

5. POWŁOKI NAPAWANE

Nakładanie powłok metodami spawalniczymi - napawanie, polega na dokładnym stopieniu materiału dodatkowego (spoiwa) z nadtopionym materiałem podłoża, którego udział w nałożonej napoinie, zależnie od stosowanej metody, może dochodzić do kilkudziesięciu procent. Źródłem ciepła stapiającym materiał dodatkowy w postaci drutu, pręta, taśmy lub proszku jest płomień gazowy, łuk elektryczny lub wiązka lasera, stąd można wyróżnić następujące metody napawania:

- gazowe,
- elektryczne: łukowe (elektrodą otuloną, elektrodą nietopliwą lub elektrodą topliwą w osłonie gazowej, łukiem krytym), żuźlowe, plazmowe.

Ogólnym celem napawania jest regeneracja części maszyn (napawanie regeneracyjne) bądź wytwarzanie elementów maszyn z uszlachetnioną warstwą wierzchnią zwiększającą odporność na: korozję, zużycie ściernie, erozję, kawitację, albo zwiększające żaroodporność i żarowytrzymałość (napawanie produkcyjne). Nakładane materiały posiadające wymagane wysokie właściwości pochodzą ze wszystkich grup materiałowych – metali i stopów, cermetali, ceramiki oraz tworzyw sztucznych. W technice napawania podstawowe znaczenie mają stale niskostopowe, stale wysokostopowe odporne na korozję, wysokowęglowe stopy żelaza, stopy na bazie niklu, kobaltu, stopy miedzi i aluminium, czyste metale – cynk, aluminium, tytan, nikiel cyrkon.

Możliwe jest napawanie warstw o grubości od 0,05 mm do ok. 100 mm w jednym przejściu, zależnie od stosowanej metody (tabl. 5.1), a docelowo o dowolnej grubości i składzie chemicznym na elementach o różnym kształcie i powierzchni. Do podstawowych kryteriów wyboru metody napawania należy ilość i wielkość napawanych elementów, rodzaj materiału, jego stan i spawalność, wymagane własności, jakość i grubość powłoki, kształt, wielkość i stan powierzchni, rodzaj i koszt materiałów dodatkowych, wymagana wydajność i ekonomiczność procesu.

Tabl. 5.1. Charakterystyka spawalniczych metod nakładania powłok

(* Sposób napawania: **R** – ręcznie, **P** – półautomatycznie, **A** – automatycznie, **Z** – zrobotyzowane,

** grubość w jednym przejściu)

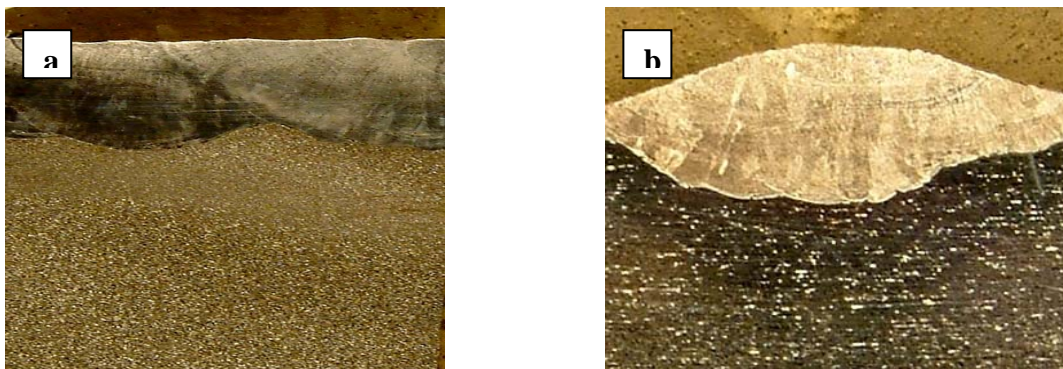
Proces – sposób nakładania powłoki*	Podstawowe materiały dodatkowe	Zakresy grubości powłok** mm	Udział materiału podłoża w powłoce %	Wydajność napawania kg/h
Napawanie gazowe - R, P, A	Stopy Fe, Ni, Cr, Co, Cu węgliki, borki, cermetale	0,05 ÷ 3,5	2 ÷ 10	0,5 ÷ 5
Napawanie elektrodą otuloną - R	Stopy Fe, Ni, Cr, Co, Cu	1 ÷ 5	10 ÷ 40	1 ÷ 5
Napawanie łukowe GMA - P, A, Z	Metale: Al, Cu,; stopy Fe, Ni, Cr, Co, Cu, Al	0,5 ÷ 6	5 ÷ 40	2 ÷ 30
Napawanie ŁK - P, A	Stopy Fe, Ni, Cr, Co	2 ÷ 8	10 ÷ 40	2 ÷ 40
Napawanie łukowe GTA - R, P, A	Al, Cu, W, Ti, Cr, Ni, stale niestopowe, stale stopowe, stopy Ni, Cr, Co	1,5 ÷ 5,0	5 ÷ 10	1 ÷ 8
Napawanie elektrożuźlowe - A	Stale niskowęglowe i stopowe	12 ÷ 100	10 ÷ 60	20 ÷ 200
Napawanie plazmowe - P, A, Z	Stopy Fe, Ni, Cr, Co, Cu, tlenki, borki, węgliki, cermetale	0,2 ÷ 15	5 ÷ 15	0,5 ÷ 20

Przygotowanie powierzchni do napawania polega na oczyszczeniu, usunięciu wszelkich wad, a zwłaszcza pęknięć oraz ewentualnie ułożeniu wstępnej warstwy, która pozwala uniknąć

wytworzenia się kruchych faz międzymetalicznych w obszarze stopienia napoiny z podłożem oraz przyczynia się do zmniejszenia naprężeń cieplnych i znacznych odkształceń w nakładanej napoinie. Nałożone warstwy napawane cechuje duża jednorodność metalurgiczna i strukturalna, poza napoinami nakładanymi ze stopów o bardzo dużej twardości (stellity), w których dopuszcza się występowanie pęknięć.

W makrostrukturze elementów z powłoką napawaną wyróżnia się materiał rodzimy, napoinę i strefę wpływu ciepła SWC, co przedstawiono na rys. 5.1. Napoiny w stanie surowym posiadają budowę dendrytyczną, a układ głównych osi dendrytów odzwierciedla kierunek odpływu ciepła podczas krystalizacji materiału dodatkowego.

Budowę napoin pod względem składu chemicznego charakteryzuje niejednorodność wywołana warunkami procesu krzepnięcia, objawiająca się mikrosegregacją dendrytyczną, której stopień jest zależny od szybkości chłodzenia. Szczególnie silna niejednorodność występuje w pobliżu linii wtopienia wskutek braku dokładnego wymieszania roztopionego materiału rodzimego. Na granicy wtopienia stopień udziału materiału rodzimego jest większy niż w spoinie, zwłaszcza gdy są znaczne różnice między składem chemicznym materiału rodzimego a materiałem dodatkowym. Ponadto, zależnie od metody spawania szerokość strefy przyległej do linii wtopienia, w której występują znaczne różnice składu, może wynosić od 0,2 do 0,5 mm.



Rys. 5.1. Budowa napoin ze stali austenicyznej w stanie surowym na stali; a) niestopowej, b) austenicyznej. Dendrytyczna struktura napoin, pod napoinami zarysowana SWC.
Traw. a) 10% HNO₃, b) HNO₃ + HF

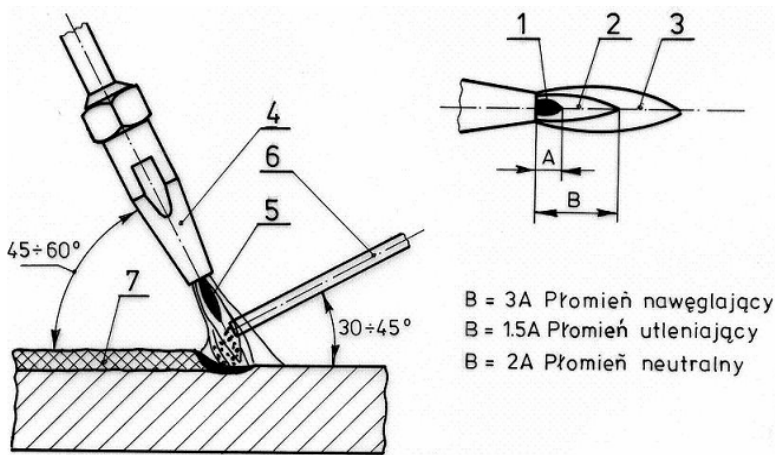


Rys. 5.2. Mikrostruktura w obszarze wtopienia napoiny za stali austenicyznej na stali; a) niestopowej, b) austenicyznej. Dendrytyczna budowa austenitu w spoinie, w SWC przegrzane, równoosiowe ziarna materiału rodzimego. Traw. HNO₃ + HF



5.1. Powłoki napawane gazowo

Metodą napawania gazowego nakłada się na nadtopioną powierzchnię przedmiotu warstwy ciekłego metalu stopionego w płomieniu gazowym, rys. 5.3. Spoiwo może być w postaci drutu litego lub proszkowego, albo proszku metalicznego. Podstawowym gazem palnym jest acetylen o temperaturze płomienia ok. 3100°C.



Rys. 5.3. Schemat napawania gazowego i regulacji płomienia;

- 1 – jąderko płomienia,
- 2 - strefa redukcyjna,
- 3 – strefa utleniająca,
- 4 - palnik gazowy,
- 5 - płomień gazowy,
- 6 - pręt,
- 7 - napoina

Napawanie acetylenowo-tlenowe wymaga bardzo dokładnej regulacji płomienia, dla większości stopów jest zalecany płomień lekko nawęglający lub neutralny tylko dla stopów miedzi – płomień lekko utleniający. Konieczne jest bardzo często podgrzewanie wstępne i powolne chłodzenie po napawaniu. Przy napawaniu niektórymi stopami zalecane jest użycie topnika. Powierzchnie do napawania muszą być bardzo starannie oczyszczone ze wszelkich zabrudzeń, smarów, tlenków. Podczas napawania bowiem powierzchnia musi być równomiernie zwilżana, co jest niezbędne do połączenia metalicznego napoiny z podłożem.

Metodą napawania gazowego nakłada się gładkie, równe powłoki o wysokiej jakości, przy minimalnym przetopieniu materiału podłoża, którego udział w napoinie jest w porównaniu do innych metod napawania bardzo mały, tabl. 5.1. Dzięki temu napoiny już w pierwszej warstwie osiągają pożądane własności nakładanego materiału; wysoką twardość, odporność na korozję i in.

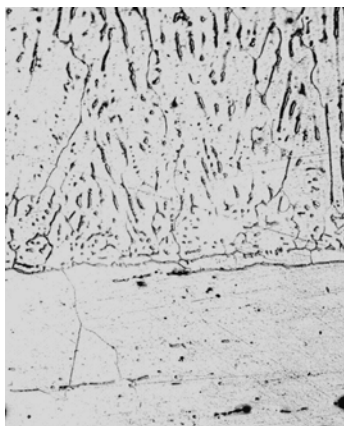
Najpowszechniej napawanie gazowe stosuje się do powierzchni o małych wymiarach i złożonych kształtach, np. krawędzie tnące narzędzi, przyłgnie zaworów. Nakłada się stale wysokostopowe z dużym udziałem węglików, stopy niklu, stopy kobaltu.

Napawanie spoiwem w postaci drutu lub pałeczki stosuje się do regeneracji lub produkcji nowych elementów ze stali, żeliwa, staliwa, brązów, mosiądzów, nakładając stale wysokostopowe, stopy na osnowie niklu, kobaltu lub chromu, także stopy miedzi, ołowiu. Napawa się panewki ze stopów miedzi, odlewy staliwne i żeliwne, wirniki, pompy, łopatki turbin, czopy, łożyska, koła zębate, wały korbowe, wałki rozrządu, narzędzia do obróbki skrawaniem i przeróbki plastycznej, narzędzia wiertnicze, czerpaki i zęby koparek, zawory i przyłgnie zaworowe, narzędzia rolnicze i in. W przemyśle najczęściej stosuje się napawanie gazowe części maszyn i urządzeń stellitami i podobnymi materiałami bardzo twardymi, odpornymi na zużycie ścierne, adhezyjne, korozję, erozję. Stellyty to żarowytrzymałe stopy Co-Cr-W z udziałem ok. 1 - 3% węgla o budowie roztworu stałego kobaltu i bardzo twardymi węglikami chromu i wolframu, co pokazano na rys. 5.4.

Odmianą napawania gazowego jest metoda napawania spoiwem w postaci proszku. Do napawania gazowego proszkowego stosuje się palnik acetylenowo-tlenowy z zasypnikiem i podajnikiem proszku. Proszek metalu o granulacji 0,03 ÷ 0,10 mm jest zasysany przez strumień gazu palnego i wydostaje się wraz z nim z dyszy palnika. Tą metodą układa się warstwy o grubości 0,02 ÷ 3,5 mm, przy czym warstwy mogą być połączone z podłożem tylko mechanicznie lub też z nim stopione. W wypadku połączenia mechanicznego powierzchnie pokrywane muszą być śrutowane by zwiększyć chropowatość i przyczepność. Przy napawaniu podłoża z nadtopieniem, jeśli warstwy mają być

grubsze niż 0,5 mm, wymagane jest podgrzewanie wstępne i naniesienie cienkiej warstwy spajającej o grubości ok. 0,25 mm, a następnie naniesienie warstwy o wymaganej grubości. Ze względu na możliwość sproszkowania każdego niemal metalu i stopu zakres stosowania materiałów napawanych proszkowo jest bardzo szeroki. Stąd zasadniczą zaletą tej metody – możliwość stosowania jej do układania powłok ze stopów, które trudno otrzymać w postaci drutu lub pręta.

Do podstawowych wad napawania gazowego zalicza się: konieczność podgrzewania wstępnego, a często obróbki cieplnej, niebezpieczeństwo powstania naprężeń spawalniczych, konieczność bardzo starannego przygotowania powierzchni i niską wydajność procesu, w porównaniu do innych metod napawania (tabl. 5.1).



Rys. 5.4. Mikrostruktura napoiny w obszarze połączenia; dendrytyczna struktura stellitu na stali zaworowej.
Traw. $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$

5.2. Powłoki napawane elektrycznie

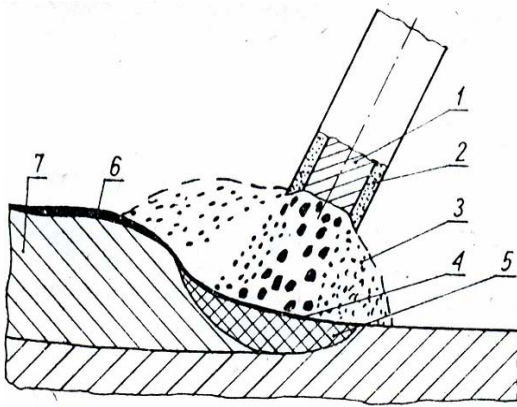
Nakładanie powłok metodą napawania elektrycznego polega na stopieniu materiału dodatkowego (powłokowego) w łuku elektrycznym lub przez nagrzewanie oporowe i nałożeniu go na stopione równocześnie podłoże, z którym tworzy spójną metalurgicznie powłokę metaliczną. Materiałem dodatkowym przy napawaniu elektrycznym może być prawie każdy metal i stop w postaci elektrody otulonej z drutu rdzeniowego pełnego lub proszkowego, drutu pełnego, drutu proszkowego, taśmy pełnej i taśmy proszkowej oraz proszku. Napawanie elektryczne wykonuje się: ręcznie, półautomatycznie i automatycznie.

W przemyśle najczęściej stosuje się napawanie:

- łukowe; elektrodą otuloną, elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej, elektrodą topliwą w osłonie gazowej, łukiem krytym,
- żuźłowe,
- plazmowe.

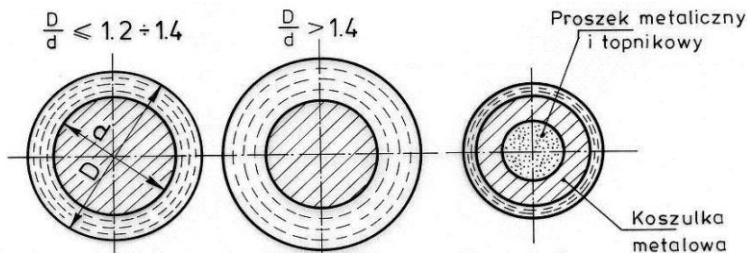
Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną polega na stopieniu materiału elektrody i metalu pokrywanego ciepłem łuku elektrycznego, wskutek czego powstaje powłoka metaliczna, rys. 5.5a. W temperaturze łuku dochodzącej do 5000°C ulega znacznemu nadtopieniu podłoże tak, że w napoinie jego udział sięga do 40%. W jednym przejściu można ułożyć warstwę o grubości 1 ÷ 5 mm. Do nanoszenia powłok jako materiału dodatkowego stosuje się elektrody otulone z rdzeniem pełnym lub proszkowym: rutyłowe zasadowe lub rutyłowo-zasadowe, rys. 5.5b.

Do podstawowych parametrów napawania zalicza się: rodzaj i natężenie prądu napawania, napięcia łuku, prędkość napawania, średnicę elektrod i sposób jej prowadzenia względem powierzchni napawanej. Dzięki dużej uniwersalności, niskim kosztom jest powszechnie stosowana do układania napoin ze stali niskowęglowych niskostopowych, wysokostopowych, specjalnych, stopów Ni, Cu, Al, Co, a przedmioty napawane mogą być dowolnego kształtu, wielkości, ze stali, żeliwa, stopów Cu, Al, Ni.



Rys. 5.5a. Napawanie łukowe elektrodą otuloną;

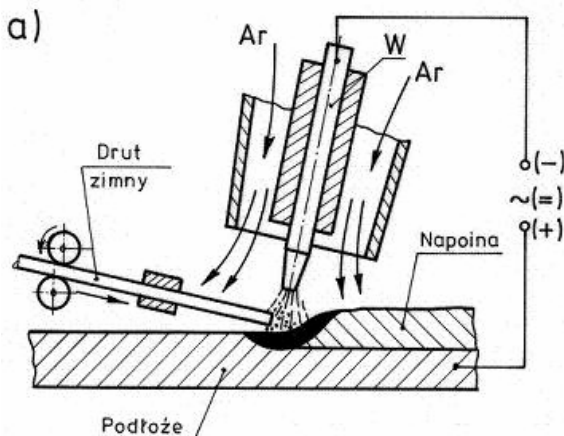
- 1 – rdzeń metalowy,
- 2 – otulina,
- 3 – osłona gazowa,
- 4 – ciekły żużel,
- 5 – jeziorko napoiny,
- 6 – zakrzepnięty żużel,
- 7 - napoina



Rys. 5.5b. Rodzaje elektrod otulonych do napawania łukowego – średnio- i grubootulinowa z rdzeniem metalicznym oraz z rdzeniem proszkowym

Napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej (metoda GTA)

Napawanie tą metodą polega na wprowadzeniu materiału dodatkowego do obszaru łuku jarzącego się między nietopliwą elektrodą wolframową a napawanym przedmiotem, w osłonie gazu obojętnego, co przedstawiono na rys. 5.6. Materiał dodatkowy w postaci drutu, pręta pełnego lub proszkowego albo proszku, ulega stopieniu i tworzy napoinę na nadtopionej powierzchni przedmiotu. Dzięki osłonie łuku gazem obojętnym (argon, hel), metal napoiny ma bardzo wysoką jakość. W jednym przejściu można ułożyć warstwę 1,5 ÷ 5 mm, a udział materiału podłoża w napoinie osiąga 5 ÷ 10%. Mała wydajność i stąd wysoki koszt, przy wysokiej jakości jest powodem zastosowania do napawania przede wszystkim naprawczego części maszyn, wad odlewów. Zastosowanie drutów proszkowych pozwala napawać warstwy o dużej twardości, niemożliwe do uzyskania przez napawanie drutami pełnymi. Napawa się stale, żeliwa, stopy aluminium i stopy miedzi, a jako powłoki stosuje się: stellite, stale wysokostopowe, ołów, brąz, stopy niklu i stale austenityczne.



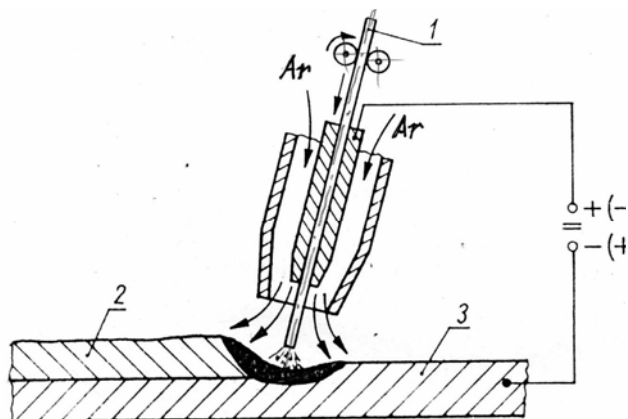
Rys. 5.6. Metoda napawania automatycznego metodą GTA drutem zimnym;
W – nietopliwa elektroda wolframowa

Napawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazu (metoda GMA)

Napawanie tą metodą polega na stapianiu materiału elektrody i podłoża przez jarzący się łuk między elektrodą topliwą a napawanym przedmiotem, w osłonie gazu obojętnego lub aktywnego.

Do napawania stosuje się druty pełne oraz proszkowe. Gazami osłaniającymi łuk i jeziorko spawalnicze przed dostępem gazów z atmosfery są: argon, hel i CO₂. Rodzaj osłony gazowej wywiera istotny wpływ na skład chemiczny napoiny i jej właściwości.

W celu zwiększenia wydajności napawania automatycznego stosuje się dodatkowy drut wprowadzany w obszar jarzącego się łuku tzw. drut gorący (podgrzewany oporowo) lub drut zimny (bez podgrzewania), rys. 5.7. Stosuje się głównie do napawania dużych, płaskich powierzchni (tabl. 5.1), warstwami o specjalnych własnościach użytkowych, lub regeneracji elementów ze stali niskowęglowych, niskostopowych, staliw, żeliw, stopów Cu i Al.

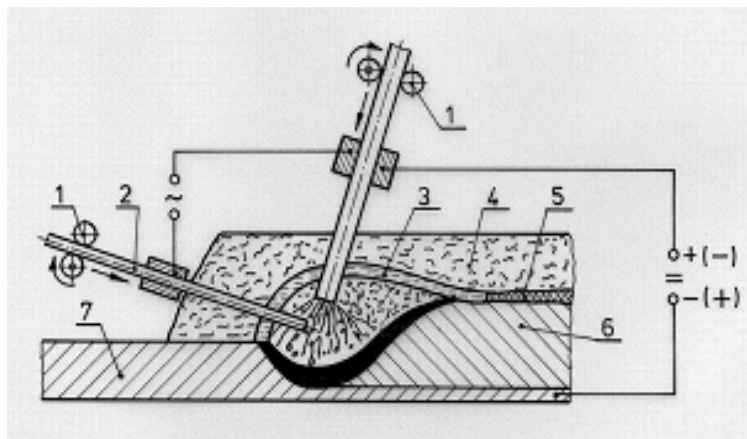


Rys. 5.7. Schemat napawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej (GMA);

- 1 - elektroda topliwą,
- 2 - napoina,
- 3 - podłoże

Powłoki napawane łukiem krytym

Proces napawania łukiem krytym polega na stapianiu materiału elektrody z warstwą wierzchnią w jarzącym się łuku elektrycznym pod ochronną warstwą topnika, rys. 5.8. Topnik, oprócz ochrony i stabilizacji łuku oraz jeziorka spawalniczego rafinuje ciekły metal napoiny (odprowadzając zanieczyszczenia do żużla), reguluje jej skład i wpływa na formowanie lica napoiny.

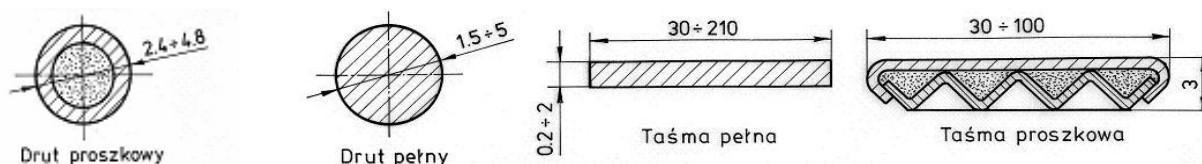


Rys. 5.8. Napawanie łukiem krytym z dodatkowym gorącym drutem;

- 1 – podajniki drutu,
- 2 – gorący drut,
- 3 – ciekły żużel,
- 4 – topnik,
- 5 – zakrzepły żużel,
- 6 – napoina,
- 7 - podłoże

Elektroda w postaci drutu pełnego lub proszkowego albo taśmy pełnej lub proszkowej, bądź spiekanej, pokazanych na rys. 5.9, jest podawana w sposób ciągły. Tą metodą napawa się warstwy ze stali niskowęglowych, stopowych, stopów niklu, kobaltu i chromu, niektórych stopów miedzi i stopów aluminium. Napoiny są wysokiej jakości o gładkim i równym licu. Jednocześnie wysoka wydajność napawania tą metodą powoduje, że stosuje się ją najczęściej w przemyśle do napawania dużych powierzchni elementów grubościennych.

Napawa się głównie materiały odporne na ścieranie na powierzchni kruszarek, młotów, rynien zsypanych, walców hutniczych, kół tocznych, ogniw gąsienic, rolek przenośników taśmowych, noży, wykrojników, łopatek turbin, płyt sitowych, armatury instalacji w energetyce jądrowej.



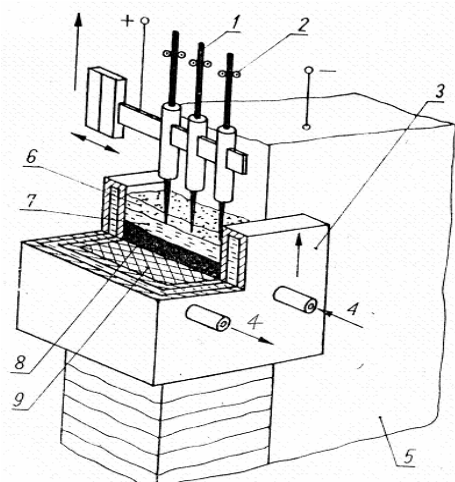
Rys. 5.9. Przekroje drutów i taśm pełnych i proszkowych do napawania łukiem krytym

Odmianą napawania łukiem krytym jedną elektrodą jest napawanie z wypełniaczem, gdzie proszek metaliczny poddawany jest ze specjalnego dozownika. Na proszek jest zasypywany z kolei topnik. Składy chemiczne proszku i drutu elektrod mogą być dobierane tak by zapewnić wymagany skład chemiczny napoiwy. Z kolei wprowadzenie w obszar łuku drutu elektrodowego zamiast proszku pozwala zwiększyć wydajność napawania i obniżyć przetopienie podłoża. Grubości uzyskanych warstw w napawaniu łukiem krytym w jednym przejściu wynoszą $2 \div 8$ mm, udział materiału podłoża w powłoce wynosi $10 \div 40$ %, a proces prowadzi się półautomatycznie lub automatycznie.

Napawanie elektrożuźlowe

Polega na stapianiu materiału dodatkowego z nadtopionym podłożem ciepłą kąpielą żuźlową nagrzewaną oporowo z utworzeniem napoiwy, rys. 5.10. Ciekły żużel i jeziorko spawalnicze są utrzymywane w komorze utworzonej przez powierzchnię napawanego przedmiotu (5) oraz miedziane nakładki (3) intensywnie chłodzone wodą (4). Stopiony metal zbiera się poniżej kąpeli żuźlowej i krzepnąc tworzy napoinę pomiędzy nakładkami. Zużycie topnika jest niewielkie, w odróżnieniu od wielokrotnie większego zużycia jak przy napawaniu łukiem krytym i wynosi kilka procent masy stopionego materiału dodatkowego.

Jako materiały dodatkowe stosuje się stale stopowe w postaci drutu lub taśmy, pełnych lub proszkowych. Grubość powłok w jednym przejściu wynosi $12 \div 100$ mm. Napawanie pojedynczą taśmą stosuje się do dużych powierzchni, jak wnętrza zbiorników ciśnieniowych, ponadto do walców hutniczych gładkich i profilowych, młotków kruszarek, bijaków stalowych, staliwnych lub żeliwnych napawanych stalą niestopową, stopową odporną na korozję, żelwem stopowym.



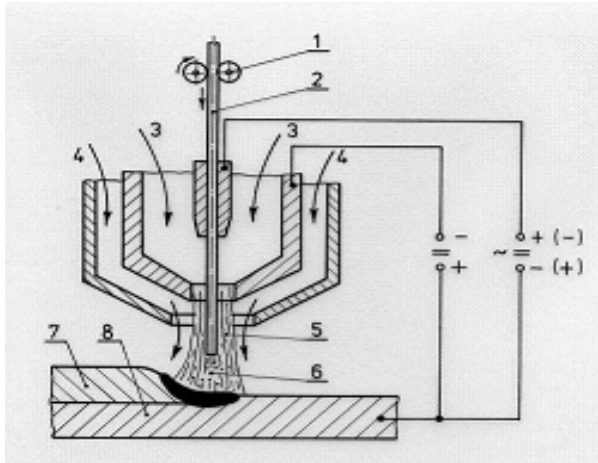
Rys. 5.10. Napawanie żuźlowe trzema elektrodami w postaci drutu;

- 1 - drut elektrodowy,
- 2 - podajnik,
- 3 - nakładka formująca z zaznaczonym kierunkiem przesuwu,
- 4 - woda chłodząca,
- 5 - napawany przedmiot,
- 6 - topnik,
- 7 - ciekły żużel,
- 8 - jeziorko napoiwy,
- 9 - napoina

Napawanie plazmowe

Polega na stapianiu w łuku plazmowym o temperaturze $18\ 000 \div 24\ 000^{\circ}\text{C}$ materiału dodatkowego (w postaci proszku lub drutu) z nieznacznie nadtopionym podłożem. Podczas napawania plazmowego proszek, np. metalu o ziarnach od 0,06 do 0,3 mm jest wprowadzany do palnika plazmowego z dozownika za pomocą gazu transportującego (zazwyczaj argonu). Stopiony proszek w łuku plazmowym (5) rys. 5.11, wychodzącym z dyszy jest przenoszony ciśnieniem gazów na podłoże napawane tworząc napoinę o minimalnym udziale podłoża. Argon zapewnia dokładną

ochronę stopianego proszku i jeziora spawalniczego napoiny oraz przyległego metalu podłoża przed dostępem gazów z powietrza. Napoiny charakteryzują się bardzo wysoką czystością metalurgiczną, minimalnym udziałem materiału podłoża. W jednym przejściu układa się jednorodne warstwy o grubości $0,25 \div 6$ mm. Napawa się proszkiem na osnowie kobaltu, niklu, żelaza, chromu, miedzi i cyny, przedmioty ze stali niestopowych, odpornych na korozję, staliwa i niektórych gatunków żeliw.



Rys . 5. 11. Schemat napawania plazmowego;

- 1 – podajnik,
- 2 – drut,
- 3 – gaz plazmowy,
- 4 – gaz ochronny,
- 5 – łuk plazmowy,
- 6 – łuk,
- 7 – napoina,
- 8 - podłoże

Napawanie plazmowe stosuje się do części silników spalinowych, narzędzi skrawających, krawędzi tnących narzędzi do prac ziemnych, zaworów, gniazd zaworowych, czopów walców hutniczych, złączy przewodów wierniczych. Napawanie plazmowe z gorącym lub zimnym drutem jest odmianą całkowicie zautomatyzowaną, w której materiałem dodatkowym jest drut podgrzany przed wprowadzeniem do obszaru łuku plazmowego, co zapewnia mniejsze przetopienie podłoża i większą wydajność napawania niż w wypadku wprowadzenia do obszaru łuku drutu zimnego.