

Zbigniew MIRSKI<sup>1</sup>  
Tomasz PIWOWARCZYK<sup>1</sup>

## TECHNIKI SPAJANIA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZE STAŁĄ W WYTWARZANIU NARZĘDZI GÓRNICZYCH

W artykule przedstawiono możliwe techniki spajania termicznego węglików spiekanych ze stałą przy wytwarzaniu narzędzi pracujących w kopalniach rud miedzi i węgla kamiennego. Zwrócono uwagę na właściwości oraz zalety i wady technologii klejenia, lutowania, zgrzewania i spawania węglików spiekanych ze stałą. Podano przykłady narzędzi i części maszyn, wykonanych określonymi technikami spajania, do pracy w obróbce skał i w przemyśle wydobywczym. Szczególną uwagę poświęcono technikom lutowania twardego, z których najszersze zastosowanie, przy wytwarzaniu narzędzi górniczych, ma lutowanie indukcyjne.

### 1. WPROWADZENIE

Węgliki spiekane stanowią najczęściej używany materiał na końcówki robocze narzędzi górniczych. Są one zaliczane do materiałów o warunkowej zdolności do termicznego spajania z powodu specyficznych właściwości powierzchniowych oraz bardzo odmiennych właściwości fizycznych i mechanicznych w porównaniu ze stałą. Rodzaje węglików spiekanych wynikają z różnych kryteriów podziału: składu chemicznego (WC+Co i WC+(Ti,Ta,Nb)C+Co), zastosowania (gatunki G,B,H,S zgodnie z PN-H-89500:1988) czy wielkości cząstek WC (nanoziarniste  $<0,2\mu\text{m}$ , ultradrobnoziarniste  $<0,5\mu\text{m}$ , drobnoziarniste  $0,5 \div 1,5\mu\text{m}$ , standardowe  $1,5 \div 3\mu\text{m}$ , gruboziarniste  $3 \div 30\mu\text{m}$ ). Podstawowe trudności, występujące podczas zwilżania lutem powierzchni węglików spiekanych, spowodowane są obecnością:

- trudnozwilżalnych tlenków wolframu,
- trudnozwilżalnych węglików wolframu WC, a szczególnie węglików tytanu TiC, tantalu TaC i niobu NbC.

Węgliki spiekane wykazują zróżnicowane właściwości w porównaniu ze stalami stopowymi do ulepszania cieplnego, a mianowicie [1],[2]:

- 2 do 3-krotnie mniejszy współczynnik rozszerzalności liniowej ( $\alpha_W = 4,5 \div 7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ,  $\alpha_S = 11 \div 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ), zależnie od temperatury,
- większą przewodność cieplną ( $\alpha_W = 38 \div 67 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $\alpha_S = 26 \div 60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ),

---

<sup>1</sup> Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Politechnika Wrocławska

- 3 – krotnie większy moduł sprężystości wzdłużnej,
- bardzo małą zdolność do odkształceń na poziomie 0,1–0,3% w temperaturze otoczenia, w związku z tym węgliki spiekane wykazują dużą skłonność do kruchego pęknięcia,
- trwalsze warstwy tlenkowe na powierzchni spajania.

Z powodu wysokiej ceny węgliki stosowane są zwykle w postaci kształtek łączonych z korpusem narzędzia wykonywanego ze stali niestopowych lub stopowych. Na korpusy narzędzi najczęściej stosowane są stale charakteryzujące się wysoką granicą plastyczności, twardością i wytrzymałością na rozciąganie (w granicach 700 ÷ 1000MPa). Warunek ten spełniają niestopowe i stopowe stale do ulepszenia cieplnego o zawartości węgla od 0,45 do 0,7 % wag. Spośród częściej używanych należy wymienić stale niestopowe do ulepszenia cieplnego gat. C45 i C55 (wg PN-EN 10083-2:2008) oraz, w przypadku większych wymagań wytrzymałościowych, stale stopowe do ulepszenia cieplnego gat. 41Cr4 i 42CrMo4 (wg PN-EN 10083-3:2008). Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne węglików spiekanych oraz stali stosowanych na korpusy narzędzi zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne węglików spiekanych i stali stosowanych na korpusy narzędzi [1],[2]

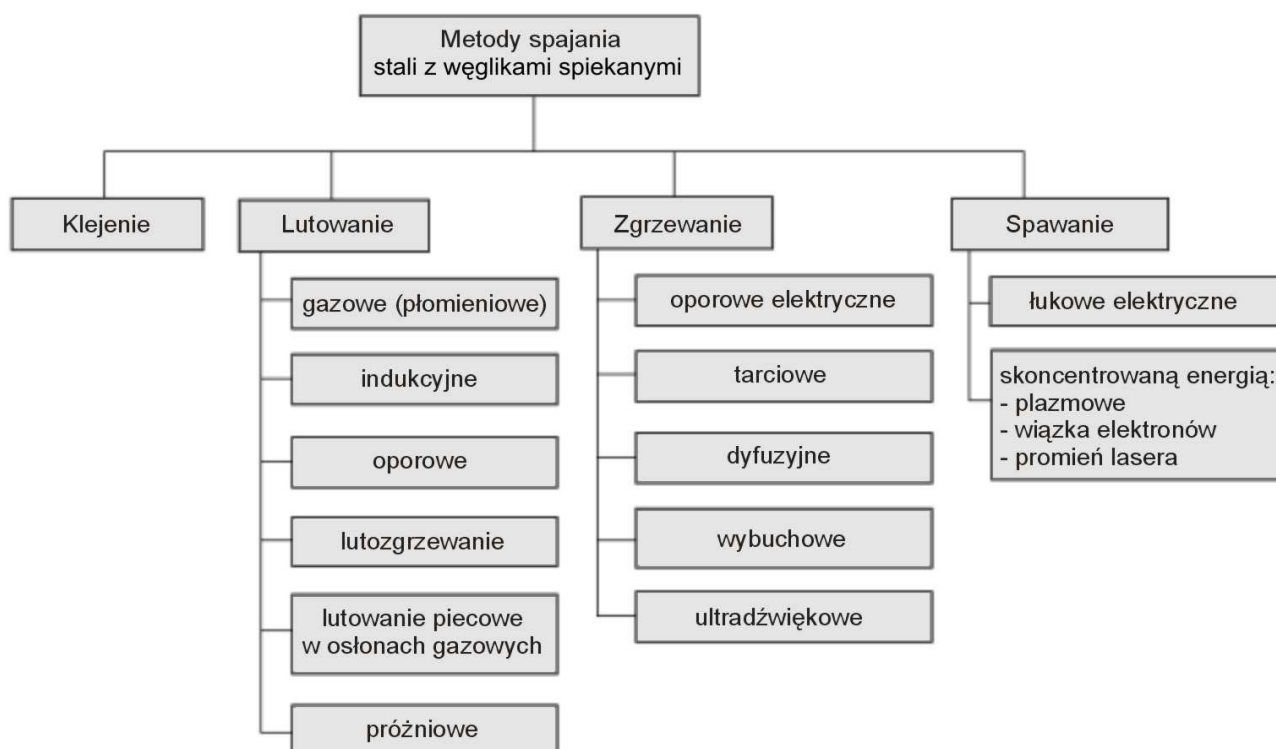
Table 1. Selected physical and mechanical properties of sintered carbides and steel using for tool bodies [1],[2]

Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne	Węgliki spiekane o zaw. do 12% wag. Co	Stale stosowane na korpusy narzędzi
Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	(10÷15)·10 <sup>3</sup>	8·10 <sup>3</sup>
Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> 1/K	4÷7	11÷14
Przewodność cieplna właściwa $\lambda$ , W/m·K	38÷67	26÷60
Wytrzymałość na ściskanie $R_c$ , MPa	4400÷5000	-
Moduł sprężystości wzdłużnej $E$ , GPa	520÷640	160÷210
Wytrzymałość na zginanie $R_{bm}$ ( $R_g$ ), MPa	1400÷3000	-
Wydłużenie względne $A$ , %	0,1 ÷ 0,3	14÷16
Granica plastyczności $R_e$ , MPa	-	165÷290
Twardość	1290÷2200 HV 30	47-52 HRC po ulepszeniu cieplnym

## 2. METODY SPAJANIA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZE STALĄ

Techniki spajania węglików spiekanych ze stalą mogą być bardzo różnorodne, poczynając od procesów klejenia, przeprowadzanych najczęściej w temperaturze pokojowej, poprzez procesy lutowania i zgrzewania, kończąc na procesach spawania. Na rysunku 1 pokazano schemat blokowy obrazujący możliwe techniki spajania węglików spiekanych ze stalą, rozpoczynając od procesów o najniższej temperaturze łączenia aż do procesów spawania w których dochodzi do nadtopienia łączonych materiałów. Nie wszystkie jednak metody spajania węglików spiekanych są powszechnie i w jednakowym stopniu stosowane. Spajanie stali z węglkami spiekanyymi w produkcji narzędzi odbywa się przede wszystkim metodami lutowania twardego i wysokotemperaturowego, rzadziej innymi technikami: lutozgrzewania, zgrzewania oporowego, tarcowego, dyfuzyjnego

i wybuchowego lub spawania [1-5]. Ostatnio coraz częściej eksperymentuje się i używa technologii klejenia [1-5].



Rys. 1. Metody spajania stali z węglkami spiekanymi [1]

Fig. 1. Joining methods of steel with sintered carbides [1]

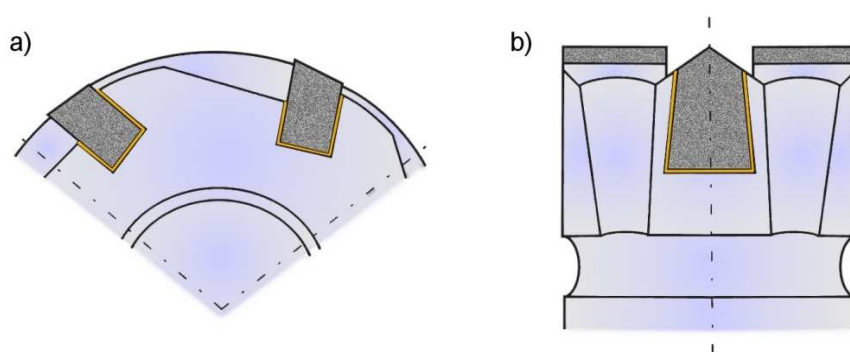
### 3. KLEJENIE WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZE STALĄ

W celu uzyskania złącza o dobrej funkcjonalności, przy zachowaniu możliwości wymiany płytek węglkowych, konstruktorzy i technolodzy zwrócili się w kierunku techniki klejenia, wykazującej szereg zalet niezbędnych w przypadku łączenia tych grup materiałów. Wdrożenia tej techniki zasadne są szczególnie w przypadku narzędzi i części maszyn o mniejszych wymaganiach eksploatacyjnych.

Podstawowe czynniki, które ograniczają zastosowanie techniki klejenia w produkcji narzędzi, to stosunkowo niewielka wytrzymałość na ścinanie połączeń, zwykle nie przekraczająca  $35 \div 40$  MPa, oraz brak odporności na wysokie temperatury. Jednakże dynamiczny rozwój techniki klejenia w ostatnich latach spowodował znaczny wzrost parametrów wytrzymałościowych i odporności na wysokie temperatury dostępnych na rynku materiałów klejowych. Aktualnie oferowane przez producentów kleje konstrukcyjne często mają wytrzymałość na ścinanie większą niż 40 MPa (np. kleje epoksydowe utwardzane przez dodatkowe nagrzewanie indukcyjne). Dodatkowo można ją jeszcze zwiększyć stosując kleje o budowie kompozytowej, składające się z osnowy kleju właściwego i napelnacza – fazy obcej w postaci: cząstek, włókien i siatek [2]. Innym sposobem zwiększania funkcjonalności połączeń klejowych jest odpowiednia konstrukcja

złącza, przy wykorzystaniu możliwie największej powierzchni łączenia oraz wyeliminowaniu niekorzystnych obciążeń powodujących oddzieranie i rozrywanie złączy [2],[7]. Powinny być one projektowane jako złącza zakładkowe pracujące na ścinanie, przenoszące głównie naprężenia styczne lub obciążone naprężeniami normalnymi ujemnymi, pracując na ściskanie [2],[6],[7]. Naprężenia rozciągające (normalne, dodatnie) mogą być przenoszone, ale na dużych powierzchniach, pod warunkiem konstrukcyjnego wyeliminowania nieosiowego obciążenia takich spoin [2],[6],[7].

Poprawa konstrukcji złącza to nie tylko zmniejszenie naprężeń, ale także ich równomierne rozłożenie na możliwie największej powierzchni. Bardzo korzystnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, zabezpieczającymi kształtki węglkowe przed działaniem niekorzystnych sił rozciągających, są tzw. zatraski za ostrzem (rys. 2a) lub jaskółczy ogon (rys. 2b) [2].

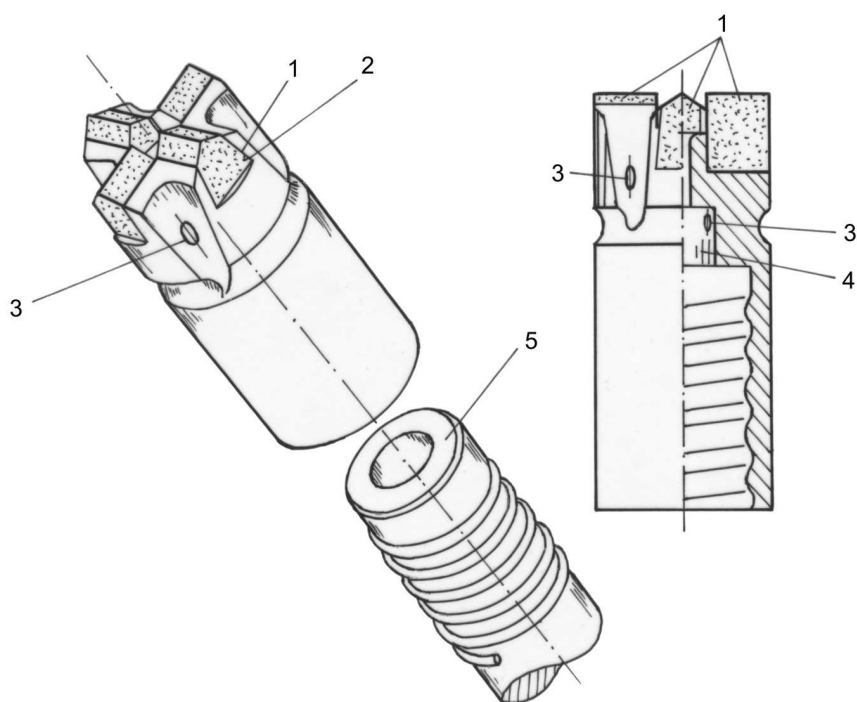


Rys. 2. Konstrukcja gniazd przygotowanych do klejenia: zatraski za ostrzem (a), jaskółczy ogon w koronce krzyżowej (b) [2]

Fig. 2. Structure of sockets preparing for gluing: catch behind tool point (a), dovetail in cross-bit (b) [2]

Intensywny postęp technologii klejenia w ostatnich latach sprawił, iż problem odporności klejów na wysokie temperatury został częściowo rozwiązany. Stosowane są kleje odporne na temperatury w zakresie  $250 \div 350^{\circ}\text{C}$ , np. spoiwa oparte na żywicach epoksydowo – fenolowych lub uszczelnienia silikonowe [2]. Produkowane są również nowoczesne produkty pracujące w temperaturach powyżej  $400^{\circ}\text{C}$ , a nawet uszczelniacze i kleje wytrzymujące temperatury z zakresu  $1000 \div 1500^{\circ}\text{C}$  [2]. Przykładem stanowią kleje wysokotemperaturowe, będące mieszaniną składników nieorganicznych wykazujących odporność cieplną, a także kleje o budowie kompozytowej zbrojone napełniaczami ceramicznymi. Podstawowym problemem klejów odpornych na wysokie temperatury jest radykalne zmniejszenie ich parametrów wytrzymałościowych. Współczesne materiały klejowe umożliwiają częściowe wyeliminowanie tej wady, zapewniając względnie wysoką wytrzymałość mechaniczną połączeń.

Dowodem racjonalności wprowadzenia techniki klejenia do łączenia węglków spiekanych ze stalą w przemyśle narzędziowym są liczne rozwiązania, które znalazły już zastosowanie w praktyce. Przykładem mogą być wiertnicze koronki krzyżowe łączone dwuskładnikowym klejem na bazie żywicy metakrylowej (rys. 3) [2] lub skrobaki węglkowe do czyszczenia taśm przenośników transportujących (rys. 4a) i ślizgi transportowe (rys. 4b).



Rys. 3. Koronka wiertnicza z wklejonymi węglkami spiekany: kształtka węglkowa (1), gniazdo krzyżowe (2), otwór wodny (3), kanał wodny (4), zerdź (5) [2]

Fig. 3. Cross-bit with gluing sintered carbides: sintered carbide (1), cross-bit socket (2), water hole (3), water channel (4), drilling rod (5) [2]



Rys. 4. Skrobaki węglkowe do czyszczenia taśm przenośników transportujących (a) oraz ślizgi transportowe (b) [2]

Fig. 4. Carbide scrapers for transporter tapes cleaning (a) and transporter slippers (b) [2]

#### 4. Lutowanie węglików spiekanych ze stalą

Lutowanie miękkie, przy stosowaniu lutów o temperaturze topnienia (temperatura likwidus) poniżej 450°C, jest rzadko stosowane do łączenia węglików spiekanych, ze względu na niewielkie oddziaływanie sił adhezji i kohezji i wynikające stąd stosunkowo małe wartości właściwości mechanicznych połączeń lutowanych. Wytrzymałość na rozciąganie lutów miękkich nie przekracza zwykle 60MPa [1]. Zwilżalność lutami miękkimi węglików spiekanych jest ograniczona. Dla jej poprawienia powierzchnie płytek węglkowych można pokrywać galwanicznie powłokami z miedzi, srebra, niklu lub kobaltu, choć nie zawsze jest możliwe uzyskanie zadowalającej przyczepności powłoki do podłoża.

Lutowanie twarde jest metodą lutowania, która występuje przy zastosowaniu lutów o temperaturze likwidus powyżej 450°C. Jest najczęściej stosowaną technologią termicznego łączenia węglików spiekanych ze stalą, ze względu na szereg zalet, jakie wykazuje w porównaniu z innymi metodami spajania tych materiałów. W odróżnieniu od innych technik termicznego łączenia materiałów, w lutowaniu twardym łączenie materiałów następuje bez ich nadtapiania, co umożliwia kompensację naprężeń termicznych i odkształceń plastycznych w lutowinie. W celu wykonania poprawnego złącza lutowanego należy zwrócić uwagę na odpowiednie przygotowanie powierzchni węglików spiekanych do lutowania, ponieważ należą one do materiałów trudno zwilżalnych. Innymi ważnymi czynnikami wpływającymi na uzyskanie dobrego połączenia lutowanego są: metoda i parametry lutowania, konstrukcja połączenia lutowanego z wiodącą rolą szczeliny lutowniczej oraz postać i właściwości lutownicze materiałów dodatkowych [3].

Spośród metod lutowania twardego, stosowanych w lutowaniu węglików spiekanych ze stalą, z uwagi na źródło nagrzewania i doprowadzenie ciepła, najczęściej znalazły zastosowanie takie metody lutowania jak: płomieniowe, indukcyjne, oporowe, w atmosferach kontrolowanych, próżniowe. W ostatnim 30 – leciu obserwuje się wzrost zainteresowania użyciem w technikach lutowania nowych źródeł ciepła, tj. głównie łuku elektrycznego oraz skoncentrowanych źródeł energii, tj. wiązki elektronów i promienia lasera [1],[8]. Jednak w skali przemysłowej metody te, przy spajaniu węglików spiekanych ze stalą, nie znalazły jeszcze powszechnego zastosowania.

##### 4.1. Lutowanie płomieniowe

Lutowanie płomieniowe jest najczęściej stosowane do lutowania drobnych narzędzi, o niewielkim polu przekroju elementów lutowanych. Wynika to z małej koncentracji ciepła dostarczanego przez płomień, a co za tym idzie, powolnego nagrzewania materiałów łączonych. Tą metodą jest możliwe również lutowanie części o dużych przekrojach, ale przy zastosowaniu wysokowydajnych i wielopłomieniowych palników gazowych.

Spośród gazów palnych najczęściej do lutowania płomieniowego węglików spiekanych ze stalą stosowany jest acetylen. Acetylen jest jedynym gazem palnym ze strefą redukującą tlen w płomieniu. Topnik może być doprowadzony do obszaru lutowania w postaci lotnej, proszku, pasty, a także łącznie z lutem w postaci prętów i pasty



lutowniczej. Pasta lutownicza może być dozowana ręcznie, półautomatycznie lub automatycznie.

Płytką węglkową ma zwykle mniejsze wymiary i mniejszą masę w porównaniu ze stalowym korpusem narzędzia (rys. 5), ponadto węgliki spiekane charakteryzują się większą przewodnością cieplną w porównaniu ze stalą. To wymaga skierowania płomienia gazowego przede wszystkim w kierunku stali i jej silniejszego nagrzewania. Po skrzepnięciu lutownicy i uzyskaniu połączenia lutowanego z węglkami spiekаныmi należy bardzo powoli studzić złącze w ośrodku wolno odprowadzającym ciepło, takim jak: komora grzejna pieca, podgrzany piasek kwarcowy czy sproszkowany grafit. Ma to zapewnić pełniejszą relaksację naprężeń skurczowych w połączeniu lutowanym i niedoprowadzenie do pęknięć w płytkach z węglków spiekanych.



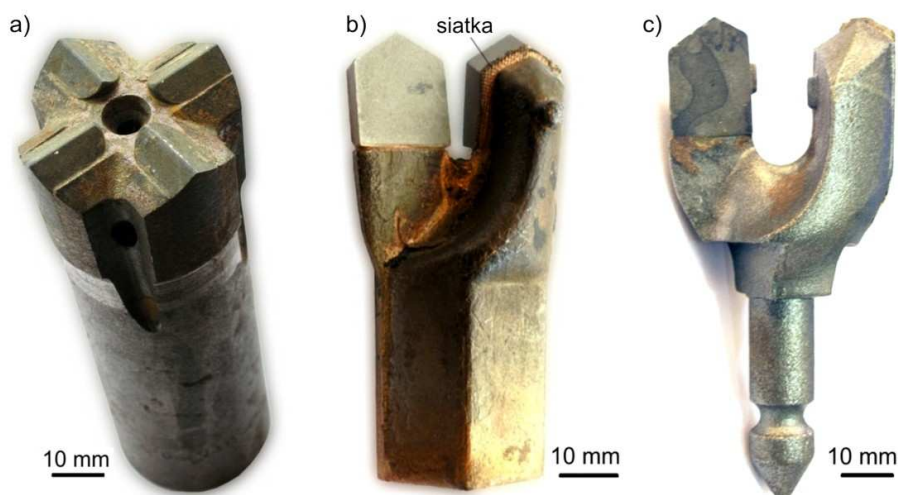
Rys. 5. Przykład narzędzia lutowanego płomieniowo – dłuto kamieniarskie o szerokości ostrza 16mm

Fig. 5. Example of flame brazing tool – stonecutter's chisel

#### 4.2. LUTOWANIE INDUKCYJNE

Lutowanie indukcyjne charakteryzuje się znacznie większą efektywnością nagrzewania w porównaniu z lutowaniem płomieniowym, ze względu na większą gęstość energii nagrzewania wynoszącą  $104\text{W}/\text{cm}^2$  [9]. Spośród metod lutowania twardego węglków spiekanych ze stalą, lutowanie indukcyjne ma największe przemysłowe zastosowanie w kraju [3]. Może być ono przeprowadzone przez nagrzewanie prądami o średniej i wysokiej częstotliwości. Prądy średniej częstotliwości w zakresie 8-15kHz są bardziej przydatne w procesach lutowania węglków spiekanych ze stalą ze względu na większą prędkość nagrzewania. Jest to ważne szczególnie dla elementów o większej masie i przekroju poprzecznym. Na rysunku 6 pokazano narzędzia wytwarzane techniką lutowania indukcyjnego: koronka krzyżowa o średnicy 45mm, zbrojona 4-ma kształtkami węglkowymi, do pracy w kopalniach rud miedzi (a), raczki do pracy w kopalniach rud miedzi o średnicy 38mm (b) i węgiel kamienny o średnicy 40mm (c).

Prędkość nagrzewania węglków spiekanych jest większa aniżeli stali, ze względu na ich większą przewodność cieplną, w związku z czym wskazane jest nagrzewanie impulsowe. W lutowaniu narzędzi istotną rolę odgrywa równomierność nagrzewania płytki z węglków spiekanych oraz korpusu stalowego narzędzia w obszarze powstającego złącza lutowanego.



Rys. 6. Przykłady narzędzi lutowanych indukcyjnie: koronka krzyżowa (a), raczki (b, c) [1]  
Fig. 6. Example of induction brazing tool: cross-bit (a), drill-bits (b, c) [1]

Należy przy tym brać pod uwagę zarówno większą przewodność cieplną węglików spiekanych w porównaniu ze stalą, jak i najczęściej mniejsze rozmiary płytki węglkowej w porównaniu z korpusem stalowym. Równomierność nagrzewania, w dużym stopniu, zależy również od budowy wzbudnika i dostosowania jego kształtu do nagrzewanych elementów. Największe sprzężenie występuje w przypadku gdy narzędzie lutowane o kształcie walcowym, takie jak wiertło, rozwiertak czy koronka krzyżowa, jest dopasowane do kształtu wzbudnika pierścieniowego i znajduje się w jego środku (rys. 7). Wskazane jest również, dla efektywnego nagrzewania, aby ramiona wzbudnika nie były otwarte przy doprowadzeniu do generatora indukcyjnego, lecz zamykały pole elektromagnetyczne. Jeżeli w dolnej części lutowanego narzędzia znajduje się pozioma szczelina lutownicza powinna być ona objęta wzbudnikiem indukcyjnym dla nagrzania tego obszaru, w przeciwnym przypadku, mogą być problemy ze stopieniem lutu, który się tam znajduje lub z dopłynięciem lutu do tego „zimnego” obszaru [1].



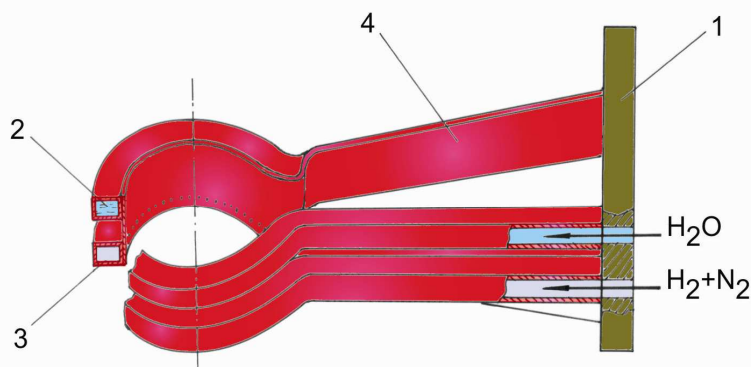
Rys. 7. Lutowanie indukcyjne koronki krzyżowej lutem w postaci drutu we wzbudniku pierścieniowym [10]  
Fig. 7. Induction brazing of cross-bit with wire brazing solder in loop inductor [10]



Topnik, a także lut, powinny być już wcześniej doprowadzone do obszaru lutowania. W przypadku narzędzi z płaskimi kształtkami węglkowymi, najlepsze efekty daje użycie lutu w postaci folii lub taśmy, dozowanego wcześniej przed nagrzewaniem. To ułatwia topienie lutu i jego wnikanie w kapilarne szczeliny lutownicze oraz zapewnia łatwiejsze i pełniejsze ich wypełnianie. W przypadku braku lutu w płaskiej postaci, może on być również użyty w postaci drutu lub pręta, także układanego pod płytką węglkową lub dozowanego z góry.

W standardowym pojęciu lutowanie indukcyjne wymaga zastosowania topnika osłaniającego nagrzewane powierzchnie przed utlenianiem, a także roztwarzającego nowo tworzące się tlenki. Możliwe jest jednak użycie, podczas nagrzewania indukcyjnego, specjalnych wzbudników doprowadzających gaz o działaniu redukującym lub obojętnym [1],[3]. Stosowane gazy to najczęściej wodór, szczególnie w Stanach Zjednoczonych, oraz mieszaniny argonu i azotu z wodorem [1].

Na rysunku 8 pokazano konstrukcję specjalnie wykonanego wzbudnika do lutowania w osłonie gazowej, który składa się z dwóch pierścieni. Jeden pierścień służy do konwencjonalnego obiegu wody chłodzącej, a drugi doprowadza gaz osłonowy. W tym przypadku jako gaz osłonowy o charakterze redukującym zastosowano mieszaninę wodoru i azotu, w proporcji objętościowej odpowiednio 20:80. Na podstawie analizy wcześniejszych prób lutowania na elementach stalowych stwierdzono pełną przydatność tej mieszaniny gazów do lutowania twardego węglków spiekanych [1],[3],[11].



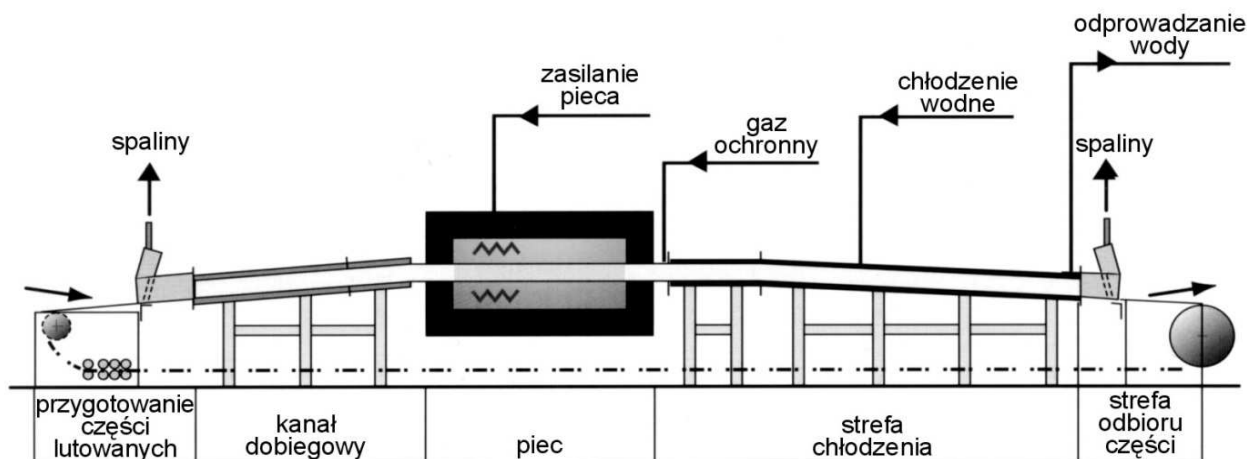
Rys. 8. Konstrukcja wzbudnika pierścieniowego z doprowadzeniem gazu osłonowego: podstawa mocująca (1), pierścień miedziany z chłodzeniem wodnym (2), pierścień doprowadzający gaz osłonowy (3), płaszcz miedziany (4) [1],[3],[11]

Fig. 8. Construction of loop inductor with shielding gas feed: fixed base (1), copper ring with water cooler (2), ring feeding shielding gas (3), copper jacket (4) [1],[3],[11]

#### 4.3. LUTOWANIE W PIECACH Z ATMOSFERĄ KONTROLOWANĄ

Lutowanie twarde pod osłoną topnika, zwłaszcza w temperaturze lutowania powyżej 1000°C, nie stanowi już tak skutecznej ochrony powstającego złącza lutowanego, jak lutowanie w niższej temperaturze. Szczególnie dotyczy to obszaru, obok złącza lutowanego, nagrzewanego do wysokiej temperatury i niechronionego przed intensywnym utlenianiem.

Aby tego uniknąć stosowane są technologie piecowe lutowania w atmosferze kontrolowanej, które wykorzystuje się w produkcji wielkoseryjnej narzędzi zbrojonych węglnikami spiekanymi. Używane są do tego celu piece komorowe i piece tunelowe z rusztem wędrownym, nazywane też piecami taśmowymi. Schemat pieca tunelowego, z jego charakterystycznymi strefami, pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Schemat pieca tunelowego z rusztem wędrownym [12]

Fig. 9. Scheme of tunnel furnace with travelling grate [12]

Wymaganą atmosferę ochronną w piecach tunelowych zapewnia się dzięki utrzymywaniu stałego nadciśnienia gazu. Wyróżnia się dwa charakterystyczne rodzaje pieców przelotowych tj. piece z egzotermiczną osłoną gazową i piece mufłowe [1],[12].

Piece z atmosferą egzotermiczną, z uwagi na rodzaj gazu, służą jedynie do lutowania stali niestopowych i niskostopowych. Są to stosunkowo tanie technologie ze względu na cenę gazu osłonowego, który wytwarzany jest z bezpośredniego spalania gazu palnego. Nie wymagają one zamkniętej komory nagrzewania tj. mufl i charakteryzują się dużymi przekrojami poprzecznymi tuneli i długimi strefami nagrzewania.

Piece mufłowe służą do lutowania materiałów z tlenkami trudnymi do zredukowania, np. stali o zawartości powyżej 1,5% wag. chromu. Lutowane materiały należy oddzielić od komory pieca poprzez zastosowanie mufl wykonanej z żaroodpornej stali. Gaz osłonowy jest doprowadzany za strefą nagrzewania i przepływa w stronę wlotową i wylotową pieca. Stosuje się strefowe rozmieszczenie gazów osłonowych w piecu z uwagi na ich cenę. Zasadniczym gazem osłonowym jest czysty wodór o niskim punkcie rosy, lub mieszanina wodoru i azotu. Przy wlocie i wylocie pieca wprowadza się natomiast tańszy azot, który stanowi barierę zapobiegającą przedostawaniu się powietrza do atmosfery ochronnej.

Technologie lutowania w przelotowych piecach tunelowych wymagają dokładniejszego przygotowania elementów lutowanych i większych inwestycji w porównaniu z lutowaniem topnikowym. Z tego względu stosowane są zwykle w produkcji wielkoseryjnej. W przygotowaniu narzędzi zbrojonych węglnikami spiekanymi należy zadbać o dokładne pozycjonowanie płytek węglkowych w gnieździe, dla zapobieżenia niepożądanego zmiany ich położenia. Wymaga to zastosowania specjalistycznego oprzyrządowania wykonanego z materiałów odpornych na oddziaływanie

wysokiej temperatury, np. ze stali żaroodpornych i żarowytrzymałych lub z materiałów ceramicznych. Prostsze rozwiązania wymagają jedynie użycia dystansowych wkładek grafitowych i opłotów z drutu mocującego.

Zaletami tej metody lutowania są stałe warunki nagrzewania elementów lutowanych i studzenia złączy lutowanych. Połączenia lutowane są wolne od zanieczyszczeń żużli potopnikowych oraz tlenkowych i można je bezpośrednio po lutowaniu poddać końcowym operacjom obróbki powierzchniowej malowania, lakierowania, czy też obróbki galwanicznej. Brak topnika wymusza przygotowanie do lutowania elementów z szerokością szczeliny poniżej 0,1mm, przy równoległych ściankach szczeliny [3]. Większe szczeliny spowodują przerwanie przepływu lutu. Jako luty, do lutowania węglików spiekanych ze stałą, stosowane są zwykle spoiwa bez składników łatwo parujących, najczęściej na osnowie miedzi. Spoiwa lutownicze są stosowane zwykle w postaci pasty lutowniczej lub kształtek wykonanych z drutu, folii lub taśmy.

#### 4.4. LUTOWANIE W PIECACH PRÓŻNIOWYCH

Lutowanie w próżni przeprowadzane jest zwykle w piecach o konstrukcji jedno- lub dwukomorowej. Nowoczesne piece próżniowe mają możliwość uzyskiwania próżni w zakresie  $10^{-1}$ – $10^{-7}$  mbar i temperatury roboczej do  $1600^{\circ}\text{C}$ . Nagrzewanie wsadu powinno być możliwe poprzez konwekcję wraz z zastosowaniem cząstkowego ciśnienia azotem lub argonem oraz regulowanym schładzaniem gazem o ciśnieniu powyżej 6 barów [13]. Masa wsadu pieca może dochodzić do 4000kg w komorze o pojemności do  $8,8\text{m}^3$  [1]. Komora grzewcza pieca, przy wysokich wymaganiach dotyczących jakości lutowania, może być wykonana jako całkowicie metalowa [13].

Wymagana wysokość próżni w lutowaniu węglików spiekanych to  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  mbar. Dla zapewnienia właściwości kapilarnych lutu w warunkach lutowania beztopnikowego, zalecane jest, aby maksymalna szczelina lutownicza nie przekraczała 0,05mm. Szerokość szczeliny lutowniczej zależy od właściwości lutu. Stosowane luty nie mogą zawierać w składzie chemicznym składników o małej prężności par, takich jak: cynk lub mangan. Stosowane spoiwa to luty na osnowie miedzi, kobaltu, tytanu, srebra, złota i platyny, stopów żelazo-nikiel [1],[14]. Lutowanie w próżni zapewnia uzyskanie lutownicy najlepiej odgazowanej spośród stosowanych metod lutowania. Również i tutaj istotnym problemem jest takie przygotowanie korpusu i kształtki z węglików spiekanych, aby nie zmieniały one położenia podczas lutowania.

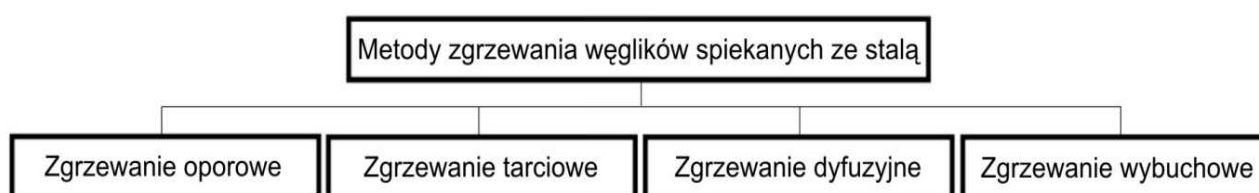
Zalety lutowania próżniowego węglików spiekanych ze stałą to przede wszystkim [1],[14]:

- eliminacja uciążliwego topnika i związane z tym usuwanie żużla potopnikowego,
- brak zgorzeliny i barw nalotowych na całej powierzchni elementów lutowanych,
- brak niepożądanych zjawisk powierzchniowych, np. związanych z nawęglaniem lub odwęglaniem powierzchni,
- jednakowe warunki lutowania dla całego wsadu pieca i związany z tym brak miejscowego przegrzania,

- powolne nagrzewanie elementów lutowanych i powolne studzenie złączy lutowanych,
- możliwość zastosowania tanich i łatwo dostępnych lutów na osnowie miedzi,
- uzyskanie dobrych jakościowo połączeń lutowanych, niezależnie od zdolności manualnych pracownika,
- automatyzacja procesu lutowania,
- idealne warunki BHP dla obsługi.

## 5. ZGRZEWANIE WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZE STALĄ

Mimo opracowania i rozwoju wielu metod zgrzewania, nie znalazły one tak powszechnego zastosowania przy spajaniu węglików spiekanych ze stalą jak metody lutowania twardego. Podstawowym powodem są problemy łączenia tej grupy materiałów, wynikające głównie z powstawania dużych gradientów temperatury, konieczności stosowania nacisków na kształtki węglkowe, a także z możliwości wystąpienia kruchych faz międzymetalicznych w przypadku ich bezpośredniego łączenia [1],[3]. Możliwe metody zgrzewania węglików spiekanych ze stalą pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Metody zgrzewania węglików spiekanych ze stalą [1]

Fig. 10. Welding methods of steel with sintered carbides [1]

## 6. SPAWANIE WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZE STALĄ

Spawanie węglików spiekanych ze stalą stosowane jest rzadko. Znane są patenty potwierdzające taką możliwość [1],[2], jednak w wyniku oddziaływania wysokich temperatur powstają twarde i kruche fazy międzymetaliczne na granicy połączenia. Złącza wykazują zwiększoną tendencję do pęknięcia pod wpływem lokalnych naprężeń termicznych, powstałych na skutek zróżnicowanych współczynników rozszerzalności liniowej węglików spiekanych i stali. Możliwość spawania tej pary materiałów wymaga stosowania szeregu zabiegów przygotowawczych, polegających np. na napawaniu na kształtki węglkowe warstw o dużej zawartości niklu lub wprowadzeniu kompensujących przekładki niklowych. Nie zaleca się spawania przy użyciu palnika acetylenowo – tlenowego oraz łuku elektrycznego, natomiast istnieje możliwość wykorzystania skoncentrowanych źródeł energii, np. wiązki elektronów w próżni czy też promienia laserowego [1],[2].

## 7. PODSUMOWANIE

Spajanie węglików spiekanych ze stalą jest procesem sprawiającym znaczne trudności z uwagi na różnice we właściwościach fizycznych i mechanicznych obu materiałów. Mimo to istnieje wiele technik łączenia tych materiałów, poczynając od procesów klejenia, poprzez procesy lutowania, kończąc na procesach zgrzewania i spawania. W warunkach przemysłowych nie wszystkie jednak metody spajania węglików spiekanych są jednakowo powszechne i równie często stosowane.

Spajanie stali z węglkami spiekаныmi w produkcji narzędzi pracujących w maszynach i pojazdach dla budownictwa czy górnictwa skalnego odbywa się przede wszystkim metodami lutowania twardego i wysokotemperaturowego, rzadziej innymi technikami. Lutowina umożliwia kompensację naprężeń termicznych, jednak podczas opracowywania technologii należy bezwzględnie uwzględnić konieczność równomiernego nagrzewania płytek z węglików spiekanych oraz korpusu stalowego narzędzia w obszarze powstającego złącza lutowanego. W celu wykonania poprawnego połączenia należy zwrócić uwagę na odpowiednie przygotowanie powierzchni elementów łączonych (szczególnie węglików spiekanych), dobrać właściwą metodę i parametry lutowania oraz postać i właściwości lutownicze materiałów dodatkowych. W technikach lutowania istotne jest również zapewnienie właściwej szerokości szczeliny lutowniczej. Spośród metod lutowania twardego, stosowanych w lutowaniu węglików spiekanych ze stalą, z uwagi na źródło nagrzewania i doprowadzenie ciepła, najczęściej stosuje się metodę indukcyjną. Charakteryzuje się ona znacznie większą efektywnością w porównaniu z lutowaniem płomieniowym, ze względu na większą gęstość energii nagrzewania, dlatego też ma największe przemysłowe zastosowanie w kraju. Lutowanie miękkie nie jest stosowane do łączenia węglików spiekanych, ze względu na niewielkie oddziaływanie sił adhezji i kohezji i wynikające stąd stosunkowo małe wartości właściwości mechanicznych połączeń lutowanych (nie przekraczające zwykle 60MPa) i ograniczoną zwilżalność.

Mimo rozwoju wielu metod spawania i zgrzewania, nie znalazły one powszechnego zastosowania przy spajaniu węglików spiekanych ze stalą. W ostatnich latach zauważalny jest trend zwracania się w kierunku wykazującej wiele zalet technologii klejenia. Podstawowe czynniki, które ograniczają powszechne zastosowanie tej techniki w produkcji narzędzi, to stosunkowo niewielka wytrzymałość na ścinanie połączeń oraz brak odporności na wysokie temperatury. Aktualnie stosuje się zabiegi mające na celu niwelowanie tych niedostatków (specjalne metody przygotowania powierzchni, spoiny klejowe o budowie kompozytowej, odpowiednia konstrukcja połączeń), jednak w narzędziach górniczych, z uwagi na zbyt duże obciążenia, nie przewiduje się szybkiej zmiany technologii łączenia, którą aktualnie stanowi lutowanie twarde.

## LITERATURA

- [1] MIRSKI Z., 2011, *Spajanie węglików spiekanych ze stalą*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [2] PIWOWARCZYK T., 2007, *Zwiększanie oddziaływań adhezyjnych i kohezyjnych w połączeniach klejowych węglików spiekanych ze stalą C 45*, Rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

- [3] MIRSKI Z., 2000, *Sterowanie szerokością szczeliny lutowniczej w procesach spajania materiałów różnoimiennych*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 73, seria: Monografie, 22, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [4] MIRSKI Z., PIWOWARCZYK T., 2007, *Porównanie technik klejenia i lutowania węglików spiekanych*, Przegląd Spawalnictwa, 9, 102-108.
- [5] MIRSKI Z., SZYMKOWSKI J., PIWOWARCZYK T., 2006, *Klejenie i lutowanie twarde węglików spiekanych trawionych elektrolitycznie*, Przegląd Spawalnictwa, 9-10, 64-68.
- [6] GODZIMIRSKI J., 2002, *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, WNT, Fundacja „Książka Naukowo – Techniczna”, Warszawa.
- [7] MIRSKI Z., Klejenie materiałów, w: Pilarczyk J., 2005, *Procesy spajania*, Poradnik Inżyniera Spawalnika, tom 2, WNT, Warszawa.
- [8] WILDEN J., BERGMANN J.-P., REICH S., GOECKE S.-F., 2007, *Beztopnikowe niskotemperaturowe spajanie lekkich konstrukcji różnoimiennych metodą sterowanego łuku zwarcowego*, Przegląd Spawalnictwa, 9, 77-81.
- [9] PETER H. J., 2007, *Lutowanie indukcyjne-stara technologia łączenia z potencjałem innowacyjności*, Przegląd Spawalnictwa, 9, 51–56.
- [10] ZIMMERMANN K. F., 1985, *Mechanisierteres Hartlöten auf Lötvorrichtungen und Lötmaschinen*, Ausführungsbeispiele induktivbeheizter, maschineller Hartlöteirichtungen, Technik die verbindet, Berichte aus Forschung und Praxis, 23, Degussa, Hanau.
- [11] MIRSKI Z., BARTNIK Z., KRYNICKI L., 1996, *Stanowisko do lutowania indukcyjnego w osłonie mieszanki gazowej  $H_2 + N_2$* , Nowoczesne wyposażenie stanowisk przy wytwarzaniu i remontach konstrukcji metalowych, Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza, 23–25 kwietnia 1996, Szczecin, Wyd. Zapol, Szczecin, 77–82.
- [12] SCHWARZ L., 2007, *Piece przelotowe do lutowania wysokotemperaturowego w atmosferze ochronnej*, Przegląd Spawalnictwa, 9, 95–98.
- [13] BORETIUS M., 2004, *Lutowanie próżniowe – stan techniki i rozwój*, Przegląd Spawalnictwa, 8-9, 47-52.
- [14] KUZIO T., WINIOWSKI A., 1978, *Lutowanie w próżni*, Przegląd Spawalnictwa, 4, 9–14.

#### BONDING TECHNIQUES SINTERED CARBIDES WITH STEEL IN THE MANUFACTURE OF MINING TOOLS

Possible techniques thermal bonding sintered carbides with steel in the manufacture of tools working in a mine copper ore and coal were presented in the article. Call attention to the characteristics as well as advantages and disadvantages of the technology adhesive bonding, brazing, pressure welding and welding sintered carbides with steel. Show the examples of tools and parts of machines, carried out certain bonding techniques, to work in the treatment the rocks and mining. A special attention given to brazing techniques, from which the widest use, in the manufacture of mining tools, is induction brazing.