

Bezpośrednie lutowanie diamentu do korpusu narzędzia – spoiwa lutujące i metody lutowania

Direct brazing of diamond to the tool body – brazing binders and methods

MARCIN PODSIADŁO
LUCYNA JAWORSKA
PIOTR KLIMCZYK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.63>

W artykule przedstawiono zagadnienie bezpośredniego lutowania diamentu do korpusu narzędzia. Omówiono największe zagrożenia dla złącza lutowanego, takie jak naprężenia i zła zwilżalność. Następnie zaprezentowano wytwarzanie półfabrykatów z polikrystalicznego diamentu różnymi metodami. Dalej przedstawiono stopy metali (lutowia) o osnowie ze srebra, z niklu i miedzi, które wykorzystuje się do lutowania diamentu. Omówiono najczęściej stosowane metody lutowania twardego (oporowe, indukcyjne, laserowe i w poczerwieni).
SŁOWA KLUCZOWE: lutowanie, diament, PCD, ceramika, narzędzia

The article presents the problem of direct brazing of diamond to the tool body. The greatest threats to the brazing joint were discussed: stress and poor wettability. Methods for producing polycrystalline diamond blanks by various methods were presented. The metal alloys (solders) with a silver, nickel and copper matrix that is used for brazing diamonds were described. The most commonly used brazing methods (resistance, induction, laser and infrared) were discussed.

KEYWORDS: brazing, diamond, PCD, ceramics, tools

Wprowadzenie

Zwiększenie wytrzymałości połączeń metal–ceramika stanowi cel wielu badań naukowych. Takie złącza pracują w trudnych warunkach – są narażone na działanie wysokiej i niskiej temperatury oraz podlegają zmiennym obciążeniom mechanicznym i cieplnym. Najgroźniejsza jest duża różnica naprężeń własnych. W ceramice naprężenia te mogą się sumować z rozciągającymi naprężeniami eksploatacyjnymi, co niekiedy prowadzi do przekroczenia wytrzymałości całego połączenia i w efekcie do jego zniszczenia [1].

Na wielkość naprężeń własnych w złączach ceramiczno-metalowych mają wpływ:

- współczynniki rozszerzalności liniowej ceramiki i metalu,
- moduły sprężystości wzdłużnej i moduł odkształcenia postaciowego,
- granica plastyczności metalu, zależna od temperatury,
- współczynnik przewodnictwa ciepła dla elementów złącza,
- czynniki geometryczne, takie jak kształt i wymiary spajanych elementów [2, 3].

Poziom naprężeń w złączu można zmniejszyć przez odpowiedni dobór jego wszystkich elementów, w tym zadbanie o to, aby miały one zbliżone wartości wymienionych właściwości.

Przyczyną nieodpowiednich właściwości złączy, np. nieszczelności bądź niskiej wytrzymałości, jest zła zwilżalność pomiędzy stopami stanowiącymi lutowie a powierzchnią ceramiki. Typowa temperatura lutowania ceramiki do metali mieści się w przedziale 470÷1190°C. Oczywiście dla procesu spajania decydującymi parametrami są szybkość grzania, temperatura spajania, rodzaj atmosfery, czas wytrzymania w temperaturze spajania oraz szybkość chłodzenia.

Szczelne i wytrzymałe złącze pomiędzy ceramiką a metalem można uzyskać trzema metodami:

- przez naniesienie powłok metalowych na podłoże ceramiczne w celu uzyskania niskoenergetycznej granicy faz metal–metal,
- drogą rozkładu (dysocjacji) i dyfuzji materiału ceramicznego w spoiwie, wykorzystującego rozpuszczanie się składników ceramicznych w spoiwie,
- przez zastosowanie metali aktywnych i utworzenie nowych faz stałych, korzystnych dla złącza [4].

Materiały diamentowe i lutowanie ostrzy z polikrystalicznego diamentu na podłożu z węgla spiekane

Diament stanowi krystaliczną odmianę węgla o regularnej strukturze. Jest najtwardszym spośród wszystkich znanych materiałów. Ograniczeniem zastosowania diamentu naturalnego jest brak naturalnych kryształów w pełnym zakresie wielkości. Obecnie diament naturalny stanowi jedynie 10% diamentu stosowanego do celów technicznych – pozostałą część zapotrzebowania pokrywa diament syntetyczny.

Diament syntetyczny po raz pierwszy otrzymano drogą przemiany alotropowej grafitu, w obecności katalizatorów, w warunkach wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury. W latach 70. XX w. metodą wysokociśnieniowego spiekania otrzymano diament polikrystaliczny, który stosowano: w produkcji narzędzi do obróbki skrawaniem, do obróbki kamienia budowlanego, w wiertnictwie oraz jako oczka w ciągadłach przeznaczonych do produkcji drutów

* Mgr inż. Marcin Podsiadło, marcin.podsiadlo@ios.krakow.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3962-6268> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania; Wydział Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica, Kraków, Polska
Prof. dr hab. inż. Lucyna Jaworska, lucyna.jaworska@ios.krakow.pl, <https://orcid.org/0000-0002-1240-2694> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania; Wydział Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica, Kraków, Polska
Dr hab. inż. Piotr Klimczyk, <https://orcid.org/0000-0002-8060-1388> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska

z metali kolorowych [5]. Obecnie narzędzi z PCD używa się do obróbki materiałów nieżelaznych (np. stopów aluminium, stopów tytanu, tworzyw sztucznych, polimerów wzmacnianych włóknami, kompozytów, ceramiki).

W latach 80. zrealizowano niskociśnieniową koncepcję wytwarzania diamentu syntetycznego metodą krystalizacji chemicznej z fazy gazowej CVD (*chemical vapour deposition*). Ta technika umożliwia nakładanie diamentu na duże powierzchnie. W metodzie CVD diament jest syntetyzowany z bogatych w węgiel gazów, w warunkach ciśnienia bliskiego ciśnieniu atmosferycznemu, bez jakichkolwiek dodatków (np. kobaltowej fazy wiążącej). Diament otrzymywany metodami CVD charakteryzuje się wysoką czystością chemiczną oraz prawidłowością struktury krystalograficznej. Ma wysoką przewodność cieplną (do sześciu razy większą od miedzi), co także stanowi pożądaną właściwość ostrzy narzędzi skrawających. Odporność ścierna takiego diamentu jest wyższa w porównaniu z materiałami polikrystalicznymi otrzymywanymi w warunkach wysokiego ciśnienia. Najczęściej polikrystaliczny diament CVD jest наносzony w postaci powłok o grubości do 0,5 mm. Słabą stroną tych materiałów – w porównaniu z diamentem otrzymywanym w warunkach wysokiego ciśnienia – jest większa kruchość.

Polikrystaliczny diament z kobaltową fazą wiążącą (do 10% obj.) otrzymuje się w postaci cienkich warstw, o grubości od 0,3 do 1,5 mm, spiekanych w tym samym procesie z podkładką wykonaną z węglików spiekanych WC-Co. W ten sposób w jednym procesie spiekania powstaje spiek dwuwarstwowy, który jest łączony z korpusem narzędzia (np. płytki skrawającej) poprzez warstwę węglika spiekane, za pomocą lutów opartych na srebrze i miedzi, często zawierających ind i tytan.

Firmy produkujące komercyjne polikrystaliczne materiały diamentowe podkreślają, że temperatura procesu lutowania nie powinna przekraczać 730°C, a czas wytrzymania w wysokiej temperaturze musi być minimalizowany. Do lutowania stosuje się spoiwa o temperaturze lutowania z przedziału 600÷700°C. Zwraca się uwagę na korpus narzędzia, którego współczynnik rozszerzalności cieplnej nie powinien znacząco różnić się od współczynnika rozszerzalności cieplnej PCD i warstwy podłożowej węglika spiekane. Jeżeli różnica współczynników rozszerzalności cieplnej jest duża, istnieje ryzyko powstania naprężeń cieplnych drugiego rodzaju, a efektem relaksacji tych naprężeń mogą być pęknięcia. Po lutowaniu zaleca się chłodzenie na powietrzu (chłodzenie w cieczach nie jest rekomendowane).

Do lutowania często używa się urządzeń indukcyjnych i ultradźwiękowych, a najczęściej – laserowych [6].

Stopy lutujące diament

Diament (polikrystaliczny, monokrystaliczny, proszki diamentowe i diament w postaci grubych warstw CVD) jest niezwiązalny przez większość spoiw i trudno go połączyć z konwencjonalnymi stopami lutowniczymi ze względu na ich skład chemiczny. W trakcie procesu lutowania w podwyższonej temperaturze tworzą się roztwory i metastabilne węgliki (Co, Ni, Fe), a z pierwiastków (Ti, Zr, Hf, Nb, Mo, Mn, Si) – stabilne węgliki. Materiały diamentowe mają znacznie wyższy moduł sprężystości niż metale. Niedopasowanie modułu Younga materiału korpusu narzędzia i materiału diamentowego może skutkować wysokim stanem naprężeń szczątkowych.

Naprężenia resztkowe cieplne to kolejny poważny problem wynikający z niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej diamentu i podłoża WC-Co lub diamentu i metalowego korpusu narzędzia. Metal korpusu narzędzia i stopu lutowniczego kurczy się bardziej niż

materiał diamentowy podczas chłodzenia po procesie lutowania. Resztkowe naprężenia cieplne mogą powodować pęknięcia międzyfazowe, a następnie zmniejszać wytrzymałość na ścinanie elementów lutowanych.

Jednym z najważniejszych zagadnień dotyczących lutowania twardego diamentu jest dobór stopu lutowniczego o odpowiedniej temperaturze topnienia, nieprzekraczającej temperatury grafityzacji diamentu. Diament jest metastabilną – w warunkach atmosferycznych – postacią węgla; stabilny jest grafit. Dostarczenie do diamentu dodatkowej energii, np. w formie ciepła, powoduje więc jego przemianę alotropową w grafit. Dla diamentu syntetycznego temperatura grafityzacji w powietrzu wynosi (w zależności od katalizatorów zastosowanych w procesie syntezy metali) ok. 700°C, a dla monokryształów – powyżej 1000°C. Dla układu srebro–miedź (przy zawartości miedzi 28%) temperatura topnienia eutektyki wynosi 779°C. Te stopy stanowią podstawę spoiw lutowniczych dla diamentu. Dodatek takich metali, jak cynk, kadm i cyna, obniża temperaturę topnienia stopu lutowniczego, co ma pozytywny wpływ na ograniczenie procesu grafityzacji diamentu. Dodanie kilku procent tytanu poprawia zwilżanie spoiwa lutowniczego do diamentu. Wraz ze wzrostem zawartości tytanu wytrzymałość połączeń zmniejsza się ze względu na wzrost grubości warstwy TiC i innych faz międzymetalicznych. Ilość tytanu wprowadzanego do tego spoiwa nie powinna przekraczać 4% wag. [8].

Wysokotemperaturowy stop lutowniczy na osnowie z niklu, zawierający takie pierwiastki, jak chrom, bor, krzem, tytan i żelazo, także został zastosowany do lutowania diamentu do metalowych korpusów narzędzi skrawających. W strefie lutowania powstają węgliki krzemu i chromu. Wykazano, że chrom poprawia zwilżalność diamentu przez stop lutujący, jednak w porównaniu ze spoiwami na osnowie z miedzi i ze srebra charakteryzuje się wyższą temperaturą topnienia [9].

Jako optymalny skład spoiwa o osnowie z miedzi, przeznaczonego do lutowania diamentu w narzędziach skrawających, wytypowano kompozycję zawierającą 20% Sn i 10% Ti. Temperatura lutowania dla tego stopu wynosi 960°C. Ma on lepszą wytrzymałość i odporność na erozję w porównaniu ze stopami Ag-Cu oraz niższą temperaturę topnienia w porównaniu ze stopami na osnowie z niklu [10].

W literaturze dotyczącej komercyjnych spoiw lutujących najczęściej podawane są przykłady lutowania podłoża węglkowych, na których znajduje się warstwa diamentowa, spiekana z podłożem w tym samym procesie. W tym przypadku nie ma więc procesu lutowania diamentu, lecz występuje lutowanie węglika spiekane do korpusu narzędzia. Temperatura topnienia komercyjnych spoiw lutujących mieści się w przedziale 660÷1000°C, przy czym zachodzi konieczność powolnego nagrzewania i chłodzenia w zakresie 700÷1000°C [11]. Czas wytrzymania materiału powyżej 700°C także jest ograniczony.

Uniknięcie procesu grafityzacji i prawidłowe wypełnienie złącza materiałem spoiwa na skutek dobrej zwilżalności nie są jedynymi wyzwaniem w procesie lutowania diamentu. Złącze musi się charakteryzować odpowiednią wytrzymałością. Ważnym parametrem procesu lutowania diamentu jest także atmosfera procesu. Lutowanie diamentu można prowadzić w atmosferze obojętnej (Ar, N₂, He), redukcyjnej (H₂) lub w wysokiej próżni. Zawartość tlenu w gazie ochronnym powinna być mniejsza od 1 ppm. Najczęściej stosowane są argon lub mieszanina argonu z 5% wodoru. Lutowie do lutowania diamentu jest dostępne w postaci pasty lub folii. Z ekonomicznego punktu widzenia pasty są mniej wydajne niż folie, a dodatkowo muszą być nagrzewane znacznie wolniej, w próżni,

ponieważ w pierwszej fazie należy usunąć lepszczce. Szybkie odgazowanie lepszczca znajdującego się w paście skutkuje złą jakością złącza (porowatością). Pasty łatwiej się rozprowadza. W przypadku past nie powinno się stosować nagrzewania indukcyjnego lub oporowego, ponieważ są to procesy powodujące szybkie nagrzewanie [11].

Proces lutowania diamentu do korpusów narzędzi

Procesy bezpośredniego lutowania materiałów diamentowych (bez warstwy pośredniej w postaci węglika spiekanego) są jedno- albo dwustopniowe. Procesy jednostopniowe są realizowane z użyciem stopu, który zawiera metale aktywne względem diamentu, zwilża jego powierzchnię i tworzy silne wiązanie z atomami węgla. Zawartość metali aktywnych w spoiwie powinna być jednak ograniczona do 1÷10% wag. [12].

Druga metoda obejmuje procesy lutowania dwustopniowego, w których diament jest powlekany metalową warstwą i do lutowania można zastosować konwencjonalny stop lutowniczy, używany do łączenia metali. W przeciwieństwie do ceramiki tlenkowej czy azotkowej na metalowe powłoki nie są wymagane bardzo aktywne pierwiastki, takie jak hafn, cyrkon czy tytan. Badania potwierdziły skuteczność takich pierwiastków, jak chrom czy krzem, które z kolei są łatwiejsze w zastosowaniu z uwagi na mniejsze powinowactwo do tlenu i tym samym mniejszą skłonność do utleniania [13].

Przykładem jednostopniowego lutowania ziarna diamentu na stalowym podłożu jest lutowanie za pomocą stopu lutującego Ni-Cr-B-Si. Proces prowadzono wiązką laserową w atmosferze argonu. Stop Ni-Cr-B-Si w procesie lutowania laserowego wykazał dobre zwilżanie ziaren diamentu i stali. W obszarze granicy międzyfazowej ziaren diamentu i spoiwa lutującego chrom występował na powierzchni ziarna diamentu w postaci dwóch węglików, tj. Cr_7C_3 i Cr_3C_2 , co zapewniało mocne wiązanie diamentu ze spoiwem. Dobre połączenie uzyskano również między stalowym podłożem a stopem stanowiącym spoiwo [14].

Połączenia między diamentem CVD (grube warstwy diamentowe, otrzymywane techniką chemicznego osadzania z fazy gazowej) a węglikiem spiekanym są często badane ze względu na szeroki zakres zastosowania. Do lutowania stosuje się aktywne metale spoiwa lutującego na bazie srebra i miedzi. Spoiwa lutujące powinny zawierać do 1,25% wag. aktywnego składnika, np. Ti. Przy tej ilości składnika aktywnego spoiwo wykazywało odpowiednią zwilżalność – otrzymano mocne wiązanie z podłożem węglkowym. Dla procesu lutowania z zastosowaniem spoiwa $AgCuInTi1.25$ uzyskano dobre zwilżanie i ograniczony obszar reakcji pomiędzy diamentem, spoiwem lutującym i podłożem z węglika spiekanego. Tymczasem przy wyższych stężeniach składników aktywnych, np. 3% wag. Ti, obserwowano większy zasięg reakcji i niekorzystny wpływ na właściwości mechaniczne złącza [15].

Metody lutowania diamentu

W procesach lutowania diamentu wykorzystuje się różne źródła ciepła: płomień, podczerwień, indukcję elektryczną, zanurzenie, laser i oporność.

Lutowanie w podczerwieni

Do lutowania w podczerwieni wykorzystuje się lampy kwarcowe o wysokiej intensywności do generowania fal promieniowania elektromagnetycznego o długościach większych niż widmo widzialne. To promieniowanie jest pochłaniane przez lutowaną część. Część lutowaną moż-

na umieścić w specjalnej retorcie lub pojemniku zawierającym gaz ochronny. Lutowanie w podczerwieni zostało opracowane do lutowania paneli o strukturze plastra miodu. Kluczowym zadaniem w przypadku tego procesu jest kontrola temperatury.

Lutowanie oporowe

Lutowanie oporowe to proces, w którym ciepło wytwarzane w złączu lutowniczym jest wynikiem oporu elektrycznego. Ciepło powstaje w lutowanych komponentach, w elektrodach, które stykają się ze składnikami, lub w obu układach. Ogrzewanie oporowe jest bardzo lokalne i szybkie. Charakteryzuje się gradientem temperatury, dlatego tą metodą lutuje się elementy o małej objętości. Lutowanie oporowe jest najbardziej energooszczędne i najmniej kosztowne.

Lutowanie w piecu oporowym

Lutowanie w piecu oporowym jest procesem, w którym źródło ciepła do lutowania stanowi promieniowanie cieplne. Do elementów grzewczych pieca, wykonanych np. z grafitu, tantalum czy molibdenu, podłączony jest prąd elektryczny. Ciepło z elementu jest następnie wypromieniowywane w kierunku ogrzewanej części. W piecu oporowym można z dużą dokładnością kontrolować temperaturę, próżnię i atmosferę ochronną. Te piece są głównie stosowane w przypadku użycia past lutujących. Należy pamiętać, że usuwanie lepszczca ma szkodliwy wpływ na elementy grzewcze pieca oraz na jego wyłożenie. Koszty utrzymania i eksploatacji są stosunkowo wysokie. Wynika to z faktu, że elementy oporowe należy okresowo wymieniać. Częstotliwość wymiany zależy od temperatury roboczej, godzin pracy i czystości procesu.

Lutowanie indukcyjne

Lutowanie indukcyjne w podstawowej konfiguracji polega na tym, że półprzewodnikowy zasilacz RF wysyła prąd przemienny przez cewkę miedzianą, w której wnętrzu jest umieszczona część do lutowania. Cewka służy jako pierwotny transformator, a podgrzewana część staje się obwodem wtórnym. Gdy metalowa część jest umieszczona w cewce indukcyjnej i znajduje się w polu magnetycznym, krążące prądy wirowe są indukowane w obrębie lutowanej części. Prądy wirowe wytwarzają precyzyjne i zlokalizowane ciepło, bez żadnego bezpośredniego kontaktu między lutowaną częścią a cewką. W przypadku wrażliwych operacji lutowania twardego, takich jak lutowanie twarde diamentów, system oparty na indukcji może być wyposażony w pirometr optyczny, który ułatwia sterowanie temperaturą w zamkniętej pętli. Poprzez odpowiedni dobór zasilania indukcyjnego ogrzewania, regulatora temperatury i pirometru optycznego zapewnia się kontrolę temperatury na poziomie $\pm 2^\circ\text{C}$ [11].

Lutowanie indukcyjne piecowe

Lutowanie indukcyjne piecowe jest procesem, w którym susceptor grafitowy jest podgrzewany przez indukcję. Następnie susceptor emituje ciepło do części, która ma być lutowana. W przeciwieństwie do pieców oporowych piece indukcyjne o rozmiarach zwykle stosowanych do lutowania diamentów nie mają wielu stref. Równomierność temperatury uzyskuje się dzięki konstrukcji cewki i izolacji. Podobnie jak w przypadku pieców oporowych piece indukcyjne mogą mieć atmosfery ochronne, w tym atmosferę gazu obojętnego lub wysokiej próżni albo ich kombinację.

Lutowanie laserowe

Lutowanie laserowe jest zdecydowanie najkorzystniejsze w porównaniu z innymi metodami. W tym przypadku czas lutowania wynosi kilka sekund, podczas gdy lutowanie innymi metodami trwa nawet kilka godzin [16]. Do lutowania laserowego wykorzystuje się różne lasery, o różnych długościach fali, np. laser CO₂ lub Nd:YAG. Długości fali charakteryzują się różnymi współczynnikami absorpcji i tym samym różną temperaturą oraz rozkładem temperatury w materiale, na który oddziałuje wiązka laserowa [17]. Absorpcja materiału jako funkcja długości fali lasera i temperatury (w zakresie od temperatury pokojowej do punktu odparowania materiału) znacząco wpływa na wydajność procesu obróbki laserowej. Prognozy procesu obróbki laserowej, wykorzystujące uproszczone lub wyrafinowane modele, wymagają znajomości absorpcji materiału.

Ze względu na złą lutowalność stopów tytanowych, z których niekiedy wykonuje się korpusy narzędzi, do przytwierdzania segmentów ostrzy stosuje się klejenie i dodatkowo mocowanie mechaniczne, aby zmniejszyć masę [18].

Monolityczne diamenty i ich lutowanie

W przypadku spieków z polikrystalicznego diamentu najczęściej stosuje się podłoże z węglika spiekanego, a lutowanie polega na spajaniu węglika z korpusem narzędzia. Powodem stosowania w rozwiązaniach komercyjnych lutowania poprzez węglkową warstwę pośrednią jest niska odporność polikrystalicznego diamentu na przemianę w grafit.

W Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie od wielu lat otrzymuje się polikrystaliczne materiały diamentowe bez podłoża z węglika spiekanego. Podstawowym celem prowadzonych badań jest uzyskanie materiałów o podwyższonej odporności na działanie wysokiej temperatury – osiąga się to przez ograniczenie udziału fazy kobaltowej w spiekach [19, 20].

Pierwszym przykładem lutowania tych materiałów była metalizacja spieku diamentowego zawierającego 5% Ti jako fazy wiążącej (po procesie spiekania materiał składał się z diamentu i TiC). Spiek metalizowano metodą PVD (*physical vapour deposition*) czystym tytanem, a następnie lutowano indukcyjnie za pomocą spoiwa Cu-Ag [21]. Te materiały charakteryzują się także dobrym przewodnictwem elektrycznym, mimo że brak w nich fazy metalowej, ponieważ zamiast kobaltu jako fazę wiążącą zastosowano ceramikę. Proces lutowania materiałów diamentowych z fazą wiążącą w postaci węglika tytanowo-krzemowego Ti₃SiC₂ (w ilości 15% masy) z dodatkiem nanometrycznego proszku TiCN (w ilości 5% masy) przeprowadzono za pomocą lutowni B-Ag70.5Cu26.5Ti (ISO 3677). Dla tego spoiwa producent rekomenduje temperaturę lutowania materiałów ceramicznych powyżej 850°C. W warunkach próżniowego lutowania zaleca się temperaturę nie wyższą niż 900°C. Spoiwo lutujące zakupiono w postaci wstążek o grubości 0,2 mm i wycięto z niego elementy odpowiadające geometrii ostrza diamentowego. Zastosowano dwie temperatury lutowania: 865°C i 900°C. Proces lutowania przeprowadzono w piecu próżniowym VHT 08-20 firmy Nabertherm. Prędkość grzania wynosiła 100°C/min, natomiast czas wytrzymania w maksymalnej temperaturze wynosił 30 min. Lepsze rezultaty uzyskano dla wyższej temperatury lutowania – wykonane połączenie miało mniejszą porowatość. Niezależnie od temperatury lutowania nie stwierdzono różnic w twardości lutowanego materiału. W obu przedstawionych przypadkach

połączenie pomiędzy monokrystalicznym diamentem a spoiwem lutującym polega na reakcji węgla z diamentem z aktywnym tytanem, znajdującym się w spoiwie lub powłoce. W wyniku reakcji powstaje węgiel tytanu. Biorąc pod uwagę, że składnikiem fazy wiążącej diament jest węgiel tytanu, materiały wykazują dużą koherencję względem siebie, skutkującą brakiem naprężeń i jakichkolwiek nieciągłości w strefie połączenia. Nowe materiały zawierające inne ceramiczne fazy wiążące wymagają innych rozwiązań procesu lutowania.

LITERATURA

- [1] Kaliński D. „Opracowanie spoiwa kompozytowego do spajania ceramiki korundowej z metalami”. *Prace ITME. Zeszyt 53*. Warszawa: ITME, 1999.
- [2] Seo K., Kusuka M., Nogato F., Teresaki T., Nakao Y., Saida K. “Study of thermal stress at ceramic-metal joint”. *JSMIE International Journal. Series 1. 2* (1990): 33.
- [3] Suganuma K., Okamoto T., Koizumi M., Kamachi K. “Influence of shape and size on residual stress in ceramic/metal joining”. *Journal of Materials Science*. 22, 10 (1987): 3561–3565.
- [4] Nicolas M.G., Peteves S.D. “Reactive joining: Chemical effects on the formation and properties of brazed and diffusion bonded interfaces”. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 31, 8 (1994): 1091–1096.
- [5] Sigalas I., Caveney R.J. “Diamond Materials and Their Applications”. *Handbook of Ceramic Hard Materials* (ed.: Ralf Riedel). Weinheim: Wiley-VCH, 2000: 481.
- [6] <http://www.e6.com>. “Diamond Tool Materials for Metalworking: Tool Fabrication Troubleshooting”.
- [7] Jaworska L. „Diament – Otrzymywanie i zastosowanie w obróbce skrawaniem”. Warszawa: WNT, 2008.
- [8] Chen Y., Hong J.X., Fu Y.C., Su H.H. “Effect of Ti addition on shear strength of brazing diamond and Ag based filler alloy”. *Key Engineering Materials*. 416 (2009): 264–268.
- [9] Tillmann W., Wojarski L., Lehmer B. “Investigation of mechanical and metallurgical properties of brazed ceramic and cemented carbide joints”. *IJW 2010 – International Conference on Advances in Welding Science & Technology for Construction, Energy & Transportation*, Istanbul. (2010): 337–341.
- [10] Klotz U.E., Liu C., Khalid F.A., Elsener H.R. “Influence of brazing parameters and alloy composition on interface morphology of brazed diamond”. *Materials Science and Engineering: A*. 495, 1–2 (2008): 265–270.
- [11] Skewes S. “Equipment Solutions for the Brazing of Diamond Tools”. <http://www.gh-ia.com/pdf/brazing-diamond-tools.pdf>.
- [12] Naidich Y.V., Umanski V.P., Lavrinenko L.A. “Strength of the Diamond-Metal Interface and Brazing of Diamonds”. Cambridge (UK): Cambridge International Science Publishing Ltd, 2007.
- [13] Tillmann W., Osmanda A.M. “Production of diamond tools by brazing”. *Materials Science Forum*. 502 (2005): 425–430.
- [14] Jiang Z., Zhang C. “Analysis on microstructure of laser brazing diamond grits with a Ni-based filler alloy”. *Advanced Materials Research*. 97–101 (2010): 3879–3883.
- [15] Tillmann W., Osmanda A.M., Yurchenko S. “Investigations of contact angles of active brazing fillers on diamond-layers by optical 3D-microscopy”. *Proc. 4th Int. Brazing & Soldering Conference*, Florida (USA), 2009.
- [16] Haferkamp H., Bach F.W., von Alvesleben F., Mai T., Kreutzburg K. “Laserstrahlöten von Metall-Keramik-Verbindungen”. *Schweissen Schnitten*. 48 (1996): 853–859.
- [17] Zhang Z., Modest M.F. “Temperature-dependent absorptances of ceramics for Nd:YAG and CO₂ laser processing applications”. *Journal of Heat Transfer*. 120, 2 (1998): 322–327.
- [18] Cichosz P., Kuzinowski M., Tomov M. „Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. I. Ostrza diamentowe”. *Mechanik*. 90, 8–9 (2017): 660–662, 664–668.
- [19] Cygan S., Jaworska L., Putyra P., Ratuszek W., Cyboron J., Klimczyk P. “Thermal stability and coefficient of friction of the diamond composites with the titanium compound bonding phase”. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 26, 6 (2017): 2593–2598.
- [20] Jaworska L., Klimczyk P., Szutkowska M., Putyra P., Sitarz M., Cygan S., Rutkowski P. “Thermal resistance of PCD materials with borides bonding phase”. *Journal of Superhard Materials*. 37, 3 (2015): 155–165.
- [21] Jaworska L. „Dobór metalicznej fazy wiążącej i sposobu jej wprowadzenia do kompozytu diamentowo-metalowego”. *Prace IOS*, nr 77. Kraków: IOS, 1994.
- [22] Jaworska L., Rozmus M., Laszkiewicz-Łukasik J., Wyżga P., Podsiadło M., Czechowski K. „Wykonanie płytek skrawających z monolitycznego spieku diamentowego”. *Mechanik*. 8–9 (2012): s. 39–46 (CD).