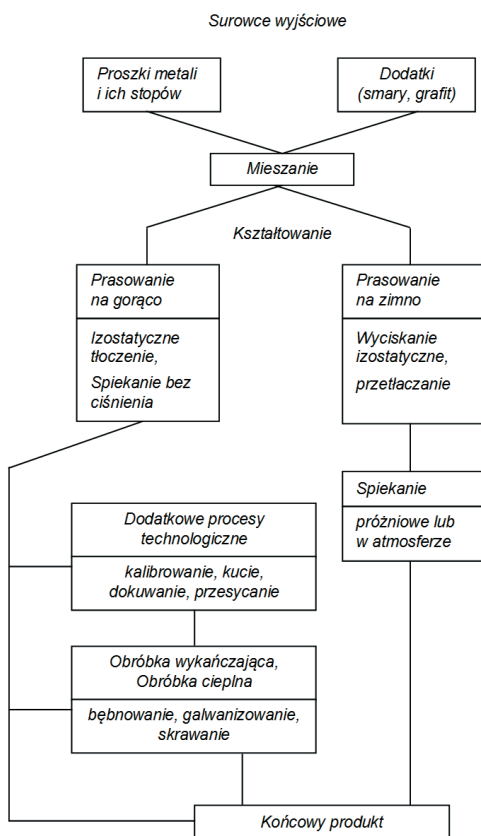


2. Nowoczesne technologie prasowania i spiekania wyrobów z proszków spiekanych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym – w świetle badań literaturowych

Rozwój metalurgii proszków postępował wraz z rozwojem przemysłu maszynowego i elektrotechnicznego. Na początku XX wieku nastąpił dynamiczny wzrost wytwarzania wyrobów z proszków poprzez produkcję włókien z proszków wolframu, tantal, molibdenu. Kolejny etap nastąpił w 1922 roku, kiedy w Niemczech rozpoczęła się produkcja węglików spiekanych pod nazwą Widia. W 1930 roku opracowano nowe technologie wyrobów porowatych łożysk ślizgowych samosmarujących oraz masową produkcję elementów maszyn. W dzisiejszych czasach zauważa się dynamiczny rozwój technologii wytwarzania, wynikający z dużego



Rysunek 2. Schemat procesu technologicznego metalurgii proszków [7]

zapotrzebowania na innowacyjne wyroby posiadające skomplikowane kształty. Wyroby te są szczególnie oczekiwane przez takie przemysły jak: motoryzacyjny, lotniczy, budowlany, elektrotechniczny. Produkowane elementy proszków metali gwarantują dobrą odporność na zużycie cierne, mały współczynnik tarcia oraz dużą żaroodporność.

Nowoczesna technologia (schemat procesu technologicznego metalurgii proszków przedstawia rysunek 2) wytwarzania części bezodpadową metodą zagęszczania, spiekania, kalibrowania (dogęszczania) lub/i dokuwania proszków metali w coraz szerszym zakresie zastępuje tradycyjne technologie ubytkowe [7]. Jak wcześniej wspomniano, technologie te dają możliwość uzyskiwania części o skomplikowanych kształtach: kół zębatych o różnych zarysach uzębień, krzywek, elementów sprzęgłowych, dźwigni, części amortyzatorów. Dzięki zastosowaniu precyzyjnego i trwałego oprzyrządowania do prasowania, kalibrowania i dokuwania zapewniona zostaje powtarzalność i dokładność wymiarowa.

2.1. Elementy ślizgowe spiekane z proszków

Metalurgię proszków stosowano początkowo tylko dla takich elementów, których otrzymanie innymi technologiami nie było możliwe. Do wyrobów tych należą między innymi łożyska lite i porowate oraz filtry spiekane. W miarę jednak rozwoju, z uwagi na swoje zalety, metalurgia proszków zaczęła konkurować z innymi gałęziami technologii i stosowana jest obecnie do otrzymywania wielu elementów konstrukcyjnych wykonanych zarówno ze stali, jak i z metali nieżelaznych.

Istnieje również kilka zasadniczych rodzajów łożysk nieporowatych, wytwarzanych na drodze metalurgii proszków. Najbardziej znanymi rodzajami są: łożyska z zawartością grafitu, łożyska miedziowo-ołowiowe, łożyska wytwarzane przez nasycenie porowatych spieków metalami łatwo topliwymi lub stopami łożyskowymi oraz łożyska na osnowie węglików spiekanych [14].

Spiekane łożyska lite zwykle są wytwarzane przez prasowanie na gorąco lub nasycenie szkieletu z metali trudno topliwych metalami o niższej temperaturze topnienia. Są stosowane w podwyższonej i obniżonej temperaturze oraz przy wysokich obciążeniach, gdzie nie jest możliwe smarowanie olejami. Samosmarne spiekane łożyska lite zawierają odpowiednią ilość grafitu lub miękkich metali nisko topliwych. 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 zawartości 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.

Do wyrobów 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 lub 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.

Jednak największe znaczenie posiadają spiekane łożyska porowate a wśród nich łożyska z proszku żelaza i z proszku brązu, które dominują w światowej produkcji wśród spiekanych wyrobów proszkowych. Początkowo dominowała produkcja łożyska na bazie proszku brązu, później rozpoczęto produkcję łożysk na osnowie żelaza. łożyska na osnowie żelaza cechują się dobrymi właściwościami ślizgowymi oraz posiadają wyższe właściwości mechaniczne niż łożyska z brązów. Spośród innych typów łożysk porowatych, należy wspomnieć o łożyskach żelazno-miedziowych, łożyskach na osnowie aluminium oraz łożyskach żeliwnych [14].

Łożyska na osnowie żelaza produkowane są: z proszku żelaza z grafitem lub bez grafitu ze znacznym dodatkiem miedzi.

Obok wyżej wymienionych grup łożysk spotykane są również łożyska z niewielkim dodatkiem ołowiu. Ołów wprowadza się w postaci metalicznego proszku ołowiu lub w postaci tlenku ołowiu. Początkowo dodawano do proszku żelaza do 18% Pb, z upływem czasu zaczęto ograniczać jego zawartość i obniżono do około 3,5%. Określono, że wprowadzenie większej ilości ołowiu powoduje pogorszenie właściwości łożysk.

Jako dodatki przy produkcji łożysk żelaznych stosowane są również inne metale, do których należy zaliczyć przede wszystkim cynk. Zastosowanie tego rodzaju łożysk nie znalazło większego zainteresowania [14, 15].

Początkowo do produkcji żelaznych łożysk porowatych stosowano proszek żelaza z dodatkiem miedzi do 20% lub ołowiu do 15%. Obecnie produkuje się w dużej ilości łożyska żelazne bez żadnych dodatków, głównie w USA [14, 15]. Wytworzone matrycowo łożyska nasącza się olejem. W porównaniu do brązu, spiek proszku żelaza nie jest odporny na korozję w wilgotnym środowisku. Pewną ochroną przed korozją jest olej w porowatej strukturze. Zaletą łożyska ze spieku żelaza jest wyższa twardość i odporność na ścieranie w zanieczyszczonym środowisku.

Dodatek grafitu przy wytwarzaniu spiekanych łożysk porowatych na osnowie żelaza jest niewielki i zawiera się w przedziale 3-4%. Zawartość grafitu w łożyskach o strukturze ferrytycznej powinna się zawierać w przedziale 0,5-1%, w łożyskach o strukturze eutektoidalnej 1 do 2,5%, natomiast w łożyskach o strukturze nadeutektoidalnej powyżej 2,5% [14, 15].

Łożyska żelazne z dodatkiem miedzi zostały wprowadzone do przemysłu w celu podwyższenia właściwości wytrzymałościowych. Dodatek miedzi (5-25%) podnosi w znacznym stopniu właściwości spieków. Łożyska te pozwalają na stosowanie wyższych obciążeń i prędkości ślizgania.

M.J. Balszin podaje, że skład chemiczny łożysk żelazowo-miedziowych i żelazowo-miedziowo-grafitowych powinien zawierać się w następujących granicach: Fe – 83-97%, Cu 3-15% i grafit 0-2%, w tym 0-1% węgla związanego. W USA produkowane łożyska żelazowo-miedziane zawierają 5-30% Cu reszta to Fe. Łożyska te nie zawierają zwykle grafitu [14, 15].

Łożyska spiekane (porowate) na osnowie miedzi są to łożyska miedziowo-cynowe (brązowe) z dodatkiem lub bez dodatku grafitu. Zawartość cyny w łożyskach z brązów wynosi od 6 do 12%. Zawartość grafitu w porowatych łożyskach brązowo-grafitowych może dochodzić do 5% (najczęściej stosuje się 1-1,5%). Wyższe wartości grafitu stosuje się w przypadkach, gdy nie ma specjalnych wymagań w stosunku do właściwości wytrzymałościowych. Łożyska tego rodzaju odznaczają się niskimi właściwościami plastycznymi, mają jednak większą odporność na działanie wyższych temperatur.

Rzadziej spotykanymi łożyskami porowatymi była grupa łożysk brązowych z dodatkiem ołowiu (nie przewyższającym zwykle 10%).

Osobną grupę wśród łożysk na osnowie miedzi zajmują porowate łożyska miedziowo-olowiowo-grafitowe ze stosunkowo dużą zawartością grafitu [14, 15].

Głównym składnikiem łożysk porowatych ze stopów lekkich jest aluminium. Łożyska na osnowie aluminium produkowane są głównie w USA. Bliższe dane odnośnie składu chemicznego i udziału procentowego określonych produktów nie są szeroko rozpowszechnione.

Porowate łożyska żeliwne zawierają 96-97% żelaza, do 3% grafitu, w tym 1% węgla związanego chemicznie. Wytwarza je się z proszków żeliwnych o małej zawartości krzemu. Łożyska te mają niższe właściwości mechaniczne i ślizgowe niż spieki żelaza. Znaczenie ich jest daleko mniejsze niż innych typów łożysk porowatych. Znana jest produkcja tego typu łożysk wytwarzanych z proszku żeliwa przez prasowanie proszku [14, 15].

Oprócz prac z łożyskami porowatymi na bazie brązów i żelaza zostały przeprowadzone badania innych stopów metalowych. Aby zaoszczędzić drogiej cyny w łożyskach z brązów do produkcji łożysk zaczęto stosować mieszaniny proszków o podstawie miedź-mosiądz specjalny. Tego rodzaju spieki wykazują wyższą wytrzymałość niż brązy ale za to posiadają gorsze właściwości ślizgowe.

Znane były także łożyska porowate żelazne nasycane rtęcią (głównie w Wielkiej Brytanii). Płynna rtęć służyła jako środek smarujący tylko przy niskich temperaturach. Do pracy przy wyższych temperaturach muszą być stosowne domieszki metali, które tworzyły w rtęcią amalgamaty.

Znane jest również inne rozwiązanie łożysk specjalnych na bazie brązu. Ich skład chemiczny podawany jest w następujących proporcjach: Ni – 2,5%, Si – 0,8%, P – 0,3%, Cu – reszta [14, 15].

Osobnym tematem jest proces smarowania łożysk ślizgowych. Smarowanie to proces doprowadzenia środka smarnego do szczeliny ślizgowej pomiędzy łożyskiem i poruszającym się wałkiem, celem zmniejszenia oporów tarcia i zużycia łożyska oraz ścierania się wałka. W przypadku łożysk współpracujących z układem smarowania, środek smarujący najczęściej w formie oleju lub smaru doprowadzany jest do powierzchni ślizgowych poprzez system otworów i rowków smarnych (rys. 3) [16].



Rysunek 3. Przykład łożyska z systemem rowków smarnych współpracującego z układem smarowania [16]

Kosztowo korzystniejszą alternatywą do łożysk pracujących z układem smarowania jest stosowanie łożysk samosmarujących zapewniających doprowadzenie środka smarującego w sposób samoczynny. Do łożysk samosmarujących zalicza się również typy niskoobsługowe wymagające naniesienia środka smarnego do wgłębień w powierzchni ślizgowej łożyska bezpośrednio przed montażem. Łożyska samosmarujące pozwalają wyeliminować układ smarowania, upraszczając całą konstrukcję. Łożyska wymagające smarowania potrzebują indywidualnego i kosztownego wykonania „na miarę”. Łożyska samosmarujące są łatwo dostępne w szerokiej gamie typów i znormalizowanych wymiarów.

W zależności od sposobu doprowadzenia środka smarnego do szczeliny ślizgowej rozróżnia się następujące typy łożysk (rys. 4):

- Spiekane z proszków metali nasączone olejem:
 - łożyska ze spieku proszku brązu Cu/Sn,
 - łożyska ze spieku proszku żelaza Fe;
- Zwijane z taśmy stalowej lub brązowej z pokryciem kompozytowym jako warstwa ślizgowa:
 - zwijane z taśmy stalowej z pokryciem z teflonu PTFE,
 - łożysko zwijane z taśmy z brązu z pokryciem z teflonu PTFE,
 - łożysko zwijane z taśmy stalowej z pokryciem z żywicy POM z kieszonkami smarnymi;
- Zwijane z taśmy z brązu z kieszonkami (wgłębieniami) na środek smarny:
 - brąz zwijany;
- Łożyska z litego brązu (obrabianego maszynowo) z przelotowymi otworami wypełnionymi grafitem:
 - brąz z czopami grafitowymi [16].

Łożyska ze spiekanych proszków metali (rys. 4) posiadają mikro-porowatą, kapilarną strukturę nasączoną olejem oddawanym do szczeliny ślizgowej w trakcie pracy wałka.

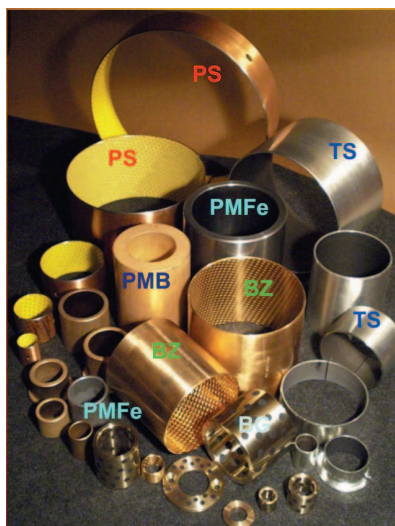
Łożyska zwijane z taśmy stalowej lub brązowej z pokryciem kompozytowym (rys. 4) posiadają warstwę teflonu PTFE będącego smarem stałym redukującym tarcie. Teflon posiada najniższy współczynnik tarcia ze wszystkich znanych smarów stałych.

Łożyska zwijane z taśmy stalowej z pokryciem z żywicy (rys. 4) o bardzo dobrych własnościach ślizgowych. Dodatkowo warstwa żywicy posiada okrągłe kieszonki do wypełnienia przed montażem smarem oddawanym do szczeliny ślizgowej w trakcie pracy łożyska.

Łożyska zwijane z taśmy z brązu z wgłębieniami w kształcie rombu na środek smarny (rys. 4). Własności ślizgowe oparte o bardzo dobre własności ślizgowe brązu z dodatkiem fosforu jak również smar zawarty we wgłębieniach na powierzchni ślizgowej łożyska.

Łożyska z litego brązu (rys. 5) z przelotowymi otworami wypełnionymi grafitem będącym smarem stałym rozcieranym przez poruszający się wałek tworząc warstwę ślizgową. Korpus łożyska wykonany jest z brązu o bardzo dobrych własnościach ślizgowych.

Łożyska baryłkowe – rys. 5 (określane również jako sferyczne), należą do wytwarzanych metodą metalurgii proszkowej pozwalającej na produkcję wysoce skomplikowanych kształtów „net shape” – „na gotowo” tzn. bez konieczności ich dalszej obróbki [16].



Rysunek 4. Rodzaje łożysk samosmarujących oferowanych na rynku przez producenta [16]



Rysunek 5. Przykład łożysk baryłkowych [16]

Materiałami stosowanymi do produkcji łożysk samosmarnych są:

- proszek brązu,
- proszek żelaza,
- grafit w proszku,
- dyspersyjna zawiesina teflonu PTFE,
- granulaty teflonu PTFE.

Zalety łożysk samosmarnych:

- eliminacja układów smarowania prowadząca do uproszczenia i potanienia konstrukcji zwiększając tym samym konkurencyjność produktu,
- łożyska standardowe wykonane są w tolerancjach nie wymagających dalszych czynności jak np. rozwieranie otworu po wcisku, stosowania zabezpieczeń przed przemieszczaniem się w trakcie pracy, przy założeniu stosowania się do zaleceń tolerancji wałka i otworu obudowy,
- samosmarność łożysk to bezobsługowość maszyn i polepszenie ich własności,
- szeroka gama wymiarowa (już od 2 mm średnicy wałka) zapewnia dużą swobodę projektancką,
- wysokie dopuszczalne prędkości obrotowe do 6 m/s,
- cienkościenność zmniejsza gabaryty i wagę maszyn zmniejszając jednocześnie koszty materiałowe,
- zdolność pracy w ciężkich warunkach pracy (zanieczyszczenia, wysoka temperatura pracy nawet do kilkuset stopni C),
- możliwość zarówno obrotowego, nawrotnego, liniowego jak i mieszanego typu ruchu wałka,
- cichobieżność, tłumienie przenoszonych drgań prowadzące do wyciszonej pracy maszyn.

Czynnikami decydującymi o trwałości łożysk są:

- prędkość ślizgowa wałka,
- wielkość obciążenia łożyska,
- temperatura pracy wpływająca na wartość współczynnika tarcia,
- gładkość i materiał wałka (twardość i odporność na przegięcia),
- rodzaj materiału obudowy uzależniający dobre lub złe odprowadzanie ciepła,
- występujące wibracje,

- środowisko pracy (zanieczyszczenia, wilgoć, chemikalia, substancje chemicznie agresywne np. kwas octowy, sól) mogące powodować korozję elektrolityczną.

Przykłady zastosowań łożysk samosmarnych:

- zmechanizowany sprzęt gospodarstwa domowego,
- narzędzia elektryczne,
- silniki elektryczne i spalinowe, rozruszniki samochodowe,
- zawory, liczniki, urządzenia kontrolno-pomiarowe,
- regulatory, elementy sterowania automatyki, siłowniki,
- pompy, kompresory,
- maszyny przemysłu włókienniczego, spożywczego, drzewnego,
- maszyny rolnicze i ogrodnicze,
- urządzenia transportu poziomego i pionowego,
- zawieszania drzwi, bram, krzesła obrotowe,
- łóżka szpitalne i rehabilitacyjne,
- maszyny górnicze,
- śluzy wodne,
- regulowane fotele samochodowe,
- urządzenia biurowe (drukarki, kserokopiarki).

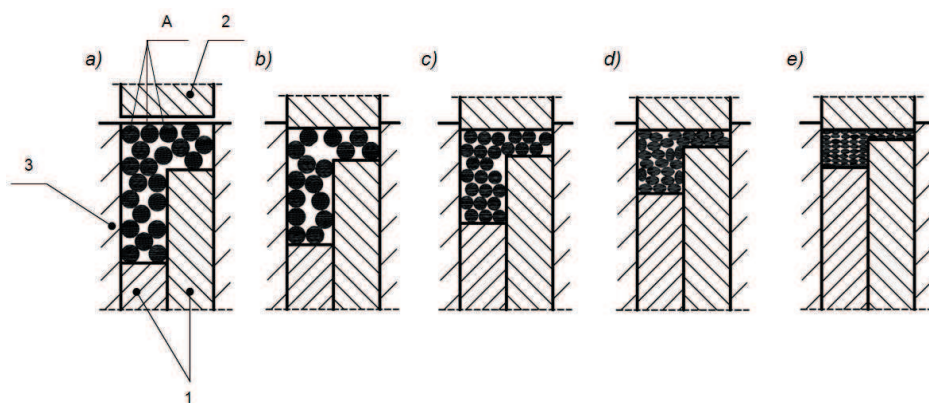
2.2. Technologia prasowania i spiekania

Proces wytwarzania spiekanych części maszyn z proszku żelaza zaczyna się w momencie sprasowania proszku lub mieszanki proszkowej w matrycy prostej lub też często bardzo skomplikowanej. Prasowany proszek zamknięty stemplami w matrycy, poddawany jest naciskowi. Ciśnienie to powoduje, że następuje znaczne wzajemne zbliżenie poszczególnych ziaren proszku, ich wzajemne przyleganie (zespolecie), często zgrzanie się ich na zimno. Powstała w ten sposób wypraska zostaje następnie wypchnięta z matrycy i poddana dalszym operacjom technologicznym: spiekaniu, dogęszczaniu, kalibrowaniu itd. W celu zmniejszenia w procesie prasowania i wypychania z matrycy tarcia o ściany matrycy i stempli, jak również aby łagodzić wzajemne tarcie między ziarnami proszków, dodany jest środek poślizgowy do mieszanki przed jej zasypaniem do komory zasypowej w narzędziu prasującym. W procesie wytwarzania wyróżniamy trzy podstawowe operacje: prasowanie, spiekanie, kalibrowanie.

Prasowanie

Proces prasowania odbywa się najczęściej w matrycy. Matryce zasypujemy dobraną objętościowo ilością proszku, a następnie stempel połączony z suwakiem prasy wywiera nacisk, doprowadzając do zagęszczenia proszku. Na rysunku 6 pokazano kolejne etapy prasowania. W pierwszej fazie podczas zasypywania matrycy występuje tarcie międzycząsteczkowe oraz między ściankami a ziarnem. Wynikiem jest niecałkowite zasypanie komory i powstawanie tak zwanych mostków. Określają one przestrzeń pomiędzy ziarnami, która podczas zasypywania nie zostaje wypełniona. Kolejnym etapem jest stopniowe eliminowanie mostków, poprzez nacisk wywierany przez stempel bądź stemple, co powoduje przemieszczanie się ziarenek między sobą. Etapem następnym jest wprowadzenie odkształceń sprężystych ziaren proszków, które po przekroczeniu wartości krytycznych poddają się odkształceniu plastycznemu. Ostatni etap przedstawia proszek po prasowaniu, tworząc wypraskę, która zostaje wypchnięta przez wypychacze. Poniższy schemat, opracowany przez Seeliga, oparty jest na modelowych gumowych kulkach [17].

Najczęściej stosowane metody formowania wyprasek: prasowanie w matrycach zamkniętych, prasowanie izostatyczne, prasowanie kroczące (z przesuwaną się matrycą), walcowanie, wyciskanie, odlewanie i natryskiwanie, specjalne metody formowania (formowanie i prasowanie dynamiczne i pulsacyjne, prasowanie w polu magnetycznym).



Rysunek 6. Etapy prasowania proszku: a) luźno zasypywany proszek, b, c) załamanie mostków, d) początek odkształcenia ziaren, e) proszek po prasowaniu, A – tworzenie mostków między ziarnami, 1 – stemple dolne, 2 – stempel górny, 3 – matryca [17]

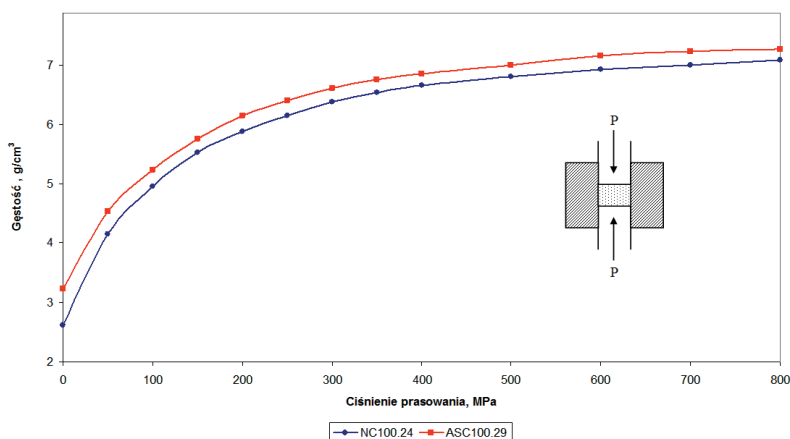
Prasowanie (zagęszczanie) proszku w cylindrycznej matrycy

Właściwości wytrzymałościowe elementów prasowanych i spiekanych rosną wraz z ich gęstością. Ekonomiczność procesu obniża zaangażowana ilość energii w procesie prasowania oraz zużycie narzędzi. Aby pogodzić te dwie przeciwstawne tendencje poszukuje się możliwości uzyskania wysokiej gęstości przy niskim ciśnieniu prasowania. Dla znalezienia kompromisu w procesie, pomocnymi stają się krzywe zależności gęstości od ciśnienia prasowania dla proszków i mieszanek.

Krzywe te tworzy się empirycznie. Badania wykonywane są w matrycach z węglików o średnicy wewnętrznej 25 mm, poprzez wytwarzanie przy różnych ciśnieniach prasowania cylindrycznych próbek. Pomiar gęstości pozwala wykreślić krzywe w funkcji ciśnienia prasowania.

Rysunek 7 przedstawia przykłady krzywych zagęszczania dla dwóch proszków NC 102.24 i ASC 100.29. Proszki prasowano z domieszką 0,75% stearynianu cynku [18].

Charakter krzywych pokazuje, że przyrost ciśnienia prasowania powoduje do pewnych wartości wyraźny, choć stopniowy, wzrost gęstości, pokazuje również, że osiągnięcie wartości teoretycznej gęstości żelaza staje się niemożliwe, nawet przy nieograniczonym wzroście nacisku. Jednocześnie też można zauważyć, że dwa proszki o takiej samej granulacji oraz o takiej samej czystości chemicznej tworzą dwie odrębne krzywe mimo, że ich charakter jest analogiczny. Można to tylko wytłumaczyć różną strukturą ziaren (cząsteczek) proszków żelaza tych dwóch różnych gatunków.



Rysunek 7. Krzywe zagęszczania dla dwóch proszków żelaza [18]

Prasowanie izostatyczne

W trakcie izostatycznego prasowania, proszek żelaza zachowuje się podobnie jak w procesie prasowania w sztywnej matrycy, wyraźnie to można zaobserwować w trakcie prasowania proszku elektrolitycznego w hermetycznie zamkniętych elastycznych matrycach, poddawanych różnym izostatycznym ciśnieniom prasowania. W czasie izostatycznego prasowania nie występuje tarcie proszku o ścianki matrycy, zatem nie jest konieczne dodawanie środków poślizgowych do proszków żelaza.

Oglądając mikrostruktury można rozpoznać następujące szczegóły:

- przy gęstości $5,56 \text{ g/cm}^3$ (około 26,2% porowatości) występuje wiele porów o wielkości porównywalnej z wielkością ziaren proszku,
- powyżej gęstości $6,17 \text{ g/cm}^3$ (około 21,5% porowatości) ziarna proszku żelaza klinują się wzajemnie tak mocno, że niemożliwe jest dalsze odkształcenie próbki, bez odkształcenia plastycznego ziaren,
- przy gęstości powyżej $6,61 \text{ g/cm}^3$ (około 15,9% porowatości) największe pory są znacznie mniejsze niż wielkość ziaren proszku, zaś przy gęstości powyżej $7,44 \text{ g/cm}^3$ (około 5,3% porowatości) największe pory, które można rozpoznać są mniejsze niż najdrobniejsze ziarna proszków występujące w mieszankach.

Jeżeli w badanym procesie zagęszczania wyeliminujemy element tarcia o stałą matrycę, to znaczy skoncentrujemy się na prasowaniu (zagęszczaniu) izostatycznym, to łatwo zauważyć, że problem zagęszczania (prasowania) u swoich podstaw ma zjawiska fizyczne, z których minimum można wymienić dwa:

- w miarę zagęszczania, ziarna proszku będą podlegały odkształceniom plastycznym, a co za tym idzie będą się utwardzały, to znaczy będzie wzrastała wartość ich granicy plastyczności,
- w miarę zagęszczania będą zwiększały się wzajemne kontakty ziaren proszku, a zatem będzie malała ich wzajemna możliwość przemieszczenia się (naprężenia styczne).

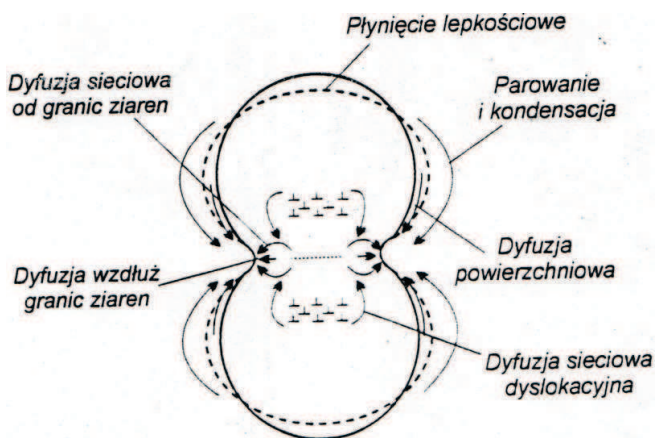
Przy utrzymaniu nacisku zewnętrznego zaczyna występować stan równowagi pomiędzy wartością granicy plastyczności prasowanego materiału i wartości przemieszczających naprężeń stycznych. W konsekwencji następuje zatrzymanie przebiegu wzrostu zagęszczania.

Spiekanie

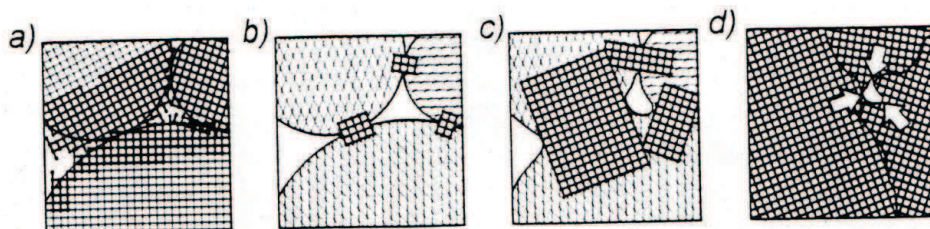
Spiekanie jest procesem, w którym sprasowane lub luźno zasypane cząstki proszku metalowego w temperaturach niższych od temperatury ich topnienia zmieniają się w zespolone

ciało stałe. W trakcie tego procesu poszczególne cząstki proszku metalowego łączą się ze sobą w wyniku dyfuzji. Spiek, będący produktem procesu spiekania, jest ciałem porowatym o odpowiednich właściwościach mechanicznych. I tak wytworzona wypraska jest poddawana procesowi spiekania. Podstawowymi parametrami wpływającymi na proces spiekania są: temperatura i czas, charakterystyka geometryczna cząstek proszku, skład chemiczny mieszanki proszków, gęstość wyprasek, skład chemiczny atmosfery spiekania.

W zależności od zastosowanej technologii może być jedno lub wielokrotne spiekanie. Zadaniem spiekania jest scalenie cząstek w trwałą kształtkę, która swoją budową krystalograficzną będzie porównywalna do materiału litego. Pozycje literaturowe jednoznacznie nie definiują pojęcia spiekania, ponieważ na proces wpływa wiele czynników takich jak: energia swobodna powierzchni cząsteczek, procesy związane ze zdrowieniem i rekrytalizacją materiału, mechanizmy transportu cząstek (rys. 8, 9). Oprócz przedstawionych czynników, decydujący wpływ mają także warunki temperaturowe, czasowe, atmosfery ochronne i struktura poddawana



Rysunek 8. Mechanizmy podstawowych procesów zachodzących podczas spiekania [18]



Rysunek 9. Schemat procesu rekrytalizacji w czasie spiekania: a-d) kolejne stadia procesu [19]

spiekaniu. Podczas procesu przemieszczania cząstek następuje zwiększenie powierzchni styku, które jest spowodowane działaniem: pełzania, dyfuzji powierzchniowej i objętościowej oraz parowania i kondensacji.

Pełzanie jest zauważalne w początkowym etapie spiekania. Polega na uzyskaniu jak największego styku, spowodowanego zbliżaniem się środków ziaren. Efektem jest utworzenie szyjki oraz kierunku porów występujących pomiędzy zewnętrznymi powierzchniami ziaren.

Poprzez dyfuzję powierzchniową rozumiemy przemieszczanie się atomów ziaren. Droga atomów przebiega od powierzchni wypukłych do wklęsłych, która jest spowodowana napięciem powierzchniowym. Efektem działania dyfuzji jest powiększenie powierzchni styku bez zbliżania się środków cząstek oraz powstanie skurczu spieku.

W procesie spiekania rola dyfuzji objętościowej polega na wyrównaniu stężenia w mikroobszarach oraz zmniejszenia objętości porów. Z pomocą migracji wakansów i atomów w przeciwnym kierunku umożliwiające jest łatwe wydobycie ich na wypukłe powierzchnie.

Wykorzystując fazę gazową można przeprowadzić parowanie i kondensację. Polega to na transportowaniu metalu nad powierzchnie wklęsłą i wypukłą. Transport ten odbywa się w kierunku szyjki gdzie nie następuje zbliżanie się środków cząstki i skurczu spieku.

Proces spiekania odbywa się w temperaturze niższej niż temperatura topienia jednego z głównych składników. W tabelicy 1 przedstawiono zakres temperatur wykorzystywanych podczas operacji spiekania. Oprócz temperatury bardzo ważna jest także ochronna atmosfera, jaka panuje we wnętrzu pieca, która pozwala na osiągnięcie żądanej wytrzymałości wypraski. Do najczęściej używanych atmosfer zaliczamy [17]: atmosferę azotu, wodoru (sprężonego), wodoru (elektrolitycznie czystego), atmosferę azotu + wodoru, azotu + zdysocjonowanego CH_3OH , dysocjonowanego amoniaku, gazu egzotermicznego, argonu, helu, próżni.

Tablica 1. Zakres temperatur podczas spiekania [17]

Temperatura spiekania, °C	
Żelazo / Stal	1100-1300
Stopy aluminium	590-620
Miedź	750-1000
Mosiądz	850-950
Brąz	740-780
Metale wysokotopliwe	1200-1600

Drugie prasowanie – doprasowywanie, kalibrowanie oraz poprawa kształtu

Proces jest bardzo zbliżony do prasowania. Celem operacji jest dogęszczenie wyrobu (otrzymanie właściwej gęstości) oraz uzyskanie odpowiedniej tolerancji wymiarowej. Podczas procesu na wypraskę działa siła odkształcenia plastycznego, która gwarantuje wytworzenie wypraski w 6-7 IT klasie dokładności. Natomiast po procesie spiekania końcowego, rząd dokładności jest zaliczany do 10-11 klasy IT. Narzędzia do kalibrowania są bardzo zbliżone do zestawu przeznaczonego do operacji prasowania. Różnica polega na większej dokładności wymiarowej oraz zmniejszeniu komory zasypowej matrycy.

Drugie prasowanie, kalibrowanie oraz poprawa kształtu mają jedną wspólną cechę, to znaczy wszystkie zabiegi powodują odkształcenie plastycznej obrabianej kształtki. Różnice tych operacji są jednak wyraźne:

- Celem drugiego prasowania jest zagęszczenie, już wstępnie spieczonych, uprzednio sprasowanych kształtek (jest to zmiana wartości gęstości w przedziale: 5-20%). W drugim prasowaniu występują znaczne odkształcenia plastyczne, a ciśnienia stosowane są porównywalne z ciśnieniami przy prasowaniu proszku;
- Celem kalibrowania jest poprawa tolerowanych wymiarów oraz korekta ewentualnych deformacji powstałych w operacji spiekania. Wymagane ciśnienia nacisku, w tej operacji, są relatywnie znacznie mniejsze niż przy prasowaniu, ale odkształcenia plastyczne występują też w znacznie mniejszym zakresie. W operacji kalibrowania w konsekwencji odkształcenia plastycznego można również zauważyć nieznaczne zwiększenie wartości gęstości kalibrowanych kształtek, jednak nie ma to żadnego zasadniczego znaczenia i nigdy nie przekracza wartości 5%;
- Celem poprawy kształtu jest zmiana kilku istotnych właściwości produkowanych kształtek, a mianowicie: poprawa wymiarów, zwiększenie gęstości oraz zmiana kształtu (np. wyciskanie na powierzchni czołowej lub obwodzie). Zaangażowane w tej operacji ciśnienia są porównywalne z ciśnieniami stosowanymi w procesie drugiego prasowania. Znaczna deformacja plastyczna zachodząca w tej operacji podwyższa twardość i wytrzymałość obrabianej kształtki przy jednoczesnym nieznacznym obniżeniu wartości wydłużenia przy zrywaniu.

Należy również mieć na uwadze, że uzysk przyrostu wartości np. wytrzymałości w operacji drugiego prasowania i poprawy kształtu często jest na tyle zadowalający, że nie ma potrzeby stosowania w wielu przypadkach dodatków stopowych, aby uzyskać założone wymagane wartości właściwości produkowanych kształtek.

W operacjach kalibrowania oraz poprawy kształtu ma miejsce odkształcenie sprężyste oraz plastyczne materiału.

Dla prowadzenia z pełnym efektem tych operacji trzeba przestrzegać kilku zasad opartych na zebranych doświadczeniach w ciągu wielu lat, m.in. w Instytucie Obróbki Plastycznej:

- Twardość materiału kształtki przewidzianej do tych operacji nie powinna przekraczać wartości twardości 180 HV;
- Gdzie jest to tylko możliwe nie należy kalibrować jednocześnie wszystkich powierzchni przewidzianych do kalibrowania, tylko w zaplanowanej kolejności;
- Zewnętrzne kontury powinny być kalibrowane lub poprawiane na wstępie, aby uniknąć pęknięcia, dopiero po ich skalibrowaniu należy kalibrować i poprawiać otwory;
- Powierzchnie płaskie – czołowe powinny tak długo pozostawać pod naciskiem, aż zostanie zakończony proces kalibrowania;
- Poza przypadkiem, gdy tylko niezależne od całości elementy kształtki podlegają kalibrowaniu, kalibrowana kształtka we wszystkich jej fragmentach winna być w bezpośrednim kontakcie z narzędziem kalibrującym;
- W przypadku kalibrowania lub operacji poprawy kształtów elementów odsadzonych musi być spełniony warunek podparcia tych elementów przez cały czas trwania operacji kalibrowania, czy poprawy kształtu. Podparcie newralgicznych fragmentów może być zrealizowane samymi stemplami, czy też „pływającą” matrycą.

W procesie kalibrowania oraz poprawy kształtu obrabiana kształtka podlega odkształceniom, nie tylko sprężystym, ale również plastycznym. Naciski, które powodują odkształcenia w kształtkach, występują pośrednio w narzędziu, jednak w narzędziu mogą być tylko dopuszczalne w zakresie naprężeń sprężystych. Są to jednak naprężenia, w swej wartości, znaczne.

2.3. Stosowane metody obróbki cieplnej i powierzchniowej

Wykonane elementy techniką metalurgii proszków poddawane są często różnym zabiegom obróbki wykańczającej, których celem jest poprawa posiadanych przez nie właściwości lub też nadanie im pewnych nowych właściwości.

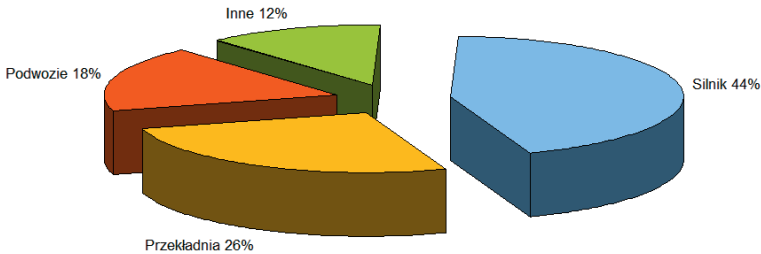
W tablicy 2 przedstawiono zabiegi obróbki wykańczającej spieków [20, 21].

Tablica 2. Zabiegi obróbki wykańczającej spieków [20, 21]

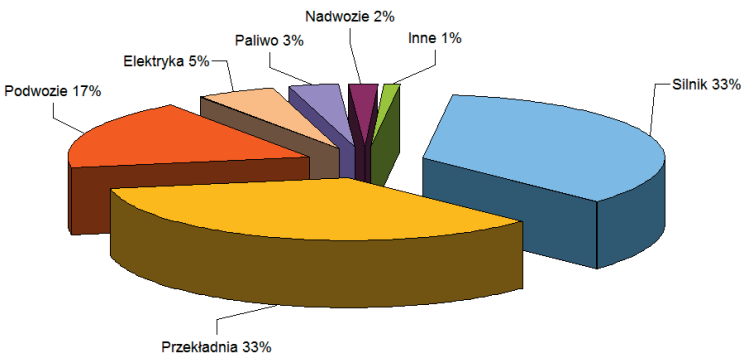
Zabieg obróbki wykańczającej		Cel zabiegu
1	2	3
Obróbka cieplna	Ulepszanie cieplne: austenitzowanie, hartowanie, odpuszczanie	Podwyższenie twardości i wytrzymałości
	Utwardzanie wydzieleniowe	Jak wyżej
	Utwardzanie powierzchniowe: • nawęglanie • węgloazotowanie • azotowanie • azotowanie plazmowe • azotonawęglanie • hartowanie indukcyjne	Podwyższenie twardości na powierzchni
	Wyżarzanie odprężające, odpuszczanie	Usunięcie naprężeń wewnętrznych
Infiltrowanie Impregnowanie Nasycanie	Infiltrowanie metalami	• Podwyższenie gęstości i wytrzymałości • Likwidacja przepuszczalności dla cieczy i gazów
	Impregnowanie polimerami	Likwidacja przepuszczalności dla cieczy i gazów
	Nasycanie olejem	Nadanie własności samosmarujących
Obróbka wiórowa, specjalne zabiegi obróbki wykańczającej	Obróbka skrawaniem	Gwintowanie, podcinanie, wiercenie otworów poprzecznych do kierunku prasowania
	Usuwanie gratu i czyszczenie: • bębnowanie • bębnowanie wibracyjne • piaskowanie • czyszczenie ultradźwiękami • czyszczenie elektrolityczne	• Usuwanie gratu • Usuwanie zanieczyszczeń, odtłuszczanie
	Spajanie elementów: • twarde lutowanie • spawanie • inne metody łączenia	Łączenie ze sobą różnych części spiekanych w celu uzyskania wyrobu o skomplikowanym kształcie
	Uzlachetnianie powierzchni: • śrutowanie • platerowanie bębnowe • elektroplaterowanie	• Utwardzenie powierzchni i podwyższenie odporności na zmęczenie • Poprawa wyglądu i odporności na korozję
	Ochrona przed korozją: • obróbka w parze wodnej • fosforowanie	Poprawa odporności na korozję i odporności na zużycie

2.4. Przykłady zastosowań wyrobów z proszków metali

Sektor motoryzacyjny stał się głównym przemysłowym odbiorcą elementów konstrukcyjnych wytwarzanych metodami metalurgii proszków, przede wszystkim w produkcji wieloseryjnej samochodów. Zgodnie z opinią Whittakera [22] pomimo, że istnieją różnice geograficzne, przy dominacji przemysłu motoryzacyjnego osiągającej najwyższy poziom w Japonii i nieco niższy w Ameryce Północnej, średnia zależność tego sektora od przemysłu metalurgii proszków w skali światowej kształtuje się obecnie w granicach od 75 do 80%. Udział elementów wykonanych metalurgią proszków w samochodach osobowych jest dość zróżnicowany, lecz szczególnie zastosowanie znajdują spieki w silnikach i skrzyniach biegów. Świadczą o tym dane statystyczne z Europy (rys. 10) i Japonii (rys. 11) gdzie udział tych części stanowi co najmniej 70% udziału elementów z proszków metali w całym przemyśle motoryzacyjnym.



Rysunek 10. Przykład zastosowań metalurgii proszków w europejskim przemyśle motoryzacyjnym [22]



Rysunek 11. Przykład zastosowań metalurgii proszków w japońskim przemyśle motoryzacyjnym [22]

Stosowanie proszków żelaza, miedzi i ich stopów do produkcji seryjnej wyrobów z proszku o wytrzymałości powyżej $R_m = 400$ MPa w znaczny sposób zaspokajają oczekiwania przemysłu. Dzięki nieustającym badaniom podwyższono wytrzymałość elementów ze stali nierdzewnych i żaroodpornych do wartości $R_m = 800$ MPa. Trwające badania opierają się na poprawieniu takich własności jak: uderzalność, twardość, odporność na ścieranie i korozję oraz wytrzymałość na rozciąganie. Elementy z proszków żelaza osiągają gęstość $7,0-7,7$ g/cm³. Technologia kształtowania pozwala na:

- wytwarzanie wyrobów z materiałów trudno topliwych, z pominięciem konieczności roztopienia składników, np. spiekane węgliki tytanu,
- łączenie materiałów, których nie można połączyć innymi metodami, np. ceramiki z metalami,
- łączenie elementów charakteryzujących się różnymi temperaturami topnienia oraz wzajemnie nierozpuszczających, np. pseudostopy diamentowo-metalowe,
- wykonywanie wyrobów o bardzo unikatowych właściwościach, np. implanty, samosmarujące łożyska nieporowate z udziałem grafitu lub miękkich metali niskostopowych,
- wytwarzanie materiałów porowatych o objętości porów sięgającej do 50% całkowitej objętości np. łożyska samosmarujące porowate wykonane ze stali niskowęglowej z domieszkami miedzi i grafitu lub brązów cynowych, filtry metaliczne ze stali, mosiądźów niklowych i brązów cynowych,
- dobór składu chemicznego, który decyduje w szerokim zakresie o przewodności elektrycznej i cieplnej oraz rozszerzalności cieplnej produktów np. styki elektryczne W-Cu, szczotki kolektorowe Cu-C,
- wytwarzanie materiałów magnetycznie twardych i miękkich,
- wytwarzanie wyrobów o skomplikowanych kształtach.

Współcześnie kształtowane wyroby z proszków metali znalazły szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu:

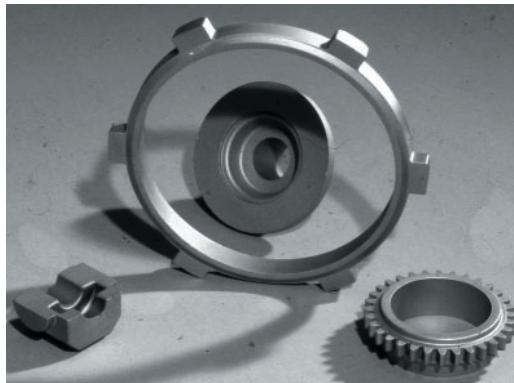
- motoryzacyjnym: łożyska samosmarne, krzywki popychaczy, elementy sprzęgieł, łożyska i gniazda zaworowe, koła zębate pomp olejowych, koła, pierścienie tłokowe, tłoczki hamulcowe, elementy amortyzatorów, elementy rozrządu łańcuchowego i pasowego, elementy rozruszników, synchronizatory i pierścienie synchronizacyjne, dźwignie i rozpieracze skrzyni

biegów, piasty tarcz sprzęgieł, elementy wentylatorów, alternatorów i wirników alternatorów, elementy aparatów zapłonowych, korbowody, dźwignie zaworowe, gniazda sprężyn zaworowych (rys. 12),

- maszynowym: łożyska ślizgowe, koła zębate, dźwignie, filtry, krzywki,
- budowlanym: zapadki zamków, łożyska klamek, klucze, segmenty zębate, tuleje, rolki,
- elektrotechnicznym: łożyska ślizgowe, elementy styczników, elektrody, pierścienie ślizgowe, nabiegunniki,
- precyzyjnym: małe łożyska ślizgowe, dźwignie, krzywki, pierścienie, tarcze krzywkowe,
- zbrojeniowym: elementy broni.

Części z proszków spiekanych żelaza znajdują zastosowanie również w przemyśle okuć budowlanych. Pozostałą produkcję stanowią części zastosowane w przemyśle precyzyjnym, obrabiarkowym, ciągnikowym, maszyn rolniczych, maszyn do szycia, maszyn budowlanych, włókienniczych, a także w elektrotechnice.

Prowadzone w Instytucie Obróbki Plastycznej badania w ramach licznych projektów międzynarodowych jak i prac własnych pozwoliły na opracowanie technologii wytwarzania części z proszków spiekanych o określonych cechach użytkowych metodami metalurgii proszków. Poniżej przedstawiona jest gama wyrobów stosowanych w różnych gałęziach przemysłu wytworzona dwiema różnymi technologiami.



Rysunek 12. Wyroby wytwarzane w procesach kucia proszków i walcowania powierzchniowego (koło zębate), głównie do przekładni samochodowych [22]

Technologia wytwarzania wyrobów z proszków spiekanych w jednej operacji kształtowania [23, 24]

W tablicy 3 podano charakterystykę i zastosowania wyrobów z proszków spiekanych wykonanych w jednej operacji kształtowania.

Technologia wytwarzania wyrobów z proszków spiekanych wykonywanych w dwóch operacjach kształtowania plastycznego

Na rysunku 14 pokazano przykłady wyrobów otrzymywanych według tej technologii. W tablicy 4 podano charakterystykę i zastosowanie wyrobów.

Tablica 3. Wyroby z proszków spiekanych wykonywane w jednej operacji kształtowania [badania własne]

Nazwa wyrobu	Charakterystyka wyrobu	Zastosowanie
Koło zębate (rys. 13 a)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy Mo Gęstość: 7,0 g/cm ³ Twardość 52 HRC	przemysł samochodowy
Pierścień krzywkowy (rys. 13 a)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy Mo Gęstość: 6,6 g/cm ³ Twardość 50 HRC	przemysł samochodowy
Pierścień dystansowy (rys. 13 b)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy CrM Gęstość: 6,8 g/cm ³ Twardość 68 HRA	przemysł samochodowy
Pierścień dystansowy fazowany (rys. 13 c)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy Mo Gęstość: 6,8 g/cm ³ Twardość 68 HRA	przemysł maszynowy
Matryca gnąca (rys. 13 d)	Mieszanka proszkowa na bazie proszku stali nierdzewnej 430L Gęstość: 6,8 g/cm ³ Twardość 60 HRA	przemysł spożywczy

a) koła zębate i pierścienie krzywkowe



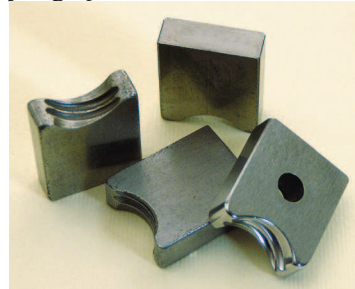
b) pierścienie dystansowe



c) pierścienie dystansowe fazowane



d) matryce gnące



Rysunek 13. Przykłady części z proszków spiekanych wykonywanych w jednej operacji kształtowania [23, 24] [badania własne]

a) kliny



b) pierścienie łożyskowe



c) tuleje dystansowe



d) pierścienie łożyskowe



Rysunek 14. Przykłady części z proszków spiekanych wykonywanych w dwóch operacjach kształtowania plastycznego [badania własne]

Tablica 4. Wyroby z proszków spiekanych wykonywane w dwóch operacjach kształtowania plastycznego [badania własne]

Nazwa wyrobu	Charakterystyka wyrobu	Zastosowanie
Klin (rys. 14 a)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy Mo Gęstość: 7,6 g/cm ³ Twardość 58 HRC	przemysł budowlany
Pierścień łożyskowy (rys. 14 b)	Mieszanka proszkowa na bazie Astalloy Mo Gęstość: 7,65 g/cm ³ Twardość 60-64 HRC	przemysł włókienniczy
Tuleja dystansowa (rys. 14 c)	Proszek na bazie Astalloy Mo Gęstość: 7,2 g/cm ³ Twardość 50 HRC	przemysł samochodowy
Pierścień łożyskowy (rys. 14 d)	Mieszanka proszkowa na bazie Distalloy AE Gęstość: 7,4 g/cm ³ Twardość 56 HRC	przemysł maszynowy

Stosowane technologie w metalurgii proszków dają szerokie możliwości wykonywania elementów o określonych własnościach mechanicznych, fizycznych i eksploatacyjnych.