

Wytwarzanie i potencjalne zastosowanie powłok węglkowo-ceramicznych

NORBERT RADEK, MAREK MICHALSKI, ARTUR KALINOWSKI, MARCIN SZCZEPANIAK*

Przedstawiono rezultaty badań weryfikujących przydatność powłok węglkowo-ceramicznych w zastosowaniach narzędziowych. Badano powłoki WC-Co-Al₂O₃ oraz WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ nanoszone elektroiskrowo na ostrza noży tokarskich oraz gwintowniki. Stwierdzono zróżnicowaną ich przydatność w obróbce skrawaniem.

Wprowadzenie

Węglik spiekane są to cermetale składające się w 70÷96% z węglków metali trudno topliwych (np. wolframu, tantalu, niobu) oraz osnowy wiążącej, którą jest zwykle kobalt, czasami molibden, nikiel, a niekiedy żelazo. Węglik spiekane obecnie są bardzo popularne jako materiał do wytwarzania ostrzy skrawających, szczególnie w operacjach toczenia i frezowania [3].

Celem badań przedstawionych w pracy jest weryfikacja doświadczalna przydatności powłok węglkowo-ceramicznych do stosowania w narzędziach skrawających.

Rodzaje i struktura powłok węglkowo-ceramicznych

Węglik spiekane dzieli się na poszczególne gatunki w zależności od ich składu chemicznego lub od rozmiarów cząstek WC. Węglik spiekane typu WC-Co po-

dzielono według rozmiarów cząstek WC na następujące grupy [10]:

- gruboziarniste – o średniej średnicy $3 \div 30 \mu\text{m}$,
- standardowe – o średniej średnicy $1,5 \div 3 \mu\text{m}$,
- drobnoziarniste – o średniej średnicy $0,5 \div 1,5 \mu\text{m}$,
- ultradrobnoziarniste – o średniej średnicy mniejszej od $0,5 \mu\text{m}$.

Rozmiar ziarna WC ma olbrzymi wpływ na właściwości ostrzy z węglków spiekanych, a szczególnie na ich wytrzymałość na zginanie i twardość. Gdy średnica cząstek WC jest większa od $1,5 \mu\text{m}$, obserwuje się wzrost wytrzymałości na zginanie i zmniejszenie twardości ostrza z węglka spiekaneego wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren WC. W przypadku gdy ziarna WC mają średnice mniejszą od $1,5 \mu\text{m}$, obserwuje się jednocześnie wzrost wytrzymałości na zginanie i twardości ostrza z węglka spiekaneego tym

większy im mniejsze jest ziarno WC. Obserwacja ta stanowi jeden z przykładów, na podstawie których nastąpił przełom w poglądach, że wzrost twardości musi powodować spadek własności plastycznych, np. ciągliwości [10].

Zastosowanie ceramicznych materiałów narzędziowych w porównaniu do węglków spiekanych jest niewielkie, ale ciągle wykazuje dynamikę wzrostu. Według szacunków około 5% ostrzy narzędzi skrawających wykonuje się z tej grupy materiałów. Do najbardziej popularnych materiałów służących do wytwarzania ceramicznych materiałów narzędziowych można zaliczyć:

- jednofazowy tlenek glinu Al₂O₃,
- azotek krzemu Si₃N₄,
- wielofazowe mieszaniny Al₂O₃ i Si₃N₄ z twardymi węglkami, azotkami i tlenkami.

Dość interesująco przedstawia się możliwość wytwarzania obróbką elektroiskrową przeciwzuzyciowych powłok węglkowo-ceramicznych, elektrodami wykonanymi metodami metalurgii proszków [4]. Supertwarde powłoki mogą być nanoszone na ostrza skrawające narzędzi, takich jak np. noże tokarskie, frezy, dłutaki czy gwintowniki. Przypu-

* Dr hab. inż. Norbert Radek, prof. Uczelni, mgr inż. Artur Kalinowski – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, mgr inż. Marek Michalski, F.H. BARWA, ul. Warkocz 3-5, 25-253 Kielce, dr inż. Marcin Szczepaniak – Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław.

szcza się, że w/w powłoki mogą być z powodzeniem stosowane na elementach maszyn, które pracują w ekstremalnych warunkach, np. intensywne używanie ściernie, obciążenia udarowe.

Dodatkową zaletą zachęcającą do stosowania supertwardych powłok elektroiskrowych jest aspekt ekologiczny. Obróbkę elektroiskrową cechuje brak szkodliwych oddziaływań na środowisko.

Proces osadzania elektroiskrowego charakteryzują wyładowania impulsowe generowane pomiędzy elektrodą i podłożem [1, 5, 8]. Podczas obróbki elektroiskrowej następuje jonizacja powietrza do obszarów wysokotemperaturowych i wysokociśnieniowych pól, w efekcie czego następuje tworzenie się stopu. Stopowanie elektroiskrowe jest technologią obróbki powierzchniowej i cechuje się intensywnym dopływem ciepła i bardzo wąską strefą wpływu ciepła (SWC), również przy nakładaniu powłok z trudno topliwych kompozytów [2, 6, 9].

Obiekt i metodyka badań

Obiektami badań były powłoki nakładane metodą elektroiskrową, dwoma rodzajami elektrod:

– WC-Co-Al₂O₃ (85% WC, 10% Co oraz 5% Al₂O₃),

– WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ (85% WC, 10% Co oraz 5% Al₂O₃/3TiO₂),

o przekroju 4 mm × 6 mm na próbki wykonane ze stali C45. Powłoki nanoszono w osłonie argonu.

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia produkcji ukraińskiej, model EIL-8A. Opierając się na zdobytych doświadczeniach własnych przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych:

– napięcie $U = 230$ V,

– pojemność kondensatorów $C = 150$ F,

– natężenie prądu $I = 2,4$ A.

Badania powłok węglkowo-ceramicznych dotyczyły: obserwacji i analizy mikrostruktury, pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, mikrotwardości i przyczepności oraz testów tribologicznych.

Obserwacje mikrostruktury prowadzono za pomocą elektronowego mikrosko-

pu skaningowego Joel typ JSM-5400. Pomiarzy chropowatości przeprowadzono za pomocą przyrządu Topo L120 przy wykorzystaniu programu PROFILOMETR. Mikrotwardość mierzono na mikrotwardościomierzu Microtech MX3 przy obciążeniu 40 G, przyłożonym przez 15 s. Pomiarzy przyczepności wykonano metodą zarysowania (z ang. *scratch test*), stosując przyrząd REVETEST. Testy tribologiczne wykonano na testerze tribologicznym T-01M typu kulka-tarcza.

WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

Badania morfologii powłok

W procesie elektroiskrowego tworzenia warstw powierzchniowych na katodzie następuje wzajemne oddziaływanie znajdujących się w stanie ciekłym materiałów elektrod. Powstają tu nowe związki chemiczne, zachodzą procesy samo- i heterodyfuzji oraz następuje tworzenie stopów i pseudostopów. Proces konstituowania warstwy wierzchniej zachodzi w skrajnie nierównowagowych warunkach sprzyjających powstawaniu form drobnodispersyjnych. W strefie działania wyładowania struktura jest bardzo rozdrobniona, obserwuje się znaczne naprężenia wewnętrzne oraz ślady deformacji ziaren. Działanie dużych ciśnień i temperatur, znacznie przewyższających temperaturę topnienia i wrzenia materiałów elektrod, a także duża szybkość odprowadzania ciepła powodują, że powstają specyficzne struktury o unikalnych własnościach, np. twardość powłoki ma zwykle znacznie większą wartość niż twardość materiału elektrod. W składzie warstwy mogą występować fazy nie występujące w wyjściowych materiałach elektrod. Osobliwe własności jak i struktura powstałej powłoki są rezultatem mechanizmu procesu. W procesie wyładowania iskrowego na katodę przenoszone są materiały anody, a także azot z powietrza. Krople płynnego metalu i azot pod wpływem wywołanych wyładowaniem wysokich temperatur, dyfundują w powierzchnię detalu tworząc w metalicznym podłożu mocno przetopioną azotkowo-węglkową warstwę o dużej twardości i odporności na zużywanie, przy czym przyjmuje się, że o twardości warstwy decyduje obecność azotu. Na podstawie analizy metalograficznej zglądów można stwier-

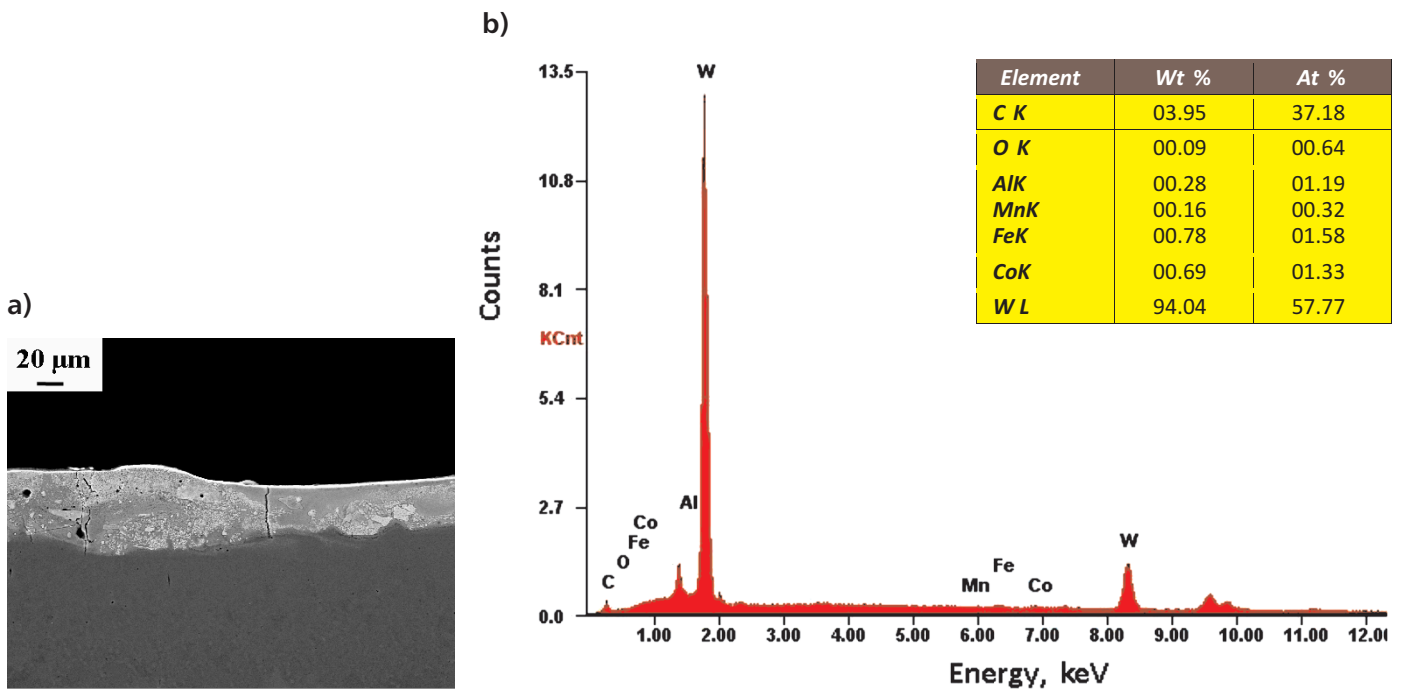
dzić, że efekt umocnienia polega głównie na zjawiskach dyfuzyjnych. W wyniku wyładowania na katodzie powstaje bardzo cienka warstwa, przy czym podłoże nie rozgrzewa się. Ponadto proces ten zachodzi bardzo szybko. Ogólnie warstwa nałożona elektroiskrowo składa się z dwóch stref: zewnętrznej (białej trudno trawiącej się, jednorodnej) i wewnętrznej (o charakterze dyfuzyjnym i zmiennym składzie). Często obserwuje się też trzecią – strefę wpływu ciepła.

Na fotografii – rys. 1a, przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Co-Al₂O₃ stopowanej elektroiskrowo. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że maksymalna grubość powłoki wyniosła 64 μm, natomiast minimalna grubość – około 34 μm. W przypadku powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ – rys. 2, grubość wyniosła od 29 ÷ 68 m. Głębokości SWC w głąb materiału podłoża dla obu powłok były porównywalne i wynosiły ok. 23 ÷ 31 m.

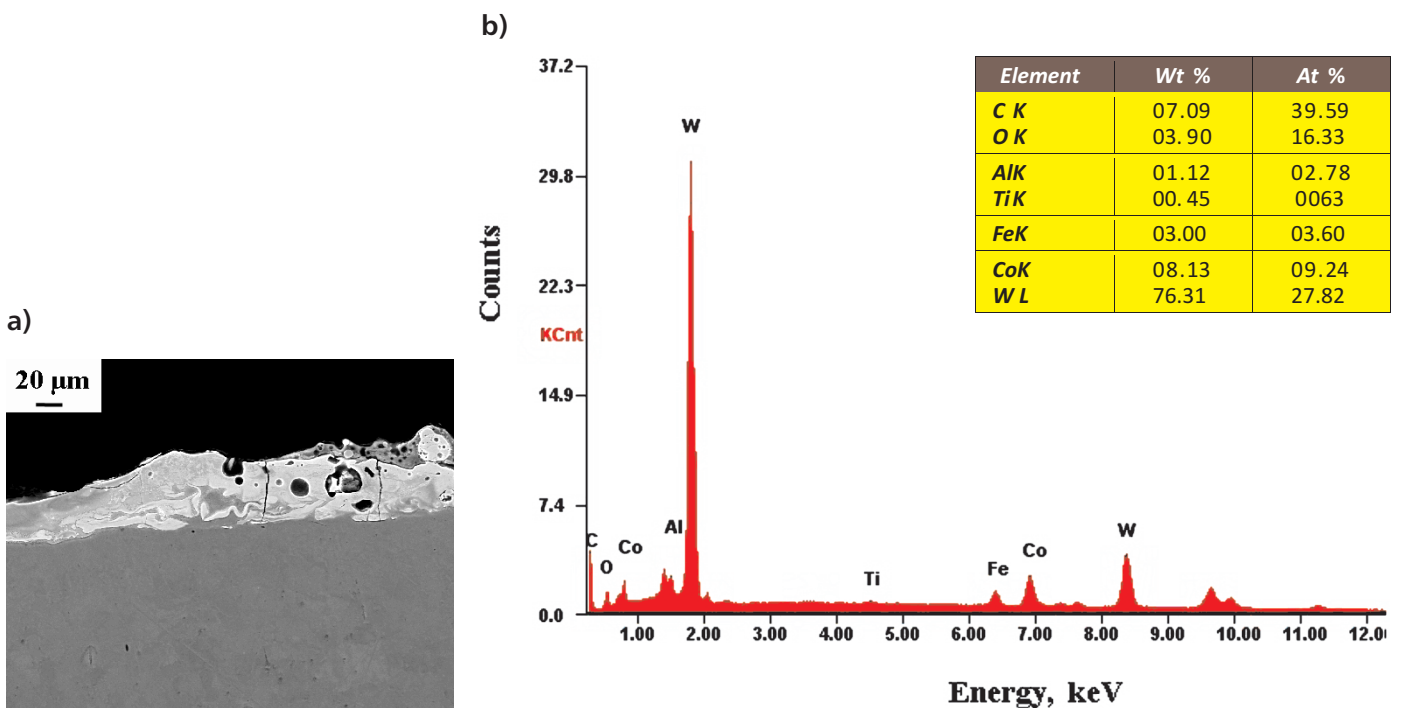
Obserwacje mikrostruktur powłok WC-Co-Al₂O₃ oraz WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ – rys. 1a i 2a, wykazały występowanie niekorzystnych zjawisk w formie porów i mikropęknięć oraz nierównomierną grubość.

Jedną z przyczyn uzyskania nierównomiernej grubości powłok było zastosowanie do ich nanoszenia urządzenia o ręcznym posuwie elektrody. Ponadto efekt ten można rozpatrywać od fizycznej strony przebiegu wyładowania elektrycznego między elektrodami. Energia dostarczana w impulsie elektrodom powoduje erozję anody (erody) jak również katody (materiału podłoża). Powłokę tworzy nie tylko stopiony materiał erody, ale również stopiony materiał podłoża w efekcie czego tworzą się tzw. wspólne obszary powłokowe.

Przeprowadzona analiza punktowa w górnej części powłok – rys. 1b i 2b wykazała dużą intensywność pików pierwiastków wchodzących w skład zastosowanych elektrod. W przypadku powłoki WC-Co-Al₂O₃ zawartość W wyniosła około 57,77% at. oraz 39,59% at. C. Ponadto stwierdzono obecność Al (około 1,19% at.) oraz kobaltu (około 1,33% at.). Natomiast w przypadku powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ – rys. 2b, stwierdzono 27,82% at. W i 9,24% at. Co. Na rysunku 2b widoczna jest również obec-



Rys. 1. Powłoka WC-Co-Al₂O₃: a) mikrostruktura, b) widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego



Rys. 2. Powłoka WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂: a) mikrostruktura, b) widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego

ność pików aluminium (około 2,78% at.) oraz tytanu (około 0,63% at.).

Badania tribologiczne

Badania oporów tarcia (tarcie technicznie suche) przeprowadzono na próbkach w kształcie pierścienia wykonanych ze stali węglowej wyższej jakości C45 (w stanie normalizowanym), na które naniesiono elektroiskrowo powłoki

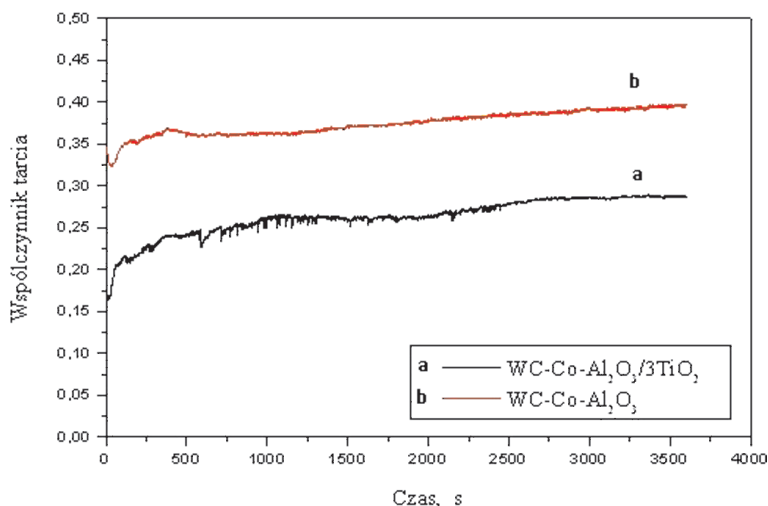
WC-Co-Al₂O₃ i WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂. Przewidzianą próbką była kulka o średnicy 6,3 mm wykonana ze stali 100Cr6.

Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach:

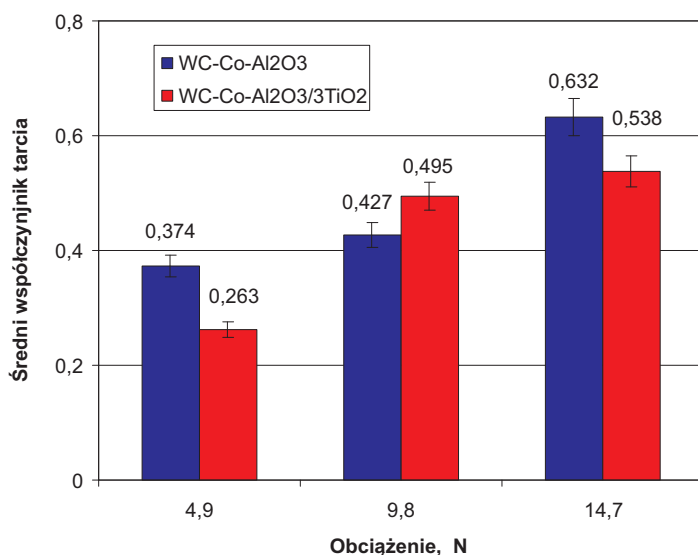
- prędkość liniowa $v = 0,8$ m/s,
- czas próby $t = 3600$ s,
- zakres zmian obciążenia $Q = 4,9$ N; 9,8 N; 14,7 N.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na wykresie – rys. 3, który ilustruje przebiegi współczynnika tarcia w funkcji czasu próby, przy obciążeniu 4,9 N.

Podczas tarcia technicznie suchego badanych powłok nastąpiło przekształcenie technologicznej warstwy wierzchniej (TWW) w eksploatacyjną warstwę wierzchnią (EWW). Efekt ten nastąpił głównie na skutek nacisków i prędkości



Rys. 3. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji czasu: a) powłoka WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂, b) powłoka WC-Co-Al₂O₃



Rys. 4. Średnie wartości współczynnika tarcia

ślizgania oraz oddziaływania atmosfery otoczenia bliskiego z badaną powierzchnią. Jednocześnie obserwowano stabilizację stanu przeciwzużyciowej warstwy powierzchniowej (PWP).

Na przebiegu (a) – rys. 3a można zaobserwować, że stabilizacja współczynnika tarcia następuje po upływie około 2500 sekund, a wartość jego oscyluje na poziomie 0,27÷0,30.

Dla powłoki WC-Co-Al₂O₃ (przebieg b) współczynnik tarcia stabilizuje się po upływie około 3100 sekund, a jego wartość wynosi 0,38÷0,40.

Wartości średnie współczynnika tarcia powłok węglkowo-ceramicznych przedstawiono na wykresie – rys. 4. Wynika z niego, że wartości średnie współczyn-

nika tarcia rosną proporcjonalnie do zwiększającego się obciążenia.

Mniejsze wartości średnich współczynników tarcia występują dla powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂. Wyjątkiem jest obciążenie 9,8 N, przy którym mniejsza średnia wartość współczynnika tarcia wystąpiła dla powłoki WC-Co-Al₂O₃.

Pomiary mikrogeometrii

Pomiary chropowatości powłok WC-Co-Al₂O₃ i WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ wykonano w dwóch prostokątnych do siebie kierunkach. Pierwszy pomiar był wykonany zgodnie z ruchem przemieszczania się elektrody, natomiast drugi pomiar był prostokątny do ściegów skanujących. Z dwóch pomiarów ob-

liczono wartość średnią parametru Ra dla danej powłoki. Przykładowe zapisy rezultatów pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek przedstawiono na rys. 5.

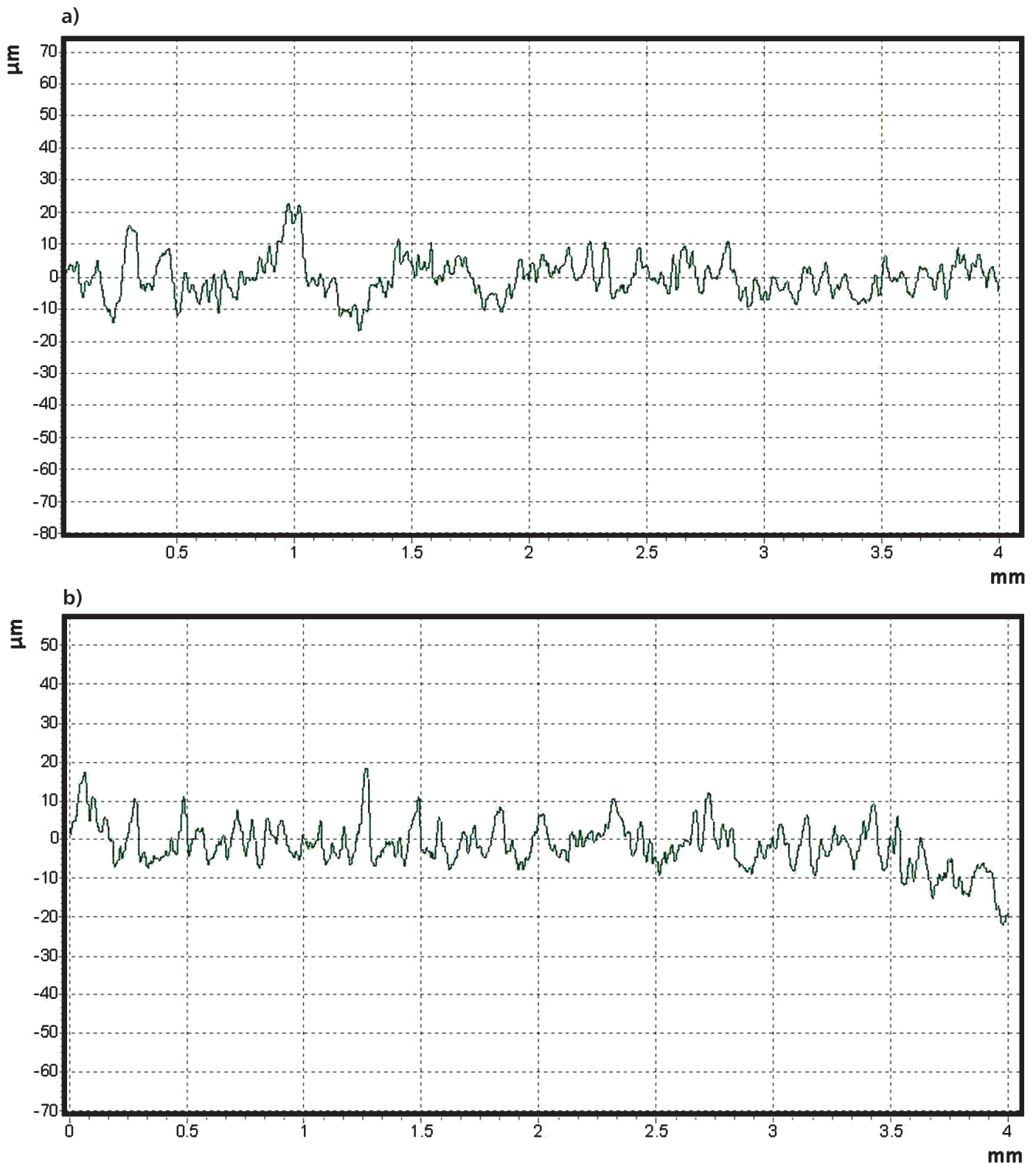
Powłoki WC-Co-Al₂O₃ posiadały chropowatość Ra= 6,16÷7,79 μm, natomiast w przypadku powłok WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ parametr Ra = 4,18÷4,58 μm. Próbkę ze stali C45, na którą nanoszono powłoki przed ich pokryciem miały chropowatość Ra = 0,38÷0,41 μm.

Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono metodą Vickersa. Odciski penetratorem wykonano na zgładach prostokątnych w trzech strefach: w powłoce (białej trudnotrawiącej się, jednorodnej), w strefie wpływu ciepła (SWC), jak również w materiale rodzimym. Wyniki badań mikrotwardości przedstawiono w formie histogramów – rys. 6.

Stwierdzono, że obróbka elektroiskrowa spowodowała zmiany mikrotwardości w obrabianym materiale. Mikrotwardość materiału podłoża po obróbce elektroiskrowej wynosiła średnio około 141 HV_{0,04} (taką samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wejściowym). Nakładając obróbkę elektroiskrową powłoki WC-Co-Al₂O₃ oraz WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ uzyskano znaczny wzrost mikrotwardości w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża.

Powłoka WC-Co-Al₂O₃ posiadała średnią mikrotwardość 843 HV_{0,04} (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 498% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża), a powłoka WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ około 851 HV_{0,04} (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 504% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroiskrowej wzrosła o 168% (powłoka WC-Co-Al₂O₃) i o 179% (powłoka WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂) w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Nieco większa wartość mikrotwardości w SWC powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ w stosunku do powłoki WC-Co-Al₂O₃ może być spowodowana powstaniem w niej węglków tytanu. Ta tematyka będzie przedmiotem dalszych badań.



Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii powłok Ra: a) WC-Co-Al₂O₃, b) WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂

Pomiary przyczepności

Pomiary przyczepności i oznaczenie innych symptomów uszkodzenia mechanicznego powłok WC-Co-Al₂O₃ oraz WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ wykonano zgodnie z normą [7]. Badania wykonano przy sile

obciążającej rosnącej od 0 do 200 N i przy następujących parametrach:
 – szybkość wzrostu obciążenia – 39,8 N/min,
 – prędkość przesuwu stolika z próbką – 1 mm/min,

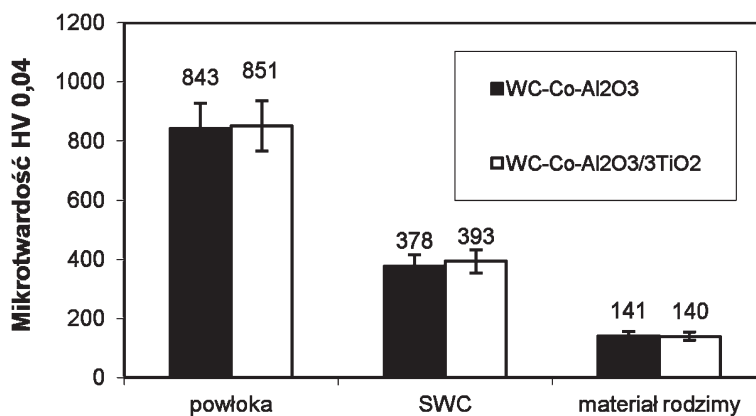
– długość rysy – 5 mm,
 – stożek diamentowy Rockwella o promieniu zaokrąglenia – 200 µm.
 Test zarysowania polegał na wykonaniu rysy za pomocą odpowiednio dobrego penetratora (w tym przypadku –



diamentowy stożek Rockwella) przy stopniowym wzroście siły normalnej (obciążającej ten penetrator) z jednoczesnym pomiarem siły oporu stawianego przez materiał (siły stycznej) i rejestracji sygnałów emisji akustycznej informujących o powstawaniu uszkodzeń warstwy w postaci pęknięć lub złuszczeń warstwy. Najmniejsza siła normalna powodująca utratę adhezji powłoki z podłożem, określana jest mianem siły krytycznej i jest przyjmowana za miarę tej adhezji.

Do oceny wartości siły krytycznej służy zapis zmian sygnałów emisji akustycznej i siły stycznej oraz obserwacje mikroskopowe (mikroskop optyczny wbudowany w aparat REVETEST). W przeprowadzonych badaniach, wartości sił krytycznych oceniono na podstawie obserwacji mikroskopowych powstałych rys po przejściu penetratora, które odnoszono do przebiegów sygnałów emisji akustycznej. Wyniki badań przyczepności przedstawiono w Tabeli 1.

Rys. 6. Wyniki pomiarów mikrotwardości powłok



tokarskich, tj. z przeciwzużyciowymi powłokami WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ naniesionym elektroiskrowo na w/w płytki oraz z płytkami niepokrytymi powłoką.

Jako kryterium stępienia ostrza przyjęto formę powstających wiórów, świadcząca o utracie właściwości skrawnych lub

Zastosowanie przeciwzużyciowej powłoki węglkowo-ceramicznej na ostrza skrawające wydłużyło czas ich pracy w niektórych przypadkach nawet dwukrotnie. Wyjątek stanowi płytka wieloostrowa z węglika spiekanego S10 z naniesioną powłoką WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂, dla której odnotowano krótszy czas

Tabela 1. Wyniki pomiarów przyczepności powłok

Powłoka	Siła krytyczna, N			
	pomiar			wartość średnia
	1	2	3	
WC-Co-Al ₂ O ₃	7,42	6,67	4,89	6,33
WC-Co-Al ₂ O ₃ /3TiO ₂	5,46	7,92	6,54	6,64

Stwierdzono, że wykonane elektroiskrowo powłoki posiadały porównywalną przyczepność. Średnia wartość (z trzech pomiarów) siły krytycznej powłoki WC-Co-Al₂O₃ wyniosła 6,33 N. Powłoka WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ posiadała średnią wartość siły krytycznej (z trzech pomiarów) na poziomie 6,64 N.

APLIKACJE POWŁOK WĘGLIKOWO-CERAMICZNYCH

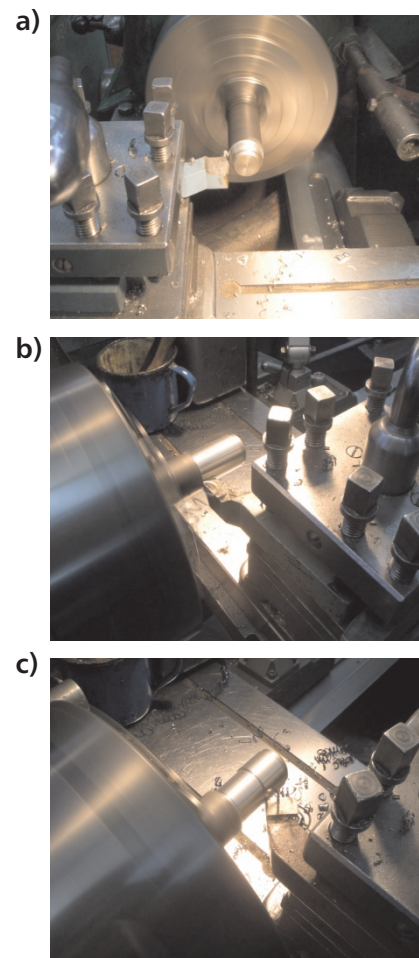
Badania trwałości ostrzy skrawających noży tokarskich

W badaniach trwałości ostrzy skrawających użyto noży tokarskich z wymiennymi płytkami wieloostrowymi ze stali szybko tnącej SW7M (1.3343) oraz węglików spiekanych S10 i H10. Badania porównawcze trwałości ostrzy skrawających wykonano dla dwóch grup noży

z użyciem wytrzymałościowe objawiające się wyszczerbieniami, wyruszeniami bądź wyłamaniem ostrza.

Testy trwałościowe wykonano na tokarce TUB 32 wyprodukowanej w Zakładach Mechanicznych w Tarnowie, będącej na wyposażeniu Wydziału Z-5 Narzędziowo-Remontowego ZM MESKO w Skarżysku-Kamiennej. Obróbkę skrawaniem prowadzono w operacji toczenia wzdłużnego stali chromowej o wysokiej hartowności 40H (1.7035). W czasie obróbki stosowano płyn obróbkowy MECAFLUID 137. Operację toczenia wraz z parametrami obróbki przedstawiono na fotografiach – rys. 7.

Analiza pracy poszczególnych noży tokarskich wykazała, że ostrza skrawające z przeciwzużyciową powłoką WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ wykazywały mniejsze zużycie w porównaniu do ostrzy noży niepokrytych powłoką.



Rys. 7. Toczenie próbek przy prędkości obrotowej n = 450 min⁻¹ nożem z płytkami: a) ze stali SW7M, z posuwem p = 0,25 m/min, b) z węglika spiekanego S10, z posuwem 0,90 m/min, c) z węglika spiekanego H10, z posuwem 1,00 m/min

pracy ($t = 202$ min.) w odniesieniu do płytki bez powłoki ($t = 277$ min.). Powodem tego było wyszczerbienie płytki podczas operacji toczenia. Uszkodzenie płytki mogło być skutkiem wżerów w materiale po obróbce elektroiskrowej lub wadą spoiny płytki z materiałem rdzenia. Wyniki badań zamieszczono w Tabeli 2.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe krzywe zużycia ostrzy skrawają-

cych (wskaźnik zużycia powierzchni przyłożenia h_p w funkcji czasu t).

Podsumowując uzyskane wyniki badań, można stwierdzić, że ostrza noży z naniesioną powłoką przeciwzużyciową WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ mogą wykonywać toczenie z większymi prędkościami wrzeczona i większym posuwem, co w efekcie poprawia efektywność obróbki.

Na krzywej a na rys. 8a widoczne jest wstępne docieranie współpracujących

powierzchni połączone z wyrównywaniem mikronierówności, co w rezultacie prowadzi do ustabilizowania się procesu zużywania. Krzywa b przedstawia normalny proces zużywania, na której widoczne są trzy fazy: docieranie, zużycie ze stałą intensywnością oraz gwałtowny wzrost zużycia z całkowitą utratą możliwości skrawanych. Natomiast na krzywej c obserwuje się szybkie zużywanie wynikające z błędu obróbki lub wadliwego materiału ostrza skrawającego.

Badania trwałości gwintowników

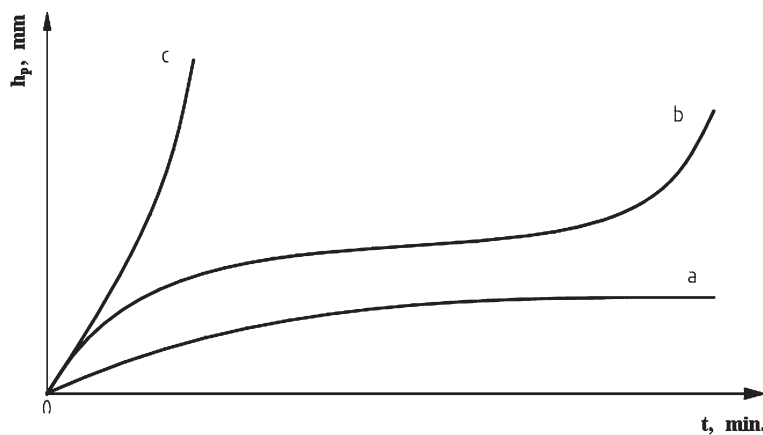
Do badań wybrano gwintowniki wykonane ze stali HSSE (stal szybko tnąca kobaltowa). Badania trwałości wykonano stosując trzy grupy gwintowników: z powłoką TiN naniesioną metodą PVD, z powłoką WC-Co-Al₂O₃ nałożoną obróbką elektroiskrową oraz gwintownik niepowleczony żadną powłoką. Powłoki zostały naniesione na części robocze gwintownika.

Jako kryterium trwałości części roboczej gwintownika przyjęto postać zużycia ściernego lub wykruszenia materiału.

Testy trwałościowe wykonano na sterowanej numerycznie tokarce YDPM BML 280 – rys. 9, która znajduje się w firmie Kiel-inox pod Kielcami). Elementem testowym były mufy ze stali S235JR, które są wytwarzane w w/w zakładzie i stosowane w piecach CO (rys. 10). W czasie operacji gwintowania stosowano płyn obróbkowy EMULKOL PS.

Tabela. 2. Zestawienie czasu pracy ostrzy skrawających

Materiał płytek	Czas pracy ostrza noża, min	
	z powłoką WC-Co-Al ₂ O ₃ /3TiO ₂	bez powłoki
SW7M	438	189
S10	202	277
H10	476	218



Rys. 8. Krzywe zużycia ostrzy skrawających: a) płytka z węgla spiekanego H10 z powłoką WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂, b) płytka z węgla spiekanego H10 bez powłoki, c) płytka z węgla spiekanego S10 z powłoką WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂



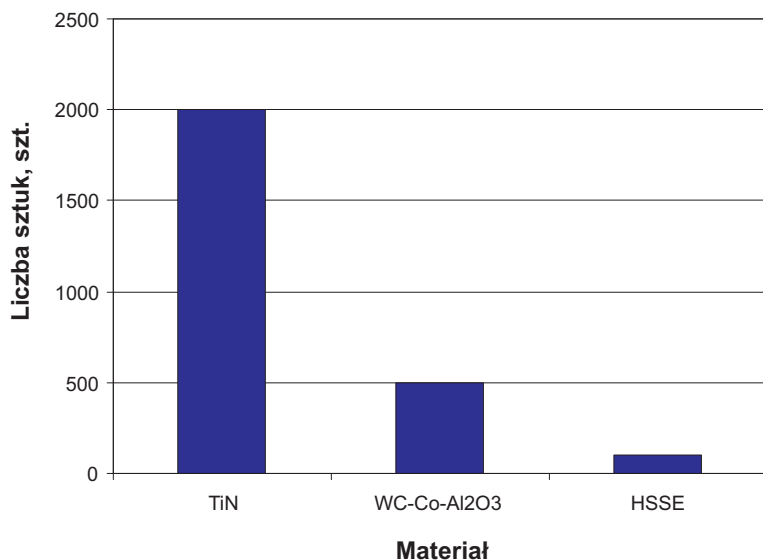
Rys. 9. Tokarka CNC z podajnikiem



Rys. 10. Mufa z wykonanym gwintem

Trwałość gwintowników określano liczbą nagwintowanych muf.

Wyniki badań trwałości gwintowników przedstawiono na rys. 11. W wyniku przeprowadzonych badań eksploatacyjnych okazało się, że największą trwałość wykazał gwintownik z powłoką TiN, za pomocą którego wykonano gwinty



Rys. 11. Histogram liczby nagwintowanych muf w zależności od użytego gwintownika

w 2000 szt. muf. Gwintownikiem z przeciwzużyciową powłoką WC-Co-Al₂O₃ wykonano gwinty w 500 szt. muf. Najmniejszą liczbę gwintów (w 100 szt. muf) wykonano gwintownikiem ze stali HSSE (bez powłoki).

Analiza zużytych części roboczych gwintowników po teście trwałości wykazała dominującą rolę zużycia ściernego. W mniejszym stopniu występowało wykruszenie bądź wyszczerbienie materiału.

Podsumowując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że gwintownik z naniesioną powłoką WC-Co-Al₂O₃ (obróbka elektroiskrowa) może być stosowany do wykonywania precyzyjnych gwintów na obrabiarkach CNC, choć wykona mniejszą liczbę gwintów w stosunku do gwintownika z powłoką TiN (metoda PVD).

Podsumowanie

W rezultacie przeprowadzonych badań zarejestrowano następujące spostrzeżenia, na podstawie których sformułowano podsumowujący wniosek.

1. Powłoki WC-Co-Al₂O₃ i WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ naniesione elektroiskrowo charakteryzowały się znacznie większą wartością parametru chropowatości Ra w stosunku do chropowatości materiału podłoża. Powłoki WC-Co-Al₂O₃ posiadały chropowatość Ra = 6,167,79 m, natomiast chropowatość powłok WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ wyniosła Ra = 4,184,58 m.

2. Analizując mikrostrukturę stwierdzono, że grubość powłok WC-Co-Al₂O₃ i WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ mieściła się w zakresie 29÷68 μm, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła w głąb materiału podłoża ok. 23÷31 μm. Stwierdzono ponadto, że powłoki posiadały mikro-pęknięcia oraz pory.

3. W wyniku obróbki elektroiskrowej otrzymano powłokę WC-Co-Al₂O₃ o średniej mikrotwardości 843 HV_{0,04} oraz powłokę WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ o średniej mikrotwardości 851 HV_{0,04}, podczas gdy mikrotwardość materiału podłoża (stali C45) wynosiła 350 HV_{0,04}.

4. Przyczepność powłok węglkowo-ceramicznych do podłoża była porównywalna. Średnia wartość siły krytycznej dla powłoki WC-Co-Al₂O₃ wyniosła 6,33 N, natomiast dla powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ średnia wartość siły krytycznej była na poziomie 6,64 N.

5. Wyznaczone współczynniki tarcia w obydwóch przypadkach naniesionych powłok elektroiskrowych miały zbliżone wartości. Mniejsze wartości współczynników tarcia wystąpiły dla

powłoki WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂ i mieściły się w zakresie μ = 0,263 ÷ 0,538.

6. Przeprowadzone w rzeczywistych warunkach pracy badania trwałości ostrzy skrawających noży tokarskich i części roboczej gwintowników z powłoką WC-Co-Al₂O₃/3TiO₂, dowiodły większej ich trwałości (od 2 do 5 razy) w porównaniu do ostrzy noży i gwintowników nie pokrytych powłoką.

7. Na podstawie zrealizowanych badań stwierdzono, że właściwie dobrane powłoki naniesione elektroiskrowo mogą zwiększyć trwałość ostrzy narzędzi do obróbki skrawaniem.

Literatura

- DiBitonto D.D., Eubank P. T., Patel M.R., Barrufet M.A.: Theoretical models of the electrical discharge machining process. I-A simple cathode erosion model. Journal of Applied Physics 66/9 (1989), 123-131.
- Galinov I.V., Luban R.B.: Mass transfer trends during electrospark alloying. Surface & Coatings Technology 79 (1996), 9-18.
- <http://www.fanar.pl/katalogi.php>
- Konstanty J.: Powder metallurgy diamond tools. Elsevier, Oxford 2005.
- Łazarenko B.R. Łazarenko N.I.: Elektroiskrovaja obrabotka tokoprovodiaszczih materialow. Akademia Nauk CCCP, Moskwa 1958.
- Miernikiewicz A.: Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. Rozprawy nr 274. Kraków 2000.
- Norma PN-EN ISO 20502:2016 – Ceramika wysokiej jakości. Oznaczanie adhezji powłok ceramicznych w próbie zarysowania.
- Ozimina D., Radek N., Styp-Rekowski M.: Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej za pomocą obróbki elektroiskrowej. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyki vol. 24, Nr 2 (2004), 229-238.
- Radek N.: Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(2009), 10-16.
- Wysiecki M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997. ■