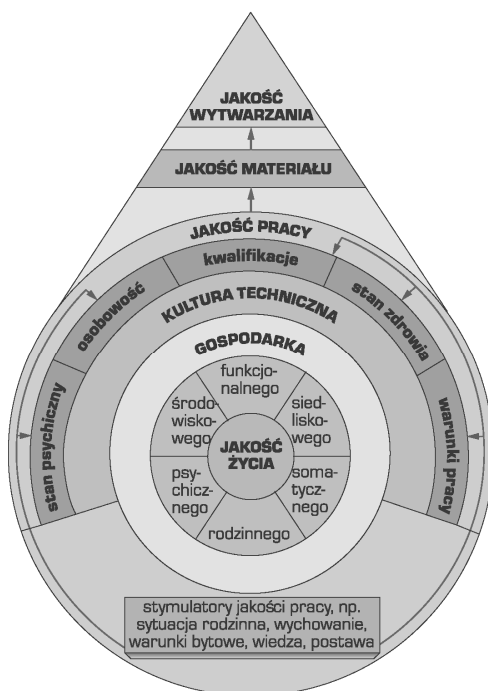


1. Podstawy metalurgii proszków

1.1. Ogólna charakterystyka zasad doboru procesu technologicznego

ZALEŻNOŚĆ JAKOŚCI ŻYCIA I POZIOMU PROCESÓW WYTWARZANIA PRODUKTÓW

O poziomie i jakości życia, wymianie informacji, poziomie edukacji, jakości i możliwościach opieki zdrowotnej oraz innych aspektach środowiska, w którym żyjemy, decydują produkty i inne dobra użytkowe, w które zaopatruje się każdy z nas na rynku, a które są dostarczane przez wytwórców, w którym inżynierowie odgrywają szczególną rolę inspirującą, twórczą i kierowniczą. Projekty inżynierskie są podstawą uruchomianej i wykonywanej produkcji. Jakość wytwarzania ma bowiem ścisły związek z poziomem jakości życia (rys. 1.1) rozumianym jako stopień spełnienia wymagań określających poziom materialnego i duchowego bytu poszczególnych osób i całego społeczeństwa.



Rysunek 1.1. Model zależności przyczynowo-skutkowych w strukturze gospodarczej społeczeństwa (opracowano według pomysłu R. Kolmana)

ROLA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ W PROCESACH WYTWARZANIA PRODUKTÓW

Z punktu widzenia projektowania produktów, równoprawne są wszystkie materiały inżynierskie, które mogą zapewnić wymagane własności produktów, a wielokryterialna optymalizacja jest podstawą selekcji tworzywa o najlepszych własnościach użytkowych i technologicznych oraz o najniższych możliwych kosztach wytwarzania, przetwórstwa i eksploatacji materiału i produktu. Nie można akceptować często dotychczas stosowanego podejścia, związanego z wykorzystywaniem materiałów, tylko dlatego, że właśnie dysponują nimi wytwórcy produktów końcowych. Zagadnienia materiałowe odgrywają zatem ważną rolę w realizacji zadań środowiska inżynierskiego. Materiał jest bowiem tworzywem, z którego wytwarza się produkty interesujące klientów. Stąd najistotniejsze jest projektowanie materiałów, tak by kształtować ich strukturę i własności spełniające wymagania w warunkach pracy.

Nauka o materiałach jest dziedziną nauki, dotyczącą struktury i własności materiałów (tworzyw), zwłaszcza z uwzględnieniem możliwości ich zastosowania. Z kolei inżynieria materiałowa jest dziedziną inżynierii, obejmującą zastosowanie nauki o materiałach dla bezpośrednio użytecznych celów związanych z projektowaniem, wytwarzaniem i użytkowaniem różnych produktów i dóbr powszechnego użytku. Nauka o materiałach i inżynieria materiałowa, oprócz nauk informatycznych oraz awangardowych nauk biologicznych i medycznych, należą do najintensywniej rozwijających się obszarów nauki, decydujących obecnie o postępie cywilizacyjnym ludzkości. Paradygmat inżynierii materiałowej dotyczy doboru materiału inżynierskiego, który w odpowiednio dobranym procesie technologicznym kształtowania postaci geometrycznej produktu oraz struktury i własności materiału inżynierskiego zapewni odpowiednie, wymagane i z góry założone własności użytkowe produktu. Problematyka nauki o materiałach i inżynierii materiałowej jest zatem złożona i obejmuje następujące zagadnienia ogólne:

- strukturę atomową i cząsteczkową materiałów,
- zależność struktury i własności materiałów,
- kształtowanie struktury i własności materiałów,
- technologie procesów materiałowych,
- badanie struktury i własności materiałów,

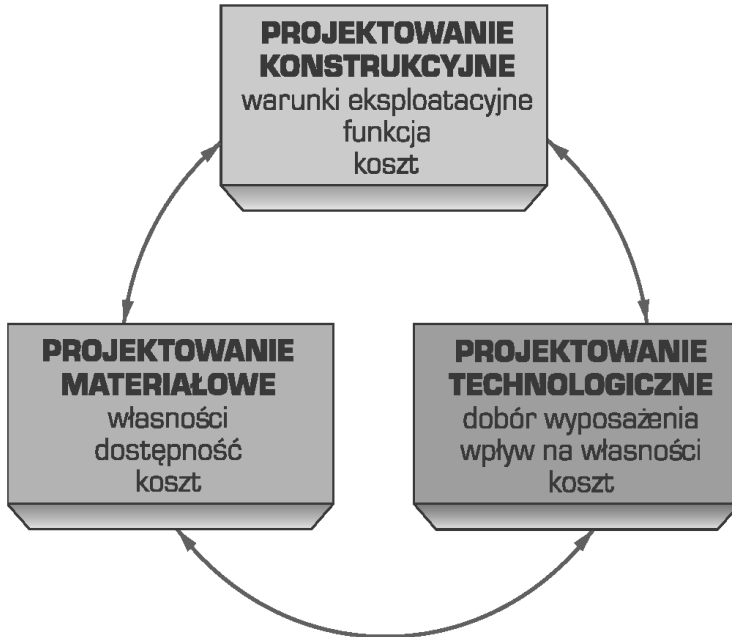
- badanie własności produktów wytworzonych z materiałów w warunkach eksploatacji,
- predykcję własności materiałów, w tym również w warunkach eksploatacji.

Książka niniejsza dotyczy szczegółowych zagadnień, dotyczących technologii procesów materiałowych, jako ważnego elementu procesu przetwarzania surowców materiałowych w produkty, zwanego wytwarzaniem. Wytwarzanie polega na wykonywaniu produktów z surowców materiałowych w różnych procesach, przy użyciu różnych maszyn i w operacjach zorganizowanych zgodnie z dobrze opracowanym planem. Proces wytwarzania polega zatem na właściwym wykorzystaniu zasobów: materiałów, energii, kapitału i ludzi. Współcześnie wytwarzanie jest kompleksowym działaniem, łączącym ludzi, którzy wykonują różne zawody i zajęcia, przy użyciu różnych maszyn, wyposażenia i narzędzi, w różnym stopniu zautomatyzowanym, włączając komputery i roboty. Celem wytwarzania jest każdorazowo zaspokajanie potrzeb rynkowych klientów, zgodnie z opracowaną strategią przedsiębiorstwa lub organizacji zajmującej się wytwarzaniem, wykorzystującej dostępne możliwości i urządzenia.

PROJEKTOWANIE INŻYNIERSKIE Z UWZGLĘDNIENIEM PROCESÓW WYTWARZANIA PRODUKTÓW

Projektowanie produktów po fazie wzornictwa przemysłowego, związanego z ogólnym opisem funkcji produktu oraz opracowaniem ogólnej jego koncepcji, obejmującej jedynie formę zewnętrzną, kolor i ewentualnie ogólne założenia co do połączenia głównych elementów, obejmuje projektowanie inżynierskie i kolejno przygotowanie produkcji. Projektowanie inżynierskie, w którym można wyróżnić projektowanie systemu wytwarzania oraz projektowanie produktów nie jest wyizolowanym działaniem, gdyż wpływa na wszystkie pozostałe fazy wprowadzania na rynek danego produktu, od których równocześnie jest zależne projektowanie produktu, łączy w sobie trzy równie ważne i nierozdzielne elementy (rys. 1.2):

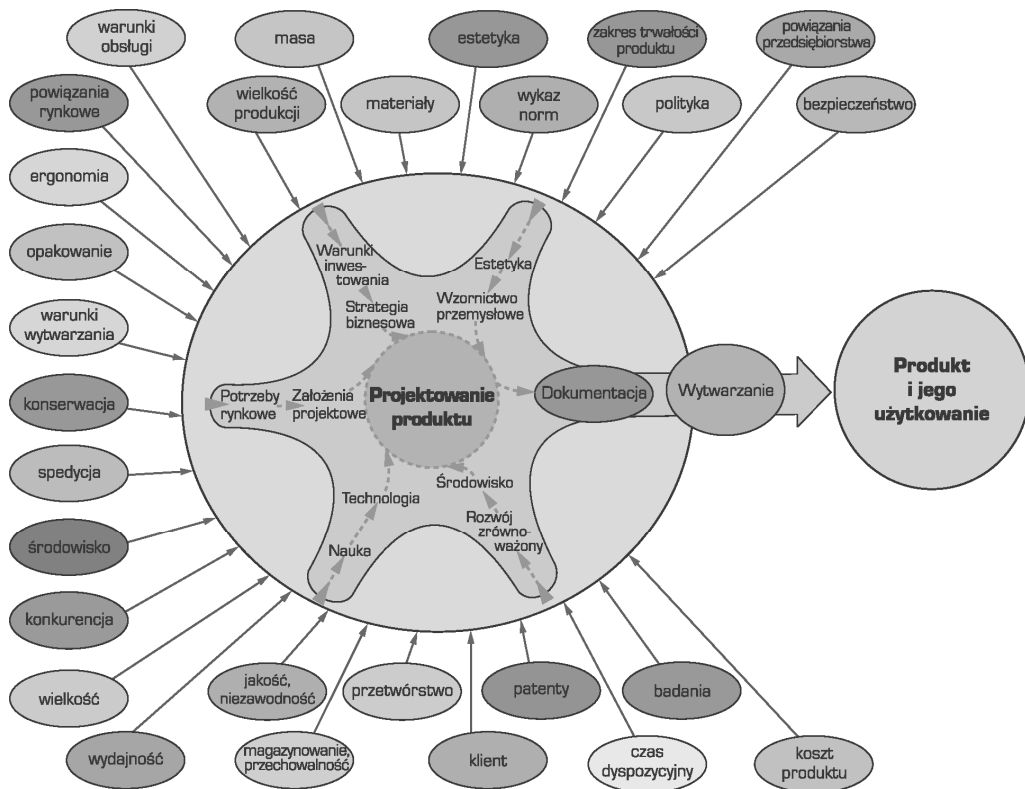
- projektowanie konstrukcyjne, którego celem jest opracowywanie kształtu i cech geometrycznych produktów zaspokajających ludzkie potrzeby,
- projektowanie materiałowe, w celu zagwarantowania wymaganej trwałości produktu lub jego elementów wytworzonych z materiałów inżynierskich o wymaganych własnościach fizykochemicznych i technologicznych,
- projektowanie technologiczne procesu, umożliwiającego nadanie wymaganych cech geometrycznych i własności poszczególnym elementom produktu, a także ich prawidłowe



Rysunek 1.2. Schemat współzależności między elementami projektowania inżynierskiego produktu, tj. projektowaniem konstrukcyjnym, projektowaniem materiałowym oraz projektowaniem technologicznym (opracowano według rysunku G.E. Dietera)

współdziałanie po zmontowaniu, przy uwzględnieniu wielkości produkcji, poziomu automatyzacji i komputerowego wspomaganie, jak również przy zapewnieniu najmniejszych możliwych kosztów tego produktu.

Projektowanie inżynierskie jest złożonym działaniem wymagającym uwzględnienia wielu różnorodnych elementów (rys. 1.3), a wzajemne relacje między koniecznymi do uwzględnienia zadaniami przedstawiono schematycznie na rysunku 1.4. Pierwsze stadium projektowania inżynierskiego polega na opracowaniu koncepcji, połączonym z ogólnym wyspecyfikowaniem dostępnych materiałów i procesów technologicznych. W kolejnym stadium ogólnego projektowania inżynierskiego określa się kształt i przybliżoną wielkość elementów, stosując inżynierskie metody analizy. W tym stadium projektant ogólnie typuje klasę stosowanych materiałów oraz rodzaj procesu technologicznego, dobierając np. obróbkę plastyczną, odlewanie lub metody metalurgii proszków do wytwarzania elementu ze stopów metali nieżelaznych. Własności materiału należy przy tym określić bardziej precyzyjnie.



Rysunek 1.3. Czynniki uwzględniane podczas projektowania inżynierskiego produktów (opracowano według informacji C. Neweya i G. Weavera oraz pomysłu M.F. Ashby'ego i K. Johnson)

W stadium szczegółowego projektowania inżynierskiego ostatecznie dobiera się zarówno materiał, jak i proces technologiczny. Dokonuje się wówczas doboru jednego, odpowiedniego materiału oraz najwyżej kilku wariantów procesu technologicznego. Projektowanie technologiczne, dotyczące sposobu przetwarzania materiałów inżynierskich w celu wytworzenia produktu, jak również projektowanie materiałowe, dotyczące właściwego doboru materiałów inżynierskich zapewniających wymagane własności użytkowe produktów, oprócz projektowania konstrukcyjnego, dotyczącego doboru kształtu i postaci geometrycznej produktów lub ich elementów, jako jeden z trzech nierozłącznych elementów projektowania inżynierskiego jest zatem zadaniem złożonym i trudnym. Trudno zatem sobie wyobrazić, że może być wykonywane w sposób przypadkowy i bez odpowiednio przyjętej metodyki. W takim przypadku nie

może być mowa o doborze, spośród nieskończonej liczby możliwych rozwiązań tego, które jest optymalne, a co najmniej odpowiednie ze względu na zbiór wymienionych i obowiązujących kryteriów. Każdy, kto uczestniczy w procesie przygotowania produktu do obecności na rynku, musi mieć zatem świadomość mnogości możliwych rozwiązań, a specjaliści winni szczegółowo znać metodologię postępowania, związaną z selekcją i dokładną charakterystykę bardzo wielu materiałów inżynierskich obecnie dostępnych, jak również tendencje umożliwiające w razie potrzeby indywidualne zaprojektowanie materiału, o zestawie własności najbardziej odpowiadającym rzeczywistym wymaganiom i nierozłącznie związanych z tym procesów technologicznych. Niejednokrotnie zdarza się, że decyzja o prawidłowym doborze materiału inżynierskiego wymusza zmianę technologii, a nawet postaci konstrukcyjnej produktu lub jego elementu. Nierzadko bywa również odwrotnie.

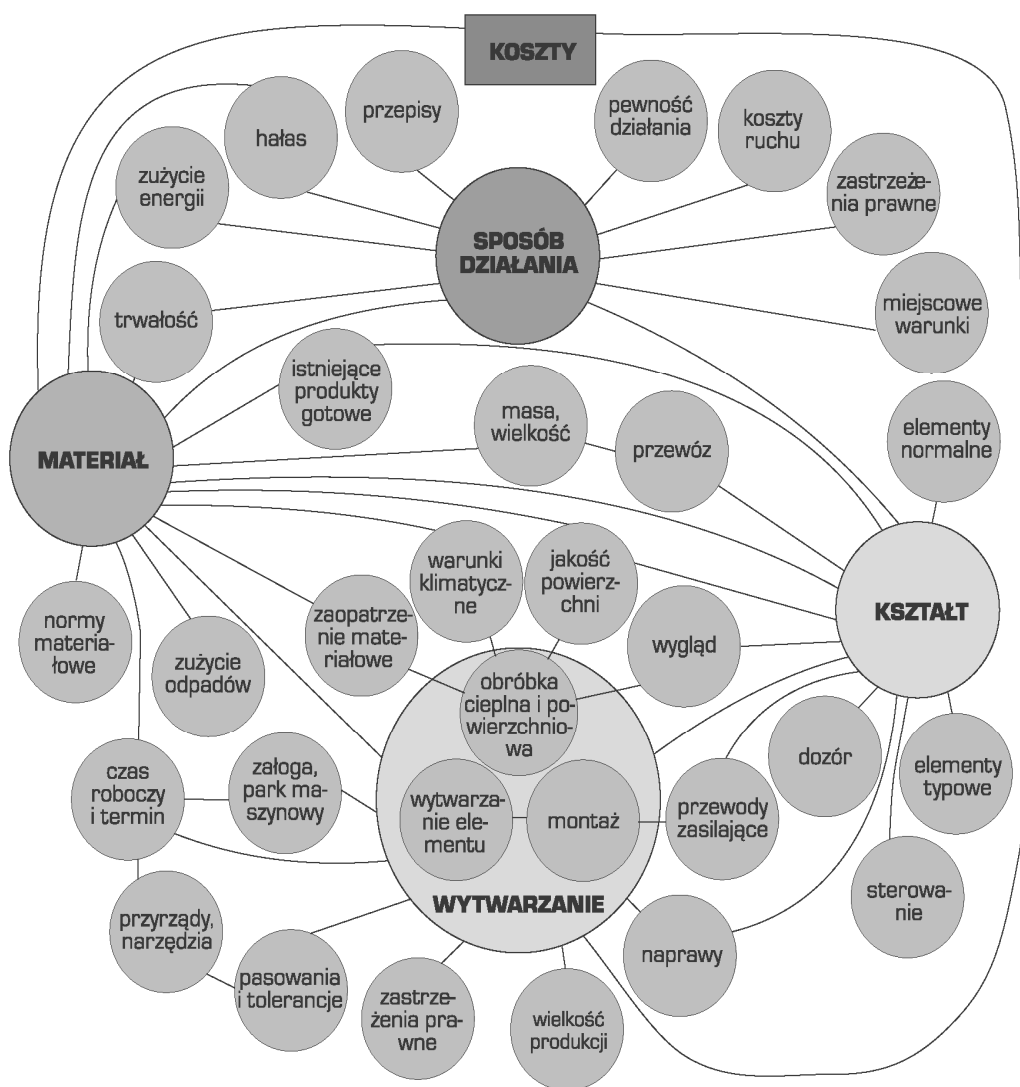
Wytypowany proces technologiczny oraz możliwości wykorzystania niektórych technologii wpływają na proces projektowania inżynierskiego, decydując o doborze materiału, jak również o sekwencji operacji technologicznych, a także o wymiarach, tolerancjach wymiarowych, połączeniach elementów i innych aspektach. Proces projektowania wymaga zatem uwzględnienia wielu czynników związanych z procesem technologicznym poprzez projektowanie ze względu na lub alternatywnie za względu na:

- wytwarzanie i montaż,
- odlewanie,
- obróbkę plastyczną,
- metalurgię proszków,
- obróbkę ubytkową,
- łączenie,
- obróbkę cieplną i powierzchniową,
- procesy stosowane dla materiałów ceramicznych,
- procesy stosowane dla materiałów polimerowych,
- wytwarzanie materiałów kompozytowych.

Ze względu na technologiczność produktu, w procesie projektowania powinno się uwzględniać także kolejne aspekty:

- ograniczenie ogólnej liczby elementów produktu,
- unifikację i standaryzację elementów,

- stosowanie materiałów łatwo obrabialnych,
- dostosowanie projektu do procesów wytwarzania,
- projektowanie każdego elementu, tak by był łatwy do wykonania,
- ograniczanie liczby operacji obróbki ubytkowej i wykończającej.



Rysunek 1.4. Układ zadań uwzględnianych podczas projektowania inżynierskiego i ich wzajemne powiązanie (opracowano według M. Skarbińskiego)

1.2. Metody metalurgii proszków

DEFINICJA METALURGII PROSZKÓW

Dotychczasowe rozważania, dotyczące znaczenia technologii procesów materiałowych w procesach wytwarzania produktów wskazują na ważną rolę i możliwości kształtowania zarówno postaci produktów, jak i własności materiałów inżynierskich przez wykorzystanie metalurgii proszków. Jest ona dziedziną techniki, obejmującą metody wytwarzania proszków metali i materiałów metalowych lub ich mieszanin z proszkami niemetalowymi oraz otrzymywania półproduktów i produktów z tych proszków bez konieczności roztopienia głównego składnika. Z powodzeniem może ona konkurować np. z odlewaniem, obróbką plastyczną i obróbką skrawaniem, uzupełniając lub zastępując te technologie. Elementy z niektórych materiałów, np. metali trudno topliwych i węglików spiekanych, mogą być wytworzone jedynie metodami metalurgii proszków. Technologie metalurgii proszków i materiałów ceramicznych w wielu przypadkach wykazują podobieństwa, wobec czego w niektórych rozdziałach łącznie omawiane są wybrane materiały spiekane i materiały ceramiczne.

Do zalet metalurgii proszków można zaliczyć ograniczenie zużycia materiałów, brak możliwości wytwarzania niektórych z nich innymi metodami i stosowanie niższej temperatury niż w metalurgii konwencjonalnej. Wady metody metalurgii proszków są związane z uzyskiwaniem materiałów o dużej porowatości, a co za tym idzie – o małej wytrzymałości, oraz z trudnościami w uzyskiwaniu produktów o złożonym kształcie ze względu na nierównomierny rozkład ciśnienia w objętości proszku podczas prasowania. Porowatość produktów można wykorzystać, np. w filtrach i łożyskach porowatych (samosmarujących).

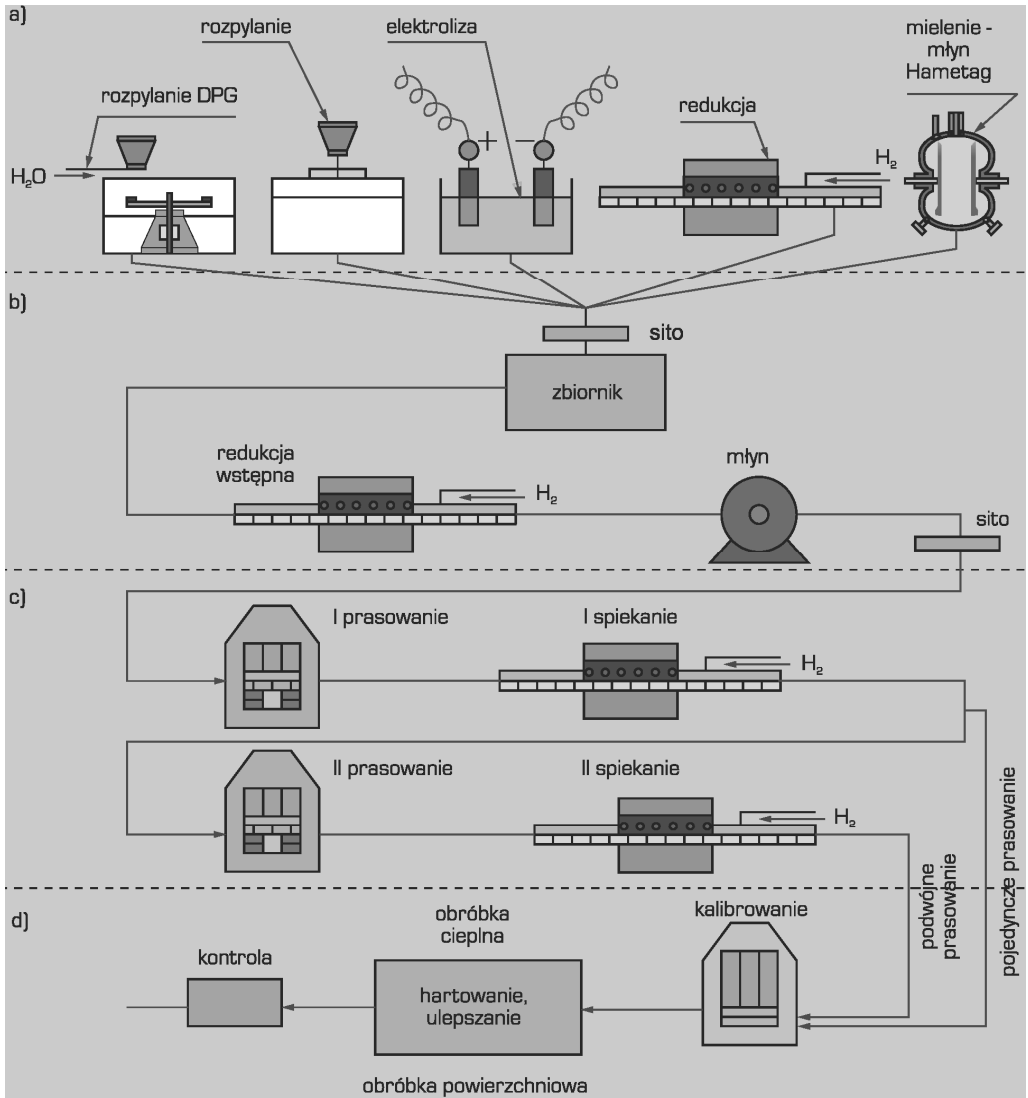
PROCES TECHNOLOGICZNY PRODUKTÓW METODĄ METALURGII PROSZKÓW

Najogólniej w procesie technologicznym produktów metodą metalurgii proszków można wyszczególnić następujące operacje:

- wytworzenie proszku metalu lub mieszaniny proszków różnych materiałów,
- przygotowanie proszku,
- formowanie proszku na zimno,

- spiekanie,
- obróbkę wykończającą.

Przykładowy proces technologiczny produktów z proszków żelaza podano schematycznie na rysunku 1.5.



Rysunek 1.5. Uproszczony schemat produkcji masowej produktów z proszków żelaza i stali (według W. Rutkowskiego); a) wytwarzanie proszków, b) przygotowanie proszków, c) formowanie wstępne i spiekanie, d) obróbka wykończająca

W praktyce przemysłowej lub badawczej często występują odstępstwa od typowego procesu technologicznego. Przykładowo – formowanie wstępne i spiekanie często mogą być połączone w jedną operację.

Niekiedy otrzymany spiek o dużej porowatości jest następnie nasycany roztopionym metalem o temperaturze topnienia niższej niż głównego składnika. Mogą występować również inne odstępstwa od podanego typowego procesu technologicznego, lecz charakterystyczne jest zawsze otrzymywanie wyjściowego materiału w postaci proszku i jego spiekanie w temperaturze niższej od temperatury topnienia głównego składnika.

KLASYFIKACJA METOD WYTWARZANIA PROSZKÓW

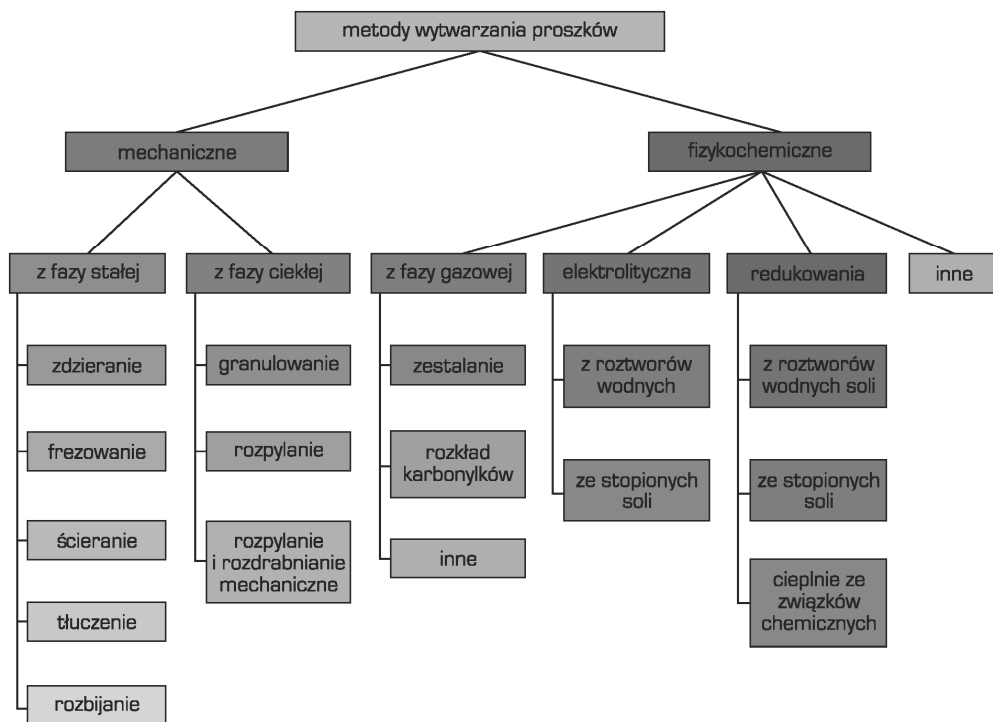
Proszki są wytwarzane w wyniku mechanicznego lub fizykochemicznego rozdrabniania wyjściowego materiału litego albo reakcji chemicznych lub fizykochemicznych – z innych materiałów lub związków chemicznych. Metody wytwarzania proszków podano na rysunku 1.6.

METODY MECHANICZNE WYTWARZANIA PROSZKÓW

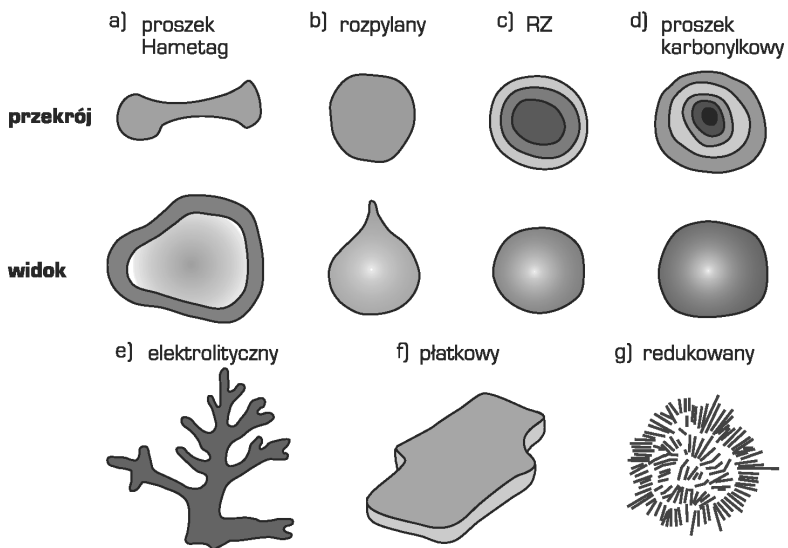
Metodami mechanicznymi przez rozdrabnianie w młynach kulowych, wibracyjnych lub wirowo-udarowych uzyskuje się proszki w kształcie talerzykowatym (proszek Hametag na rysunku 1.7a), wielościennym lub odłamkowym.

Metody mechaniczne należą do mało wydajnych i mogą być stosowane w zasadzie do rozdrabniania metali i niemetali kruchych. Proszki rozdrobnione w młynach kulowych lub wibracyjnych zwykle są zanieczyszczone materiałem okładzin młyna i kul, co wymaga następnego ich oczyszczania chemicznego.

Najczęściej stosowanym urządzeniem do mechanicznego rozdrabniania proszków jest młyn wirowo-udarowy typu Hametag. W bębnie młyna dwa stalowe śmigła obracające się w przeciwnych kierunkach z dużą prędkością powodują powstawanie wirów powietrza, które porywają cząstki wsadu metalowego w postaci pociętego drutu, wiórów i innych odpadków. Rozdrobnienie cząstek następuje w wyniku uderzania ich o śmigła i ściany bębna oraz o siebie. Gaz wdmuchiwany do bębna przez wentylator unosi proszek, kierując go przez segregator do osadnika. Proszek jest odbierany okresowo do hermetycznych zasobników.



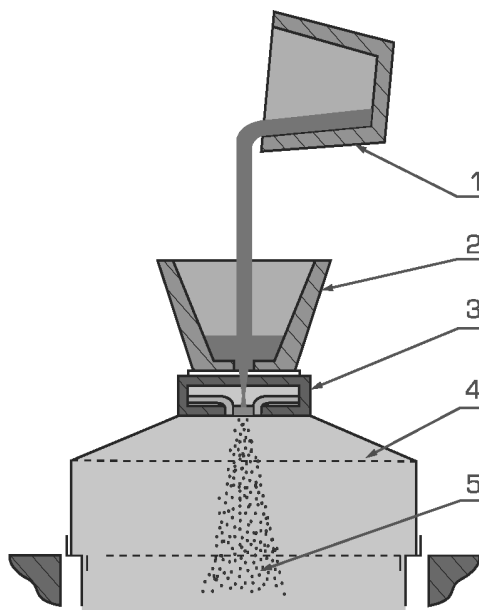
Rysunek 1.6. Ogólna klasyfikacja metod wytwarzania proszków



Rysunek 1.7. Przykłady kształtów proszków metali otrzymanych różnymi metodami (według W. Rutkowskiego)

WYTWARZANIE PROSZKÓW METODĄ ROZPYLANIA

Rozpylanie polega na rozbijaniu strumienia ciekłego metalu (rys. 1.8) na drobne kropelki przez środek rozpylający działający pod znacznym ciśnieniem. Środkiem tym jest zwykle woda, para wodna, powietrze lub gazy obojętne. Kropelki cieczy zastygają (rys. 1.7b) przed



Rysunek 1.8. Schemat urządzenia do rozpylania metali; 1 – kadź, 2 – tygiel, 3 – dysza, 4 – komora rozpylania, 5 – proszek

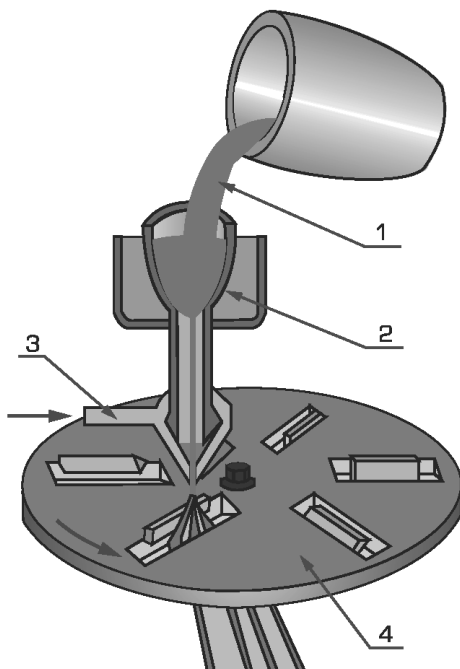
opadnięciem na dno zbiornika. Dodatkowo, w metodzie znanej jako DPG poza rozpylaniem stosuje się również mechaniczne rozbijanie strumienia ciekłego metalu za pomocą łopatek – klinów, zamocowanych na wirującej tarczy (rys. 1.9). W metodzie określanej jako RZ (rys. 1.7c) proces rozpylania jest połączony z występującymi w jego trakcie lub stosowanymi później reakcjami chemicznymi utleniania, wypalania węgla lub redukcji.

METODY FIZYKOCHEMICZNE OTRZYMYWANIA PROSZKÓW

Bardzo czyste chemicznie proszki metali, głównie żelaza, o charakterystycznej strukturze warstwowej i o kształcie kulistym (rys. 1.7d) otrzymuje się metodą karbonylkową. Polega ona na wstępnym wytworzeniu karbonylków, np. $\text{Fe}(\text{CO})_5$, w wyniku działania tlenku węgla na rudę lub złom metalu w reaktorach wysokociśnieniowych. Karbonylki metali, które są

cieczami, ogrzewane następnie powyżej temperatury wrzenia rozkładają się na czysty metal, osadzający się w chłodzonych zbiornikach, oraz tlenek węgla, służący do wytwarzania następnych porcji karbonylków.

Proszki metali trudno topliwych mogą być uzyskane przez redukcję (rys. 1.7g) ich tlenków lub soli, najczęściej w piecach przepychowych w przeciwnym kierunku gazu redukcyjnego, np. wodoru, lub w piecach zawieszinowych.



Rysunek 1.9. Schemat urządzenia do otrzymywania proszków metali przez rozpylanie metodą DPG; 1 – ciekły metal, 2 – lejek z dyszą, 3 – woda, 4 – wirująca tarcza z lopatkami-klinami

Metoda elektrolityczna polega na wydzielaniu metalu na katodzie, najczęściej w postaci gąbki, którą po wysuszeniu rozdrabnia się na proszek (rys. 1.7e).

Proszki metali o niskiej temperaturze wrzenia, np. Zn, mogą być wytwarzane metodą odparowywania metalu i następnie kondensacji jego par w zbiorniku, zwanym kondensatorem.

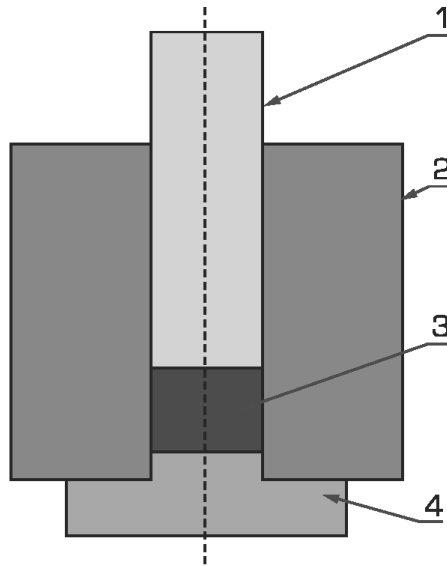
PRZYGOTOWANIE PROSZKU

Przygotowanie proszku ma na celu uzyskanie odpowiedniego wsadu do dalszych operacji technologicznych. Procesy przygotowania wsadu obejmują sortowanie proszku na różne frakcje

ziarnowe, mieszanie w odpowiednich proporcjach, dodawanie środków poślizgowych i porotwórczych, a także granulację proszków.

METODY FORMOWANIA PROSZKÓW NA ZIMNO

Formowanie na zimno polega na poddawaniu proszku ścisnaniu w zamkniętej przestrzeni, w wyniku czego następuje jego zagęszczenie. W zależności od kształtu formy oraz własności



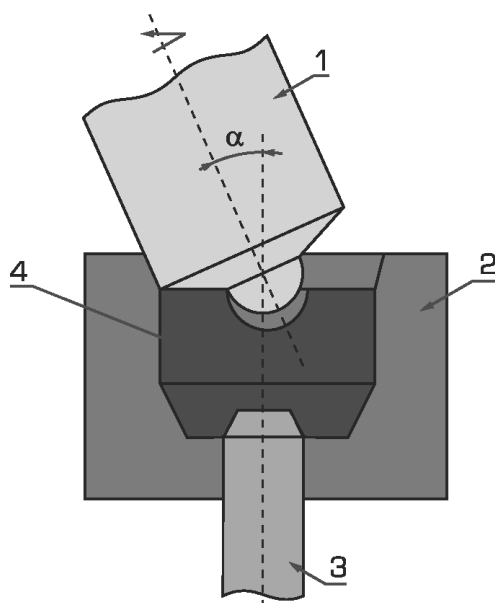
Rysunek 1.10. Schemat prasowania jednostronnego proszków; 1 – stempel górny, 2 – matryca, 3 – proszek, 4 – stempel dolny

proszku, w szczególności zaś od jego plastyczności, zagęszczalności i formowalności, dobiera się odpowiednią metodę formowania na zimno, a mianowicie:

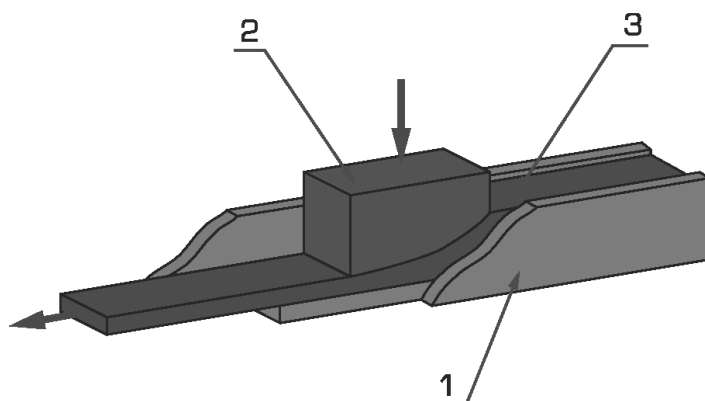
- prasowanie na zimno w różnego rodzaju prasach w zamkniętych matrycach (rys. 1.10),
- prasowanie izostatyczne w komorach wysokociśnieniowych,
- wibracyjne zagęszczanie proszków,
- prasowanie obwiedniowe (rys. 1.11),
- prasowanie kroczące (rys. 1.12),
- walcowanie proszków (rys. 1.13),
- wyciskanie proszków na zimno (rys. 1.14),

- formowanie udarowe,
- kucie na zimno,
- odlewanie i napyłanie gęstwy, tj. silnie zagęszczonej zawiesiny proszku materiału podstawowego w cieczy z dodatkami środków zapobiegających aglomeracji ziarn (rys. 1.15).

W wyniku formowania uzyskuje się formówki, np. wypraski, odkuwki, walcówki.



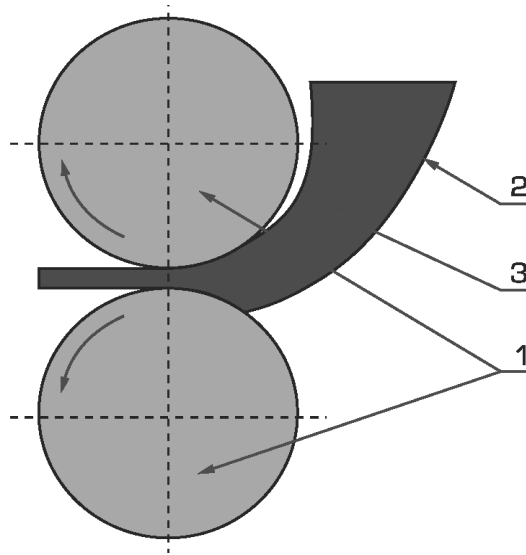
Rysunek 1.11. Schemat prasowania obwiedniowego proszków; 1 – obracający się stempel, 2 – matryca, 3 – wypychacz, 4 – proszek



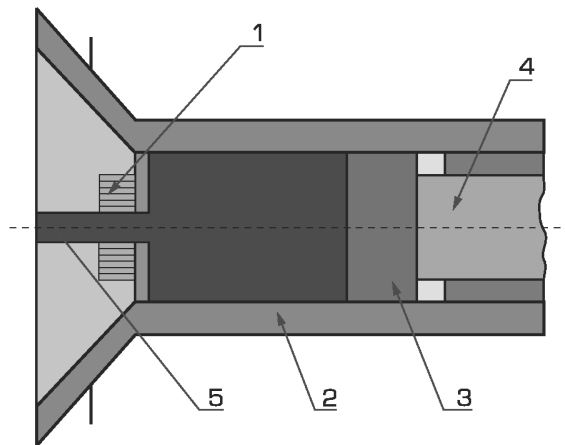
Rysunek 1.12. Schemat urządzenia do prasowania krocącego proszków (według W. Rutkowskiego); 1 – podłużna matryca, 2 – przesuwający się tłok metalowy, 3 – proszek

ISTOTA SPIEKANIA

Spiekaniem proszków jest nazywana operacja technologiczna (której poddaje się formówkę lub luźno zasypane ziarna proszku), polegająca na złączeniu pod wpływem ogrzewania poszczególnych ziarn proszku w kompozyt o określonych własnościach mechanicznych



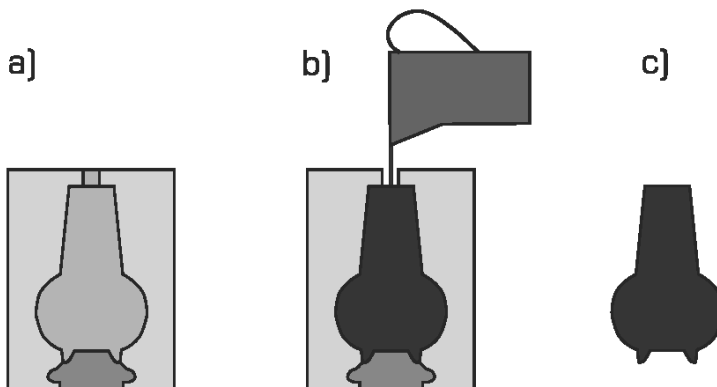
Rysunek 1.13. Schemat walcowania proszków; 1 – walce, 2 – leż zasypowy, 3 – proszek



Rysunek 1.14. Schemat wyciskania proszków bez osłony; 1 – matryca, 2 – rura stalowa, 3 – popychacz proszku, 4 – stempel, 5 – uformowany proszek

i fizykochemicznych. W wyniku spiekania otrzymuje się spieki metali lub spieki ceramiczno-metalowe, zwane cermetami. Spiekanie może przebiegać jako:

- swobodne,
- pod działaniem siły, tj. połączone z formowaniem zapewniającym określony kształt, np. w wyniku prasowania proszków na gorąco, walcowania na gorąco lub kucia na gorąco.



Rysunek 1.15. Zasada odlewania gęstwy a) forma, b) zalewanie gęstwy, c) uzyskana kształtka

SPIEKANIE Z FAZĄ STAŁĄ

Spiekanie jest wykonywane zwykle poniżej temperatury topnienia głównego składnika. Może przebiegać w fazie stałej, gdy w czasie tej operacji nie występuje faza ciekła. W pierwszym etapie spiekania w fazie stałej ziarna proszku łączą się w wyniku adhezji, wywołanej głównie formowaniem. Po nagrzaniu na powierzchni ziarn następuje dyfuzja atomów, w miarę upływu czasu przebiegająca w całej objętości proszku. W wyniku tych zjawisk następuje trwałe zespolenie ziarn oraz zmniejszenie porowatości spieku.

SPIEKANIE POŁĄCZONE Z FORMOWANIEM

W przypadku gdy spiekanie jest połączone z formowaniem, zewnętrzne siły powodują dodatkowe odkształcenie plastyczne ziarn proszków metali, któremu – ze względu na wysoką temperaturę – towarzyszą zwykle procesy zdrowienia i rekrytalizacji – statyczne lub dynamiczne.

SPIEKANIE Z FAZĄ CIEKŁĄ

W czasie tzw. spiekania z fazą ciekłą przejściowo lub stale może występować faza ciekła, mimo że temperatura jest niższa od temperatury topnienia głównego składnika. Spiekanie z fazą ciekłą jest zazwyczaj właściwe dla proszków wieloskładnikowych, a roztopieniu ulegają niskotopliwe eutektyki utworzone przez poszczególne składniki. W pierwszym etapie spiekania z fazą ciekłą tworzy się ciecz zapełniająca pory między ziarnami proszku, ułatwiająca przegrupowywanie się i zwarte ułożenie ziarn. Z kolei następuje rozpuszczanie się w cieczy niektórych drobnych ziarn oraz wydzielanie z cieczy kryształów na dużych ziarnach. W końcu cząstki stałe zrastają się i spiekają.

Spieki otrzymane w wyniku spiekania z fazą ciekłą charakteryzują się strukturą składającą się z równomiernie rozłożonych ziarn fazy stałej w zakrzepłej cieczy.

WŁASNOŚCI SPIEKÓW

W wyniku spiekania uzyskuje się materiał zwarty, jednak zwykle w pewnym stopniu porowaty, o strukturze jedno- lub wielofazowej. Zarówno spiekanie z fazą stałą, jak i ciekłą może prowadzić do uzyskania struktury jednorodnej lub niejednorodnej.

Spieki cechują się:

- zespoleniem poszczególnych ziarn proszku,
- utworzeniem nowych granic ziarn,
- własnościami różnymi od własności formówek,
- zazwyczaj objętością mniejszą od formówek,
- większą gęstością od formówek.

Niekiedy spiekanie może jednak powodować zwiększenie objętości. Zmianę objętości powodowaną spiekaniem należy brać pod uwagę podczas projektowania przez uwzględnienie odpowiednich naddatków formówek.

OPERACJE OBRÓBKI WYKOŃCZAJĄCEJ SPIEKÓW

Obróbka wykończająca spieków obejmuje:

- obróbkę cieplną,

- kalibrowanie,
- nasycanie spieków metalami,
- obróbkę plastyczną,
- obróbkę skrawaniem.

OBRÓBKA CIEPLNA SPIEKÓW

W celu polepszenia własności mechanicznych oraz fizycznych spieki metali mogą być poddawane obróbce cieplnej zwykłej, która – w zależności od składu chemicznego spieku – polega na hartowaniu i odpuszczaniu, przesycaniu i starzeniu, a także obróbce cieplno-chemicznej, głównie nawęglaniu lub azotowaniu. Ze względu na mniejsze przewodnictwo cieplne, szybkości nagrzewania i chłodzenia spieków są mniejsze niż materiałów konwencjonalnych, a czas ich wygrzewania jest dłuższy.

KALIBROWANIE

W celu uzyskania wysokiej dokładności wymiarowej gotowe produkty poddaje się kalibrowaniu przy naciskach znacznie mniejszych niż podczas operacji formowania na zimno.

NASYCANE SPIEKÓW METALAMI

Spieki o znacznej porowatości mogą być nasycane metalami o temperaturze topnienia niższej niż gotowego spieku. Może się to odbywać przez zanurzenie spiekanego i porowatego szkieletu w roztopionym metalu nasycającym lub wygrzewanie szkieletu z proszkiem metalu nasycającego w piecu z atmosferą regulowaną. Stosowane są zróżnicowane metody infiltracji ciekłego metalu do porowatej kształtki produktu, m.in. próżniowa, nisko- lub wysokociśnieniowa, zapewniające dokładne wypełnienie porów kształtki metalową osnową.

OBRÓBKA PLASTYCZNA I OBRÓBKA SKRAWANIEM

W celu nadania wymaganych cech geometrycznych oraz własności, półprodukty ze spiekanych metali w kształcie bloków poddaje się obróbce plastycznej, np. kuciu lub walcowaniu.

Obróbka skrawaniem, np. szlifowanie, umożliwia ostateczne nadanie kształtu i uzyskanie wymaganej gładkości powierzchni.

1.3. Ogólna charakterystyka selektywnego spiekania laserowego

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METOD WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO

Do nowoczesnych metod metalurgii proszków można zaliczyć metody przyrostowego wytwarzania, m.in. szybkiego wytwarzania narzędzi, znane jako RT (j. ang.: *Rapid Tooling*), stosowane do otrzymywania stalowych form do formowania wtryskowego lub do odlewania pod ciśnieniem, tłoczników metalowych, a także elementów maszyn. Metody te są wykorzystywane również do otrzymywania metalowych prototypów oraz produktów finalnych w wyniku laserowego spiekania proszków metalicznych, w tym także do zastosowań w medycynie, implantologii np. na sztuczną żuchwę z tytanu i ceramiki, a także przy wytwarzaniu wysoko wyspecjalizowanych narzędzi medycznych. Wymaga to zapewnienia oczekiwanej biokompatybilności materiału zastosowanego proszku oraz możliwości sterylizacji gotowego produktu.

Metody przyrostowego wytwarzania służą do spiekania szerokiej gamy proszków metalicznych, w tym m.in. stopów metali lekkich, stopów tytanu, stali, stopów i nadstopów kobaltu i chromu, a także materiałów polimerowych (np. poliamidu) lub ceramiki i materiałów kompozytowych. Zastosowanie tej innowacyjnej technologii powoduje, że jakość produktów z materiałów polimerowych nie odbiega od wykonanych konwencjonalnie przez wtryskiwanie. Technologia ta umożliwia produkcję elementów pojedynczych lub w niewielkich seriach, zgodnie z indywidualnym zapotrzebowaniem rynkowym, zapewniając uzyskanie wgłębień, podcięć i kanałów wewnętrznych, trudnych lub wręcz niemożliwych do wytworzenia konwencjonalnie.

Odpowiednie technologie przyrostowego wytwarzania znane są jako selektywne spiekanie laserowe SLS (j. ang.: *Selective Laser Sintering*) lub bezpośrednie spiekanie laserowe metali DMLS (j. ang.: *Direct Metal Laser Sintering*). Technologie te polegają na scalaniu warstw proszku przy użyciu wiązki promieniowania laserowego z zakresu podczerwieni, którego źródłem jest laser CO₂ lub Nd:YAG. Możliwe jest również zastosowanie podwójnego systemu laserów. Nie jest przy tym konieczne stosowanie dodatkowych elementów podtrzymujących,

gdyż materiał który nie został poddany spiekaniu stanowi podparcie wystających części i pochylonych lub zamykających powierzchni wytwarzanego elementu. Proces jest sterowany komputerowo, po zaprojektowaniu i zamodelowaniu wytwarzanego produktu z wykorzystaniem odpowiedniego programu CAD (j. ang.: *Computer Aided Design*).

W celu zrealizowania pełnego cyklu wytworzenia jakiegokolwiek elementu jedną z wymienionych technologii należy automatycznie rozprowadzać kolejne cienkie warstwy proszku lub mieszaniny proszków na powierzchni płyty roboczej o odpowiedniej chropowatości i temperaturze, umieszczonej na stole roboczym o automatycznie regulowanym położeniu, a następnie na powierzchni poprzednio zestalonych warstw. Za pomocą zgarniacza wyrównywana jest każdorazowo warstwa proszku.

Sterowana komputerowo wiązka laserowa jest prowadzona po powierzchni proszku wykorzystując program CAD, w kolejnych warstwach (odpowiadających poprzecznemu przekrojowi wirtualnego przestrzennego modelu przedmiotu zapisanego przy użyciu zapisu cyfrowego CAD 3D), powodujących spiekanie cząstek proszku w ściśle określony sposób i w selektywnie wybranych miejscach na powierzchni proszku. Stół z kolejną warstwą proszku obniża się o zadaną wysokość, wynikającą z automatycznego podziału wirtualnego przestrzennego modelu przedmiotu na warstwy o zadanej grubości i cykl rozprowadzania proszku oraz spiekania laserowego powtarza się, aż do uzyskania kompletnie zestalonego przedmiotu, który może być oddany do użytku po ostudzeniu i oczyszczeniu z nadmiaru proszku. System zapewnia monitorowanie temperatury wytwarzanego przedmiotu i warunki spiekania laserowego przedmiotu o własnościach mechanicznych powtarzalnych w całej objętości. Możliwe jest też przetapianie proszku wiązką laserową i wtedy następuje przejście materiału od stanu stałego w postaci proszku poprzez stan ciekły do stanu stałego w postaci wytworzonego przedmiotu.

1.4. Ogólna charakterystyka materiałów oraz produktów spiekanych z proszków

PRODUKTY SPIEKANE ZE STALI WĘGLOWYCH I STOPOWYCH

Metody metalurgii proszków znalazły zastosowanie w masowej produkcji licznych elementów wytwarzanych z żelaza, stali węglowych i stali stopowych. Umożliwiają bowiem

znaczne zmniejszenie pracochłonności, odciążenie obrabiarek, oszczędności surowcowe i zmniejszenie ilości odpadów. Spiekane elementy maszyn są stosowane w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym. W postaci produktów z proszków spiekanych są wytwarzane koła zębate, rolki, podkładki, nakrętki, zapadki, elementy amortyzatorów, gniazda zaworów, łożyska, okucia budowlane, elementy uzbrojenia, maszyn biurowych i maszyn do szycia.

Produkty spiekane ze stali niskowęglowej cechują się wytrzymałością na rozciąganie ok. 220 MPa, twardością 50 HBW i wydłużeniem do 20%. Zwiększenie wytrzymałości i odporności na korozję i ścieranie jest możliwe w przypadku zastosowania produktów z proszków stalowych, w szczególności o składzie chemicznym odpowiadającym stalom specjalnym. Produkty takie można uzyskiwać różnymi metodami, a mianowicie – przez:

- spiekanie proszków stali o składzie chemicznym odpowiadającym gotowemu spiekowi,
- wymieszanie w odpowiednio dobranych proporcjach proszków żelaza ze sproszkowanym węglem i proszkami innych składników stopowych i następnie spiekanie,
- wymieszanie proszków żelaza z proszkami żeliwa lub żelazostopów i następnie spiekanie,
- nawęglanie produktów otrzymanych przez spiekanie proszków żelaza.

PRODUKTY SPIEKANE Z MIEDZI I JEJ STOPÓW

Szeroko są stosowane produkty spiekane z miedzi i jej stopów. Wytwarza się je z mieszaniny proszków Cu, Sn lub Zn albo proszków stopowych, np. Cu-Pb lub Cu-Zn. Miedź oraz brązy lub mosiądże są stosowane do wytwarzania spiekanych elementów urządzeń i maszyn, okuć budowlanych, w medalierstwie.

ŁOŻYSKA I FILTRY SPIEKANE

Metody metalurgii proszków umożliwiają wytwarzanie produktów, których nie można wytworzyć innymi metodami.

Do produktów tych należą między innymi:

- łożyska lite,
- łożyska porowate,
- filtry spiekane.

SPIEKANE ŁOŻYSKA LITE

Spiekane łożyska ślizgowe wykazują dobre własności mechaniczne. Spiekane łożyska lite zwykle są wytwarzane przez prasowanie na gorąco lub nasycanie szkieletu z metali trudno topliwych metalami o niższej temperaturze topnienia. Są stosowane w podwyższonej i obniżonej temperaturze oraz przy wysokich obciążeniach, które to warunki wykluczają smarowanie olejami.

Spiekane łożyska lite o odpowiednim udziale grafitu lub miękkich metali niskotopliwych są samosmarowne. Najczęściej wytwarza się je z żelazografitu lub miedziografitu. Żelazo może być częściowo zastąpione przez Cu, Pb, Sn lub Zn, natomiast miedź – przez Sn, Zn, lub Pb. Może być stosowany również brąz ołowiowy o stężeniu 10-40% Pb. W zależności od warunków pracy łożyska ślizgowe mogą zawierać także 0-60% Cu, 0-70% Ni, 0-70% Co, 0-30% Cr, 0-10% Al, 0-10% Mo, do 50% grafitu oraz 0-40% węglików lub borków metali.

POROWATE ŁOŻYSKA SAMOSMAROWNE

W przeciwieństwie do licznych materiałów spiekanych, w tym także łożysk litych, charakteryzujących się dużą gęstością, niektóre produkty, takie jak łożyska samosmarowne, są wytwarzane jako porowate. Pory istniejące wewnątrz materiału są połączone ze sobą, tworząc kapilarne kanaliki. Objętość porów sięga 50% całkowitej objętości łożysk. Łożyska porowate (PN-H-97044:1996) są wytwarzane z proszków metali, najczęściej ze stopów żelaza lub miedzi, m.in. ze stopów miedzi z cyną, do których mogą być dodawane proszki niemetalu, np. grafitu. Najczęściej łożyska te produkuje się w postaci cienkościennych tulei lub tulei z kołnierzami, a także w postaci baryłkowatej. Są również wytwarzane taśmy porowate, nakładane następnie na podkładki stalowe i zwijane w półpanewki.

Łożyska porowate nasyca 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.

Spiekane łożyska porowate są stosowane w układach, w których nie ma możliwości doprowadzenia dodatkowego smarowania oraz wykonywania przeglądów okresowych oraz tam, gdzie nie można dopuścić do wyciekania oleju. Łożyska porowate z dodatkowym

smarowaniem są stosowane w ciężkich warunkach pracy – przy dużej prędkości oraz obciążeniu.

SPIEKANE FILTRY POROWATE

Do produktów spiekanych o porowatości do 50% należą filtry. 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, a także z proszków innych metali. Spiekane mogą być również włókna metali.

Porowate filtry spiekane umożliwiają oczyszczanie z cząstek o średnicy 10^{-3} - 10^{-4} mm. Gazy są oczyszczane z zanieczyszczeń mechanicznych, a także w pewnym stopniu osuszane. Za pomocą porowatych filtrów możliwa jest również regulacja ciśnienia gazów. Ciecze są oczyszczane głównie z zanieczyszczeń mechanicznych.

Filtry spiekane o porowatości do 50% cechują się dobrymi własnościami mechanicznymi, w tym wytrzymałością na rozciąganie, wytrzymałością na zginanie, a także dużą odpornością na obciążenia udarowe i działanie wysokiej temperatury. Mogą być regenerowane przez przepłukiwanie lub przedmuchiwanie oraz metodami chemicznymi. Są stosowane w przemyśle zbrojeniowym, lotniczym, motoryzacyjnym, chemicznym i obrabiarkowym.

SPIEKANE STALE ODPORNE NA KOROZJĘ

Spośród materiałów spiekanych pewne znaczenie techniczne zyskały stale odporne na korozję, wytwarzane metodami metalurgii proszków, np. metodą ASP lub spiekania proszków Fe, Cr, Ni. Metody te umożliwiają wytworzenie stali o bardzo małym stężeniu węgla, bardzo trudnych do otrzymania metodą konwencjonalną.

SPIEKANE METALE TRUDNO TOPLIWE

Metody metalurgii proszków umożliwiają otrzymanie czystych metali trudno topliwych, np. Ta, Nb, Ti, odpornych na korozję, albo W lub Mo stosowanych do pracy w wysokiej temperaturze, m.in. w elektrotechnice i elektronice. Spiekane metale trudno topliwe poddaje się obróbce plastycznej na gorąco, np. młotkowaniu, ciągnięciu drutów, kuciu lub walcowaniu.

CERMETALE ŻAROODPORNE I ŻAROWYTRZYMAŁE

Liczną grupę spieków żaroodpornych i żarowytrzymałych stanowią kompozyty ceramiczno-metalowe. Materiałami ceramicznymi są zwykle tlenki, węgliki, krzemki lub borki. Powodują one zwiększenie odporności na działanie wysokiej temperatury i niewrażliwość własności wytrzymałościowych na zmianę temperatury, żaroodporność, dużą twardość i odporność na ścieranie w wysokiej temperaturze. Jako materiały żaroodporne mogą być stosowane węgliki spiekane oraz tlenki spiekane.

Do omawianej grupy materiałów należą również metale umacniane dyspersyjnie przez obcą fazę twardą i żaroodporną, jak np. wolfram spiekany z niewielkim dodatkiem tlenku sodu, wapnia lub aluminium, dwutlenku krzemu albo dwutlenku toru, zapobiegające nadmiernemu rozrostowi ziarn i pęczaniu wolframu. Podobnie jest spiekany chrom z dodatkiem tlenku itru.

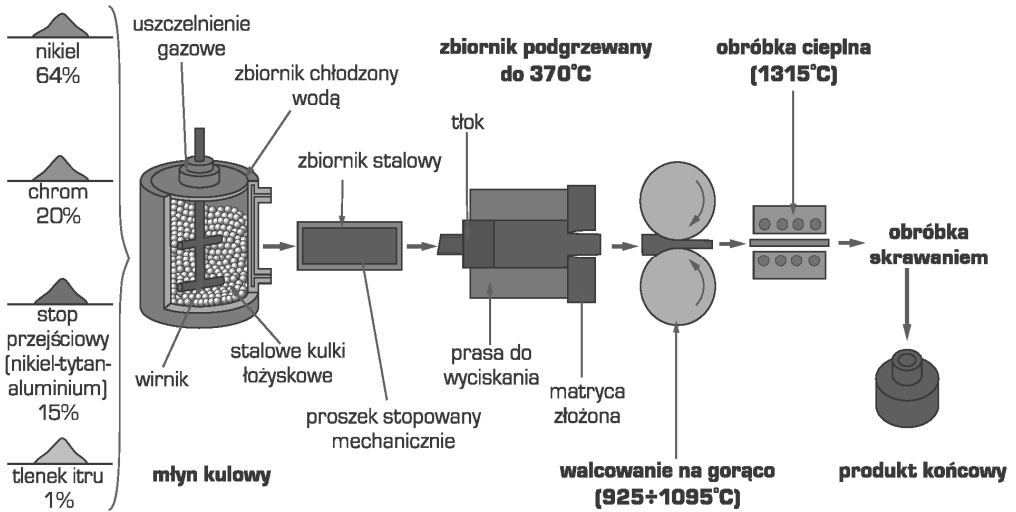
Metoda SAP (spiekanie proszku aluminium) jest stosowana w produkcji spieków $Al+Al_2O_3$. Udział tlenków w tych spiekach sięga 15%, zwykle wynosi jednak 5-11%. Obecnie, oprócz aluminium, metodą tą są wytwarzane m.in. spieki $U+UO_2$, $Fe+Al_2O_3$, $Fe-Cr+Al_2O_3$, $Fe+Fe_2O_3$ i $Ni+Al_2O_3$.

SPIEKANE MATERIAŁY NA OSNOWIE NIKLU I ŻELAZA UTWARDZANE WYDZIELENAMI TLENKÓW

Od II połowy XX wieku materiały na osnowie niklu, żelaza i aluminium są wytwarzane metodami metalurgii proszków przez mechaniczne stopowanie i utwardzanie dyspersyjne tlenkami MA ODS (j. ang.: *Mechanical Alloying – Oxides Dispersion-Strengthened*). Materiały te po raz pierwszy zastosowano na elementy turbin gazowych silników lotniczych, a później na turbiny przemysłowe, w tym łopatki, dysze, komory spalania. Obecnie materiały wytwarzane metodami metalurgii proszków przez mechaniczne stopowanie i utwardzanie dyspersyjne tlenkami MA ODS są stosowane na liczne elementy w różnych gałęziach przemysłu, włączając świece żarowe silników Diesla, elementy pieców do obróbki cieplnej, jak osłony, kosze, palety, szyny ślizgowe dla palet stalowych, paleniska kotłów węglowych i olejowych, osłony termoelementów, elementy do obróbki ciekłego szkła.

Proszki metali o odpowiednio dobranym składzie chemicznym oraz strukturze wytwarzane są metodą mechanicznego stopowania w młynach z poziomymi kulami lub między pionowymi

tarczami ściernymi. Następuje łączenie na zimno cząstek proszków o różnym składzie, tj. Ni, Ti i Al, a równocześnie pękanie innych cząstek. Powoduje to stabilizację zarówno rozmiarów jak i składu chemicznego proszku. Z kolei następuje mieszanie proszku wytworzonego metodą stopowania mechanicznego jako osnowy o średniej wielkości 150 μm (w udziale ok. 15%) z proszkiem niklu o rozmiarach 4-7 μm (w udziale ok. 64%), proszkiem chromu o rozmiarach 150 μm (w udziale ok. 20%), a także z ok. 2% Y_2O_3 o rozmiarach ok. 25 nm (rys. 1.16).



Rysunek 1.16. Schemat procesu technologicznego wytwarzania materiałów spiekanych MA ODS (opracowano według J.J. deBarbadillo i J.J. Fischera)

Materiały są wytwarzane metodami metalurgii proszków przez mechaniczne stopowanie i utwardzanie dyspersyjne tlenkami MA ODS jako pręty, płyty, blachy, rury, druty, kształtki i odkuwki. Ich własności zależą od struktury ziarn, a także od obecności drobnoziarnistych wydzieli tlenków. Zwykle po wytwarzaniu stosuje się wyżarzanie w temperaturze 1315°C. Ziarna mają wydłużoną strukturę związaną z technologią wyciskania lub odkształcenia i zapewniają wysokie własności mechaniczne w podwyższonej temperaturze. Jeżeli w wyniku staranności technologicznej zapewniona jest równoosiowa struktura ziarn w płaszczyźnie blachy, w jej płaszczyźnie występują niemal izotropowe własności

W tabelicy 1.1 podano przykładowo składy chemiczne kilku komercyjnych materiałów spiekanych wytwarzanych tą technologią. Materiały te mogą być spawane elektrodą wolframową

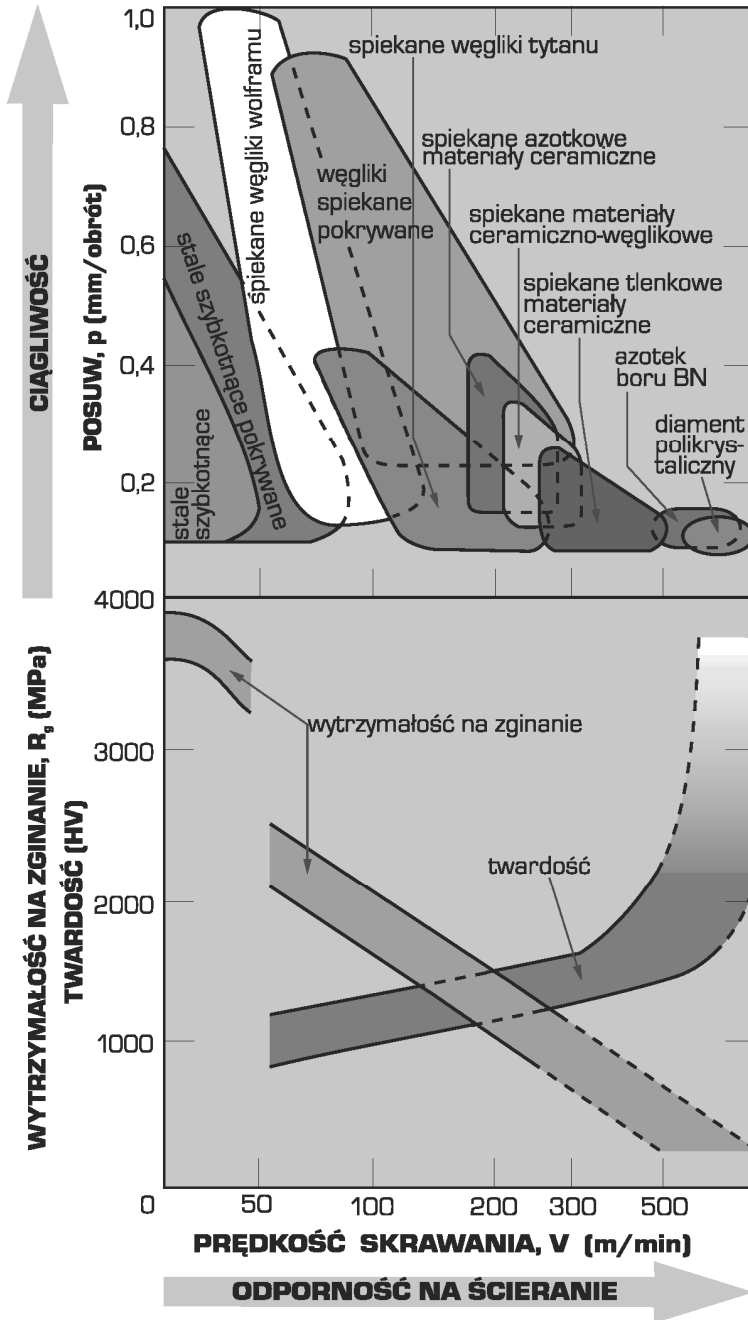
w osłonie gazów obojętnych, wiązką elektronową lub laserowo, a także zgrzewane w próżni lub lutowane dyfuzyjnie.

Tablica 1.1. Orientacyjne składy chemiczne kilku wybranych stopów wytwarzanych metodą stopowania mechanicznego i utwardzania dyspersyjnymi tlenkami (MA ODS) (według J.J deBarbadillo i J.J. Fischera)

Rodzaj nadstopu według ASTM	Udział masowy składników, %											
	Cr	Al	Ti	W	Mo	Ta	Y ₂ O ₃	C	B	Zr	Ni	Fe
MA 754	20	0,3	0,5	–	–	–	0,6	0,05	–	–	reszta	–
MA 758	30	0,3	0,5	–	–	–	0,6	0,05	–	–	reszta	–
MA 760	20	6	–	3,5	2	–	0,95	0,05	0,01	0,15	reszta	–
MA 6000	15	4,5	2,5	4	2	2	1,1	0,05	0,01	0,15	reszta	–
MA 956	20	4,5	0,5	–	–	–	0,5	0,05	–	–	–	reszta

ZASTOSOWANIE METALURGII PROSKÓW W PRODUKCJI MATERIAŁÓW NARZĘDZIOWYCH

Metalurgia proszków znalazła szerokie zastosowanie w produkcji spiekanych materiałów narzędziowych, takich jak węgliki spiekane metali, węglkostale, stale szybko tnące o bardzo dużym stężeniu węgla i pierwiastków stopowych, a także innych cermetali i spieków ceramicznych nie do wytworzenia innymi sposobami. Metalurgia proszków umożliwia ponadto uzyskanie materiałów, np. stali szybko tnących, o lepszych właściwościach technologicznych od materiałów produkowanych metodami konwencjonalnymi (rys. 1.17). W stalach tych zdołano bowiem wyeliminować niemal zupełnie segregację i pasmowość węglików, nawet w produktach o największym przekroju. Ze stali szybko tnących lub węglkostali można wykonać narzędzia bezpośrednio przez prasowanie i spiekanie.



Rysunek 1.17. Schemat: a) zakresów szybkości skrawania i dopuszczalnego posuwu, b) twardości i wytrzymałości na zginanie różnych spiekanych materiałów narzędziowych i konwencjonalnych stali szyszkotnących

OGÓLNE WYMAGANIA STAWIANE SPIEKANYM MATERIAŁOM NARZĘDZIOWYM

Szybko rozwijająca się technika i technologia stwarza konieczność zwiększania wymagań stawianych spiekany materiałom narzędziowym w zakresie własności mechanicznych, między innymi odporności na zużycie. Nieustanny rozwój nowoczesnych spiekanych materiałów narzędziowych związany jest z szybkim postępowaniem w dziedzinie inżynierii materiałowej. Nowoczesne spiekane materiały narzędziowe ze względu na charakter ich pracy oraz złożoność mechanizmów zużycia, którym podlegają ostrza narzędzi skrawających, powinny spełniać liczne wymagania, do których należą między innymi:

- wysoka twardość,
- duża udarność,
- odporność na złożone zużycie (adhezyjne, dyfuzyjne, ściernie i cieplne),
- odporność na wysoką temperaturę,
- duża wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, skręcanie i zginanie,
- wysoka odporność na zmęczenie mechaniczne i cieplne,
- dobra przewodność cieplna i pojemność cieplna,
- stabilność krawędzi skrawających,
- dobra ciągliwość.

„Idealny” materiał narzędziowy o uniwersalnym zastosowaniu, powinien łączyć w sobie podane własności, a szczególnie największą odporność na zużycie i twardość z dużą wytrzymałością i dobrą ciągliwością przy jednoczesnej obojętności chemicznej w stosunku do obrabianego materiału. Jednakże pomimo intensywnego rozwoju inżynierii materiałowej ciągle nie wytworzono „idealnego” materiału narzędziowego ze względu na podstawową sprzeczność między takimi własnościami jak twardość i ciągliwość.

OGÓLNA KLASYFIKACJA SPIEKANYCH MATERIAŁÓW NARZĘDZIOWYCH

Najogólniej – w grupie spiekanych materiałów narzędziowych – można wydzielić:

- stale i cermetale oparte na węglkach metali przejściowych oraz cermetale oparte na azotkach lub mieszaninach azotków i węglków metali przejściowych,

- materiały ceramiczne zawierające głównie $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ i/lub Si_3N_4 , ewentualnie z dodatkiem tlenków innych pierwiastków,
- materiały mieszane – ceramiczno-węglkowe – zawierające zarówno $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ oraz (lub) Si_3N_4 , jak i węgliki metali przejściowych z ewentualnym dodatkiem tlenków lub azotków innych pierwiastków,
- supertwarde materiały spiekane – w tym polikrystaliczny syntetyczny diament i azotek boru BN o regularnej sieci przestrzennej, zwany borazonem – przeważnie nakładane na płytki z węglików spiekanych.

Tablica 1.2. *Możliwości zastosowania różnych spiekanych materiałów narzędziowych*

Materiał narzędziowy	Materiał obrabiany					
	stal	żeliwo	stale odporne na korozję	stopy niklu	metale nieżelazne	materiały niemetale
Cermetale narzędziowe TiN	☉/☉	☉/☉	☉/☉	☉	☉/☉	☉/☉
Tlenkowe materiały ceramiczne	☉	☉/☉	●	●	●	●
Tlenkowo-węglkowe materiały ceramiczne	☉/☉	☉/☉	☉	☉	●	●
Spiekany azotek krzemu	●	☉/☉	●	☉/☉	●	●
Sialony	●	☉/☉	●	☉/☉	●	●
Lity regularny azotek boru	☉/☉	☉/☉	●	●	●	●
Ostrza płytkowe z regularnego azotku boru	☉	☉	☉	☉	●	●
Ostrza płytkowe z polikrystalicznego syntetycznego diamentu	●	●	●	●	☉/☉	☉/☉
Oznaczenia: ☉ zalecane do toczenia, ☉ zalecane do frezowania, ● niezalecane.						

Grupę materiałów opartych na węglkach metali przejściowych można dodatkowo podzielić na:

- spiekane stale szybko tnące,
- węglkostale spiekane,

- węgliki spiekane,
ze względu na udział objętościowy węglików w strukturze.

ZASTOSOWANIE SPIEKANYCH MATERIAŁÓW NARZĘDZIOWYCH

W zależności od składu fazowego oraz udziału cząstek twardych faz w spiekanych materiałach narzędziowych (od ich obecności lub nie) oraz składu chemicznego materiału wiążącego, a także możliwości poddania materiału obróbce cieplnej zróżnicowane są własności i zastosowanie produktów gotowych ze spiekanych materiałów narzędziowych.

Zakresy zastosowania poszczególnych grup tych materiałów narzędziowych w procesach obróbki skrawaniem podano orientacyjnie na rysunku 1.17.

W tabelicy 1.2 przedstawiono możliwości zastosowania spiekanych materiałów narzędziowych do obróbki różnych materiałów.