

11. MATERIAŁY SPIEKANE I KOMPOZYTY

Opracowała: dr inż. Anna Radoń [†]

11.1. Wprowadzenie

Metalurgia proszków jest gałęzią techniki obejmującą wytwarzanie wyrobów i półwyrobów ze sproszkowanych metali, mieszanek metali, mieszanek metali z niemetalami lub z proszków stopowych bez konieczności roztopienia głównego składnika. Zajmuje ona szczególne miejsce wśród technologii metali z powodzeniem konkurując m. in. z odlewaniem, przeróbką plastyczną i obróbką skrawaniem, uzupełniając lub zastępując te technologie. Elementy z niektórych materiałów, np. metali trudno topliwych, węglików spiekanych, a także spieki wysokoporowate, mogą być wytwarzane tylko metodami metalurgii proszków.

Do zalet metalurgii proszków można zaliczyć możliwość seryjnego wytwarzania elementów z dużą dokładnością podczas niewielu operacji technologicznych, przy niewielkim jednostkowym zużyciu energii i niemal całkowitym wykorzystaniu surowców. Wady metody metalurgii proszków są związane z uzyskiwaniem materiałów porowatych, a co za tym idzie – o mniejszej wytrzymałości oraz z trudnościami w otrzymaniu produktów o skomplikowanych kształtach.

11.2. Technologia materiałów spiekanych

Najczęściej proces technologiczny wytwarzania wyrobów metodą metalurgii proszków składa się z następujących etapów:

- otrzymywania proszku metalu lub stopu,
- formowania,
- spiekania,
- obróbki wykańczającej.

11.2.1. Metody wytwarzania proszków

Wytwarzanie proszków obejmuje procesy mechaniczne i fizykochemiczne, które mają na celu uzyskanie określonego materiału w postaci proszku. Proszek może być produktem mechanicznego rozdrobnienia materiału bez zmiany jego składu chemicznego, albo też uzyskuje się go jako produkt reakcji chemicznych lub fizykochemicznych z innych materiałów lub związków chemicznych.

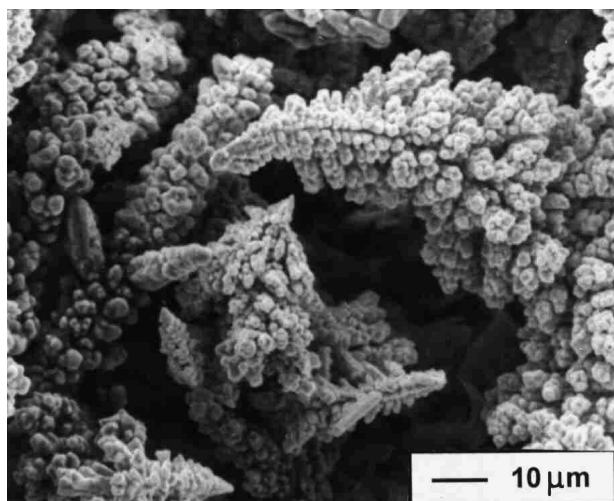
Najczęściej stosowany podział metod wytwarzania proszków przedstawiono na **rys. 11.1**. Wybór odpowiedniej metody wytwarzania proszków zależy od własności jakich oczekuje się od produktu oraz od kalkulacji ekonomicznej.

11.2.2. Własności proszków

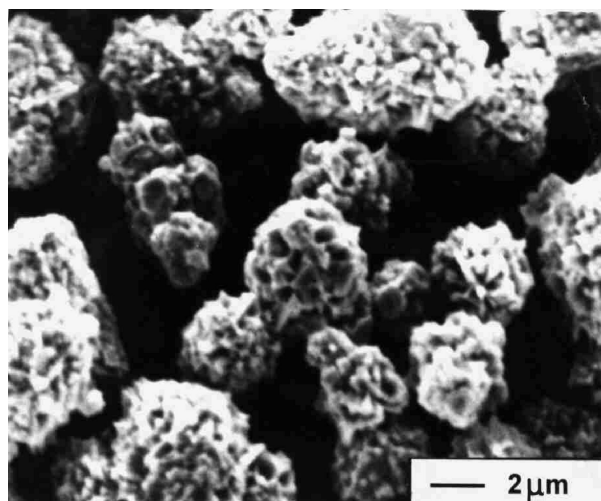
Proszki z materiału o tym samym składzie chemicznym mogą wykazywać wyraźne różnice w swych własnościach, jeśli zostały wytworzone różnymi metodami (**rys. 11.2÷11.5**). Dlatego znajomość własności proszków jest niezbędnym warunkiem prawidłowego opracowania technologii produkcji wyrobów spiekanych.



Rys. 11.1. Metody wytwarzania proszków, wg A. Ciasia, H. Frydrych, T. Pieczonki



Rys. 11.2. Elektrolityczny proszek miedzi

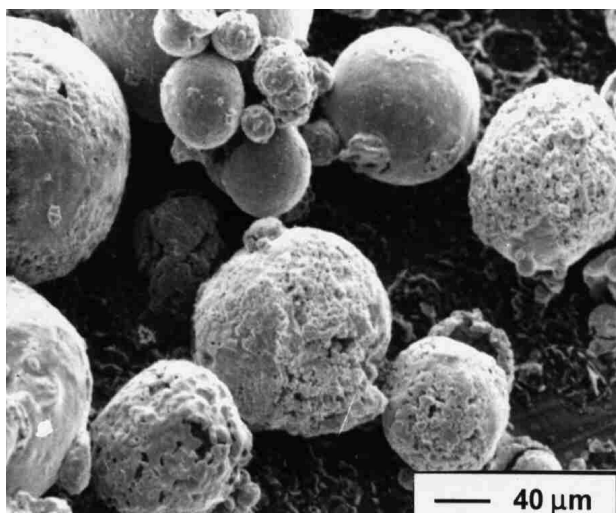


Rys. 11.3. Karbonylkowy proszek niklu

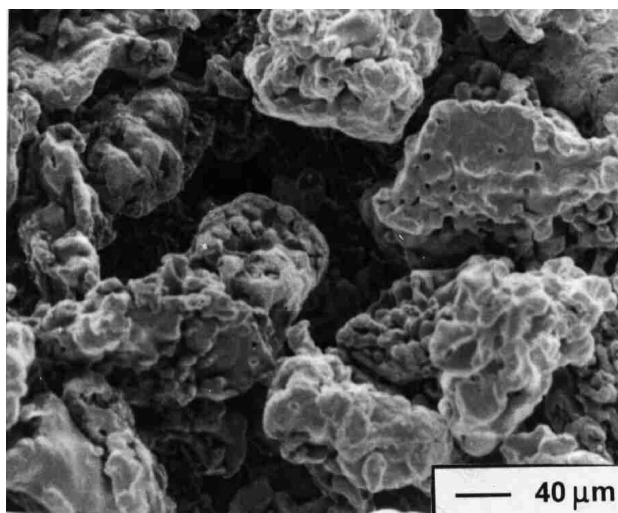
Proszki charakteryzują się:

- własnościami fizycznymi: kształtem, wielkością i rozkładem cząstek, powierzchnią właściwą, gęstością piknometryczną, mikrotwardością,
- własnościami chemicznymi: zawartością metalu podstawowego, składników stopowych, zanieczyszczeń, gazów, obecnością powłok tlenkowych,
- własnościami technologicznymi: gęstością nasypową, gęstością nasypową z usadem, sypkością, zgęszczalnością i formowalnością.

Te własności proszku należy określić przed przystąpieniem do dalszych etapów procesu technologicznego.



Rys. 11.4. Rozpylany proszek żelaza



Rys. 11.5. Redukowany proszek żelaza

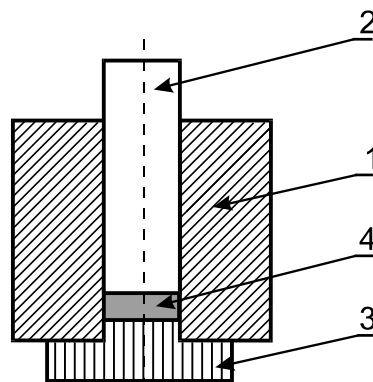
11.2.3. Formowanie proszków

Formowanie na zimno polega na ściskaniu proszku w zamkniętej matrycy, w wyniku czego następuje jego zagęszczenie. W zależności od kształtu matrycy oraz własności proszku, w szczególności zaś od jego plastyczności, zgęszczalności i formowalności dobiera się odpowiednią metodę formowania, a mianowicie:

- prasowanie,
- prasowanie izostatyczne w komorach wysokociśnieniowych oparte na prawie Pascala,
- wibracyjne zagęszczanie proszków, stosowane przy otrzymywaniu kształtek o skomplikowanym kształcie z proszków twardych, trudno prasujących się,
- walcowanie proszków, pozwalające otrzymać wyroby o jednorodnej gęstości, których długość znacznie przewyższa szerokość i grubość,
- wyciskanie past proszkowych,
- odlewanie i rozpylanie gęstwy.

11.2.3.1. Prasowanie

W praktyce metalurgii proszków najczęściej stosowanym procesem zagęszczania proszków jest prasowanie. Odbywa się ono w matrycach (rys. 11.6), w których odpowiednia ilość proszku jest zagęszczana pod naciskiem stempła. Sprasowana kształtka jest następnie wypychana z matrycy.



Rys. 11.6. Schemat matrycy do prasowania proszków: 1 – korpus matrycy, 2 – stempel pracujący, 3 – stempel dolny, 4 – prasowany proszek, wg L.A. Dobrzańskiego

Podczas procesu prasowania zachodzą następujące zjawiska:

- zbliżanie cząstek proszku na odległości umożliwiające działanie adhezji,
- powiększenie powierzchni styku cząstek proszku przez wzajemne ich przemieszczanie i deformację plastyczną,
- zdzieranie powłok tlenkowych przez wzajemne tarcie sąsiadujących ze sobą cząstek, powodujące odsłonięcie czystych, aktywnych powierzchni metalicznych,
- lokalne punktowe zgrzewanie cząstek w wyniku odkształcenia plastycznego i podwyższenia temperatury, umożliwiające dyfuzję powierzchniową.

Proces prasowania można podzielić na dwa etapy. W początkowym stadium, w warunkach niskiego ciśnienia następuje załamywanie i likwidacja „mostków” powstałych w czasie zasypywania proszku oraz ściślejsze ułożenie cząstek, dzięki ich wzajemnym poślizgom i obrotom. W tej fazie procesu duży wpływ na uzyskaną gęstość wypraski ma kształt cząstek i tarcie między przemieszczającymi się cząstkami. Rozkład gęstości w wypraskach prasowanych pod niskim ciśnieniem jest bardzo nierównomierny. Występują duże różnice, zwłaszcza między materiałem przylegającym do ścian matrycy a środkiem wypraski.

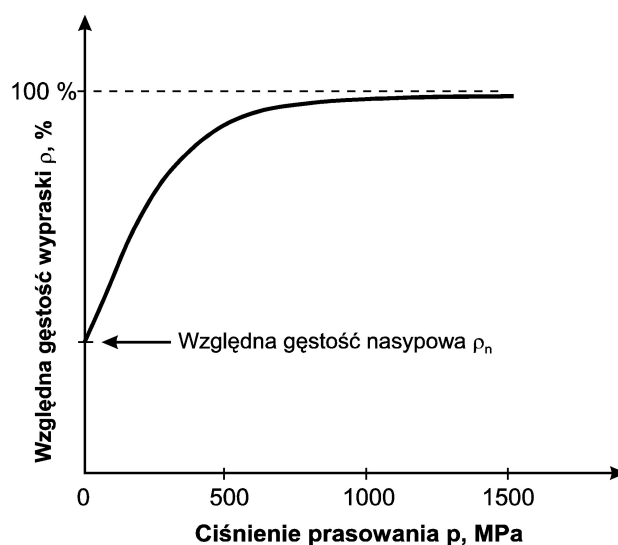
W drugim etapie prasowania pod wyższym ciśnieniem ma miejsce odkształcenie plastyczne cząstek proszku. Deformacja zaczyna się w miejscach styku poszczególnych cząstek a następnie rozprzestrzenia się na całą ich objętość. W czasie prasowania proszków z materiałów kruchych, występuje kruszenie cząstek zamiast deformacji plastycznej. Oba te etapy prasowania bardzo często nakładają się wzajemnie.

Największy przyrost gęstości ma miejsce w początkowym etapie prasowania, następnie przyrosty gęstości wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania maleją i po przekroczeniu określonej wartości ciśnienia, praktycznie nie obserwuje się dalszego wzrostu gęstości (**rys. 11.7**).

Przebieg procesu prasowania a także gęstość wyprasek będą zależać od:

- charakterystyki proszków,
- stosowania środków poślizgowych,
- wymiarów wyprasek,
- parametrów procesu prasowania.

Istnieje bardzo wyraźna zależność zdolności do zagęszczania proszku podczas prasowania od twardości materiału, z którego został wykonany. Proszki wykonane z metali plastycznych takich jak srebro czy miedź, łatwo poddają się prasowaniu, natomiast zagęszczanie proszków metali twardych jest utrudnione. Na gęstość wyprasek mają także wpływ: kształt, wielkość cząstek i stan ich powierzchni.



Rys. 11.7. Wpływ ciśnienia prasowania p na względną gęstość wypraski ρ , wg A. Ciasia, H. Frydrych, T. Pieczonki

Proszki drobnoziarniste o nieregularnym kształcie cząstek charakteryzują się wysokim współczynnikiem tarcia, co powoduje większe straty ciśnienia prasowania na pokonanie sił tarcia, a tym samym mniejszą gęstość wyprasek w porównaniu z proszkami gruboziarnistymi, o słabiej rozwiniętej powierzchni. Im większy jest stopień utlenienia proszku, tym mniejsza jest gęstość uzyskanych z niego kształtek. W podobny sposób na gęstość wyprasek wpływa ich wysokość.

W praktyce prasowania stosuje się środki poślizgowe, które ułatwiają wzrost gęstości wyprasek, wpływając na obniżenie współczynników tarcia. Zmniejszają także ciśnienie wypychania. Środki poślizgowe dzieli się na dwie grupy:

- obojętne (wazelina, gliceryna, parafina),
- powierzchniowoaktywne (kwas stearynowy, oleinowy, stearyniany cynku, litu itp.).

Wprowadza się je do proszku zazwyczaj w postaci roztworów w organicznych rozpuszczalnikach (benzyna, benzen, czterochlorek węgla), które przy suszeniu wymieszanego wsadu odparowują. Stearyniany mogą być wprowadzone w postaci proszków. Środki powierzchniowo aktywne, oprócz obniżenia współczynnika tarcia, ułatwiają deformację cząstek proszku. Drobiny środka poślizgowego wnikają w mikroszczeliny na powierzchni cząstek proszku i ułatwiają odkształcenie plastyczne.

Oprócz ciśnienia prasowania, co omówiono wcześniej, na przebieg procesu prasowania i uzyskaną gęstość ma również wpływ szybkość prasowania i czas działania nacisku. Wolne prasowanie i wytrzymanie wypraski pod maksymalnym obciążeniem przez kilkanaście sekund powoduje wzrost jej gęstości o kilka procent.

11.2.4. Spiekanie

Spiekanie jest jednym z podstawowych procesów technologicznych metalurgii proszków, któremu poddawany jest proszek luźno zasypywany do form lub gotowe wypraski. Jest to zabieg cieplny składający się z nagrzania, wygrzania przy temperaturze $0,7 \div 0,8$ bezwzględnej temperatury topnienia podstawowego składnika i następnego chłodzenia. Gdy temperatura ta jest wyższa od temperatury topnienia jednego ze składników w czasie spiekania wystąpi faza ciekła.

Główne parametry charakteryzujące spiek i zmieniające się podczas spiekania to:

- wymiary, gęstość i porowatość,
- własności mechaniczne,
- własności elektryczne i magnetyczne.

W praktyce tak ustala się parametry procesu spiekania, aby nastąpił wzrost gęstości i obniżenie porowatości, czemu towarzyszy skurcz. Proces spiekania można zakończyć z chwilą uzyskania wymaganych własności.

Analizując od strony teoretycznej proces spiekania należy uwzględnić siły napędowe oraz mechanizmy transportu materii działające w czasie spiekania. Źródłem sił napędowych procesu spiekania są zmiany energii powierzchniowej wynikające z dążenia materiału do osiągnięcia najmniejszej energii. Materiał porowaty charakteryzuje się dużą powierzchnią właściwą i proporcjonalną do niej odpowiednio wysoką wartością energii powierzchniowej. W miarę postępu spiekania zmniejsza się powierzchnia właściwa porów wskutek wygładzania ich powierzchni, sferoidyzacji i koagulacji, a tym samym siły napędowe również maleją i proces przebiega coraz wolniej. Dlatego proszki drobnoziarniste o nieregularnej budowie cząstek spiekają się lepiej od proszków o regularnym, zbliżonym do kulistego kształcie.

Podwyższenie temperatury lub przedłużenie czasu spiekania pozwala na uzyskanie większych gęstości, przy czym wpływ temperatury jest znacznie wyraźniejszy. Większa gęstość początkowa wyprasek doprowadza do uzyskania większej gęstości końcowej spieków. Natomiast skurcz spieków jest tym większy im mniejsza jest gęstość początkowa.

Badania mechanizmu transportu materii między poszczególnymi cząstkami proszku podczas spiekania doprowadziły do opracowania kilku teorii, mających na celu wyjaśnienie podstawowych zagadnień, tj.:

- powstawania i powiększania się sztyjek między spiekanyymi cząstkami,
- zmiany wymiarów spieków wskazujących na zmniejszenie się ich wymiarów.

Ustalono, że w czasie spiekania zachodzą następujące procesy:

- parowanie i kondensacja,
- dyfuzja powierzchniowa,
- dyfuzja na granicach ziarn,
- dyfuzja objętościowa,
- płynięcie lepkościowe i plastyczne,
- zdrowienie i rekrytalizacja.

Zakres poszczególnych etapów zależy od rodzaju i własności materiału oraz warunków spiekania.

Ze względu na konieczność ochrony wyrobów spiekanych przed utlenieniem, spiekanie wykonuje się w odpowiednich atmosferach. Atmosfery spiekania można podzielić na redukujące i obojętne. Najlepszą atmosferą redukującą jest czysty, suchy wodór. Jednakże jest on stosunkowo drogi i w skali przemysłowej stosuje się raczej zdysocjowany amoniak.

Do spiekania proszków stali o zawartości węgla powyżej 0,3% oraz wyprasek z miedzi i jej stopów z dużą ilością grafitu, stosowane są atmosfery otrzymane z częściowego spalania gazu ziemnego (endogaz i egzogaz). Jako atmosferę redukującą stosuje się także tlenek węgla.

Atmosfery obojętne tworzą takie gazy jak: azot, argon, hel. Rolę atmosfery ochronnej może również pełnić próżnia.

11.3. Materiały wytwarzane technologią metalurgii proszków

Materiały wytwarzane techniką metalurgii proszków można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- materiały bezkonkurencyjne, tzn. takie, które są wytwarzane wyłącznie tą techniką. Należą do nich wyroby o wysokiej porowatości, pseudostopy, węgliki spiekane, cermetale, materiały o największej twardości,
- materiały konkurencyjne, tzn. materiały wytwarzane tradycyjnie w warunkach przemysłowych metodami klasycznej metalurgii, które można obecnie wytwarzać – taniej lub lepiej – metodą metalurgii proszków.

11.3.1. Spiekane materiały konstrukcyjne

Należą tu materiały spiekane na bazie proszku żelaza, także proszków ze stali niestopowych i stali stopowych. Najbardziej typowe elementy to stosowane w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym spiekane części maszyn a mianowicie: koła zębate, podkładki, nakrętki, zapadki, części amortyzatorów, gniazda zaworów, okucia budowlane, elementy uzbrojenia, części maszyn biurowych i maszyn do szycia.

Do spieków konstrukcyjnych na bazie proszku żelaza, w celu zwiększenia ich własności wytrzymałościowych, dodawany jest węgiel w postaci grafitu, miedź, nikiel, molibden. Za dodatki stopowe tych spieków uznaje się obecnie także fosfor i siarkę. Oprócz materiałów konstrukcyjnych na bazie proszku żelaza, szeroko stosowane są produkty spiekane z miedzi i jej stopów. Wytwarza się je z mieszaniny proszków Cu, Si lub Zn albo proszków stopowych. Miedź oraz brązy i mosiądze są stosowane do wytwarzania spiekanych części urządzeń i maszyn, okuć budowlanych oraz w medalierstwie.

11.3.2. Łożyska spiekane

Spiekane materiały łożyskowe znajdują zastosowanie w budowie urządzeń przemysłowych, pojazdów, samolotów, maszyn rolniczych, maszyn i urządzeń używanych w gospodarstwie domowym, maszyn biurowych i wielu innych. W zależności od warunków pracy dobierany jest

odpowiednio skład chemiczny, fazowy i struktura tych materiałów. Materiałami łożyskowymi przeznaczonymi do pracy w warunkach tarcia suchego są najczęściej spieki żelazo-grafit i brąz-grafit. Grafit pełni w nich rolę stałego środka smarującego. Materiały te są stosowane przy podwyższonej i obniżonej temperaturze oraz przy dużych obciążeniach, które to warunki wykluczają smarowanie olejami. Żelazo może być częściowo zastąpione przez Cu, Pb, Sn lub Zn, natomiast miedź przez Sn, Zn lub Pb.

W zależności od warunków pracy łożyska ślizgowe mogą zawierać także 0÷60%Cu, 0÷30%Cr, 0÷10%Al, 0÷10%Mo oraz 0÷40% węglików, borków lub siarczaków metali. Nowoczesnym materiałem łożyskowym do pracy w warunkach tarcia suchego są porowate spieki nasycane wielkocząsteczkowymi tworzywami sztucznymi. Najczęściej używanym w tym celu tworzywem sztucznym jest teflon. Ważnym przedstawicielem spiekanych łożysk nieporowatych pracujących w warunkach tarcia płynnego są łożyska z brązu ołowiowego lub ołowiowo-cynowego produkowane jako łożyska bimetalowe (taśma stalowa z warstwą brązu). Łožyska tego typu można wytwarzać również drogą odlewania odśrodkowego.

Drugą grupą materiałów łożyskowych są łożyska porowate. Pory istniejące wewnątrz materiału są połączone ze sobą, tworząc kapilarne kanaliki. Objętość porów sięga 35% całkowitej objętości łożysk. Najczęściej wytwarza się je ze stopów żelaza lub miedzi, m. in. z brązów cynowych, do których mogą być dodawane stałe środki smarujące, np. grafit. Najczęściej łożyska te produkuje się w postaci cienkościennych tulei lub tulei z kołnierzami. Łožyska porowate nasycy się odpowiednim olejem, który w czasie pracy smaruje wał lub oś. Występuje wówczas równowaga między siłami wysysania oleju a siłami kapilarnymi porów, dzięki czemu olej nie wycieka, a po zaprzestaniu pracy natychmiast jest wciągany w głąb łożyska.

11.3.3. Filtry spiekane

Do produktów spiekanych o porowatości do 60% należą filtry. Służą one do oczyszczania wody, wodnych roztworów soli, paliw, olejów, środków chłodzących, powietrza a w wysokiej temperaturze – stopionych soli, ciekłych polimerów oraz spalin. W zależności od warunków pracy, głównie od temperatury, wykonuje się je z proszków brązów cynowych, stali chromowych lub austenitycznych odpornych na korozję albo mosiądzów niklowych.

W przypadku zastosowania filtrów spiekanych oczyszczanie mediów odbywa się nie tylko na zasadzie efektu przesiewania – zatrzymywane są bowiem także cząstki mniejsze od rozmiarów porów. Możliwe to jest, ponieważ pory tworzą przestrzenne systemy labiryntowe i równocześnie ścianki kanałków zatrzymują adhezyjnie drobne cząstki.

Celem zwiększenia porowatości dodaje się często do proszku substancji porotwórczych, które odparowując przy temperaturach niższych od temperatury spiekania, powodują wzrost objętości porów. Można również spiekać proszek luźno zasypany do form grafitowych lub stalowych.

11.3.4. Spiekane styki elektryczne

Zadania styków elektrycznych polegają na zamykaniu obwodów prądu, przejmowaniu przez pewien czas funkcji przewodnika oraz otwieraniu obwodów. Dlatego wymaga się od nich przede wszystkim odporności na iskrzenie i zgrzewanie podczas pracy.

Największe znaczenie w technice znalazły materiały stykowe złożone ze składników nie tworzących roztworów zarówno w stanie stałym jak i ciekłym. Kojarzenie ze sobą takich składników prowadzi do uzyskania tzw. pseudostopów. Jeden ze składników pseudostopów jest trudnotopliwy (np. wolfram lub molibden) i tworzy porowaty szkielet o dużej twardości i odporności na zgar. Szkielet ten jest nasycany drugim metalem – o niższej temperaturze topnienia, o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej, najczęściej miedzią lub srebrem. Takie styki mogą być również wytwarzane przez prasowanie i spiekanie odpowiednich metali, mieszanych w różnych proporcjach, co umożliwia zmianę ich własności użytkowych.

Innym korzystniejszym rozwiązaniem, prowadzącym do nadania materiałowi stykowemu odpowiednich własności i zapobiegającym tworzeniu się łuku elektrycznego w czasie pracy jest wytworzenie styku wielowarstwowego. W kolejnych cienkich warstwach, w miarę oddalania się od powierzchni roboczej, wzrasta zawartość składnika dobrze przewodzącego prąd np. srebra, co umożliwia prawie ciągłą zmianę oporności styku.

Styki na osnowie wolframu i molibdenu są stosowane przy wysokim napięciu w wyłącznikach powietrznych, olejowych i transformatorowych. Wytwarza się ponadto styki srebro-nikiel, miedź-ołów-nikiel, srebro-tlenek kadmu, miedzi lub żelaza. Jako styki ślizgowe, zbierające lub odprowadzające prąd, znane jako szczotki kolektorowe, są stosowane spieki srebro-grafit i miedź-grafit. Szczególną grupą materiałów stykowych są kompozyty.

11.3.5. Spiekane materiały narzędziowe

Metalurgia proszków znalazła szerokie zastosowanie w produkcji spiekanych materiałów narzędziowych takich jak stale szybko tnące, węglkostale, węgliki spiekane, a także cermetale, czy materiały supertwarde (np. syntetyczny diament i azotek boru).

11.3.5.1. Stale szybko tnące

W przypadku stali szybko tnących metalurgia proszków jest metodą konkurencyjną w stosunku do klasycznej technologii ich produkcji. Spiekane stale szybko tnące w porównaniu ze stalami konwencjonalnymi wykazują wiele korzystnych własności, m. in. lepszą plastyczność, dobrą szlifowalność, dużą stabilność wymiarową po hartowaniu i odpuszczaniu i przede wszystkim brak segregacji i pasmowości węglików.

Techniką metalurgii proszków można wytwarzać każdą ze stali szybko tnących, jednak szczególnie opłacalna jest produkcja stali zawierających najwięcej drogich pierwiastków stopowych. Produkcja polega na prasowaniu proszków stopowych na zimno lub gorąco. Spiekanie wyprasek wykonuje się w próżni lub w atmosferze ochronnej. Po spiekaniu ostateczny kształt nadaje się narzędziu metodą obróbki skrawaniem. Obróbka cieplna polega, podobnie jak w przypadku stali szybko tnących konwencjonalnych, na hartowaniu i odpuszczaniu.

Spiekane stale szybko tnące przeznaczone są głównie na narzędzia skrawające do obróbki materiałów trudno obrabialnych jak np. stali stopowych, stali o dużej wytrzymałości itp.

11.3.5.2. Węglkostale

Węglkostale są to spiekane materiały narzędziowe, w których udział twardych faz wynosi od 45 do 60% objętości. Fazą twardą węglkostali jest najczęściej węgiel tytanu. Osnową wiążącą fazę twardą mogą być w tych materiałach stale niskostopowe i wysokostopowe np. narzędziowe, szybko tnące, kwasoodporne, typu „maraging”.

Węglkostale są produkowane dwoma sposobami:

- przez spiekanie porowatego szkieletu z proszku węgla tytanu i następnie nasycaniu szkieletu ciekłą osnową,
- klasycznymi metodami metalurgii proszków przez mieszanie proszków TiC i proszków odpowiedniej stali, prasowanie i następnie spiekanie.

Z węglkostali wykonuje się wykrojniki, matryce, stemple, walce i narzędzia pomiarowe. Trwałość narzędzi jest 10÷20 krotnie większa niż narzędzi wykonanych ze stali narzędziowych.

11.3.5.3. Węgliki spiekane

Nazwą węgliki spiekane określa się grupę narzędziowych materiałów spiekanych, w których strukturze od 65 do 95% objętości zajmują węgliki metali (WC, TiC, TaC, NbC, MoC), a resztę metal wiążący, którym jest zwykle kobalt. W wielu krajach są produkowane węgliki spiekane,

w których metalem wiążącym jest nikiel, molibden oraz żelazo lub ich stopy z kobaltem. Produkty z węglików wytwarza się przez prasowanie i spiekanie oraz prasowanie na gorąco. Prasowanie poprzedzone jest długotrwałym mieszaniem na mokro w młynach kulowych proszków węgla i metali, tak aby cząstki węgla pokryły się warstwą metalu. Coraz większego znaczenia nabierają ponadto inne technologie takie jak: spiekanie pod ciśnieniem z ogrzewaniem indukcyjnym, wyciskanie prętów i tulejek z proszków z dodatkami plastyfikatorów.

Własności węglików spiekanych zależą głównie od składu chemicznego i składu fazowego węglików, kształtu i wielkości jego ziarna oraz udziału objętościowego w strukturze. Wykazują one dużą odporność na działanie wysokiej temperatury – do ok. 1000°C nie tracą swej dużej twardości i odporności na ścieranie. Umożliwia to ich stosowanie do skrawania z dużymi szybkościami.

W zależności od przeznaczenia, węgliki spiekane są wytwarzane w postaci różnych kształtek. Powszechnie są używane narzędzia składane, z wielostrzowymi płytkami wymiennymi, nie ostrzonymi w czasie eksploatacji. Węgliki spiekane można pokrywać twardymi warstwami powierzchniowymi. Metodą tą wytwarza się głównie płytki wielostrzowe przeznaczone do jednorazowego użytku. Na płytki z węglików spiekanych o względnie dużej ciągliwości i wytrzymałości na zginanie, nakładana jest warstwa drobnoziarnistych, czystych węglików lub azotków, głównie tytanu lub warstwa ceramiczna o znacznie większej odporności na ścieranie od materiału podłoża.

Należy tutaj także wspomnieć o supertwardych materiałach narzędziowych, do których należy polikrystaliczny syntetyczny diament, a także spiekany azotek boru BN.

11.4. Materiały kompozytowe

Najczęściej za kompozyt uważa się materiał przygotowany sztucznie, złożony co najmniej z dwóch chemicznie odmiennych faz, o ściśle określonych granicach między nimi. Własności takiego materiału są odmienne od własności każdej z faz składowych i są zależne od udziałów objętościowych tych faz.

W oparciu o taką definicję można rozróżnić trzy podstawowe typy materiałów kompozytowych:

- wzmacniane dyspersyjnie,
- wzmacniane cząstkami,
- wzmacniane włóknami.

Ta faza kompozytów, w której umieszczane są cząstki lub włókna zbrojące, jest nazywana osnową i tworzyć ją mogą polimery utwardzalne lub termoplastyczne, metale, a także materiały ceramiczne.

Kompozyty wzmacniane dyspersyjnie charakteryzują się budową złożoną z osnowy metalicznej i fazy wzmacniającej w postaci drobnych cząstek metalicznych lub ceramicznych rozmieszczonych równomiernie w osnowie. Rozmiary cząstek fazy rozproszonej mieszczą się w granicach $0,01 \div 0,1 \mu\text{m}$ a ich udział objętościowy wynosi $1 \div 15\%$.

Zasadniczą zaletą takich kompozytów jest zachowanie dobrych własności wytrzymałościowych do temperatury sięgającej 80% ich temperatury topnienia. Przykładem może być miedź wzmacniana cząstkami Al_2O_3 .

Kompozyty wzmacniane cząstkami, charakteryzują się tym, że obciążenia przenoszone są zarówno przez osnowę jak i przez cząstki. Rozmiar cząstek przekracza $1 \mu\text{m}$ a udział objętościowy zazwyczaj jest większy od 25%. Cząstki rozproszone mogą być całkowicie kruche (np. twarde węgliki w metalach – jak WC w Co). Wielkość wzmocnienia jest złożoną funkcją odległości między cząstkami, ich średnicy, oddziaływań sprężystych między osnową i cząstkami a także zachowania samych cząstek w zakresie odkształcenia sprężystego i plastycznego.

11.4.1. Kompozyty wzmacniane włóknami

Wytwarzanie kompozytów wzmacnianych włóknami umożliwia powiększenie powierzchni kontaktu fazy wzmacniającej z osnową w porównaniu z wyżej omawianymi materiałami wzmacnianymi cząstkami (przy tym samym ich udziale objętościowym). Powiększa to efektywność przenoszenia obciążeń między fazami. Materiały wzmacniające w postaci włókien są ponadto bardziej skuteczne w przenoszeniu obciążeń.

Ze względu na długość włókien można wyróżnić kompozyty z włóknami ciągłymi i włóknami ciętymi (krótkimi). Włókna ciągłe mogą mieć w kompozycie tylko jedną orientację, mogą być prostopadłe do dwóch prostopadłych kierunków lub równoległe do większej liczby kierunków. Włókna cięte mogą mieć natomiast przypadkową orientację w osnowie lub prawie równoległą do jednego kierunku.

Właściwości użytkowe kompozytu, w tym głównie mechaniczne, poważnie uzależnione są od zjawisk zachodzących na styku materiałów osnowy i włókien. Szczególnie w przypadku włókien ciętych bardzo ważne jest to, aby granica między włóknami i osnową była wystarczająco mocna dla przekazywania obciążenia od jednej do drugiej fazy. Jeżeli granice są zbyt słabe, to podczas obciążenia następuje ślizganie się włókien względem osnowy, wobec czego włókna nie przenoszą obciążenia.

11.4.2. Rodzaje materiałów kompozytowych

Kompozyty o osnowie polimerowej są najstarszym i najbardziej rozpowszechnionym rodzajem kompozytów. Włóknami stosowanymi w produkcji tych materiałów są włókna szklane, węglowe, aramidowe, borowe, ceramiczne, stalowe, wolframowe, molibdenowe.

Osnową innych kompozytów mogą być metale, aczkolwiek metody ich otrzymywania są dużo droższe i bardziej skomplikowane. Można spotkać kompozyty, których osnową są aluminium, magnez, miedź, tytan, a ich wzmocnieniem mogą być m. in. włókna grafitowe, tlenku aluminium, węgla krzemu, boru z berylem i wolframem, a także węgiel zbrojony włóknem węglowym.

Istnieją również kompozyty, których osnową są materiały ceramiczne. Własności mechaniczne tych kompozytów zależą od stosowanej metody ich otrzymywania. Metoda otrzymywania kompozytów ma zasadniczy wpływ na sposób powiązania włókien z osnową. Powiązanie włókien z osnową zależy bowiem od własności fizycznych i chemicznych materiałów wyjściowych.

Osnową ceramiczną może być cement, gips, szkło, węgiel krzemu, które można zbroić włóknami ceramicznymi, szklanymi, węglowymi, metalowymi.