

LACHOWSKI Jan, BOROWIECKA-JAMROZEK Joanna

MODELOWANIE WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW STOSOWANYCH NA OSNOWY W NARZĘDZIACH METALICZNO-DIAMENTOWYCH

Streszczenie

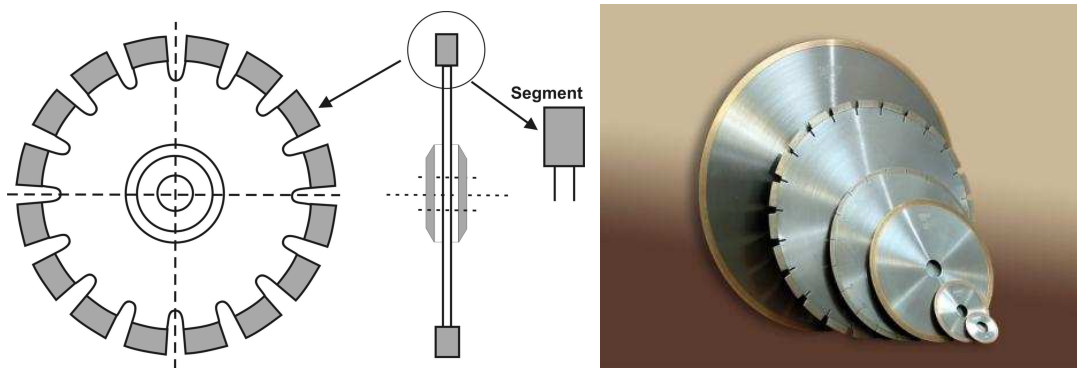
W pracy przedstawiono modelowanie właściwości materiałów, używanych jako osnowy dla narzędzi metaliczno-diaamentowych. Trzy materiały zostały wytworzone metodą metalurgii proszków z kombinacji proszków kobaltu (Co Extrafine), żelaza korbonylowego (Fe CN) i wolframu (WP30). Zastosowano prasowanie na gorąco do produkcji materiałów. Próbę rozciągania i pomiar twardości wykonano dla próbek materiałów. Istotną właściwością materiału osnowy jest retencja, czyli utrzymywanie cząstek diamentu przez otaczającą osnowę podczas pracy narzędzia metaliczno-diaamentowego. Retencja silnie zależy od mechanicznych właściwości osnowy. Mechaniczne pola wokół cząstki diamentu w osnowie były otrzymane przez symulacje komputerowe. Obliczenia przeprowadzono dla powierzchniowej cząstki po prasowaniu na gorąco i następnie obciążonej siłą zewnętrzną. Analiza właściwości mechanicznych osnowy została przeprowadzona metodą elementów skończonych z wykorzystaniem programu Abaqus. Przyjęto, że retencja cząstki diamentu jest zależna od sprężystej i plastycznej energii odkształcenia osnowy. Przeprowadzono analizę wydobycia, produkcji i cen kobaltu w latach 2000-2012.

WSTĘP

Do obróbki kamienia naturalnego stosowane są piły diamentowe produkowane w dwóch rodzajach: z ciągłą warstwą roboczą na obwodzie dysku lub z warstwą roboczą w postaci segmentów przylutowanych do stalowej tarczy pomiędzy specjalnymi wrębami (Rys. 1). Segmenty równomiernie rozmieszczone na tarczy, stanowiące elementy robocze pił, to spieki metaliczno-diaamentowe wytwarzane za pomocą technologii metalurgii proszków.

Proces wytwarzania spieków metaliczno-diaamentowych polega na wymieszaniu proszku stanowiącego metaliczną osnowę z proszkiem diamentowym syntetycznym lub naturalnym, prasowaniu kształtek, a następnie ich spiekaniu lub prasowaniu na gorąco. W wyniku tych operacji otrzymuje się segment metaliczno-diaamentowy. Segmenty lutuje się do stalowych tarcz i stanowią one elementy tnące pił tarczowych służących do cięcia materiałów (Rys. 1) [4,5,6].

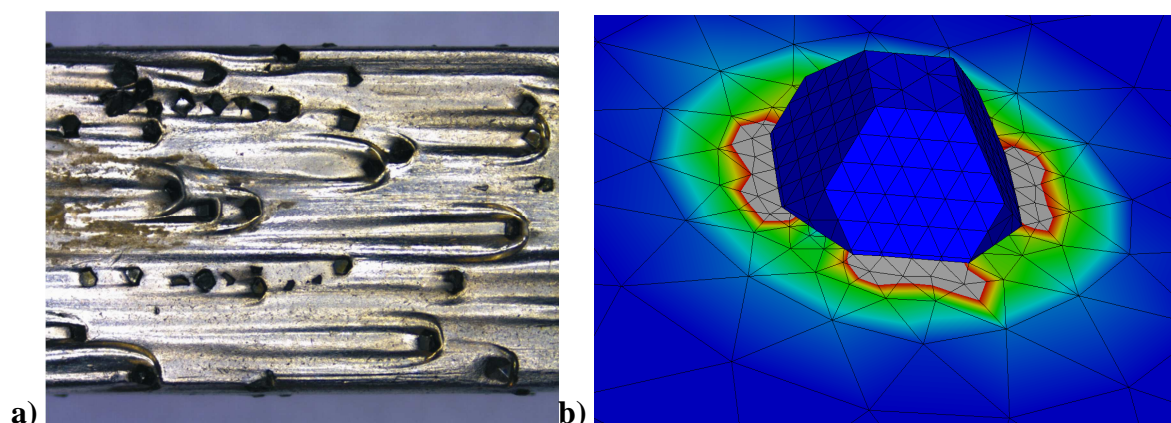
Materiałem najczęściej stosowanym na osnowę spieków metaliczno-diaamentowych jest kobalt. Jednak cena tego surowca jest wysoka i jednocześnie niestabilna [8]. Sytuacja ekonomiczna zmusza producentów do poszukiwania możliwości zastąpienia kobaltu innym, tańszym surowcem, który jako materiał osnowy zapewniłby podobne właściwości użytkowe narzędzi przy niższych kosztach ich wytwarzania [1,2,3].



Rys. 1. Diamentowa piła tarczowa, a) schemat piły, b) widok piły.

1. RETENCJA CZĄSKI DIAMENTU W OSNOWIE METALICZNEJ

Istotną właściwością materiału osnowy jest retencja - tzn. utrzymywanie cząstek diamentu na powierzchni segmentu (Rys. 2a) podczas pracy narzędzia metaliczno-diaamentowego. Cząstki diamentu są utrzymywane w osnowie dzięki połączeniom mechanicznym lub chemicznym, albo poprzez działanie obu tych połączeń jednocześnie [5]. Połączenie mechaniczne uzyskuje się w trakcie chłodzenia po procesie prasowania na gorąco. Ponieważ diament ma bardzo mały współczynnik rozszerzalności cieplnej w porównaniu z metalami cząstki diamentu są ściskane przez kurczącą się osnowę. Uzyskanie odpowiedniego połączenia mechanicznego zależy od własności sprężystych i plastycznych materiału osnowy. Analiza retencji cząstki diamentu w zależności od właściwości mechanicznych osnowy była prowadzona w pracach [9,10,11,12,]. Najbardziej istotnymi parametrami oceny skuteczności retencji są energia sprężysta i energia plastyczna odkształconej osnowy wokół cząstki diamentu (Rys. 2b). Skuteczność retencji rośnie z rosnącą energią osnowy wokół cząstki [11,12].



Rys. 2. Powierzchnia segmentu z cząstkami diamentowymi a), numeryczny model cząstki diamentu z otaczającą strefą plastyczną b)

2. WŁAŚCIWOŚCI WYBRANYCH MATERIAŁÓW STOSOWANYCH JAKO OSNOWY

Próbki do analizy zostały wykonane z proszków kobaltu, żelaza i wolframu. Podstawowe właściwości cząstek proszków użytych w badaniach przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Właściwości wykorzystanych proszków metali

Proszek (nazwa komercyjna)	Wielkość cząstki [μm]	Gęstość pozorna [g/cm^3]	Gęstość rzeczywista [g/cm^3]	Producent
Co (Co EF)	1.5	1.1	2.2	Umicore (Belgium)
Fe (Fe CN)	6.9	3.6	-	Foxmet (Luxembourg)
W (WP30)	2.6	3.2	6.0	Eurotungstene (France)

Proszek kobaltu oraz mieszaniny były prasowane na gorąco w grafitowej formie przez czas 2 minut w maksymalnej temperaturze i przy maksymalnym ciśnieniu (Tab. 2). Temperatura procesu była dobierana indywidualnie do składu materiału, tak aby porowatość spieku nie przekraczała 5%. Proces był prowadzony w atmosferze azotu przy użyciu pieca AGRA CAR1001.

Tab. 2. Skład analizowanych materiałów i parametry prasowania na gorąco

Materiał	Skład chemiczny	Parametry procesu
Co(EF)	100% Co Extrafine	850°C/35MPa/2min
Co(EF)-Fe	50% Fe CN 50% Co Extrafine	900°C/35MPa/2min
Co(EF)-Fe-W	40% Fe CN 40% Co Extrafine 20% WP30	980°C/40MPa/2min

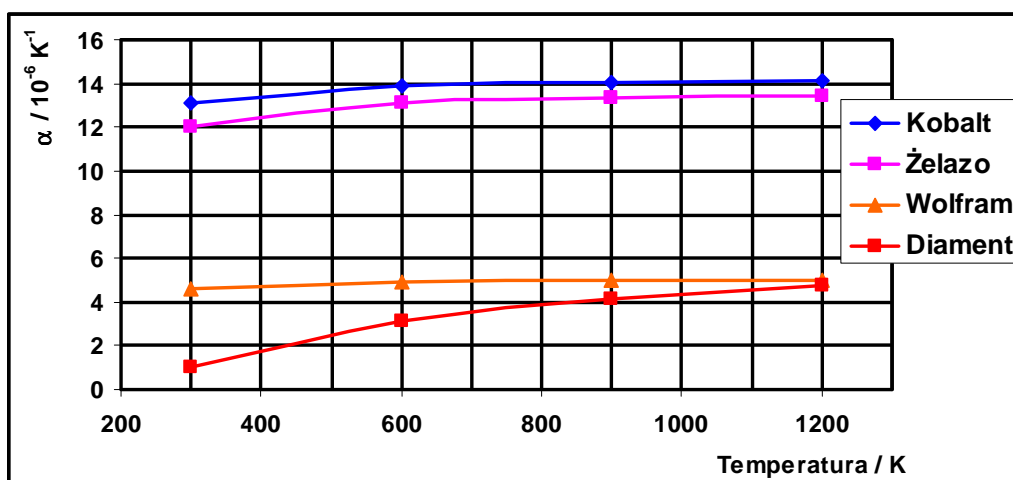
Próbie rozciągania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 4502. Wydłużenie próbki rejestrowano ekstensometrem o długości pomiarowej 10 mm. Wyznaczono dla badanych materiałów wytrzymałość, granicę plastyczności i wydłużenie. Twardość była mierzona pod obciążeniem 10 kG przy użyciu metody Vickersa. Wyniki badań wytrzymałościowych i twardości przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki statycznej próby rozciągania i badania twardości

Symbol	R_m , [MPa]	$R_{0.2}$, [MPa]	$\Delta L/L$, [%]	Twardość ⁽¹⁾ , HV10
Co(EF)	954	634	9.5	271±4
Co(EF)-Fe	527	494	1.3	254±2
Co(EF)-Fe-W	762	721	0.7	351±7

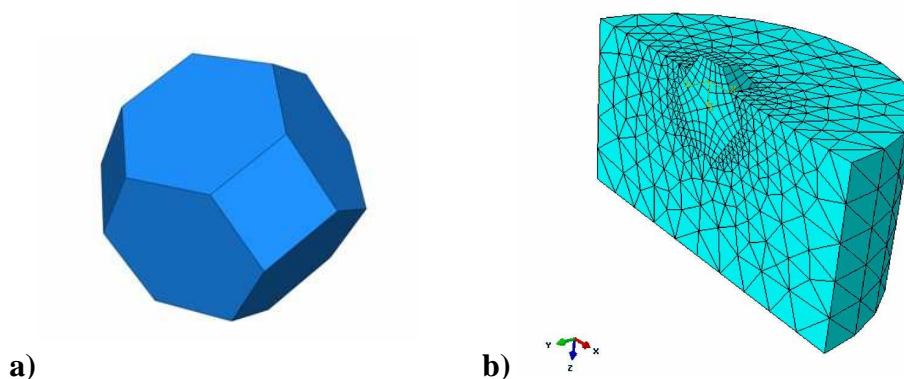
3. MODEL CZĄSTKI DIAMENTU PODCZAS PRASOWANIA NA GORĄCO

Symulację komputerową prasowania na gorąco i obciążania cząstki diamentu przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania Abaqus wersja 6.12 [16]. W obliczeniach przyjęto współczynniki rozszerzalności cieplnej kobaltu, żelaza, wolframu i diamentu zgodnie z danymi prezentowanymi w pracach [13, 14, 15] (Rys. 3). Parametry mechaniczne osnowy przyjęto zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 3.



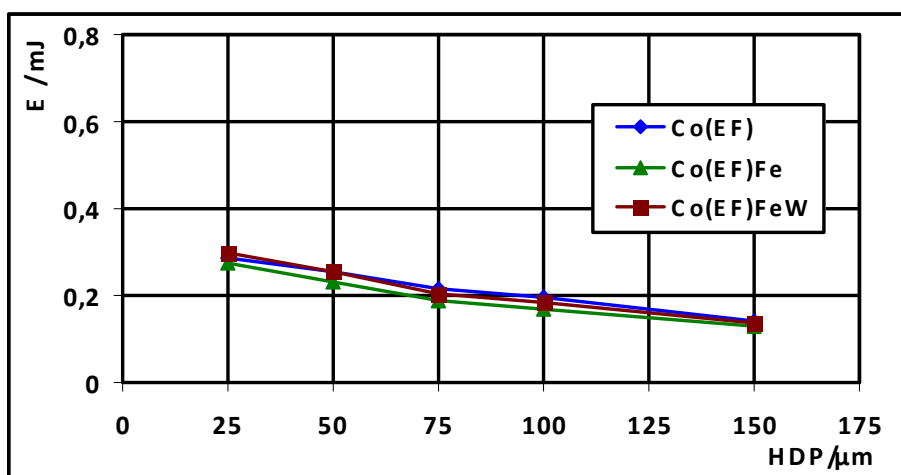
Rys. 3. Współczynniki rozszerzalności cieplnej metali i diamentu w funkcji temperatury

Komputerową symulację przeprowadzono dla modelu 3D cząstki diamentu o kształcie kubo-oktaedru (Rys. 4a), która była osadzona w osnowie (Rys. 4b). Obliczenia prowadzono dla cząstki diamentu wystającej nad powierzchnię metalicznej osnowy. Wysokość diamentu nad powierzchnią (ang. *height of diamond protrusion*, HDP) zmieniała się w zakresie od 25 μm do 150 μm . Wielkość cząstki diamentu wynosiła 350 μm (odległość między przeciwległymi kwadratowymi ściankami).

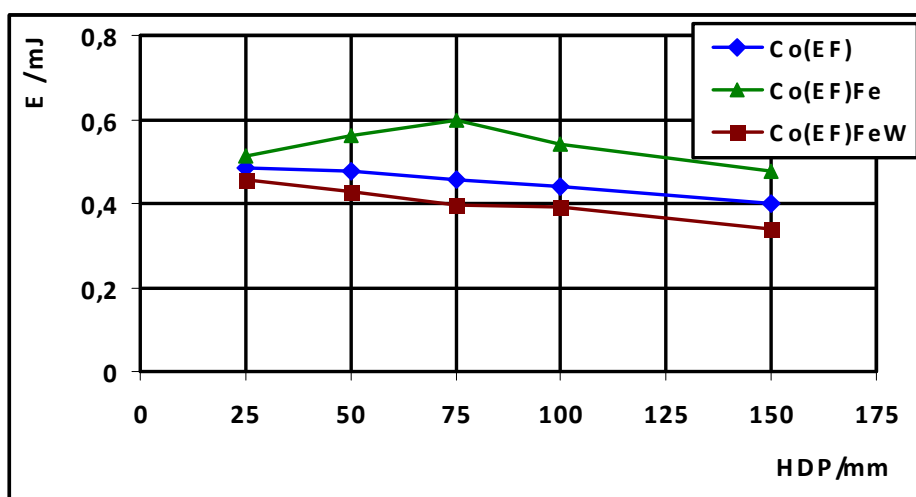


Rys. 4. Model cząstki diamentu w osnowie, a) kubo-oktaedr, b) przekrój przez model cząstki w osnowie

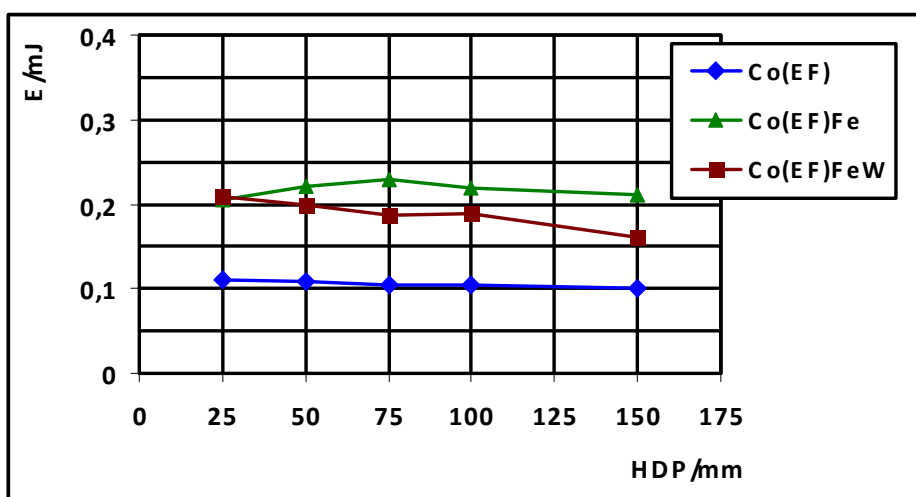
Proces chłodzenia układu cząstka diamentu – metaliczna osnowa po prasowaniu na gorąco był modelowany dla wszystkich trzech materiałów osnowy. Całkowita energia odkształcenia osnowy wokół cząstki diamentu wykazuje wyraźną zależność od protruzji HDP (Rys. 5). Obciążenie cząstki siłą 200 N powoduje dalszy wyraźny wzrost energii osnowy (Rys. 6). Udział energii odkształceń plastycznych jest większy od energii odkształceń sprężystych (Rys. 7 i Rys. 8).



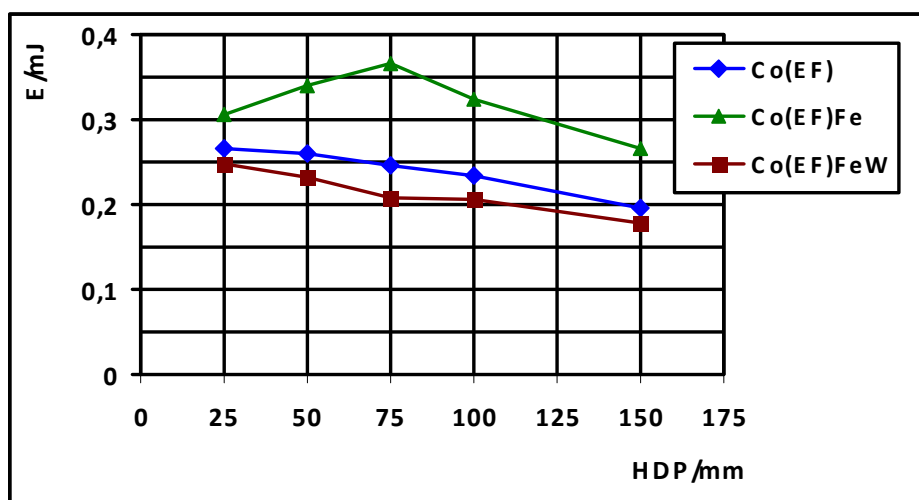
Rys. 5. Energia odkształcenia osnowy wokół cząstki diamentu



Rys. 6. Energia odkształcenia osnowy wokół obciążonej cząstki diamentu



Rys. 7. Energia sprężysta osnowy po obciążeniu cząstki diamentu



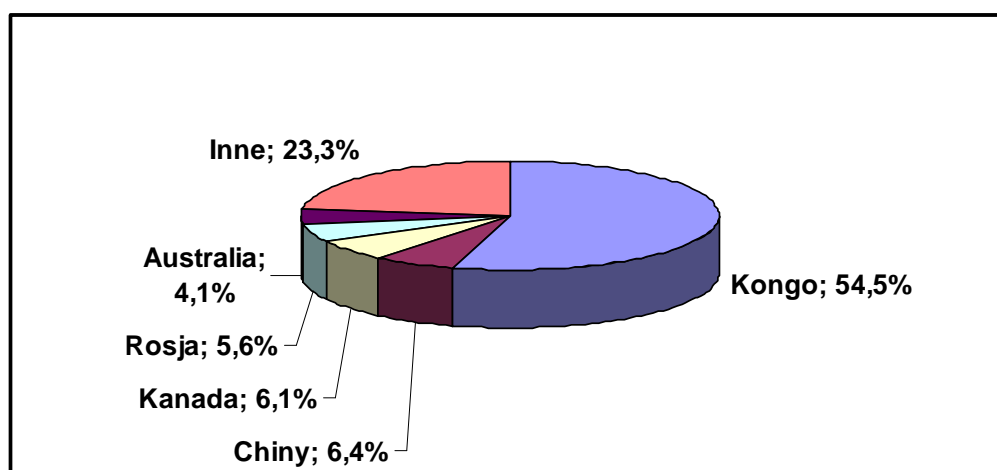
Rys. 8. Energia plastyczna osnowy po obciążeniu cząstki diamentu

4. DYNAMIKA WYDOBYCIA, PRODUKCJI I CEN KOBALTU

Statystyczne dane dotyczące wydobycia, produkcji, zużycia i cen kobaltu są gromadzone od roku 1900 [17]. Analizując zużycie kobaltu można zaobserwować dwa okresy [8,17]. W pierwszym okresie do 1938 roku zużycie kobaltu nie było wysokie. Następnie od roku 1939 (wybuch II Wojny Światowej) nastąpił szybki wzrost zużycia kobaltu.

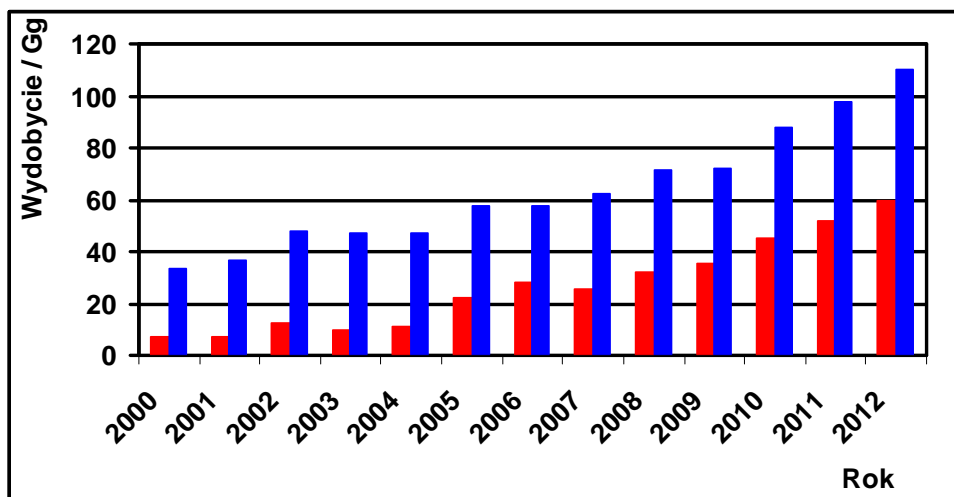
Od momentu, kiedy opracowano technologię otrzymywania syntetycznych diamentów na skalę przemysłową, zastosowanie narzędzi metaliczno-diaamentowych znacznie wzrosło [2], gdyż cena syntetycznych diamentów jest zdecydowanie niższa od ceny diamentów naturalnych. To spowodowało dalszy wzrost zapotrzebowania na kobalt; gwałtownie wzrosła produkcja i zużycie kobaltu.

Wydobycie kobaltu w roku 2012 wyniosło w sumie 110 tys. ton i jest skoncentrowane w niewielkiej grupie krajów, głównie w: Kongo, Chinach, Kanadzie, Rosji, Australii, Zambii i Kubie (Rys. 9).



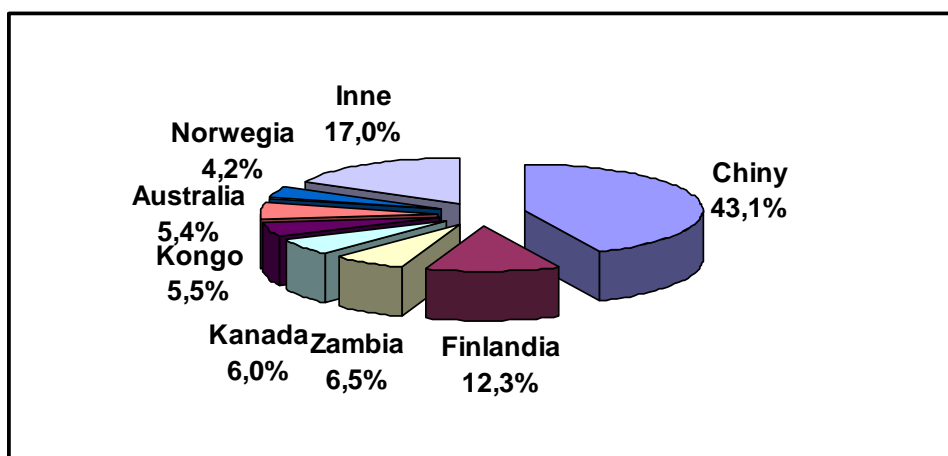
Rys. 9. Udział procentowy poszczególnych krajów w wydobyciu kobaltu w 2012 roku

Najszybszy wzrost wydobycia kobaltu po roku 2000 zanotowany był w Kongo (Rys. 10). Od ok. 7 tys. ton w roku 2002, aż do szacowanych 60 tys. ton w 2012 roku. W latach 1994-1995 wydobycie w tym rejonie wynosiło tylko ok. 3,4 tys. ton. Całkowite wydobycie światowe wynosiło odpowiednio 33,3 tys. ton (rok 2000) i szacowane 110 tys. ton (rok 2012).



Rys. 10. Dynamika wydobywania kobaltu w Kongu i na świecie od roku 2000

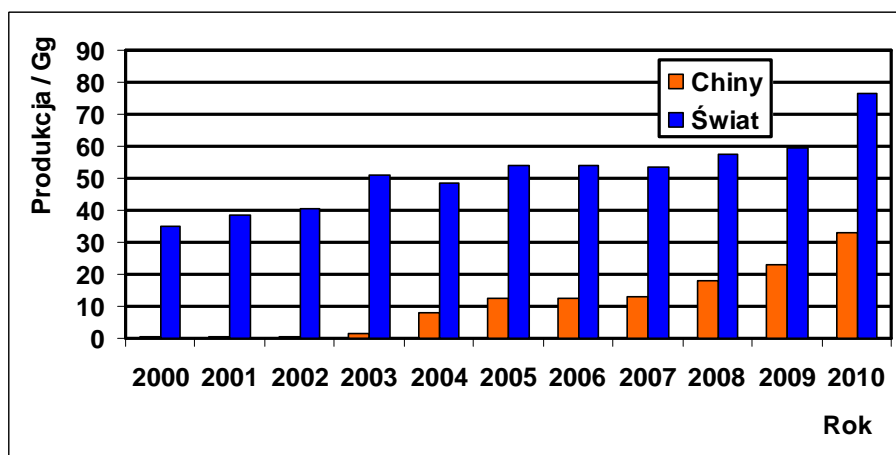
Oprócz dużych uczestników wydobywania kobaltu, również duże znaczenie mają producenci rafinowanego kobaltu (Rys. 11). Największy przyrost produkcji kobaltu ma miejsce w Chinach, 0,41 tys. ton w roku 2000, aż do 32,9 tys. ton w 2010 roku. Światowa produkcja wyniosła odpowiednio 35 tys. ton (rok 2000) i 76,4 tys. ton (rok 2010) (Rys. 12).



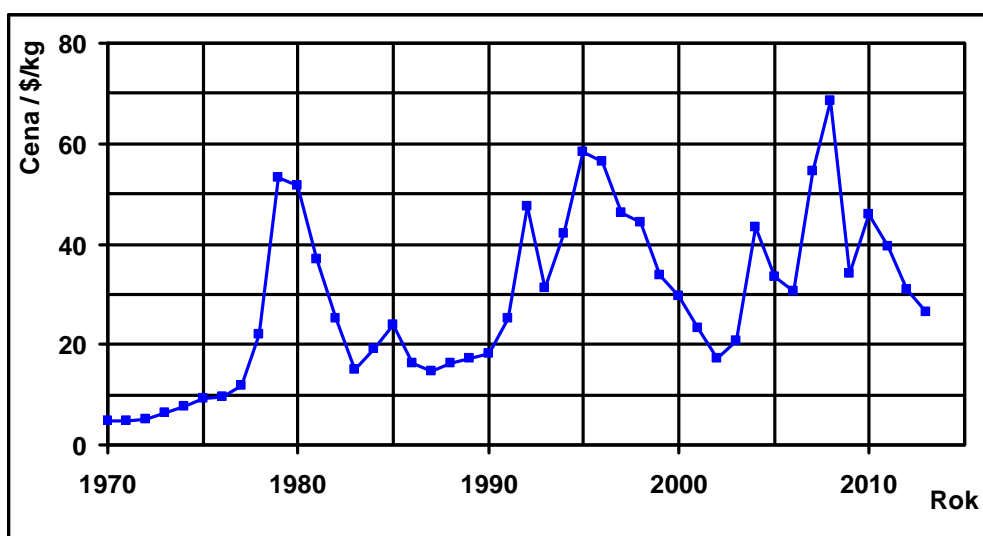
Rys. 11. Udział w produkcji kobaltu rafinowanego w roku 2010

W pierwszym rozpatrywanym okresie (do 1938 r.) cena kobaltu wykazywała większą stabilność i oscylowała wokół wartości średniej wynoszącej 4045 \$/tona. Po II Wojnie światowej cena kobaltu wahała się dalej na zrównoważonym poziomie, aż do połowy lat siedemdziesiątych, gdy nastąpił gwałtowny skok ceny (Rys. 13). Cena kobaltu wykazuje silne wahania, aż do chwili obecnej. Ostatni bardzo silny wzrost ceny kobaltu wystąpił w latach 2007-2008 (Rys. 13). Istotny wpływ na cenę kobaltu mają wydarzenia polityczne w rejonach związanych z jego wydobywaniem.

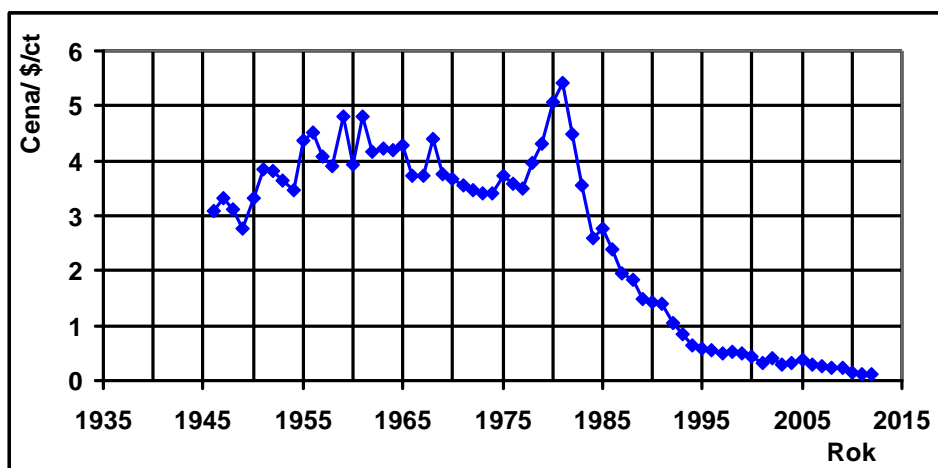
Natomiast, w przeciwieństwie do ceny kobaltu, obserwuje się ciągły spadek ceny diamentów syntetycznych (Rys. 14).



Rys. 12. Wzrost produkcji kobaltu rafinowanego na świecie i w Chinach



Rys. 13. Dynamika ceny kobaltu w latach 1970-2013



Rys. 14. Ceny diamentów przemysłowych w latach 1970-2013

PODSUMOWANIE

Istotnie na koszty wytwarzania narzędzi metaliczno-diaamentowych wpływają koszty metalicznej osnowy. Materiałem najczęściej stosowanym na osnowę spieków metaliczno-diaamentowych jest kobalt. Od roku 1977 obserwuje się zarówno wzrost jak i silne wahania

ceny kobaltu. Natomiast, w przeciwieństwie do ceny kobaltu, obserwuje się ciągły spadek ceny diamentów syntetycznych.

Dlatego poszukiwane są nowe materiały na osnowę segmentów metaliczno-diamentowych, aby obniżyć koszt wytwarzania narzędzia metaliczno-diamentowego. Prowadzone są prace w tym kierunku, aby zastąpić kobalt innymi tańszymi stopami metali. Biorąc powyższe pod uwagę, należy stwierdzić, że celowe jest poszukiwanie nowych materiałów na osnowę narzędzi metaliczno-diamentowych, aby uniezależnić produkcję tych narzędzi od kobaltu.

Zapotrzebowanie na kobalt pozostanie duże, szczególnie dla zastosowań w bateriach elektrycznych. Baterie litowe, wykorzystywane w elektrycznych pojazdach hybrydowych, zawierają znaczną zawartość kobaltu. Sygnalizowane przez duże firmy motoryzacyjne [12] zwiększenie produkcji pojazdów hybrydowych będzie dodatkowym czynnikiem wymuszającym cenę kobaltu w przyszłości.

BIBLIOGRAFIA

1. Borowiecka-Jamrozek J., Konstany J., Struktura i własności materiałów osnowy w narzędziowych kompozytach metaliczno-diamentowych, HUTNIK, Rok 2010, Nr 10, Wyd SIGMA-NOT, s. 593-596.
2. Borowiecka-Jamrozek J., Konstany J., Properties of hot pressed Fe-50%-Co materials, Inżynieria Materiałowa nr 6/2010, s1429-1432.
3. Borowiecka-Jamrozek J., Engineering structure and properties of materials used as a matrix in diamond impregnated tools, Archives of metallurgy and materials, Volume 58/2013 issue 1, pp 5-8
4. Konstany J., Powder metallurgy diamond tools: a review of manufacturing routes, Materials Science Forum, vols 534-536 (2007) 1121-1124.
5. Konstany J., Powder Metallurgy Diamond Tools, Elsevier, Oxford, 2005.
6. Konstany J., Production of diamond sawblades for stone sawing applications, Key Engineering Materials, 250 (2003) 1-12.
7. Konstany J., Production parameters and materials selection of powder metallurgy diamond tools: technology review, Powder Metallurgy, 49 (2006) 299-306.
8. Lachowski J., The Operational and Economic Aspects of Using Cobalt in Metallic-Diamond Tools, in Selected Problems of Mechanical Engineering and Maintenance, ed. Radek N., Kielce University of Technology, M29, Kielce 2012.
9. Romański A., Lachowski J., Konstany J., Diamond retention capacity - evaluation of stress field generated in a matrix by a diamond crystal, Industrial Diamond Review, 66 (2006) 43-45.
10. Romański A., Lachowski J., Effect of friction coefficient on diamond retention capabilities in diamond impregnated tools, Archive of Metallurgy and Materials, vol 54, No 4, 2009
11. Romański A., Lachowski J., Frydrych H., Is energy of plastic deformation a good estimator of the retentive properties of metal matrix in diamond impregnated tools? 2nd International Industrial Diamond Conference, 19-20th April 2007, Rome, Italy
12. Romański A., Lachowski J., Frydrych H., Energy of plastic deformation as an estimator of the retentive properties of the metal matrix in diamond impregnated tools, Diamond Tooling Journal, vol 1, 2009, pp 28-36
13. Encyclopedic Dictionary of Condensed Matter Physics, Ed. Ch. P. Poole jr, Elsevier Academic Press, London 2004.
14. Handbook of Condensed Matter and Materials Data, eds. W. Martienssen & H. Warlimont, Springer Berlin Heidelberg 2005.

15. Properties of Diamond, de Beers Industrial Diamond Division, Special publication K4000/5/89.
16. SIMULIA Dassault System, Abaqus analysis user's manual, Version 612 (2012).
17. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt>, retrieved 30 september 2013.

MODELLING OF PROPERTIES OF MATERIALS USED AS A MATRIX IN METALLIC-DIAMOND TOOLS

Abstract

The paper presents modelling mechanical properties of materials used as matrices in metallic-diamond tools. Three powder metallurgy materials were manufactured by the hot press process from combinations of cobalt (Co Extrafine), carbonyl iron (Fe CN) and tungsten (WP30) powders. The specimens of the materials were tested for tensile properties and hardness. The effective use of metallic-diamond tools strongly depends on mechanical properties of the matrix, which has to hold the diamond grits firmly. The mechanical fields around a diamond particle in a matrix were been obtained by computer simulations. Computer simulations were performed for the protruding diamond particle after hot pressing and after loading with an external force. The mechanical fields generated in the matrix were calculated using the Abaqus software. It was assumed diamond retention in a matrix can be associated with the amount of the elastic and plastic deformation energy. The analysis of dynamics of mining, production and prices of cobalt was performed during 2000-2012 years.

Autorzy:

dr **Jan Lachowski** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, jlach@tu.kielce.pl

dr inż. **Joanna Borowiecka-Jamrozek** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, jamrozek@tu.kielce.pl