

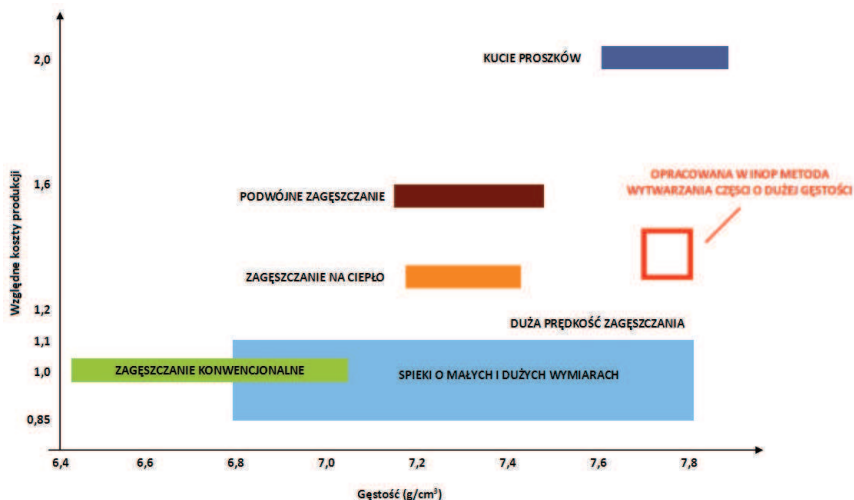
## 4. Wnioski wynikające z przeglądu literatury

Od wielu lat przemysł metalurgii proszków osiąga wysokie tempo rozwoju, ponieważ oferuje części o kształtach złożonych i coraz większych gabarytach oraz tańszych kosztach wytwarzania w porównaniu do materiałów litych. Badania rynku wykonane pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX wieku dowiodły, że potencjalny rynek zbytu wyrobów metalurgii proszków może być co najmniej trzykrotnie większy od obecnego, pod względem wytwarzanych części do silników samochodowych i skrzyni biegów, zwłaszcza w przypadku produkcji samochodów o podwyższonych wymaganiach dotyczących uzyskania wyższych osiągnięć [22, 53]. Należy podkreślić, że większość części wytwarzanych z materiałów proszkowych (około 70%) musi posiadać dobre właściwości ślizgowe i wysoką odporność na zużycie, ponieważ znajdują się w silnikach i układach przeniesienia napędu.

Głównym celem badań wykonywanych w obszarze metalurgii proszków, opisywanych w literaturze, było zwiększenie wytrzymałości i własności tribologicznych elementów konstrukcyjnych z proszków metali. Warto w tym miejscu wspomnieć o niektórych z nich, a mianowicie:

- opracowanie lepszych metod analizy konstrukcji w celu optymalnego wykorzystania produktów o „standardowej” gęstości/poziomie wytrzymałości;
- postępy w technikach wytwarzania stopów prowadzące do zwiększenia wytrzymałości proszków spiekanych;
- optymalizacja obróbki cieplnej części spiekanych, w tym wprowadzenie procesu utwardzania poprzez spiekanie;
- utwardzanie powierzchniowe części spiekanych, w tym opracowywanie gatunków proszków przystosowanych do optymalizacji reakcji na utwardzanie powierzchniowe;
- modyfikacja warstwy wierzchniej części spiekanych mająca na celu optymalizację ich właściwości tribologicznych.

Stwierdzono w wielu artykułach [22, 25-27, 53-56], że gęstość ma decydujący wpływ na praktycznie wszystkie własności mechaniczne a własności wytrzymałościowe elementów prasowanych i spiekanych rosną wraz z ich gęstością. Dlatego, w latach osiemdziesiątych XX wieku, uzyskanie najwyższej gęstości stało się najważniejszym celem rozwoju metalurgii proszków. Maksymalna gęstość możliwa do uzyskania metodami metalurgii proszków z pojedynczym prasowaniem/pojedynczym spiekaniem ograniczała się do  $6,7 \text{ g/cm}^3$ . Wyższe gęstości otrzymywano przy prasowaniu i dogęszczaniu na ciepło. Ze względu na rosnące koszty energii



*Rysunek 22. Koszty porównawcze różnych procesów dogęszczania w matrycy*

podjęto próby poszukiwania innych metod uzyskiwania części o gęstości materiału litego na zimno. Jednym z przykładów jest metoda wytwarzania części o wysokiej gęstości (rys. 22), opracowana i opatentowana w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu [28].

Przede wszystkim poszukiwano technologii, której zastosowanie pozwalałoby na zwiększenie gęstości na etapie początkowym. W przypadku złożonych części o cienkich przekrojach, ciśnienie dogęszczania kształtuje się na poziomie do około 600 MPa. Jednak w przypadku części o stałych geometriach, możliwy jest wzrost ciśnień kształtowania w procesie konwencjonalnego dogęszczania na zimno i kalibracji po spiekaniu wstępnym. Przykładem tego może być część typu „podkładka” opracowana z wykorzystaniem metody INOP, której współtwórcą jest Autorka (rys. 14b – rozdz. 2), na specjalne zamówienie klienta czeskiego ZKO Praga, produkującego łożyska do maszyn włókienniczych. W procesie prasowania uzyskano zieloną gęstość  $7,1 \text{ g/cm}^3$  przy ciśnieniu 700 MPa. W drugiej operacji dogęszczania (doprasowywania i kalibracji) uzyskano gęstość końcową ponad  $7,74 \text{ g/cm}^3$  ponownie przy ciśnieniu 700 MPa.

Jak wspomniano wcześniej, możliwe jest zwiększenie gęstości w wyrobie wytwarzanym metodami metalurgii proszków poprzez zastosowanie odpowiedniego procesu obróbki po spiekaniu. Pewien stopień dalszego zagęszczenia można uzyskać również dzięki operacji kalibrowania na zimno lub prasowania na zimno stosowanych powszechnie w konwencjonalnych procesach PM. Śrutowanie może również pełnić rolę operacji wykańczającej po spiekaniu służącej uzyskaniu lokalnego zagęszczenia w bardzo cienkiej warstwie powierzchniowej [53].

Najbardziej perspektywicznym obszarem zastosowania metody modyfikacji gęstości powierzchni są elementy łożysk kulkowych. W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu również stosuje się tą metodę do wytwarzania niektórych elementów ślizgowych, którą opracowano pod kierunkiem Autorki.

W ostatnich latach walcowaniem powierzchniowym spieków zajmuje się wiele ośrodków naukowych. Walcowanie powierzchniowe na zimno było początkowo stosowane przez takie firmy jak Hitachi Powdered Metals i Stackpole [53], wyłącznie w celu poprawy stykowej wytrzymałości zmęczeniowej pierścieni nośnych łożysk tocznych (wykonanych z materiałów proszkowych), później również w celu poprawy wytrzymałości zmęczeniowej zębów na zginanie i podwyższenia odporności na korozję wżerową. Dzięki walcowaniu wstępnie uzębionej przedkuwki wykonanej metodą metalurgii proszków, o kontrolowanej ilości nadmiaru materiału na profilu zęba, przy pomocy zazębiającego się narzędzia walcującego z zębami, można uzyskać lokalne zagęszczenie w warstwach powierzchniowych wzdłuż całego profilu zęba.

Przy tak zagęszczonej powierzchni, część wytwarzaną metodami metalurgii proszków można poddać w dalszej kolejności nawęglaniu w sposób analogiczny do koła zębatego wykonanego z materiału litego. Odpowiedni dobór mieszanki proszkowej i początkowy poziom gęstości „rdzenia” pozwalają osiągnąć porównywalne do obrobionej i azotonawęglonej stali, zarówno pod względem wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie i powierzchniowej wytrzymałości zmęczeniowej. Właściwości tribologiczne należy jednak poprawić modyfikując powierzchnię poprzez impregnowanie i smarowanie powierzchni smarem stałym w celu zmniejszenia współczynnika tarcia.

Czynnikiem ograniczającym w największym stopniu możliwą do uzyskania gęstość początkową, bez względu na to, czy zagęszczanie i kalibrowanie (dokuwanie, dogęszczanie) są głównymi operacjami procesu metalurgii proszków, jest udział objętościowy środka smarnego dodawanego do mieszanki o stosunkowo niskiej gęstości. Często tym środkiem jest grafit [56]. Opracowanie niezawodnego sposobu bezpośredniego smarowania ścian matrycy (DWL) jest od dawna celem badań licznych ośrodków naukowych. W ostatnich latach opracowano system umożliwiający smarowanie ścian matrycy podczas operacji dogęszczania. System ten obejmuje wprowadzenie cząstek stałych smaru proszkowego z warstwy fluidalnej za pomocą pistoletu natryskowego i bloku tłocznego, zamontowanych w komorze fluidyzacyjnej. Gdy blok tłoczny przesuwają się do góry matrycy, mieszanka powietrza ze smarem jest tłoczona przez określony czas i przyciągana do ścian gniazda matrycy za pomocą sił elektrostatycznych.

W przypadku produkcji części stosunkowo prostych, system ten pozwala całkowicie wyeliminować domieszki smarów. W przypadku bardziej skomplikowanych, wielopoziomowych części, gdzie jest wiele kształtujących wyrób powierzchni oprzyrządowania, ten system bywa zawodny. Obecnie uważa się, że najbardziej optymalnym kierunkiem badań podawania smaru na ściany matrycy są metody wykorzystujące siarczkowe struktury grafenopodobne np. MoS<sub>2</sub>.

Technologie stosowane w metalurgii proszków dają szerokie możliwości wykonywania elementów o określonych własnościach mechanicznych, fizycznych i eksploatacyjnych. W zależności od składu chemicznego oraz granulacji ziarna, wytwarzane wyroby z proszków metali mogą być stosowane do pracy przy różnych obciążeniach powstających podczas eksploatacji.

Istotną zaletą wciąż wprowadzanych technologii jest niewielkie jednostkowe zużycie energii przy produkcji seryjnej i masowej. Procesy charakteryzują się tym, że występuje prawie całkowite wykorzystanie materiału potrzebnego do produkcji. Dzięki wykonywaniu dość złożonych kształtów wyrobu, bez straty materiału, technologia ta w znaczny sposób minimalizuje koszty wytwarzania, zwłaszcza koszty materiałowe.

Jednocześnie nowe, o wyższej dokładności, technologie prasowania proszków z minimalną zawartością plastyfikatorów z powodzeniem mogą zastąpić technologie dotychczas stosowane. Polepsza to dokładność wykonania części z jednoczesnym podwyższeniem gęstości wyrobów, uproszcza technologię spiekania i w końcowym efekcie podwyższy wydajność i konkurencyjność tych wyrobów na rynku. Efektywność produkcji wielko seryjnej wyrobów z proszków spiekanych przewyższa znacznie efektywność produkcji części wykonanych tradycyjnymi technologiami ubytkowymi. Wysokowydajne technologie kształtowania metodami obróbki plastycznej części z materiałów proszkowych pozwalają na zmniejszenie ilości operacji koniecznych do wytworzenia gotowego wyrobu w porównaniu z ilością operacji przy stosowaniu tradycyjnych technologii, a więc uzyskuje się znacznie niższą pracochłonność produkowanych części.

Przedstawione możliwości opisują zalety technologii kształtowania wyrobów z materiałów proszkowych, ale jak w każdej technologii, występują także pewne ograniczenia wpływające negatywnie na gotowy element. Do najważniejszych z nich zaliczamy:

- proszki metali i stopów o wysokim powinowactwie do tlenu lub o ekstremalnie wysokiej czystości można obrabiać tylko dużym nakładem kosztów,
- urządzenia do wytwarzania proszków są bardzo drogie,

- trudności w całkowitym wyeliminowaniu porów, które powodują obniżenie wytrzymałości gotowego wyrobu,
- problem z uzyskaniem równomiernego rozkładu ciśnienia w całej objętości prasowanego proszku podczas wytwarzania wyrobów o złożonych kształtach, co prowadzi do niejednorodnego rozkładu właściwości w gotowym wyrobie,
- najczęściej stosowane zagęszczanie proszku przez prasowanie w matrycach wiąże się ze znacznymi ograniczeniami odnoszącymi się do kształtu i wielkości wyrobów,
- metody łączenia ze sobą spieków nie są jeszcze dostatecznie opracowane.

Mimo występowania pewnych ograniczeń, metalurgia proszków w znaczny sposób przewyższa inne metody wytwarzania. Wytwarzanie tą technologią umożliwia wykorzystanie w 95% materiału przeznaczonego na wykonanie elementu. W klasycznej metodzie obróbki skrawaniem poziom zużycia materiału wynosi zaledwie od 40-50%. Na podstawie przeprowadzonych porównań, technologię wytwarzania elementów za pomocą metalurgii proszków możemy nazwać bezodpadową.

Drugim czynnikiem wpływającym na promowanie tej technologii jest niski stopień zużycia energii. Wynosi on około 29 MJ na 1 kg gotowego wyrobu, w skład wchodzi procesy wytwarzania rudy aż do wytworzenia spiekanej części. Porównując konwencjonalne metody zawierające wytop stali, przeróbkę plastyczną wlewka i obróbkę skrawaniem, wynosi on 66-82 MJ na 1 kg gotowego wyrobu.

Analiza literaturowa wykazała, że zastosowanie siarczków smarów stałych  $\text{MoS}_2$  i  $\text{WS}_2$  do wytwarzania nowego materiału na łożyska samosmarne jest perspektywiczną technologią. Wzrost twardości w połączeniu z niskim współczynnikiem tarcia wydaje się być głównym sposobem optymalizacji trwałości proszkowych materiałów samosmarnych.