

Kierunki rozwoju szlifowania

ANDRZEJ GOŁĄBCZAK*

Główne kierunki rozwoju szlifowania ściernicowego dotyczące: materiałów i narzędzi ściernych, obciążania ściernic, innowacyjnych metod szlifowania oraz konstrukcji szlifierek.

Rozwój obróbki ściernic jest zdeterminowany aktualnymi potrzebami i wymaganiami użytkowników, które wynikają m.in. z konieczności zapewnienia: efektywnej obróbki materiałów trudno obrabialnych, uzyskiwania wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej obrabianych przedmiotów, wymaganej chropowatości powierzchni i stanu warstwy wierzchniej, wysokiej produktywności i wydajności szlifowania, powtarzalności wyników szlifowania oraz niezawodności procesu obróbki. Wzrost zapotrzebowania rynku na części i wyroby, coraz bardziej złożone i precyzyjne wskutek ich miniaturyzacji, wymusza z kolei rozwój procesów mikroszlifowania [1, 5]. Wymienione tu wymagania uzasadniają potrzebę kompleksowego rozwoju obróbki ściernic, ukierunkowanego na: materiały i narzędzia ściernic, metody kształtowania czynnej powierzchni ściernicy (CPS), doskonalenie metod i procesów szlifowania, nowe konstrukcje szlifierek oraz systemy monitorowania i sterowania procesami obróbkowymi.

Rozwój materiałów ściernych i spoiwowych ukierunkowany jest głównie na poszukiwanie nowych materiałów oraz doskonalenie technologii ich wytwarzania. Wśród aktualnie stosowanych narzędzi ściernych dominują narzędzia z konwencjonalnych materiałów ściernych, np.: Al_2O_3 , SiC, ZrO₂, BC. Obserwuje się jednak wzrost udziału narzędzi z super-twardych materiałów ściernych, takich jak: diament naturalny, diament syntetyczny i regularny azotek boru (cBN) [1, 3, 5]. Nowe gatunki ziaren ściernych są wytwarzane głównie technologią spiekania. Umożliwiają one wytworzenie ziaren ściernych zarówno o określonych właściwościach fizycznych, jak i ukształtowanych w bryły o określonych parametrach geometrycznych. W grupie nowoczesnych materiałów ściernych na uwagę zasługują ziarna z submikrokryształicznego korundu spiekanego. Budowa tych ziaren ściernych charakteryzuje się niezwykle drobnymi krystalitami (0,1 ÷ 2 μm) połączonymi ze sobą metodą „zol-żel”. Te ziarna ściernic są oznaczane akronimem SG (*Seeded Gel*) i występują pod różnymi nazwami handlowymi np.: Cubitron – firma 3M, SG – firma Norton, Sapphire Blue – firma Hermes Schleifmittel. Stosowane są również metody powlekania ziaren ściernych powłokami (np. powłoka Duplex), które zwiększają adhezyjność ziarna do spoiwa lub, w przypadku powłok metalicznych, polepszają odprowadzenie ciepła oraz umożliwiają kierunkową orientację ziaren na CPS (np. w polu elektrycznym). Opracowano również technologię wytwarzania supertwardych, polikryształicznych ziaren ściernych z diamentu syntetycznego lub cBN metodą spiekania mikroproszków z tych materiałów oraz metodę kierunkowego osadzania i rozrostu zarodków diamentu syntetycznego z fazy gazowej. Doniesienia literaturowe wskazują także na możliwość wdrożenia do produkcji nowych ściernic supertwardych, takich jak: azotek węgla (C₃N₄) czy azotek boru i węgla.

Efektywne wykorzystanie właściwości nowych ziaren ściernic uwarunkowane jest opracowaniem nowych gatunków spoiw, które powinny zapewnić m.in.: dużą wytrzymałość, długi okres trwałości kształtu narzędzi ściernych, dużą ciągliwość, dobrą przewodność cieplną, mały współczynnik

tarcia, podatność na kształtowanie CPS. Spoiwa ceramiczne, stosowane zarówno do ściernic konwencjonalnych, jak i supertwardych, modyfikuje się poprzez wprowadzanie różnego typu dodatków i wypełniaczy, mających na celu: poprawę zwilżalności ziaren ściernych, zwiększenie wytrzymałości narzędzi, zmniejszenie współczynnika tarcia, zwiększenie porowatości, poprawę przewodności cieplnej itd. W tej grupie należy wyróżnić spoiwa na bazie substancji szklanokryształicznych, które wykazują przydatność do wytwarzania ściernic cBN z domieszką mikrokryształicznego korundu spiekanego ze spoiwem ceramicznym i domieszką substancji porotwórczych. Spoiwa organiczne, wytwarzane z żywic fenolowych i poliamidowych, stosowane są przede wszystkim do ściernic zdzierających oraz ściernic do przecinania. Ich rozwój polega głównie na opracowaniu nowych receptur żywic oraz dodatków w postaci plastyfikatorów i wypełniaczy, zwiększających znacząco ich wytrzymałość. Nowe receptury spoiw, dzięki ich elastyczności i podatności w procesie szlifowania oraz możliwości kształtowania CPS w procesie obciążania, znajdują zastosowanie do wytwarzania ściernic ze ściernic supertwardych [1, 6]. Spoiwa metalowe wytwarzane są głównie metodą spiekania proszków metali (wielowarstwowe ściernice supertwarde i obciążacze wirujące) i elektrolitycznego osadzania metali (ściernice jednowarstwowe). Oferowane są również nowe spoiwa hybrydowe metalowo-ceramiczne (ściernice diamentowe firmy Diamental) oraz spoiwa spiekane z domieszką proszków metali, zwiększających przewodność elektryczną (ściernice do szlifowania elektroerozyjnego).

Rozwój ściernic charakteryzuje się funkcjonalnym dostosowaniem ich konstrukcji i właściwości skrawnych CPS do specyfiki wysoko efektywnych procesów szlifowania, np.: szlifowania HEDG, UHSG, CDCF, SSG, HSPG oraz szlifowania erozyjnego, precyzyjnego i mikroszlifowania. Główne tendencje w rozwoju ściernic ukierunkowane są na: konstrukcję ściernic do tzw. „zimnego” i wysoko wydajnego szlifowania, budowę ściernic o zmniejszonym udziale spoiwa, doskonalenie wielowarstwowych ściernic o zróżnicowanej charakterystyce technicznej, konstruowanie ściernic z supertwardych ziaren o wydłużonym kształcie i ułożeniu zorientowanym na CPS, budowę ściernic „inteligentnych” wyposażonych w mikroczujniki (np. typu MEMS). Przykładami innowacyjnych ściernic oferowanych przez producentów są [1, 3, 5]:

- ściernice Mach Disk firmy Mach Rotec do szlifowania szybkościowego, których korpusy wykonane są z lekkich materiałów kompozytowych;
- ściernice „Surfin” firmy Cafo przeznaczone do zwierciadlanego szlifowania rowków wiórowych w pełnowęglkowych narzędziach skrawających (wiertłach, frezach trzpieniowych);
- ściernice wielostrefowe firmy Kreps & Riedel, których poszczególne strefy CPS są zróżnicowane w zakresie wielkości i koncentracji ziaren ściernych lub struktury i dopasowane do miejscowych obciążeń ziaren ściernych podczas szlifowania złożonych powierzchni kształtowych;
- ściernice cBN typu Genis z firmy Tyrolit do wysoko wydajnego szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych, wyposażone w mikrochipy umożliwiające bezprzewodowe przesyłanie informacji do układu sterowania szlifiarki oraz wielopolowe ściernice Strato Ultra do szlifowania głębokiego.

Warunkiem efektywnego wykorzystania ściernicy jest dostosowanie – za pomocą obciążania – jej CPS do realizo-

* Prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak – Katedra Technologii Maszyn Politechniki Łódzkiej

wanych operacji szlifierskich, w zakresie dokładności makrogeometrycznego profilu i mikrogeometrii CPS. Obciążanie ściernic obejmuje zabiegi: profilowania, ostrzenia i czyszczenia CPS, które są realizowane metodami obróbki mechanicznej, np.: diamentowymi obciążaczami ostrzowymi obciążaczami wirującymi, ściernicami diamentowymi, wygniatańcia twardą rolką, „szlifowania miękkiej stali” oraz metodami erozyjnymi, np.: laserowe, elektrochemiczne, elektroerozyjne [1, 3, 6]. Rozwój metod obciążania ściernic obróbką mechaniczną ukierunkowany jest głównie na ich dostosowanie do potrzeb w innowacyjnych odmianach szlifowania, zautomatyzowanych procesach szlifowania na szlifiarkach CNC oraz procesach mikroszlifowania. Nowe osiągnięcia w tym zakresie dotyczą m.in.: doskonalenia technologii wytwarzania wieloziarnistych obciążaczy stojących i wirujących, wdrażania nowych odmian kinematycznych obciążania, konstrukcji urządzeń obciążających oraz opracowania systemów CNC do sterowania tym procesem. Prace badawcze wskazują także na możliwość hybrydowego obciążania ściernic obciążaczami stojącymi i wirującymi poprzez wspomaganie tego procesu drganiami ultradźwiękowymi. Rozwój erozyjnych metod obciążania ukierunkowany jest głównie na potrzeby kształtowania CPS ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym. Te potrzeby w największym stopniu zaspokajają metody obciążania elektrochemicznego, elektroerozyjnego oraz hybrydowego. Metody obciążania elektrochemicznego – ECD polegają na anodowym roztworzeniu metalowego spoiwa CPS wskutek reakcji elektrochemicznych w roztworach elektrolitów pod wpływem prądu stałego lub przemiennego. Wykazują one przydatność do ostrzenia i czyszczenia CPS ściernic supertwardych oraz ich profilowania. Szczególną odmianą obciążania elektrochemicznego jest system ELID (*Electrolytic In Process Dressing*), który jest znamieny tym, iż ostrzenie ściernicy realizowane jest w trakcie procesu szlifowania i uruchamiane cyklicznie, w okresach mechanicznej depasywacji spoiwa przez obrabiany materiał. System ELID jest przydatny zwłaszcza do ostrzenia drobnoziarnistych ściernic diamentowych i cBN ze spoiwem *Cast Iron Fiber Bonded*. Metody elektroerozyjnego obciążania – EDD polegają na wykorzystaniu energii wyładowań iskrowych w szczelinie, utworzonej pomiędzy metalowym spoiwem i elektrodą obciążającą. W tych odmianach obciążania stosowane są elektrody stacjonarne, segmentowe wirujące i drutowe. Metody EDD są szczególnie przydatne do profilowania wielowarstwowych ściernic supertwardych o złożonych zarysach CPS. Nie zapewniają one natomiast prawidłowego ukształtowania makrogeometrycznej struktury CPS i dlatego wymagają procesu ich ostrzenia. Rozwijane są również hybrydowe metody obciążania erozyjnego, których przykładem jest system elektroerozyjno-elektrochemiczny EDCD.

Charakterystykę innowacyjnych odmian szlifowania zawierają obszernie opracowania prof. K. E. Oczosia i dr. inż. W. Habrata [1] oraz publikacje Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej [2 ÷ 4], dlatego też ograniczono się tu do przedstawienia wybranych trendów ich rozwoju. Wśród wysoko efektywnych procesów szlifowania wyróżnia się HEDG (*High Efficiency Deep Grinding*), które łączy zalety szlifowania z dużą prędkością obwodową ściernicy – HSG (*High Speed Grinding*) i szlifowania głębokiego – CFG (*Creep-Feed Grinding*). Rozwój tej odmiany szlifowania ukierunkowany jest na uzyskanie bardzo dużej wydajności względnej ($150 \div 2000 \text{ mm}^3/\text{s}$) – porównywalnej z procesami obróbki skrawaniem – wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej, obniżenia temperatury szlifowania, chropowatości powierzchni i stanu warstwy wierzchniej. W tej odmianie szlifowania stosuje się duże prędkości obwodowe ściernicy ($60 \div 200 \text{ m/s}$), głębokości skrawania ($1 \div 25 \text{ mm}$) i prędkości posuwu przedmiotu ($1 \div 125 \text{ mm/s}$), wysoko wytrzymałe ściernice supertwarde ze spoiwem galwanicznym i metalo-

wym korpusem oraz specjalne systemy chłodzenia i smarowania itp. Innymi przykładami innowacyjnych odmian szlifowania są: wzdłużne szlifowanie jednoprzęściowe otworów realizowane ściernicami strefowymi, dwustronne szlifowanie powierzchni płaskich z kinematyką docierania, frezoszlifowanie, szlifowanie wspomaganie obróbką erozyjną (AECG i AEDG) czy mikroszlifowanie wspomaganie ultradźwiękami [1, 3, 5, 6].

Aktualne trendy rozwoju szlifierek koncentrują się na doskonaleniu ich zdolności wytwórczych. Dotyczy to doskonalenia konstrukcji korpusów, zespołów wykonawczych, układów napędowych, systemów numerycznego sterowania, systemów monitorowania i kontroli itp. Współczesne tendencje w budowie szlifierek uwidaczniają następujące rozwiązania innowacyjne [1, 3 ÷ 5]:

- budowa szlifierek modułowych, polegająca na projektowaniu wielu głowic szlifierskich (wrzecienników) montowanych na bazie korpusów podstawowych z różną konfiguracją głowic (duża elastyczność w ich dostosowaniu do różnych odmian szlifowania) oraz szlifierek do obróbki kompletnej (centra obróbkowe i autonomiczne stacje obróbkowe), umożliwiających łączenie operacji szlifowania z obróbką skrawaniem;
- powszechne stosowanie sterowania numerycznego CNC oraz łatwego w obsłudze oprogramowania użytkowego, z możliwością programowania zarówno cykli szlifowania, jak i obciążania ściernicy;
- wyposażanie szlifierek w nowoczesne systemy do monitorowania stanu ściernicy i procesu szlifowania. Mają tu zastosowanie systemy na bazie czujników: piezoelektrycznych, typu MEMS, emisji akustycznej oraz inteligentne systemy szlifowania;
- wyposażenie szlifierek w układy CNC sterowania głowicami do obciążania ściernic, systemy elektronicznego kodowania ściernic, automatycznej wymiany i mocowania ściernic;
- budowa korpusów szlifierek z odlewów mineralnych lub płyt granitowych. Takie rozwiązania ograniczają wpływ rozszerzalności cieplnej tych zespołów na dokładność obróbki;
- stosowanie w układach napędowych silników liniowych i momentowych, zapewniających duże prędkości przemieszczeń zespołów roboczych i wysoką dokładność pozycjonowania, systemów automatycznej kompensacji niewyrównoważenia zespołów wrzecionowych i ściernic bezpośrednio na szlifierce oraz systemów aktywnej kontroli;
- wyposażanie szlifierek w portalowe systemy załadunku i wyładowcze przedmiotów obrabianych, systemy palet przedmiotowych oraz podajniki i manipulatory.

Przedstawione kierunki rozwoju szlifowania ściernicowego koncentrują się na najnowszych osiągnięciach technologicznych w różnych dziedzinach: inżynierii materiałowej, zaawansowanych systemach projektowania konstrukcji i technologii CAD/CAM, elektroniki i informatyki, sztucznej inteligencji itp.

LITERATURA

1. K. E. OCZOŚ, W. HABRAT: Doskonalenie procesów obróbki ściernic cz. I-III. *Mechanik*: **83**(2010)/7, **83**(2010)/8-9, **83**(2010)/10; Innowacje w obróbce ściernic cz. I-II. *Mechanik*: **81**(2008)/11, **81**(2008)/12.
2. J. PŁICHTA: Współczesne problemy obróbki ściernic. Pr. zb. Politechnika Koszalińska Koszalin 2009.
3. A. GOŁĄBCZAK, B. KRUSZYŃSKI: Podstawy i technika obróbki ściernic. Pr. zb. Politechnika Łódzka, Łódź 2010.
4. A. BARYLSKI: Obróbka ścierna. Współczesne problemy. Pr. zb. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011.
5. E. BRINKSMIEIER, Y. MUTLUGUNES, F. KLOCKE, J.C. AURICH, P. SHORE, H. OHMORI: Ultra-precision grinding. *CIRP Annals*, **59**(2010), 652 ÷ 671.
6. K. WEGNER, H. HOFFMEISTER, B. KAPUSZEWSKI, F. KUSTER, W. CHAHMANN, M. RABIEJ: Conditioning and monitoring grinding wheels. *CIRP Annals*, **60**(2011), 757 ÷ 777.