich zespołów. Analizując intensywność działań wytwórców tej grupy maszyn technologicznych można stwierdzić, że najwięcej uwagi i środków poświęcają oni na ulepszanie wskazanych w tej pracy zespołom. Wynika to prawdopodobnie z tego, że zespoły te mają największy wpływ na wydajność, dokładność i powtarzalność obróbki.

W rezultacie działań we wszystkich przedstawionych wyżej sferach obecnie powstają maszyny ze sterowaniem CNC, których praca zależna jest od człowieka jedynie na etapie ich programowania. W wyniku tego stworzone są warunki sprzyjające uprosz-



Rys. 7. Przewodnice liniowe z wymuszonym przewodzeniem koszyka: a) widok kompletnej przewodnicy, b) elementy składowe przewodnicy: 1 – zaciski listwy zębatej, 2 – listwy zębate, 3 – koszyk z kołami zębatymi [4]

czeniu procesu produkcyjnego, przy jednoczesnej poprawie całościowego wyniku techniczno-ekonomicznego przedsiębiorstwa, w którym maszyny takie zastosowano.

## Literatura

- [1] Fascynująca ewolucja robotów. Biuletyn FANUC Polska, No 004. Wrocław 2017.  
 [2] Horyashchenko S., Matuszewski M., Oborski I.L., Styp-Rekowski M.: Rozwój układów sterowania i zespołów wrze-

cionowych czynnikiem determinującym postęp w budowie obrabiarek skrawających. Obróbka Metalu nr 3/2017, s. 10-13.

[3] Katalog firmy ROLLICO. Ceramiczne łożyska liniowe.

[4] Katalog firmy SCHNEEBERGER. Łożyska liniowe i liniowe wózki toczne.

[5] Matuszewski M.: Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej. Wydawnictwa Uniwersytetu Techno-

logiczno-Przyrodniczego, seria Rozprawy nr 170. Bydgoszcz 2013.

[6] Sterowania CNC FANUC – mózg niezawodnych obrabiarek. Biuletyn FANUC Polska, No. 003. Wrocław 2017.

[7] Styp-Rekowski M.: Problemy tribologiczne w eksploatacji obrabiarek skrawających. w: Ozimina D. (redakcja): Eksploatacja systemów tribologicznych, t. 2: Tarcie, zużycie, smarowanie wybranych węzłów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013, s. 255-282. ■