

Selected methods for testing the effectiveness of electrolyte solutions in the electrochemical dressing process of superhard metal bonded grinding wheels

Wybrane metody badania skuteczności roztworów elektrolitów w procesie elektrochemicznego obciążania (ECDGW-AC) ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym



Selected technol. and ecol. problems of electrochem. dressing of superhard grinding wheels with a metal bond using the ECDGW-AC method were presented. The essence of the grinding wheel dressing method, the selection of low-concd. electrolyte solns. and the results of laboratory tests were presented, including detg. the dissoln. rate of metal samples included in the grinding wheel binder and products gumming up the cutting surface of the grinding wheel (CSGW). Erosion products generated in the dissoln. process were identified and the impact of the corrosive effect of electrolytes on the structural units of grinding machines was assessed.

Keywords: superhard grinding wheels, dressing, ECDGW-AC, electrochemical tests, electrolyte solutions, corrosiveness, dissolution products

Przedstawiono wybrane problemy technologiczne i ekologiczne elektrochemicznego obciążania ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym metodą ECDGW-AC. Przedstawiono istotę metody obciążania ściernic, dobór niskostężonych roztworów elektrolitów oraz wyniki badań laboratoryjnych obejmujące ustalenie szybkości roztwarzania próbek metali wchodzących w skład spoiwa ściernicy i produktów zalepiających czynną powierzchnię ściernicy (CPS). Przeprowadzono identyfikację produktów erozji powstających w procesie roztwarzania oraz oceniono wpływ korozyjnego oddziaływania elektrolitów na zespoły konstrukcyjne szlifierki.

Słowa kluczowe: ściernice supertwarde, obciążanie, ECDGW-AC, badania elektrochemiczne, roztwory elektrolitów, korozyjność, produkty roztwarzania

Ściernice ze ścierni supertwardych (z diamentu naturalnego CD, diamentu syntetycznego SD i regularnego azotku boru CBN) spojone spoiwem metalowym charakteryzują się bardzo atrakcyjnymi właściwościami użytkowymi i w najwyższym stopniu spełniają wymagania stawiane współczesnym procesom szlifowania w zakresie wydajnej i dokładnej obróbki, zwłaszcza trudno skrawalnych stopów metalowych lub kompozytów¹⁻⁴). Racjonalne i ekonomiczne wykorzystanie tych ściernic uwarunkowane jest pokonaniem trudności związanych z ukształ-

towaniem ich makro- i mikrogeometrii CPS w procesie ich obciążania, wymaganym zarówno przez wytwórców nowych ściernic, jak i użytkowników ściernic^{3, 4}). Trudności te wynikają głównie ze specyficznych właściwości fizykomechanicznych tych ściernic, w tym zwłaszcza dużej twardości ścierniwa i wytrzymałości metalowego spoiwa. Z tych też powodów konwencjonalne metody obciążania ściernic obróbką mechaniczną (obciążanie diamentowymi obciążaczami ostrzowymi i obciążaczami wirującymi, obciążanie ściernicami, obciążanie oselkami



Dr hab. inż. Marcin GOŁABCZAK (ORCID: 0000-0001-6196-5728) w roku 1999 ukończył studia na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Łódzkiej. W 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii materiałowej, a w 2015 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn na Wydziale Mechanicznym tej samej uczelni, gdzie pracuje na stanowisku profesora uczelni w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn. Jest kierownikiem Zakładu Technologii Maszyn, dyplomowanym rzeczoznawcą SIMP i członkiem CIRP. Specjalność – inżynieria mechaniczna.



Dr hab. inż. Wojciech STACHURSKI (ORCID: 0000-0003-3936-6846) w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. W 2008 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn PŁ. Specjalność – inżynieria mechaniczna, technologia budowy maszyn, narzędzia skrawające, obróbka skrawaniem.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Technologii Maszyn, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź, tel.: (42) 631-22-99, fax: (42) 631-24-18, e-mail: marcin.golabczak@p.lodz.pl

Tabela. Właściwości fizyczno-chemiczne roztworów elektrolitów

Skład chemiczny i właściwości elektrolitu	Symbol roztworu elektrolitu				
	E1	E2	E3	E4	E5
Skład chemiczny	NaCl, KNO ₂ , KNO ₃ , CaCO ₃	NaCl, KNO ₂ , KNO ₃ , Na ₂ CO ₃	NaCl, KNO ₃ , Na ₂ O ₃	NaCl, KNO ₂ , KNO ₃ , Na ₂ CO ₃	NaCl, KNO ₃ , Na ₂ O
Stężenie roztworu, %	5	5	5	5	5
Dodatek ochronny, %	-	-	0,5	1	-
Gęstość elektrolitu, g/cm ³	1,04	1,039	1,039	1,042	1,043
pH elektrolitu	9,7	10,81	10,80	10,81	10,90

ściernymi, szlifowanie miękkiej stali oraz wygniatanie twarą rolką) są nieefektywne i w ograniczonym zakresie stosowane w produkcyjnych procesach szlifowania^{3, 4}.

Analiza publikacji źródłowych oraz wyniki badań własnych wskazują na istotne znaczenie erozyjnych metod obciążania ściernic w rozwiązywaniu trudności kształtowania właściwości skrawnych ściernic supertwardych. Wśród erozyjnych metod obciążania ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym stosowane są takie metody, jak obciążanie wysokociśnieniową strugą cieczy i ścierniwa (WJM, AWJM), obciążanie laserowe (LBM), obciążanie elektrochemiczne (ECDGW), obciążanie elektroerozyjne (EDDGW) oraz hybrydowe systemy obciążania (ECDGW/EDDGW)³⁻⁶. Metody erozyjnego obciążania ściernic supertwardych są jednak znacznie trudniejsze w realizacji w porównaniu z mechanicznymi metodami obciążania, ponieważ wymagają zastosowania złożonych i kosztownych urządzeń obciążających oraz opracowania stosownych procesów technologicznych. Metody te charakteryzują się również zróżnicowaną przydatnością w ukształtowaniu CPS ściernic supertwardych, natomiast w zastosowaniu przemysłowym dominują metody obciążania elektrochemicznego i elektroerozyjnego.

W artykule skupiono uwagę na ekologicznych i technologicznych problemach elektrochemicznego obciążania ściernic supertwardych z zastosowaniem prądu przemiennego ECDGW-AC w obecności niskostężonych roztworów elektrolitów. Przedstawiono istotę procesu obciążania ściernic supertwardych metodą ECDGW-AC oraz wyniki badań laboratoryjnych. Badania laboratoryjne obejmują dobór składu chemicznego niskostężonych roztworów elektrolitów, określenie prędkości roztwarzania składników metalowego spoiwa ściernicy i produktów zalepiających czynną powierzchnię ściernicy (CPS), ocenę korozyjnego

oddziaływania elektrolitów na zespoły konstrukcyjne szlifierki oraz identyfikację produktów erozji powstających w procesie elektrochemicznego roztwarzania.

Część doświadczalna

Metoda elektrochemicznego obciążania ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym ECDGW-AC

Prace badawcze prowadzone w Politechnice Łódzkiej zaowocowały opracowaniem nowej metody elektrochemicznego obciążania ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym (ECDGW-AC), polegającej na zastąpieniu prądu stałego prądem przemiennym i zastosowaniu specjalnie dobranych roztworów elektrolitów o małym stęże-

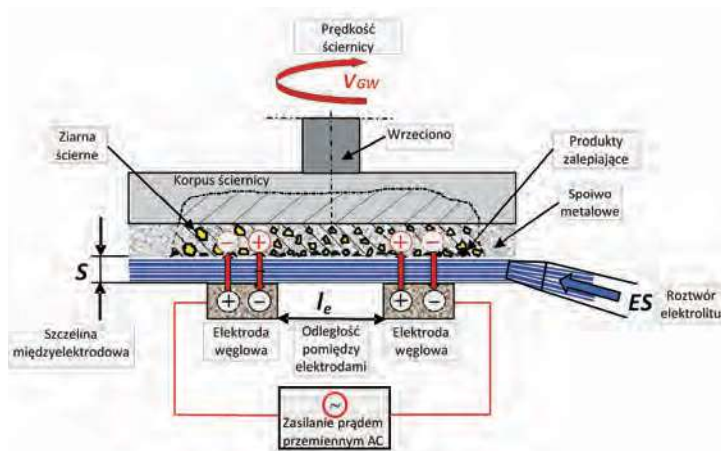


Fig. 1. Electrochemical dressing process of grinding wheel using alternating current (ECDGW-AC)

Rys. 1. Schemat obciążania ściernic supertwardych z użyciem prądu przemiennego (ECDGW-AC)

niu związków chemicznych (ok. 5%)⁴⁻⁶. Schemat procesu obciążania ściernic supertwardych metodą ECDGW-AC przedstawiono na rys. 1 i 2. Proces obciążania supertwardej ściernicy garnkowej polega na anodowym roztwarzaniu metalowego spoiwa i produktów zalepiających CPS, przy udziale prądu przemiennego doprowadzonego do dwóch elektrod węglowych. Roztworzenie składników ściernicy (spoiwa metalowego i produktów zalepiających CPS) zachodzi w szczelinie międzyelektrodowej S, do której doprowadzony jest pod ciśnieniem niskostężony roztwór elektrolitu ES o specjalnie dobranym składzie chemicznym.



Prof. dr hab. inż. Philippe JACQUET (ORCID: 0000-0003-2366-9818) w roku 1993 ukończył studia na Uniwersytecie w Burgundii, uzyskując stopień magistra chemii i fizyki. W 1998 r. uzyskał stopień doktora w dziedzinie procesów produkcyjnych w Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers w Cluny (ENSAM), gdzie obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora w laboratorium „LaBoMaP”. Specjalność – inżynieria mechaniczna i materiałowa, termochemiczna obróbka cieplna.

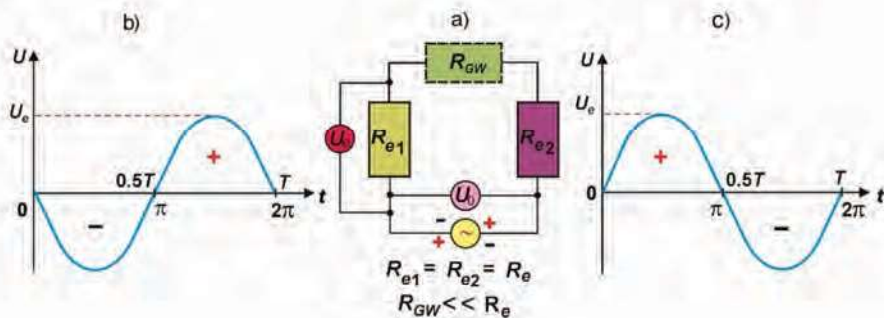


Fig. 2. Equivalent electric circuit diagram of the dressing process using ECDGW-AC method (a); course of current variation on electrodes (b, c); R_e - resistance of electrolyte, R_{GW} - resistance of grinding wheel

Rys. 2. Zastępczy schemat obwodu elektrycznego procesu obciągania ściernicy metodą ECDGW-AC (a); przebieg zmian napięcia prądu na elektrodach (b, c), R_e - oporność ściernicy R_e - oporność elektrolitu

Proces anodowego roztwarzania składników ściernicy ma charakter cykliczny, ponieważ prąd przemienny zmienia warunki polaryzacji ściernicy, która przemiennie staje się anodą lub katodą, adekwatnie do częstotliwości zmian prądu przemiennego (rys. 2).

Proces roztwarzania składników spoiwa ściernicy zachodzi podczas dodatniej polaryzacji ściernicy (gdy jest anodą). W okresach ujemnych ściernicy (kiedy jest katodą) nastę-

puje tzw. polaryzacja katodowa ściernicy. Polaryzacja katodowa sprzyja usuwaniu warstwy pasywnej z CPS (tlenków metali i innych związków chemicznych) powstających w procesie anodowym. Usunięcie warstwy pasywnej z CPS jest procesem korzystnym, ponieważ zwiększa ona opór polaryzacyjny w szczelinie międzyelektrodowej i spowalnia proces roztwarzania składników ściernicy. Do realizacji procesu obciągania metodą ECDGW-AC zbudowano stanowisko badawcze, którego opis zawierają prace^{4, 5}. Głównymi zaletami metody ECDGW-AC są: bezkomutatorowe doprowadzenie prądu do ściernicy,

mniejszy koszt zasilacza, aktywacja katodowa ściernicy oraz zastosowanie elektrolitów o małym stężeniu związków chemicznych, charakteryzujących się znikomą uciążliwością dla otoczenia i środowiska naturalnego.

Dobór roztworów elektrolitów

Dobór składu chemicznego i stężenie roztworów elektrolitów stosowanych w procesie elektrochemicznego ostrzenia ściernic uwarunkowane są wieloma wzajemnie wykluczającymi się kryteriami. Należą do nich: dobre właściwości elektrochemiczne elektrolitu, mała uciążliwość dla otoczenia i środowiska (np. w aspekcie użycia zużytych elektrolitów i produktów ostrzenia, ograniczenie korozyjności zespołów szlifierki i zagrożenia pożarowego), bezpieczeństwo pracy, koszty elektrolitów i okres ich trwałości^{4, 5}. Spełnienie wszystkich wymienionych kryteriów jest bardzo trudnym i złożonym zadaniem badawczym. W związku z tym skupiono się na doborze elektrolitów spełniających najistotniejsze wymagania, takie jak: zmniejszenie uciążliwości dla środowiska i otoczenia, ograniczenie korozyjności zespołów szlifierki oraz zapewnienie skuteczności ostrzenia ściernic. Działania zmierzające do ograniczenia uciążliwości elektrolitów dla środowiska i otoczenia polegały na wyeliminowaniu z ich składu chemicznego związków toksycznych i niebezpiecznych (np. azotanów(I) i chromianów). Ograniczenie korozyjności zespołów szlifierki osiągnięto poprzez zmniejszenie stężenia związków chemicznych w roztworze do ok. 5% oraz zastosowanie dodatków ochronnych. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie pięciu wieloskładnikowych roztworów elektrolitów, których właściwości fizyczno-chemiczne przedstawiono w tabeli^{3, 5}.

Badania laboratoryjne roztwarzania próbek metali

Celem badań laboratoryjnych było określenie warunków równowagi elektrochemicznej roztwarzania metali wchodzących w skład spoiwa ściernicy i produktów zalepiających CPS w dobranych roztworach elektrolitów, ustalenie minimalnej gęstości prądu i prędkości ich roztwarzania oraz ocena korozyjnego działania elektrolitów na zespoły

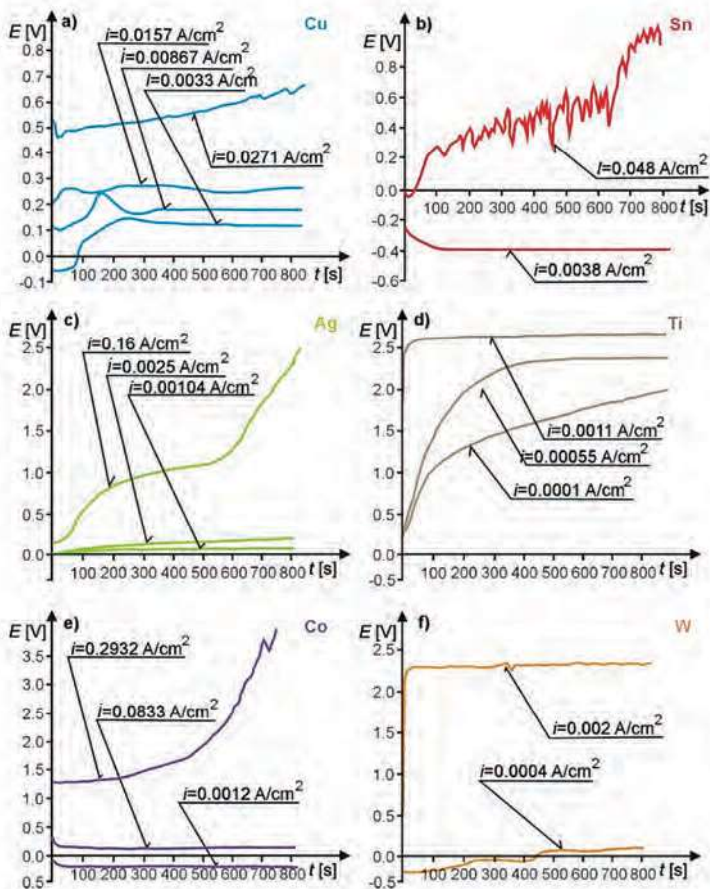


Fig. 3. The chrono-volt-amperometric plots of the grinding wheel components: a) copper, b) tin, c) silver, d) titanium, e) cobalt, f) tungsten

Rys. 3. Wykresy chronowoltamperometryczne roztwarzania składników ściernicy: a) miedź, b) cyna, c) srebro, d) tytan, e) kobalt, f) wolfram

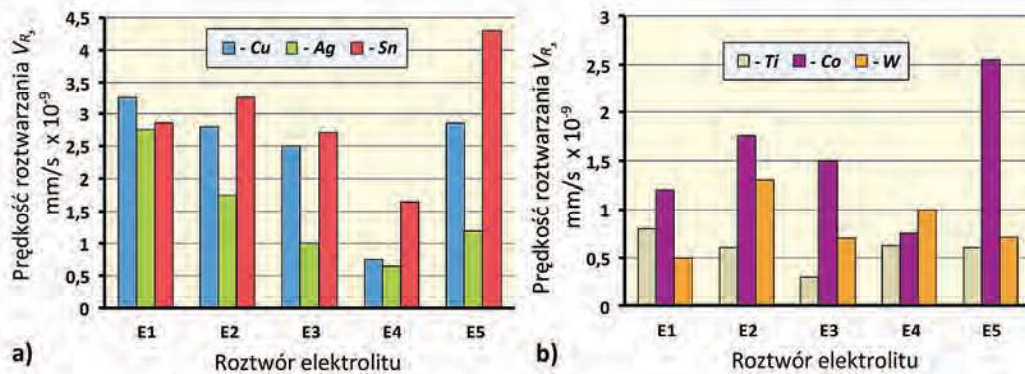


Fig. 4. The effect of electrolytes on the dissolution rate of metals constituting a) the grinding wheel bond, and b) CSGW gumming up products
Rys. 4. Wpływ elektrolitów na prędkość rozwarzania metali wchodzących w skład a) spoiwa ściernicy i b) produktów zalepiających CPS

konstrukcyjne szlifierki. Badania laboratoryjne polegały na rozwarzaniu próbek metali w elektrolizerze ECO CHEM, wykonaniu pomiarów chronowoltamperometrycznych oraz pomiarów rentgenometrycznych powstających produktów

rozwarzania^{4, 5}. Zakres badań obejmował rozwarzanie próbek metali Cu, Sn i Ag wchodzących w skład spoiwa ściernicy (S3012 175×6×3×32 D125/100 C75 M100) oraz metali Co, Ti i W wchodzących w skład szlifowanych

węglików spiekanych (WC i TiC). Przydatność dobranych elektrolitów oceniano na podstawie prędkości rozwarzania poszczególnych metali. Wskaźnikiem charakteryzującym prędkość rozwarzania metali w elektrolitach była wartość gęstości prądu, przy której ustala się równowaga pomiędzy reakcjami anodowego rozwarzania metali i katodowej redukcji składników elektrolitu (rys. 3). Podstawą do wyznaczenia potencjałów równowagi i prądu rozwarzania były opracowane woltamperogramy cykliczne i wykresy zależności Tafela^{4, 5}.

Wyniki porównawczej oceny wpływu poszczególnych elektrolitów na prędkość rozwarzania składników metalowego spoiwa ściernicy i produktów zalepiających CPS przedstawiono na rys. 4.

Analiza wyników badań wskazuje, że skład chemiczny roztworów elektrolitów i zastosowany dodatek ochronny (występujący w elektrolitach E3 i E4) mają istotny wpływ na prędkość rozwarzania składników ściernicy i produktów zalepiających CPS. Dotyczy to w szczególności prędkości rozwarzania Cu i Sn składników

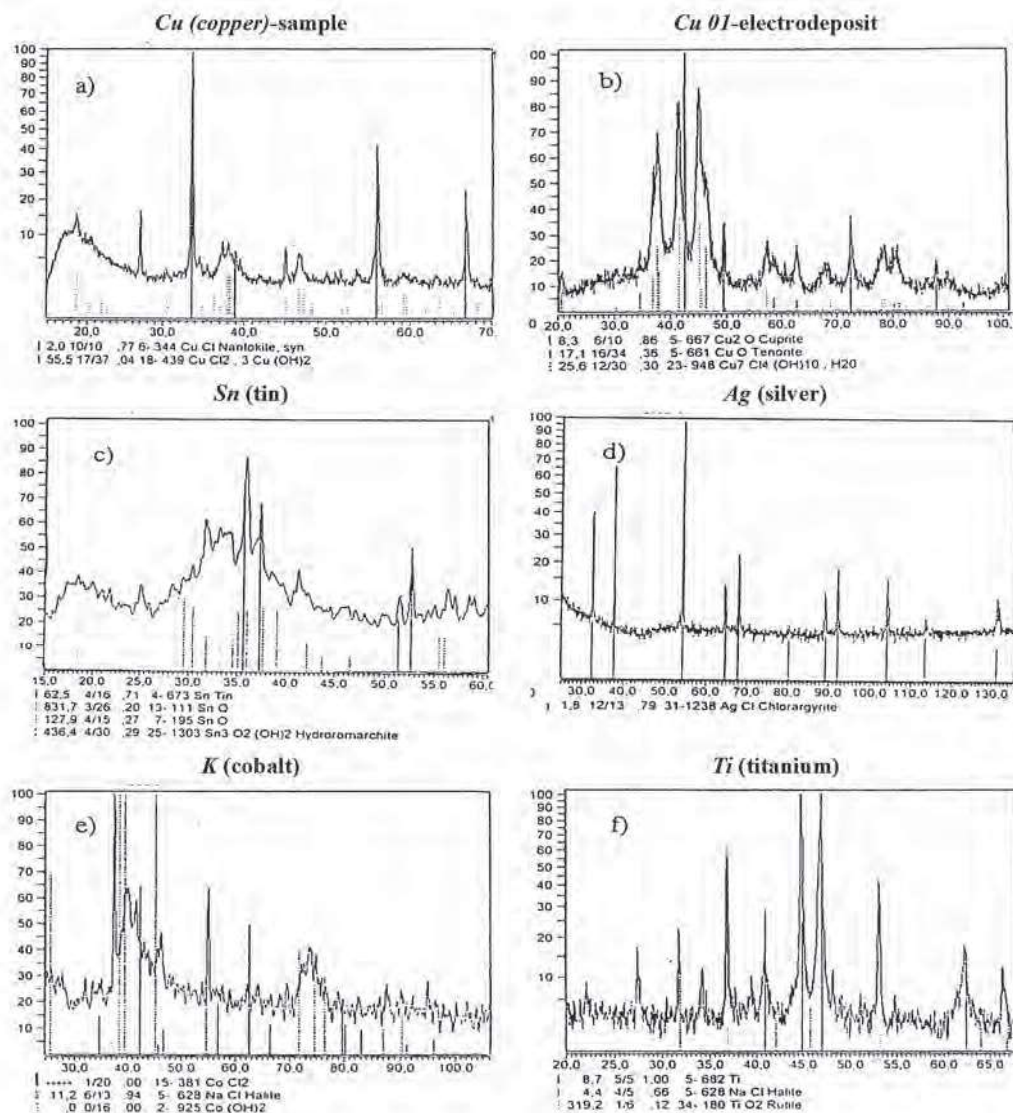


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of the grinding wheel erosion products: a) copper (the sample), b) copper (electrodeposit), c) tin, d) silver, e) cobalt, f) titanium; electrolyte solution E3

Rys. 5. Dyfraktogramy rentgenowskie produktów erozji ściernicy: a) miedź (próbka), b) miedź (osad elektrolityczny), c) cyna, d) srebro, e) kobalt, f) tytan; roztwór elektrolitu E3

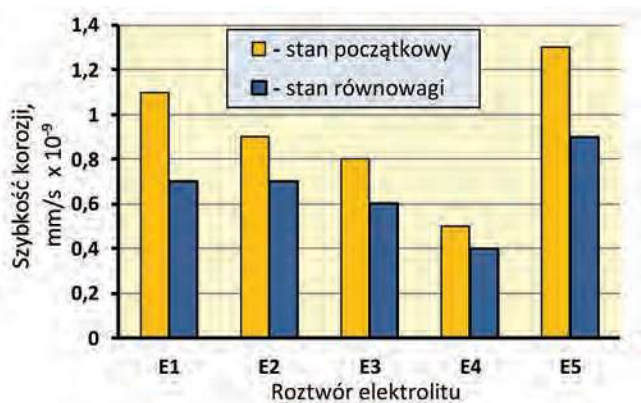


Fig. 6. The effect of the electrolyte composition on the corrosion rate of constructional steel; electrolytes as in Table

Rys. 6. Wpływ składu elektrolitu na szybkość korozji stali konstrukcyjnej; elektrolity jak w tabeli

spoiwa ściernicy oraz Co, metalu wiążącego węgliki spiekane zalepiające CPS. Prędkość roztwarzania tych metali w dobranych elektrolitach zmieniała się prawie trzykrotnie, a największą jej wartość uzyskano dla elektrolitu R5. Wpływ pozostałych elektrolitów na prędkość roztwarzania metali można uszeregować w kolejności: E1, E2, E3 i E4. Przeprowadzone badania wykazały, że dobrane elektrolity zapewniają roztwarzanie wszystkich metali wchodzących w skład spoiwa ściernicy (Ag, Cu, Sn) i produktów zalepiających CPS (Co, W, Ti), co warunkuje ich przydatność w rzeczywistych warunkach procesu ECDGW-AC. Wyjątkiem jest tu tytan, który wskutek pasywacji wytwarza warstwę tlenkową. Roztworzenie wszystkich składników spoiwa i ściernicy oraz kobaltu, który jest metalem wiążącym węgliki spiekane (WC i TiC), powoduje także zrywanie tlenków tytanu z CPS w procesie ECDGW-AC. Ten fakt potwierdziły również badania rentgenograficzne produktów na próbkach roztwarzanych metali oraz w zawiesinie roztworów elektrolitów.

Badania rentgenometryczne

Badania rentgenometryczne umożliwiły identyfikację produktów erozji na próbkach metali powstających w procesie roztwarzania w dobranych elektrolitach (rys. 5). Analiza wyników badań chronowoltamperometrycznych i rentgenometrycznych umożliwiła identyfikację produktów erozji powstających w procesie elektrochemicznego roztwarzania oraz ustalenie przebiegów reakcji elektrochemicznych zachodzących w procesie roztwarzania oraz identyfikację produktów powstających w tych reakcjach, które opisano w publikacjach^{4, 5}. Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły, że anodowemu roztwarzaniu ulegają wszystkie metale wchodzące w skład metalowego spoiwa ściernicy i produktów zalepiających CPS. Podstawowymi produktami roztwarzania elektrochemicznego są chlorki, tlenki, wodorotlenki i węglany roztwarzanych metali.

Wymienione związki chemiczne występują w roztworze elektrolitu głównie w postaci osadów dających się łatwo odfiltrować. Analizy chemiczne nie ujawniły obecności związków chemicznych uciążliwych dla środowiska naturalnego lub szkodliwych dla obsługi szlifierki i otoczenia.

Badania korozyjności elektrolitów na zespoły szlifierki

Ocena korozyjnego działania elektrolitów na zespoły szlifierki polegała na określeniu prędkości korozji żelaza w tych elektrolitach (rys. 6). Badania wykazały, że najmniejszą prędkość korozji uzyskano dla elektrolitów E3 i E4 zawierających dodatek ochronny (w ilości 0,5–1%). Ograniczenie korozyjnego działania elektrolitów na zespoły konstrukcyjne szlifierki uzyskano m.in. przez zastosowanie roztworów alkalicznych o wysokim pH ($\text{pH} > 9,4$), zmniejszenie stężenia związków chemicznych w roztworze oraz stosowanie związków ochronnych.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione badania potwierdziły przydatność metody ECDGW-AC do elektrochemicznego ostrzenia ściernic supertwardych oraz możliwość zastosowania w tym procesie roztworów elektrolitów o małym stężeniu związków chemicznych.

Ustalono skład chemiczny roztworów elektrolitów zapewniających skuteczność ostrzenia ściernic metodą ECDGW-AC, które charakteryzują się znacznie mniejszą szkodliwością dla środowiska naturalnego i otoczenia oraz małą korozyjnością zespołów szlifierki.

Badania elektrochemiczne wykazały, że anodowemu roztwarzaniu ulegają wszystkie składniki metali wchodzących w skład metalowego spoiwa ściernicy i produktów zalepiających CPS. Powstające w tym procesie produkty roztwarzania (tlenki, wodorotlenki i węglany roztwarzanych metali) nie zawierają związków uciążliwych dla środowiska naturalnego oraz obsługi szlifierki i otoczenia.

Ograniczenie korozyjnego oddziaływania roztworów elektrolitów na zespoły szlifierki zapewnia zastosowanie roztworów alkalicznych o $\text{pH} \geq 9,4$ oraz zastosowanie dodatków ochronnych.

Otrzymano: 14-10-2024

Zrecenzowano: 25-11-2024

Zaakceptowano: 28-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] K. Wegener, F. Bleicher, P. Krajnik, H.W. Hoffmeister, Ch. Brecher, *CIRP Ann-Manuf. Technol.* 2017, **66**, 779.
- [2] H. Batham, D. Patel, T.A. Banerjee, *Mater. Today Proceed.* 2022, **66**, 3870.
- [3] K. Wegener, H.W. Hoffmeister, B. Karpuschewski, F. Kuster, W.C. Hahmann, M. Rabiey, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2011, **60**, 757.
- [4] M. Gołąbczak, *Performance properties of superhard grinding wheels in erosive dressing processes*, Springer Nature Switzerland, 2024.
- [5] M. Gołąbczak, A. Gołąbczak, B. Tomczyk, *Materials* 2021, **14**, 1375.
- [6] M. Gołąbczak, R. Świąćnik, A. Gołąbczak, D. Kaczmarek, R. Dębowski, B. Tomczyk, *Materials* 2021, **14**, 6773.