



Fakulta zemědělská  
a technologická  
Faculty of Agriculture  
and Technology

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

# JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

## FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra techniky a kybernetiky

### **Bakalářská práce**

Využití výroby materiálů práškovou metalurgií pro aplikaci  
v dopravní a manipulační technice-rešeršní práce

Autor práce: Martin Kůrka

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Zoubek

České Budějovice  
2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 17.4. 2024 .....

Kůrka  
.....  
Podpis



## **Abstrakt**

Tato rešeršní bakalářská práce se zabývá technologickým postupem metody práškové metalurgie a přípravou práškových materiálů pro aplikace v dopravní a manipulační technice. První část se zaměřuje na sled jednotlivých výrobních operací v podobě přípravy, zpracování, zhutnění, slinování a konečných úprav pro získání finálního výrobku o požadovaných vlastnostech. Druhá část poskytuje přehled konkrétních aplikací a současných trendů ve výrobě materiálů práškové metalurgie. Oblast zahrnuje komponenty motorových ústrojí, řezné materiály, práškově vyvíjené elektrické kontakty, magnetické a porézní materiály. U elektrických kontaktních materiálů se jedná o slitiny na bázi stříbra a mědi. Dalšími popisovanými materiály jsou výchozí hliníkový matricový kompozit (AMC) pro magnetické materiály a slitina Cu-Sn-Zn-Gr pro samomazná ložiska.

**Klíčová slova:** Progresivní technologický postup, flexibilita zpracování, kombinace specifických vlastností

## **Abstract**

This research work deals with the technological process of powder metallurgy and preparation of powder materials for applications in transport and handling technology. The first part focuses on the sequence of individual production operations in the form of preparation, processing, compaction, sintering and final finishing to obtain a final product with the desired properties. The second part provides an overview of specific applications and current trends in powder metallurgy. It covers areas such as engine components, cutting materials, powdered electrical contacts, magnetic and porous materials. In the case of materials for electrical contacts, these include silver and copper-based alloys. Other materials described are aluminium matrix composite (AMC) for magnetic materials and Cu-Sn-Zn-Gr alloy for self-lubricating bearings.

**Keywords:** Progressive technological process, processing flexibility, combination of specific properties

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu Mgr. Tomáši Zoubkovi za odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly s vypracováním této bakalářské práce.

# Obsah

Úvod.....	7
1 Prášková metalurgie.....	8
1.1 Způsoby a příprava výroby práškových směsí.....	11
1.2 Mechanická metoda .....	11
1.2.1 Mletí .....	11
1.2.2 Velikost částic .....	12
1.2.3 Drcení.....	15
1.3 Elektrochemická metoda.....	17
1.4 Chemická metoda.....	19
2 Úprava a třídění prášku .....	20
2.1 Míchání prášku.....	20
2.2 Třídění .....	20
2.3 Magnetické odlučování .....	21
2.4 Granulace .....	22
3 Zhutňování .....	23
3.1 Tlakové zhutňování .....	24
3.1.1 Lisování v matricích.....	24
3.1.2 Válcování .....	26
3.1.3 Injekční vstřikování kovů (MIM).....	28
3.1.4 Izostatické zhutňování.....	30
4 Slinování .....	32
4.1 Slinovací pece .....	33
4.2 Slinovací atmosféra.....	34
4.3 Slinovací čas.....	35
5 Konečná úprava povrchu.....	36
5.1 Proces parní úpravy.....	36

5.2	Nauhličení .....	37
5.3	Obrábění.....	37
5.4	Odstraňování otřepů.....	38
5.5	Brokování.....	38
6	Vývoj a využití práškových směsí a materiálů .....	40
6.1	Aplikace práškových směsí v dopravní a manipulační technice.....	40
6.1.1	Převodové ústrojí .....	40
6.1.2	Motorová část.....	41
6.1.3	Materiály .....	42
6.2	Řezné materiály.....	44
6.3	Slinuté karbidy .....	45
6.3.1	Výroba slinutých karbidů.....	45
6.3.2	Rozdělení slinutých karbidů.....	46
6.4	Povlakované slinuté karbidy .....	50
6.4.1	Praktické použití: .....	51
6.5	Samomazná ložiska.....	53
6.6	Elektrické kontakty .....	55
6.7	Magnetické materiály.....	58
	Závěr .....	60
	Seznam použité literatury.....	62
	Seznam obrázků .....	76
	Seznam tabulek .....	78

---

## Úvod

Cílem této práce je poskytnout přehled současného stavu využití technologie práškové metalurgie (PM) pro výrobu materiálů využívaných v dopravní a manipulační technice, poskytnout náhled na vývoj těchto materiálů a na vybraných příkladech demonstrovat používání vybraných materiálů vyrobených práškovou metalurgií v konstrukci dopravní a manipulační techniky.

Prášková metalurgie je progresivní technologický postup výroby o široké flexibilitě zpracování, geometrii a úpravě chemických vlastností způsobené variabilním poměrovým zastoupením přidávaných práškových materiálů (Upadhyaya, 2002). Rozdílná teplota tavení a kombinace specifických vlastností přidávaných kovových i nekovových látek jsou charakteristické pro výrobu PM, které by běžnými konvenčními způsoby (slévárenství, kování) byly jen obtížně zpracovatelné (Chang a Zhao, 2013).

Nízká cena, vysoká čistota tvaru hotového výrobku, schopnost recyklace a masová výroba jsou aspekty, které jsou podmiňující pro budoucí vývoj PM. Pallini a Carvalho (2006) dodávají, že prášková metalurgie je proces s vysokou mírou využití suroviny dosahující 95 % se spotřebou energie 29 MJ na zpracovávaný kg, na druhé straně obráběcí procesy vykazují ztráty až 50 % spotřeby suroviny a až 82 MJ energie na zpracovávaný kg.

Mezi hlavní produktové oblasti se řadí automobilový, dopravní a manipulační průmysl, ve kterém hrají komponenty PM zásadní roli. Mimo konstrukční mechanicky namáhané součásti na bázi železa tvořící převážnou většinu výroby PM dochází k vývoji na nárůstu kovů a materiálů vyznačující se nízkou hustotou. Jedná se zejména o měď, bronz, titan či hliník (Dowson a Whittaker, 2008). Ve srovnání s tradičními procesy výroby umožňuje metoda PM vyrábět díly se stejnými či lepšími vlastnostmi, včetně schopnosti řídit stupeň poréznosti, schopnosti legovat kompozity a kovy, které by byli nerozpustné v kapalném stavu či zpracovávat žáruvzdorné materiály v podobě wolframu, niobu či molybdenu, vyznačující se vysokým bodem tání (German, 1998).

---

# 1 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie je nauka zabývající se výrobou práškových směsí z kovů, nekovů, jejich slitin a sloučenin. Samotný proces spočívá v lisování práškové směsi za současně přeměny v pevná tělesa, která jsou následně slinována při teplotě nižší, než je teplota tání daného materiálu. Účelem slinování je docílit u konkrétního výrobku požadovaných vlastností, zejména pevnosti a tvrdosti. Od klasické metody tavení se prášková metalurgie liší výchozími materiály ve formě prášku a výrobním postupem, při kterém dostávají výrobky konečný tvar, které není nutné dále obrábět (Koritta, 1951).

První zmínky o tomto procesu jsou datovány již do doby 3000 př. n. l., kdy staří Egypťané využívali tuto metodu k výrobě nejrůznějších nástrojů a zdobných prvků. Raný postup spočíval v zahřívání oxidu železitého dřevěným uhlím za soustavného přivádění vzduchu z kožených měchů. Takto zredukované železo se následně kulo údery kladiv, čímž se jednotlivé částice spojily dohromady a vytvořily jednotný celek. I přes velký obsah nekovových příměsí, vykazovala převážná část výrobků té doby pozoruhodnou pevnost (Carpenter a Robertson, 1930). Významným dochovaným předmětem práškové metalurgie z dob starověku je Dilliský sloup, viz obrázek 1.1 vyhotoven kolem roku 300 n.l. Sloup je zhotoven z více než 6 tun houbového železa. Postupem času a s příchodem prvních postupů tavení železa a mědi se výrobní proces práškové metalurgie dostává do pozadí a po mnoho staletí se stává neaktivní. Výjimku tvoří některé odlehlé a vzdálené oblasti (Thummler a Oberacker, 1993).

Do popředí se dostává na počátku 19. století, kdy byly zaznamenány první pokusy o využití kovů o vysokém bodu tání, zejména platiny a iridia. Postup spočíval ve výrobě platinového prášku či platinové houby, které byly lisovány a následně vypáleny. Prvním komerčním výrobkem vysokoteplotního spékání dříve stlačeného práškového materiálu byly platinové rube, uvedené v Rusku na trh jako platidlo v roce 1826 (Sobolewskoy, 1834). Rovněž významným objevem z poloviny 19. století se stává vynález zubních výplní z amalgámu, uhnětené ze slitiny stříbra a rtuti (Koritta, 1951). Do vývoje práškové metalurgie musíme rovněž započítat nově vyvinuté metody z let 1878-1898 pro výrobu uhlíkatých vláken vytlačováním a následným spékáním uhlíkatých materiálů, spolu s komerčním zpracováním a využitím osmia, zirkonia, tantalu, vanadu a wolframu jako vláken pro první elektrické žárovky. Z počátku, mezi léty 1898 až 1900 byla krátce využívána osmiová vlákna jejíž proces výroby blíže popisuje Auer von Welsbach (German, 1984)

---

Proces osmiových vláken spočívá v chemickém vysrážení prášku a vytvoření směsi sloužící jako pojivo. Zhotovená směs byla následně aplikována formou nástřiku na jemné matrice. Tímto postupem se vytvořila jemná vlákna, vypalovaná v ochranné atmosféře za účelem odpaření pojiva a spékání kovových částic do souvislého kovového drátu. Lee (1998) dodává, že osmium posléze nahradil tantal, jehož zpracování bylo obdobné s tím rozdílem, aby se stal tvárným a mohl být vytvarován do tvaru žárovkového vlákna, musel být očištěn vakuovou úpravou. Téměř shodný princip se používal i u dalších dříve zmiňovaných materiálů. Společným nedostatkem ale byla nedostatečná tažnost. Snahy k jejímu odstranění vedly v přidání příměsi 2 až 3 % niklu, jeho slisování do požadovaného tvaru a spékání při teplotě mírně pod bodem tání wolframu. Takto obohacená vlákna již vykazovala dostatečnou tažnost. V samotném závěru byl nikl odstraněn vakuově tepelným zpracováním o vysoké teplotě. (Smith, 1942)

Elektrotechnický vývoj, podpořený nově vzniklými válečnými konflikty, zejména obdobím druhé světové války, položil základy novodobé práškové metalurgie. Zkušenosti a postupy při slinování a lisování wolframového a molybdenového prášku se staly krokem k výrobě řezných destiček, lisovaných a spékaných karbidů či materiálů pro diamantové nástroje (Koritta, 1951). V druhoválečném období byla metalurgie uplatněna při výrobě a konstrukci hnacích pásů a vojenských děl. V návaznosti na automobilový průmysl se v padesátých letech stalo hlavním výrobkem práškové metalurgie samomazné ložisko. Samomazné ložisko tvořené kombinací cínového a měďného prášku, vykazovalo porézní strukturu, umožňující zadržovat a vázat ve svých pórech mazivový olej. Další zastoupení tvoří zejména ozubená kola a vačkové hřídele. Vývoj rovněž pronikl i do oblasti žáruvzdorných a reaktivních kovů (wolfram, molybden, titan, niob) a jaderných kovů jako beryllium, uran či zirkonium (Lee, 1998).

70. léta dvacátého století přináší vývoj v oblasti výroby cermetů, založené na bázi speciálních slitin ve spojení s karbidy, nitridy či jejich směsných fází. Kromě cermetů, se prášková metalurgie zaměřuje na výrobu magnetických a elektrických materiálů, komponent a dílů vytvářející přímou konkurenci výroby konvenčním metodám obrábění a odlévání. Prášková metalurgie rovněž nalézá uplatnění vlivem své schopnosti výroby materiálů s rozdílnými teplotami, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi a omezenou rozpustností v tekutém stavu, zejména ve strojírenském, leteckém

---

a automobilovém průmyslu. Ve stále větším měřítku je zastoupená v lékařství, biomedicínském inženýrství a mnohých dalších odvětvích (Skotnicová a Kursá, 2013)



**Obrázek 1.1: Sloup v Dillí (neveda.cz, 2021)**

Podmíněné užití práškové metalurgie se odvíjí od schopnosti zpracovávat materiály s odlišnými mechanickými a fyzikálními vlastnosti, které by v porovnání s konvenčními způsoby výroby a obrábění nebyly možné. Využívá se:

- Při zpracování tvárných kovů o vysokém bodu tavení, u kterých je nemožnost odlévání či tavení, aniž by nenastaly nežádoucí reakce například s pecní vyzdívkou (wolfram, tantal).
- U kovů s vysokým bodem tání, u kterých je v kapalném stavu výrazné riziko pohlcování okolních plynů.
- Výrobě látek s dokonale vyplněnou dutinovou strukturou rtuť. Příkladem jsou zubní amalgámy.
- Při spojení několika kovů při zachování charakteristických vlastností jednotlivých složek (diamantové slitiny, kovový hliník).
- U samomazných ložisek či kovových filtrů, u kterých je podmiňující pórovitost povrchu umožňující absorpci dalších látek (olej).
- Při spojení tvárných kovových vazných látek (slnuté karbidy) s vysokotavitelnými tvrdými látkami (karbidy) (Koritta, 1951)



---

Uplatnění práškové metalurgie lze s výhodou využít k výrobě čistých až nejčistších kovů. Podmiňujícím krokem je odstranění oksidování během tavení a dodržení stejnoměrnosti vsázky ovlivňující fyzikální a technologické vlastnosti. Dalším případem je situace, kdy se obrábění stává ztrátové. Typickými představiteli jsou hromadně vyráběné součástky ze spékaného železa, bronzu nebo oceli. Rovněž je práškové metalurgie použito při nevhodné slévateľnosti, obtížném kování a válcování, či nemožnosti jakéhokoliv způsobů obrábění. Typickým příkladem jsou trvalé permanentní magnety. Posledním případem je stav, kdy odlitky není možné opracovávat jinak než broušením (Koritta, 1951).

## **1.1 Způsoby a příprava výroby práškových směsí**

Pomocí jedné či kombinací více metod lze docílit výroby prášku z široké škály kovových a nekovových materiálů. Zvolená metoda se odvíjí od typu materiálu, konečné struktury výrobku a požadovaných vlastností (Upadhyaya, 2002).

U výroby prášků jsou nejvíce uplatňovány následující metody

- Mechanická metoda
- Fyzikálně chemická metoda
- Chemická metoda
- Elektro-chemická metoda

## **1.2 Mechanická metoda**

Redukce velikosti materiálů prováděné procesy drcení a mletí se řadí mezi nejstarší způsoby výroby. Mezi stěžejní rozmělnovací mechanické procesy se řadí tlak, stříh, otěr a náraz (Skotnicová a Kursá, 2013).

### **1.2.1 Mletí**

Proces je založen na působení a přenosu mechanické energie, vyvolávající v materiálu mechanické napětí vedoucí k jeho porušení (Skotnicová a Kursá, 2013). Velikostní zmenšování v tuhém stavu vychází z lomové mechaniky způsobující v následném sledu nukleaci trhlin, jejich šíření, lom a tvorbu nových povrchů (Thummler a Oberacker, 1993). Nově vytvořené lomy za současného zvětšení měrné plochy částic mají za následek snížení povrchové drsnosti a zvýšení kapilárních sil v objemu prášku nazývané jako geometrická aktivita. Důležitým aspektem může být nerovnováha přitažlivých sil stavebních prvků kovových materiálů, vedoucí k výrazným poruchám jejich

---

struktury, jejichž defekty jsou umocňovány se zmenšující se velikostí prášku (Skotnicová a Kurša, 2013).

Další snížení velikosti částic může dojít za předpokladu částečné přeměny kinetické energie v mlecím agregátu na mechanické napětí v materiálu, který je dezintegrován. Síly tímto procesem vyvolané způsobují tlaková a smyková napětí, aplikovaná jako rázová nebo pomalu působící napětí prostřednictvím mlecích těles za současné rotace nádoby, vibrací či rotujících ramen atritoru. V cementářském průmyslu je proces zmenšování materiálu doprovázen intenzivními míchacími prostředky. V práškové metalurgii je dezintegrace méně účinná a částečně omezená vlivem vysoké plasticity kovových materiálů. Účinky rozdužení se využívají zejména pro feroslitiny a intermetalické sloučeniny. Do skupiny mechanických dezintegračních procesů se řadí i vysokoenergetické mletí způsobující silné křehnutí materiálu. Toto aspektu lze s výhodou využít při procesu mechanického legování (Thummler a Oberacker, 1993).

### **1.2.2 Velikost částic**

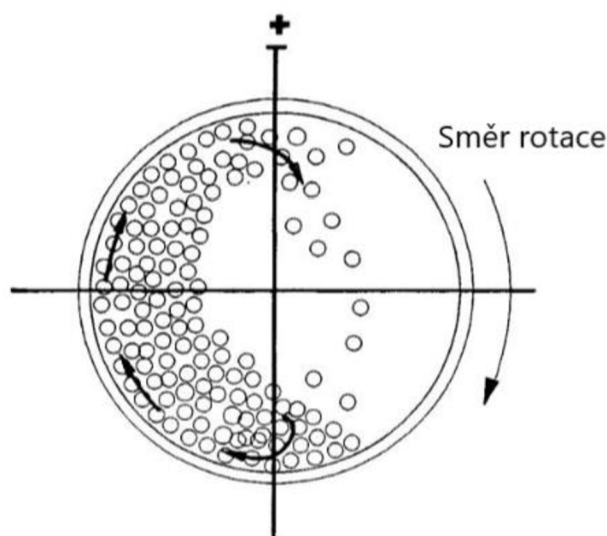
Hranice minimální dosažitelné velikosti částic se odvíjí dle materiálu a podmínek mechanického procesu. Zkoumáním a analýzou rovnovážných podmínek mletí u kovových a nekovových prášků se minimální rozměry částic pohybují v rozmezí mezi 0,1 až 1 mikrometru. Limitujícím aspektem je vazebná síla, která není v objemu tuhého materiálu konstantní. Konstantním se stává pouze vazebné spektrum, v závislosti na typu a koncentraci defektů ve velikosti makro, mikro nebo atomovém měřítku. Proto lze mechanickými prostředky zničit pouze jen slabší část vazebného spektra. Případné další zmenšování částic se stává obtížnější, z důvodu složité aplikovatelnosti smykového napětí k dosažení dalšího lomu na každou samostatnou částici. Mále částice se rovněž od větších částic liší vyšší povrchovou aktivitou zvyšující schopnost opětovného svaření (Thummler a Oberacker, 1993)

Samotná účinnost rozdužovacích a mlecích zařízení je z velké části ovlivněna zdroji takzvané ztracené energie. Tyto zdroje zahrnují elastickou a plastickou deformaci částic, kinetickou energii při pohybu částic, energii nárazu a tření. Primární příčina ztracené energie je způsobená tvorbou tepla. (Thummler a Oberacker, 1993).

---

Základním a nejjednodušším zařízením pro mletí je kulový mlýn, viz obrázek 1.2, jehož princip je založen na mechanických nárazech tvrdých mlecích těles při současném rotačním pohybu bubnu. Mlecí tělesa tvoří převážně ocelové koulečky či válečky, jejichž velikost se pohybuje v rozmezí 12–16 mm (Thummler a Oberacker, 1993). Jejich velikost a množství v objemu samotné nádoby je dána na základě vlastní tvrdosti, mlecí schopnosti a požadované hrubosti prášku. Mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu prášku se řadí tvrdokovy, korozivzdorné a nelegované oceli, porcelán, keramika a mnoho dalších (Skotnicová a Kursá, 2013).

Druhý používaný typ je vibrační mlýn, jehož konstrukce nádoby je podstatě totožná s konstrukcí kulového mlýnu. Rozdíl spočívá v uchycení nádoby pomocí speciálních ocelových pružin. Amplituda a frekvence vibrací je regulována nastavením pružin a vibračního mechanismu. Obvykle jsou využívány pro krátký časový interval mletí. Uplatnění nalézají ve vývoji a výzkumu pro redukci velikosti organických a anorganických produktů (Thummler a Oberacker, 1993).



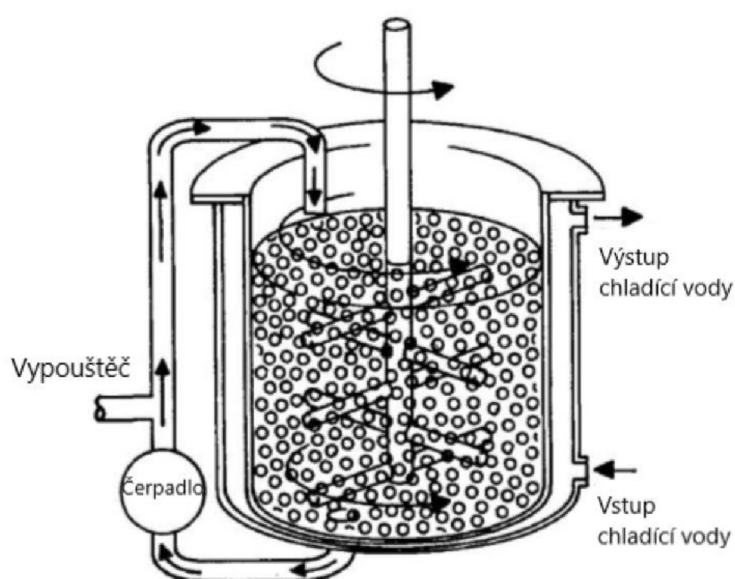
**Obrázek 1.2: Kulový mlýn a princip pohybu mlecích těles (Thummler a Oberacker, 1993)**

Atritor, viz obrázek 1.3, je konstrukčně uzpůsobený mlýn pro intenzivní mletí. Mlecí tělesa jsou spolu s melivem uváděna do pohybu prostřednictvím míchacích ramen na hřídeli a oběhovým čerpadlem zastávající funkci cirkulace kapaliny s práškem. Deintegrace vzniká vzájemným třením mezi mlecími tělesy a melivem. Proces probíhá za studena či za mokra, kdy u mokrého procesu je používána voda nebo organické kapaliny. Za předpokladu plného výrobního procesu je proces plnění řešen kontinuálně zesponu nádoby za současného vykládání mletého prášku ze shora. Systém lze vybavit

---

uzavřeným okruhem a recyklačním zařízením. Pro suché mletí je atritor vybaven přívodem inertního plynu vhodného pro materiály se speciální oxidační citlivostí jako jsou magnetické prášky z Co (Thummler a Oberacker, 1993).

Tento způsob mletí je neefektivní a méně vhodný pro tvárné kovy, u kterých dochází k obtížnější dezintegraci za současného rizika jejich spojování. Samotné rozmělnění částic a energie k tomu potřebná se mění v závislosti na relativní rozměrové změně částic v průběhu zjemňování. Mlecí proces je v neposlední řadě dále ovlivněn výkonností samotného stroje, mlecími tělesy, rychlostí rotačního pohybu nádoby a zvoleného mlecího média (Skotnicová a Kursá, 2013).



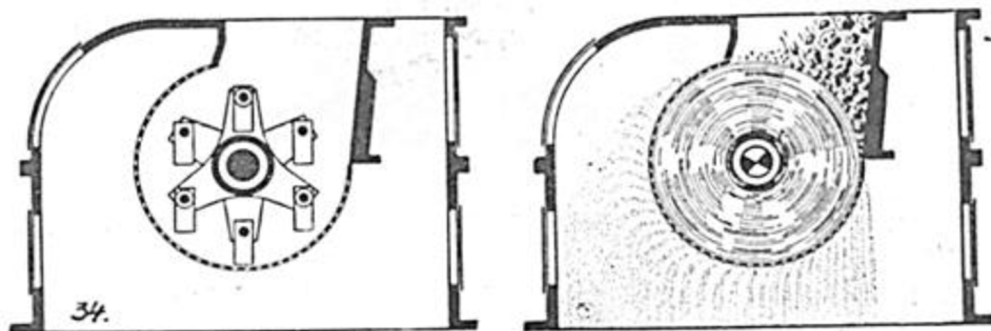
**Obrázek 1.3: Atritor, mokrý proces mletí (Thummler a Oberacker, 1993)**

Suché a mokré atritory se využívají k výrobě vápence, oxidů, anorganických pigmentů a průmyslových tvrdých kovů. Rovněž se využívají k výrobě slinutých karbidů (WC-Co), u kterých dochází k určitému stupni potahování křehkého karbidu částicemi tvárného kobaltu během mletí a míchání, žádoucí pro další pracování (Thummler a Oberacker, 1993).

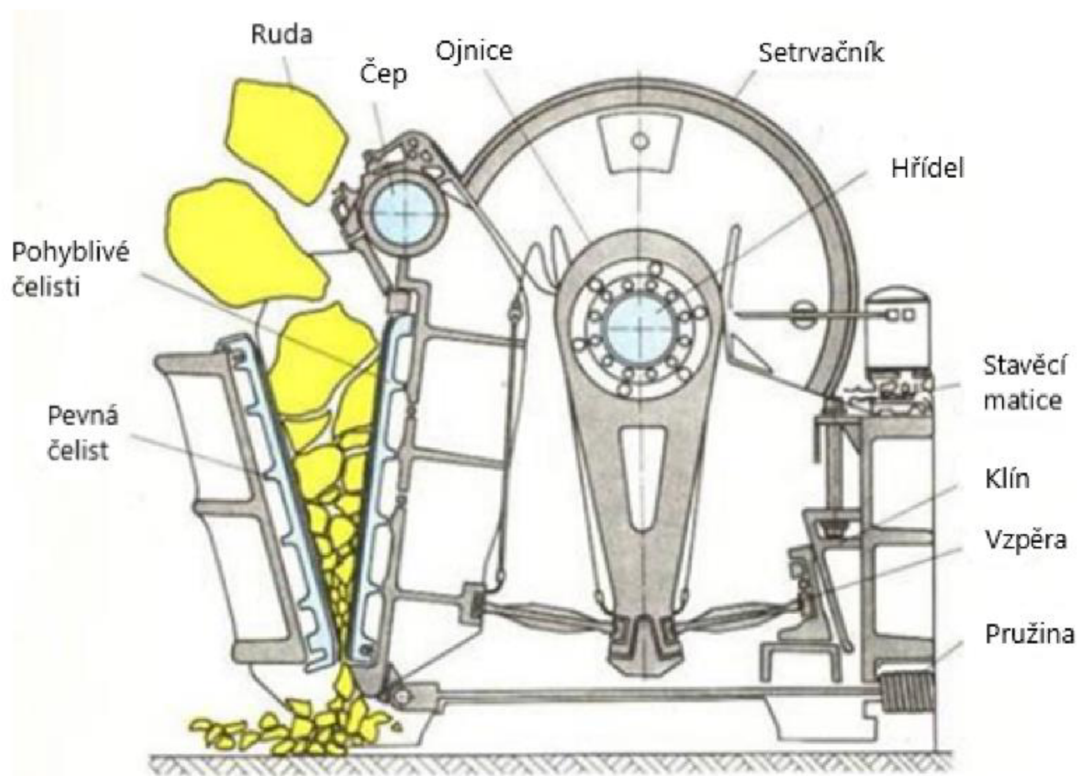
### 1.2.3 Drcení

V práškové metalurgii je používáno především kladivových a čelistových drtičů. Využívány jsou převážně pro drcení spečených kovových materiálů vznikající při elektrolytických a redukčních procesech (Skotnicová a Kursa, 2013).

Princip kladivových drtičů, viz obrázek 1.4, je založen na rychle se otáčejícím rotoru s uloženými kladivy umístěného proti dopadové stěně. Kladiva svým pohybem a opakovanými úderů drtí materiál. Čelistový drtič, uvedený na obrázku 1.5, je složen z pevné a pohyblivé čelisti. Slouží k získání hrubého prášku, který následně putuje do konečné fáze mletí prostřednictvím některého z typů používaných mlynů (Konvička, 2015)



Obrázek 1.4: Kladivový drtič (Podzemi.solvayovylomy.cz, 2015)



Obrázek 1.5: Čelistový drtič (Kálecký, 2016)

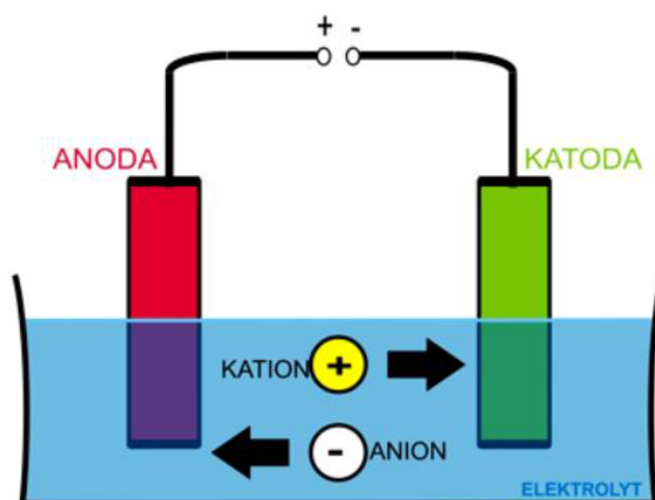
**Tabulka 1.1: Přehled materiálů používaných při mechanické metodě výroby prášku (prvky.com, 2021)**

Název	Značka	Charakteristické vlastnosti	Výskyt
Chrom	<b>Cr</b>	Bod tání: 1857 °C, protonové číslo: 24, přechodný prvek, nejtvrší kov podle Mohsovi stupnice, legující prvek ovlivňující prokalitelnost, tvrdost a pevnost.	V přírodě směsí 4 stabilních izotopů. Nejčastěji v rudách Chronit, Krokoit atd.
Mangan	<b>Mn</b>	Bod tání: 1244 °C, protonové číslo: 25, přechodný kov, legující prvek zlepšující u ocelí pevnost v tahu a tvrdost. Nevýhoda vysoká afinita ke kyslíku.	Známo přibližně 300 minerálů s obsahem manganu, výskyt současně spojený s rudami železa
Železo	<b>Fe</b>	Bod tání: 1539 °C, protonové číslo: 26, přechodný kov, středně tvrdý feromagnetický, tech. železo nejdůležitější konstrukční materiál a technický kov.	2 nejrozšířenější kov, přírodní železo tvořeno směsí 4 izotopů. Nejdůležitější žel. rudy jsou Magnetit, Hematit, Pyrrhotin atd.
Nikl	<b>Ni</b>	Bod tání: 1453 °C, protonové číslo: 28, přechodný kov, zlepšuje prokalitelnost, využití u speciálních slitin, tažný, s feromagnetickými vlastnostmi.	Výskyt v ryzí formě či v rudách doprovázený kobaltem Přírodní nikl je směsí 5 stabilních izotopů
Hliník	<b>Al</b>	Bod tání: 660 °C, protonové číslo 13, čistý kov či ve slitinách využívaný k výrobě el. vodičů a některých kovů.	Ryží formě se nevyskytuje. Rozptýlený v zemské kůře, obsah činí 7,47 % hmot.
Beryllium	<b>Be</b>	Bod tání: 1287 °C, protonové číslo: 4, stálý na suchém vzduchu, součást některých slitin, zejména pro jadernou techniku a konstrukci jaderných zbraní.	Přírodní Beryllium je tvořeno 1 stabilním izotopem číslo 9. Nejnámějšími minerály Beryllia jsou Beryl a Chrysoberyl
Hliník	<b>Al</b>	Bod tání: 660 °C, protonové číslo 13, čistý kov či ve slitinách využívaný k výrobě el. vodičů a některých kovů.	Ryží formě se nevyskytuje. Rozptýlený v zemské kůře, obsah činí 7,47 % hmot.

### 1.3 Elektrochemická metoda

Jedná se o proces založený na principu elektrolýzy, při kterém vlivem katodového proudu dochází k neutralizaci kovových iontů. Elektrolytické prostředí, v němž elektrolýza probíhá, tvoří roztavené soli či vodné roztoky. První skupinu představují vysoce reaktivní kovy (Be, Nd, Ta), vytvářející vysoce stabilní oxidy, ukládající se v elektrolytu roztavené soli. Vodné roztoky se uplatňují při přípravě kovů s nízkou afinitou ke kyslíku (Fe, Co, Ni, Cu) (Thummler a Oberacker, 1993).

Proces probíhá za působení stejnosměrného elektrického proudu na taveninu či na roztok elektrolytu, viz obrázek 1.6. Pohyb elektronů je usměrňován prostřednictvím katodové a anodové elektrody (edu.techmania.cz, 2007). Elektrony jsou do soustavy přiváděny katodou, ke které jsou v závislosti na jejím záporném náboji přitahovány kationty. Současně dochází k redukci a vylučování elektropozitivních složek v podobě kovu či vodíku. Opačný děj probíhá u anody, kde dochází k oxidačním dějům za současného vylučování elektronegativních složek (Skotnicová a Kursá, 2013).



Obrázek 1.6: Princip elektrolýzy (wikiskripta.eu, 2018)

Podmiňujícími parametry vodivosti elektrolytu jsou koncentrace vodivých iontů, teplota, napětí, hustota proudu a cirkulace lázně. Ve zvláštních případech dochází k přidávání koloidů za účelem inhibice růstu jader. U vodných roztoků je srážení prášku ovlivněno vysokou proudovou hustotou a nízkou teplotou. Roztavené soli naopak vyžadují vyšší teploty v závislosti na teplotě tání vhodných solných eutektik, jež by měly obsahovat přiměřenou koncentraci kovu určenou k ukládání (Thummler, a Oberacker, 1993). Rovněž zastoupení kovu v elektrochemické řadě ovlivňuje katodický potenciál

---

a způsobuje procesy, které mohou v některých případech vytvářet napěťový ráz nezbytný pro depozici. V neposlední řadě výsledný tvar, strukturu a rozměry ovlivňují rychlost nukleace a koncentrace kovových iontů. Upadhyaya, (2002) dodává, že předností elektrochemického procesu je výsledná čistota a velmi dobré vlastnosti pro konvenční zpracování práškovou metalurgií.

Elektrolýza vodných roztoků je nejdůležitější metodou při výrobě měděného prášku. Proces probíhá v ocelových nádržích seřazených paralelně, vytvářející pracovní jednotku s cirkulačním systémem. Elektrolyt ( $\text{CuSO}_4$ ) pracuje při teplotě zhruba  $60\text{ }^\circ\text{C}$  při obsahu 5–35 g Cu a 120–250 g kyseliny sírové při proudu 7500–10000 A. Teplota je za procesu ochlazována a udržována na stálé teplotě s cílem zamezit tvorbě jemných a hustých sraženin, vyššímu podílu oxidů a zvýšené vodivosti elektrolytu. Hustota katodového proudu se pohybuje kolem  $4000\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ , anodická hustota je asi jedna desetina z této hodnoty. Skotnicová a Kursá (2013) ve své knize dodávají, že zvýšená katodová proudová hustota způsobuje tvorbu jemných hustých prášků a zvýšené vylučování vodíku. Naopak nižší proudová hustota anody zabraňuje pasivaci tavenin (Thummler a Oberacker, 1993).

Elektrolýza tavené soli se využívá v případech, kdy depozice z vodných roztoků není možná. Elektrolyt je složen ze směsi solí, většinou chloridů nebo fluoridů s nízkými teplotami tání. Díky vysoké elektrické vodivosti tvoří chloridy alkalických kovů a kovů alkalických zemin hlavní složku tavenin (Thummler a Oberacker, 1993). Napětí se nastavuje pod úroveň rozkladného napětí alkalického kovu. Tvar částic má formu hrubozrnných dendritických krystalů. Příčinou je nízká elektrická vodivost elektrolytu. V závislosti na probíhajících vedlejších procesech, primárně difúze redukovaného kovu, proudová účinnosti nepřesahuje 60 %. Elektrolýza tavenin je vhodná zejména pro tantal a beryllium (Skotnicová a Kursá, 2013).



**Tabulka 1.2: Přehled prvků využívaných při elektrochemické metodě přípravy prášku (prvky.com, 2021)**

Název	Značka	Charakteristické vlastnosti	Výskyt
Niob	Nb	Bod tání: 2477 °C, protonové číslo: 41, přechodný kov. Legující prvek. Zvyšuje pevnost, zamezuje tvorbě mezi krystalické koroze.	Nalézá se v nerostech, vždy současně s Tantalem. V malé míře součástí některých cínových rud.
Tantal	Ta	Bod tání: 2996 °C, protonové číslo: 73, přechodný kov, chemicky odolný za normálních teplot, korozi vzdorný. K výrobě kondenzátorů a chirurgických nástrojů.	Nachází se v ryzí formě a minerálech jako tantalit, kolumbit, niobit atd.
Kobalt	Co	Bod tání: 1495 °C, protonové číslo: 27, přechodný, velmi tvrdý kov. Feromagnetické vlastnosti, legující prvek, k výrobě feromagnetických slitin.	Výskyt vždy v přítomnosti Niklu. Přírodní Kobalt ze 100 % tvořen izotopem 59 Co.
Měď	Cu	Bod tání: 1083 °C, protonové číslo: 29, přechodný kov, zlepšuje korozivzdornost a snižuje slinovací teplotu. K výrobě elektrických vodičů atd.	Nejběžněji výskyt v nerostech, vzácně ryzí.
Titan	Ti	Bod tání: 1668 °C, protonové číslo: 22, přechodný, tvrdý a křehký kov. Mimořádně odolný vůči korozi a slané vodě. Ke zbrojní výrobě a v chemickém průmyslu. Významný legující prvek.	Desátý nejrozšířenější prvek. Přírodní Titan ze směsi 5 stabilních izotopů.
Vanad	V	Bod tání: 1890 °C, protonové číslo: 23, přechodný velmi tvrdý kov, na vzduchu stálý. Legující prvek pro litiny a oceli pro zvýšení pevnosti a tvrdosti. K výrobě permanentních magnetů.	V přírodě ve více než 200 nerostech. K průmyslovému využití nejvýznamnější Vanadinit, Patronit, Sulvanit atd.

#### 1.4 Chemická metoda

Chemická metoda je podle chemických procesů rozdělena do dvou kategorií na proces redukce a proces rozkladu (Mpif.org., 2024).

Proces redukce je metoda, při kterém je chemická sloučenina ve formě oxidu redukována na elementární prášky. Mimo oxidu mohou být některé prášky redukovány z halogenidu či jiného solného roztoku. Redukčním procesem lze vyrábět kovové prášky z následujících stavů:

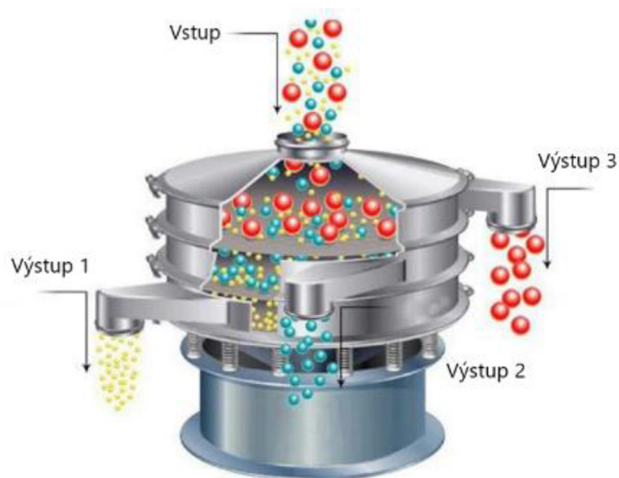
- Pevný stav
- Plynný stav
- Kapalný stav

Druhým typem výroby prášků je metoda rozkladu. Proces je založen na rozkladu chemických sloučenin v podobě hydridů, karbonylů atd. (Apps.dtic.mil., 1966).



---

Pohyb je přenášen prostřednictvím pružiny a vibračního těla stroje na povrch vibračního síta (yuanrun-china.com, 2024). Tím je zajištěn pohyb materiálu po povrchu síta za účelem filtrace, prosévání a odstraňování nečistot (rotaryscreener.com, 2024).

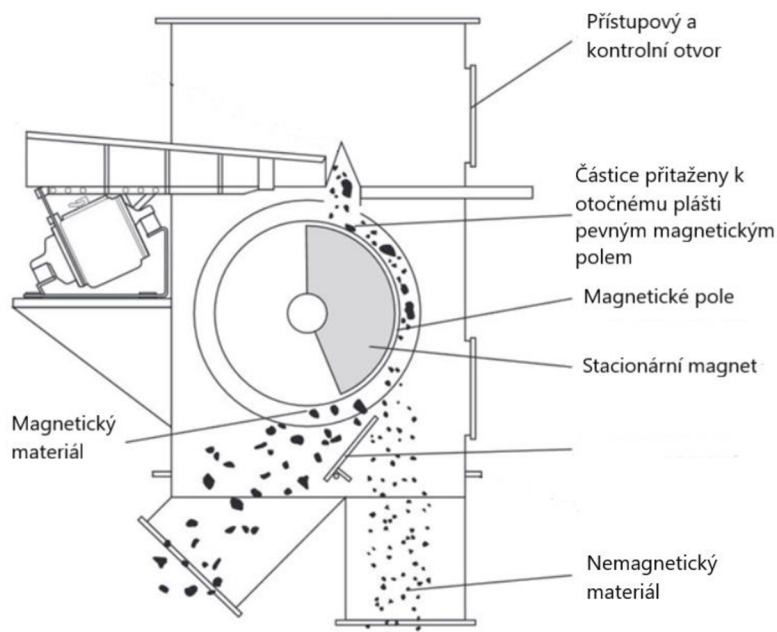


Obrázek 2.2: Princip prosévání (rotaryscreener.com, 2024)

### 2.3 Magnetické odlučování

Odlučování je využíváno za účelem separace magnetických částic od nemagnetických. Podle použitého média v podobě vody nebo vzduchu rozlišujeme separaci na mokrou a suchou (Nakai, et al., 2010). (Liu et al., 2012) dodává, že suchá magnetická separace je výhodná, jelikož nespotřebovává vodu a separované produkty není třeba filtrovat a sušit.

Bubnové válcové separátory, viz obrázek č.3, se řadí mezi nejběžnější typy magnetických separátorů používaných pro obě metody (Oberteuffer, 1974) Princip je založen na magnetickém poli v podobě silných permanentních magnetů pokrývajících celou šířku rotačního bubnu. Otáčením bubnu jsou magnetické částice stacionárním magnetickým polem drženy a následně vyneseny z magnetického pole ven. Nemagnetický materiál je odlučován vlivem gravitační síly. Tím je zajištěna selekce a třídění magnetických a nemagnetických částic (eriez.com, 2024). V závislosti na typu a konstrukčním řešením suchého separátoru lze upravovat částice až o velikosti 100 mikronů (Li, 2021).



Obrázek 2.3: Magnetický odlučovač (eriez.com, 2024)

## 2.4 Granulace

Jedná se o záměrné shlukování jemných částic do větších celků za účelem zlepšení určitých vlastností prášku (Iveson, 2001). Jemné a sypké prášky se vyznačují prašností, nízkou tepelnou vodivostí a hustotou. Granulací u stejného prášku dosáhneme lepší tepelné vodivosti s vysokou rozměrovou a objemovou hustotou (Ku, 2015).

Jedná se o složitý proces zahrnující řadu fyzikálních jevů v podobě smáčení, distribuce a nukleace pojiva, konsolidaci, růst, lámání a otěr (Adetayo, 1997). Množství pojiv je určeno vlastnostmi prášku a pojiva (Chen, 2009). WenChing (2003) dodává, že dalšími důležitými aspekty při granulacním procesu jsou distribuce pojiva v objemu prášku a doba potřebná z rozprostření pojiva. Práškové granule jsou vyráběné ze suspenze pevných částic, které se aglomerují v kapalně fázi (Semakina et al., 2014).

Pro malé objemy a snížení nákladů na zpracování lze granulaci provádět v otočném bubnu (Xue, 2014). K práškové směsi je přidáváno pojivo, rozpouštědlo a vsázka. Částice jsou spojovány do granulí za současného odpařování rozpouštědla. Účinnost rozmetání pojiva je hlavním kontrolním znakem procesu (Sakr, 2012). Čas a rychlosti otáčení bubnu ovlivňuje konečnou distribuci velikosti granulí (Barrasso, 2015). Velmi zajímavým materiálem je granulovaný nikl vyznačující se odolností proti korozi a opotřebením při vysokých teplotách. Za účelem zlepšení vlastností lze nikl obohatit o dispergované tvrdé částice v podobě TaC či NbC (Fernandes, 2014).

---

### 3 Zhutňování

Jedná se o proces, jehož hlavní funkcí je konsolidace prášku či práškové směsi do požadovaného tvaru za působení tlakové síly. Spolu s konsolidací dodává zhutňování polotovaru dostatečnou pevnost, poréznost a nejvyšší možnou rozměrovou přesnost s ohledem na možné změny způsobené během slinování (Upadhyaya, 2012). Angelo a Subramanian (2008) dodávají, že některé materiály vykazují určité procento poréznosti se záměrem vyplnění těchto pórů plyny, kapalinami a samomaznými látkami za účelem použití ke specifickým operacím v podobě samomazných ložisek, filtru či magnetických komponentů.

V závislosti na vzrůstajícím tlaku probíhají ve výlisku následující pochody. Odstraňují se vzniklé shluky a zaplňují se dutiny, částice jsou postupně uspořádány. Se vzrůstajícím tlakem a vznikem plastické deformace dochází ke kontaktu mezi částicemi, povrch částic se vyrovnává. Zvětšuje se rovněž kontaktní plocha mezi částicemi, důsledkem je jejich zpevnění (Skotnicová a Kursa, 2013). Přehled zhutňovacích metody uvádí Justino et al., (2014) viz tabulka 3.1.

Jakost prášku, tvořená částicemi různých velikostí či různého chemického složení, ovlivňuje výše uvedené procesy, které mohou probíhat ve větší či menší míře (Skotnicová a Kursa, 2013). Podmínka pro dosažení vysoké jednotnosti materiálu je založena na vhodně zvoleném druhu techniky zhutňování, výběru materiálu, typu nástroje a použití vhodného maziva (Upadhyaya, 2012).

**Tabulka 3.1: Přehled zhutňovacích metod (Angelo a Subramanian., 2008)**

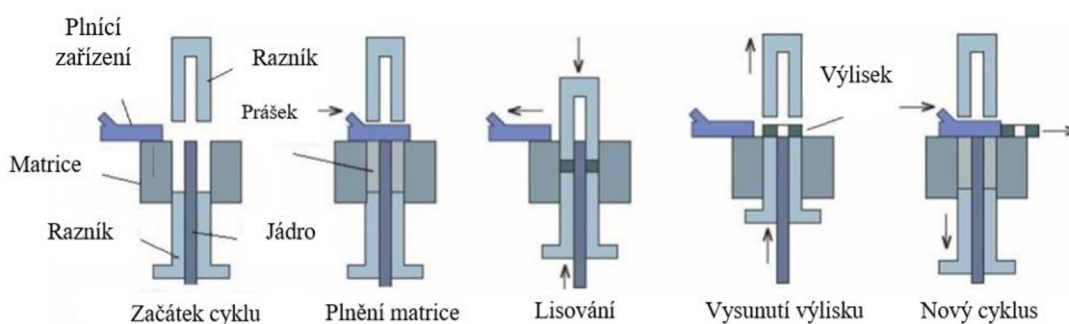
<b>Zhutňování pomocí statického a dynamického tlaku</b>	
Metody	Zhutňování statickým tlakem v matrici, válcování, kování, protlačování, injekční vstřikování, izostatické lisování (CIP, HIP)
<b>Beztlaké zhutňování</b>	
Metody	Keramické lití, vibrační zhutňování, strásání, volný zásyp

### 3.1 Tlakové zhutňování

Po přípravě a úpravách práškových materiálů (viz kapitola příprava a úprava prášku) následuje zhutňování pomocí statického či dynamického tlaku. Působící tlak zajišťuje těsnější uložení částic, překonává adhezi a tření mezi částicemi.

#### 3.1.1 Lisování v matricích

Mezi nejpoužívanější metodu formování práškových směsí se řadí lisování v matricích (Skotnicová a Kursá, 2013). Princip je založený na zhutňování prášku mezi stěnami matrice a čely razníku podléhající jen velmi omezené elastické deformaci. Z toho důvodu lze u výlisků docílit vysoké geometrické přesnosti a úzkých tolerancí. Sekvence zhutnění, viz obrázek 3.1, se skládá z plnění matrice, zhutnění a vyhazování výlisku za použití mechanických či hydraulických lisů (Thummler a Oberacker, 1993).

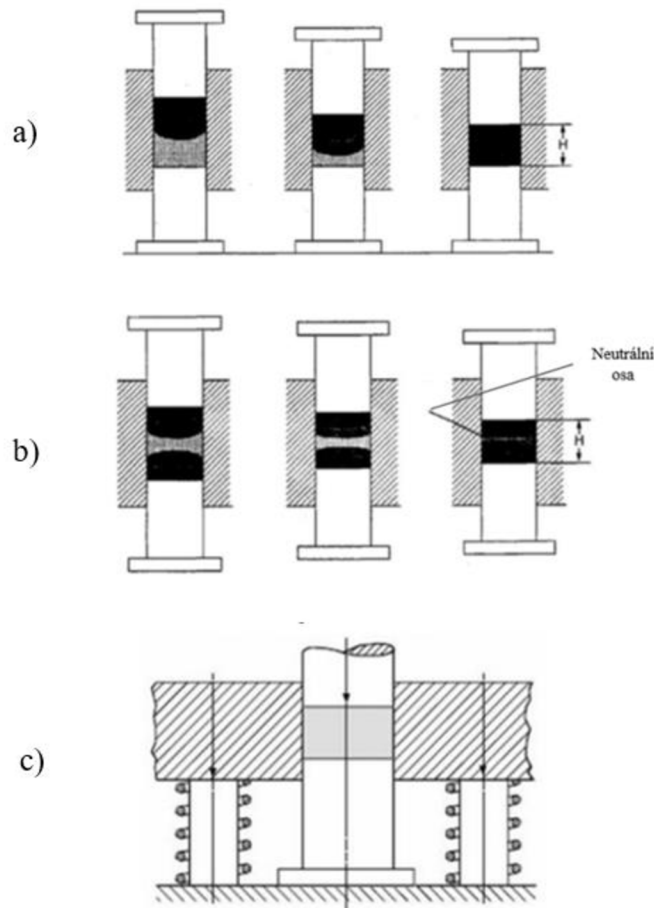


Obrázek 3.1: Princip lisování (Schatt et al., 2007)

Základní metody lisování v matricích je uveden viz obrázek 3.2 (Thummler a Oberacker, 1993).

- Jednočinné lisování je prováděno pouze horním aktivním razníkem. Spodní razník a matrice zůstávají stacionární. Tření stěny matrice zabraňuje rovnoměrnému rozložení tlaku, výlisek vykazuje vyšší zhutnění v horní části (Upadhyaya, 2012).
- Dvojčinné lisování je založeno na axiálním tlaku symetricky působícím ke středovému průřezu výlisku (Thummler a Oberacker, 1993). Stacionárním prvkem je zde pouze matrice. Spodní i horní razník postupují při lisování současně proti sobě směrem ke středu matrice. Výsledkem je vysoká hustota na horní i spodní straně výlisku, jádro zůstává neutrální, relativně slabé (Upadhyaya, 2012).
- Systém lisování v plovoucích matricích je založen na mechanismu složeného z pružin či hydraulických pomocných válců. Mechanismus zajišťuje vyrovnání hmotnosti matrice a umožňuje volné plavení v důsledku sil vyvolaných horním

razníkem působících na matrici. Tím vznikají třecí síly, které způsobí pohyb matrice směrem dolů. Síla na spodním nehybném razníku se dále zvyšuje, dokud se třecí síly od obou razníků nedostanou do rovnováhy. Tím je zaručeno příznivější rozložení hustoty vylisku (Thummler a Oberacker, 1993).



**Obrázek 3.2:** Schéma vybraných typů lisování: a) Jednočinné lisování, b) Dvojčinné lisování, c) Lisování v plovoucích maticích (Thummler a Oberacker, 1993)

Vysoká hustota vylisku je podmiňující pro dostatečnou pevnost a eliminaci smrštění při následném procesu slinování. Pokud je hustota nedostačující, podstupuje vylisek dolisování, což je opětovné lisování za zvýšeného tlaku. Zvýšením tlaku je nutné využívat lisovací zařízení o vyšších výkonech a rozměrech, rovněž dochází za provozu k vyššímu opotřebení nástrojů. Klíčovým faktorem při určení rozměrů lisovacího nástroje je poměr mezi sypanou výškou a výškou vylisku. Cílem je eliminace zvětšení lisovací dráhy, z tohoto důvodu musí být sypaná výška co nejnižší (Skotnicová a Kursá, 2013).



---

## Zhutňovací lisy

Dle základního dělení rozlišujeme lisy mechanické a hydraulické. Výkonnost v podobě tlakové síly se pohybuje v rozmezí 3 až 1000 tun. Lisovací tlak se odvíjí od konstrukce a výkonnosti daného lisu, v neposlední řadě zde hraje roli složitost a velikost vyráběných dílů (Upadhyaya, 2012).

Mechanické lisy ukládají energii pomocí setrvačnicku, který ji uvolňuje a přenáší přes excentrický, klikový či kloubový mechanismus. Výhodou je nastavitelný pohyb a zdvih suportu. Klasifikace mechanických lisů je rozčleněna dle zdroje výkonu, typu rámu, typu ovládacího systému a způsobu ovládní beranu. Mezi nejvíce využívané typy mechanických lisů se řadí klikový a excentrický převádějící rotační pohyb na lineární (Upadhyaya, 2012). Výhodou mechanických lisů je vysoká produktivita výlisků za jednotku času, počet zdvihu se zde pohybuje mezi 20 až 100 za minutu. U hydraulických se zdvih pohybuje v rozmezí 10 až 15 za minutu (Skotnicová a Kursa, 2013).

U hydraulických lisů je tlak vyvozen kapalinou působící na píst prostřednictvím čerpadla, ventilů, akumulátorů a zesilovačů. Pro hydraulické lisy je charakteristické volitelné nastavení tlaku, rychlosti a délky zdvihu v mezích kapacity dle konkrétního lisu. Vyznačují se přesností a možností regulace a dokonalé kontroly lisovací síly. (Upadhyaya, 2012).

### 3.1.2 Válcování

Metoda válcování je používána pro výrobu kovových či slitinových plechových a pásových výrobků (Upadhyaya, 2012). Proces se skládá z následujících kroků:

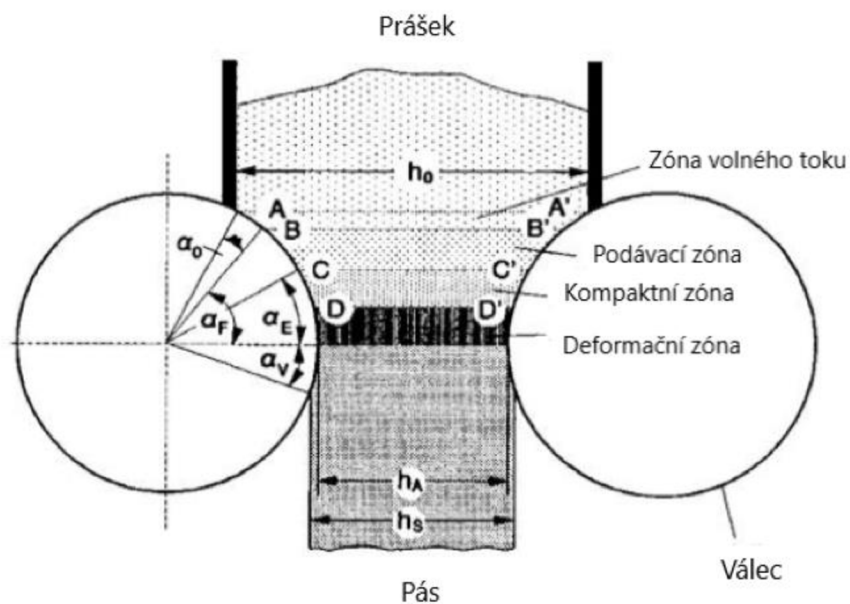
- Válcování zeleného pruhu z kovového prášku
- Kontinuálního či dávkového slinování
- Válcování slinutého pásu pro zhuštění a následné navíjení
- Konečné žíhání a finální válcování za studena

Princip je založen na válcování prášku pomocí systému válců. Doposud nezhutněný prášek vypadává vlivem gravitace z násypky přímo do mezery mezi protiběžně se otáčejícími vertikálně uloženými válci, kde dochází ke zhutnění. Tlak narůstá pozvolna, přičemž maximální hodnota je zaznamenána v nejužším místě mezi válci (Datta, 2014). Takto mechanicky spojený prášek se vyznačuje křehkostí a porézností, zároveň je již samonosný. Ve většině případů se válcování skládá z dvouválcového systém,



o jediné čtyřválcového doplněného o vnitřní válečky malého průměru, které lze využít pro přípravu pásů o tloušťce několik desetin milimetru (Thummler a Oberacker, 1993).

Propad prášku procházející mlecí mezerou je ovlivněn vtokovými vlastnostmi prášku, třecími silami mezi práškem, třecími silami povrchu válce a samotnými částicemi prášku. Další možností pro přívod prášku je nucené podávání přidavnými mechanickými prostředky v podobě šneku. Šnek zajišťuje vyšší rychlost než volný průtok. Kontaktní plocha mezi válečky a práškem jde rozdělit do 4 zón, viz obrázek 3.3, (Thummler a Oberacker, 1993).

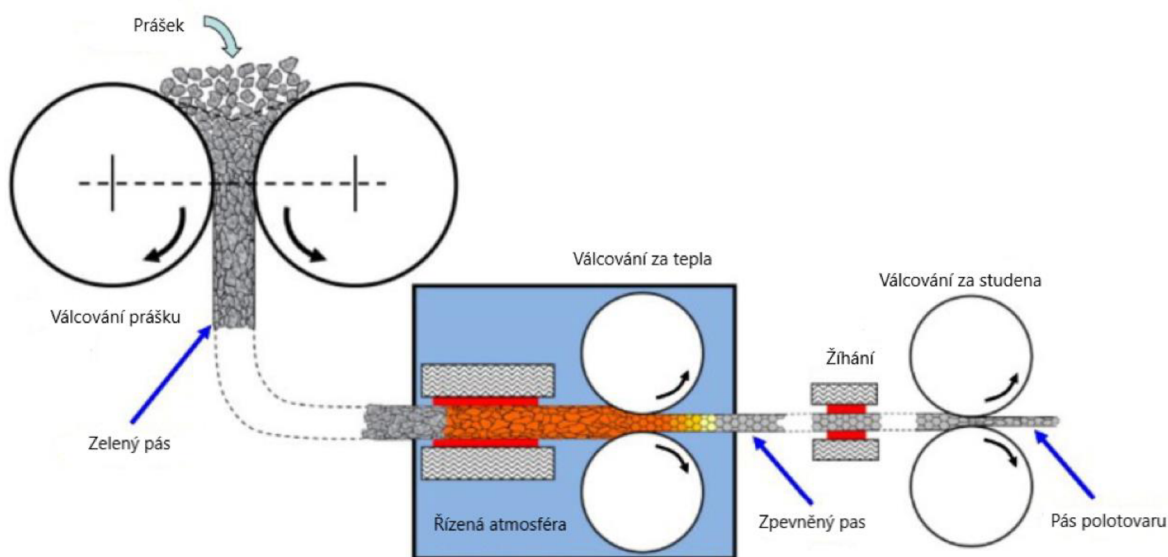


**Obrázek 3.3: Princip válcového zhutňování (Thummler a Oberacker, 1993)**

- Zóna volného proudění. V této zóně působí pouze gravitace, definovaná pod úhlem  $\alpha$ .
- Podávací zóna je zóna, ve které působí třecí síly mezi práškem a zhutňovacími válci.
- Zhutňovací zóna je úsek, ve kterém působí válcovací síla. Prášková hmota se stává soudržnou. Částice vystavené deformaci mají určitý, ale doposud omezený význam.
- Deformační zóna. Zde dochází k rozšířené deformaci a pevnost tvářeného pásu v surovém stavu dosahuje svého maxima.

Následuje slinování pásu ve vodorovné peci za použití pohyblivého dopravního pásu. Pro zavedení nepřetržitého provozu lze propojit s válcovnou neopracovaných pásů. Poté je materiál pro konečné zhuštění válcován za tepla a dále opětovně válcován na konečnou velikost, viz obrázek 3.4 (Upadhyaya, 2012).

Válcováním je zpracováno velké množství kovů a slitin včetně Fe, Cu, Co, Mo a několika železných i neželezných slitin. Mechanické vlastnosti pásů a plechu vyrobených válcováním ve formě prášku dosahuje srovnatelných vlastností jako konvenční výrobky (Thummler a Oberacker, 1993).



Obrázek 3.4: Proces válcování (Cantin et al., 2008)

### 3.1.3 Injekční vstřikování kovů (MIM)

Jedná se o vícestupňový proces původně vyvinutý z kombinace vstřikování plastů a tradiční práškové metalurgie (German a Bose, 1997). Připravený prášek je tlačěn do dutiny formy prostřednictvím rotačního šneku, kde následuje ochlazení a vytvrzení do konkrétního tvaru dutiny formy (Chang a Zhao, 2013).

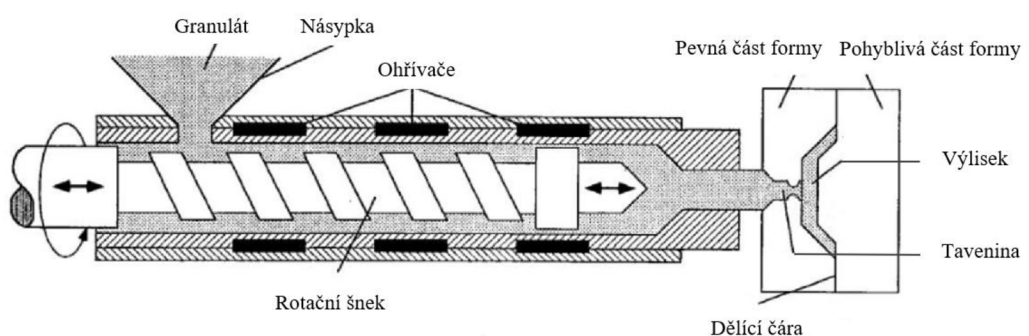
Cyklus injekčního vstřikování kovů, viz obrázek 3.5, začíná přípravou směsi jemného prášku. Kovový prášek je míchán s pojivem obsahující vosky, lubrikanty a povrchově aktivní látky. Takto vzniklá surovina se poté granuluje (Kamal et al., 2009). Nejúčinnějším systémem pro přípravu suroviny je dvoušnekový extrudér (Thummler a Oberacker, 1993). Takto připravená granulovaná surovina je přiváděna do vstřikovacího lisu, viz obrázek 3.6, který plní funkci ohřevu před jejím tlakovým vstřikováním do dutiny formy. Lisovací zařízení je složeno z externě vyhřívané válcové komory, ve které je uložen rotačně pohybující se šnekový či spirálový podavač hrnící

směs přímo do předem připravených forem. Roztavená surovina ve formě viskózní hmoty se poté nechá ochladnout a ztuhnout. Následným krokem je odstranění pojiva [za účelem eliminace praskání součásti vlivem plynů odpařovaných z pojiva a zamezení velkého smrštění při slinování (Datta, 2014).

Z tohoto důvodů je hlavním požadavkem na slinování zajistit řízené smrštění, je-likož významně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti a hustotu součásti. (Osswald a Turng, 2008). Dalšími důležitými parametry slinovacího cyklu ovlivňující konečné vlastnosti jsou doba slinování, teplota slinování, slinovací atmosféra, rychlost ohřevu a doba chlazení (German, 1998)



**Obrázek 3.6: Jednotlivé sekvence injekčního vstřikování kovů (Skotnicová a Kurša, 2013)**



**Obrázek 3.5: Princip vstřikování kovů (Thummler a Oberacker, 1993)**

---

### 3.1.4 Izostatické zhutňování

Tlak je na prášek vyvíjen rovnoměrně ze všech směrů prostřednictvím uzavřené tlakové flexibilní formy. Po vložení prášku do formy je forma zavedena do kapaliny či plynu a natlakována na požadovaný tlak přenesený na prášek pomocí pružné membrány.

Izostatické zhutňování se vyznačuje homogenní strukturou bez nutnosti aplikace jakýkoliv maziv. Tím je docíleno snížené kontaminace povrchu o vysoké jednotné hustotě. V porovnání s lisováním v matricích vyžaduje k dosažení požadované hustoty nižší tlaky (Danninger et al., 2017).

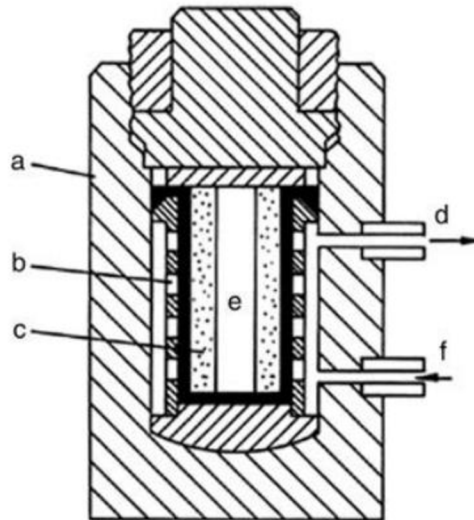
Izostatické zhutňování za studena (CIP), viz obrázek 3.7, je založeno na principu umístění prášku do flexibilní pryžové formy, která je po naplnění práškovým materiálem utěsněna a ponořena do kapaliny. Kapalina se čerpá na vysoký tlak až 1500 MPa. V praxi proces lisování probíhá při pokojové teplotě v rozmezí tlaků 200-600 MPa metodou wet-bag CIP nebo dry-bag CIP (Price, 1998). Metoda wet-bag CIP je založena na plnění formy práškem mimo tlakovou nádobu. Naplněná forma je následně vložena do tlakové nádoby obklopené kapalinou sloužící jako tlakové médium. U metody dry-bag CIP je pružná nádoba trvale připevněna k tlakové nádobě. Tlak je do formy přenášen přes suchou membránu. Metoda dry-bag CIP lze automatizovat, vykazuje kratší cykly na zhutnění. Používá se ke zpracování keramiky a kovových prášků pro výrobu filtrů a dalších rozměrově malých dílů. Rozměrová přesnost zde nedosahuje takových kvalit, jako u jednoosého slinování, v důsledku pružné flexibilní formy (Kaysser a Weise, 1993).

Metoda izostatického zhutňování se mimo zmiňované výrobky zaměřuje na zpracování vybraných materiálů v podobě molybdenu či wolframu (ve formě elektrod pro tavení obloukových pecí), polotovarů z rychlořezné oceli, těžkých slitin wolframu, součástí z tvrdokovu a dlouhých válcových filtračních prvků (Price, 1998).

Izostatické lisování za tepla (HIP), viz obrázek 3.8, probíhá za vysokých teplot v kombinaci s plynným médiem, kdy prášek je hermeticky uzavřen v nádobě, která se při provozní teplotě plasticky deformuje. Tlaková nádoba je vyráběna z nerezových či nízkouhlíkových ocelí. Pro zabránění reakce s materiálem je ochranná atmosféra zastoupená plyny v podobě argonu, dusíku či helia (Danninger et al., 2017).

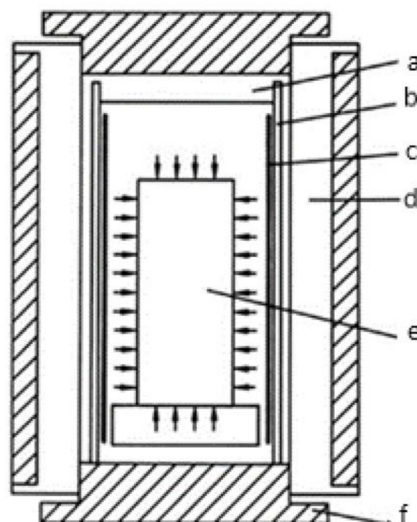
Teplota se odvíjí od konkrétního materiálu. Rozmezí teplot se pohybuje mezi 480 °C pro hliník až po 1700 °C pro wolframové prášky. U ocelí a niklu se teploty pohybují mezi 1100 °C a 1250 °C při tlacích 20 až 300 MPa (Williams, 2012). Obdobně jako

u lisování za tepla je i u izostatického lisování zhutnění aktivováno difúzními procesy. Proces zhutňování založený na kombinaci teploty a tlaku umožňuje docílit plného zhutnění při nižších tlacích než u metody CIP. Dosažená úroveň hustoty se pohybuje mezi 98 % až 100% teoretické hustoty (Danninger et al., 2017).



**Obrázek 3.7:** Jednoduchý suchý vak pro izostatické lisování za studena a) tlaková nádoba, b) membrána, c) prášek, d) tlakový výstup, e) jádrová tyč, f) tlakový vstup (Kaysser a Weise, 2000)

Moderní HIP systémy jsou pro zkrácení pracovního cyklu vybaveny systémem jednotného chlazení, který díl schladí řízenou rychlostí až o 100 °C/min (Mashl, 2013). Mashl (2016) dodává, že metoda izostatického zhutňování za tepla nalézá uplatnění při výrobě rychlořezných ocelí, slitin titanu a superslitin v oblastech leteckého a energetického průmyslu ve formě komponent do leteckých motorů či jako nástroje a součásti jaderné energetiky, těžby ropy či plynu).



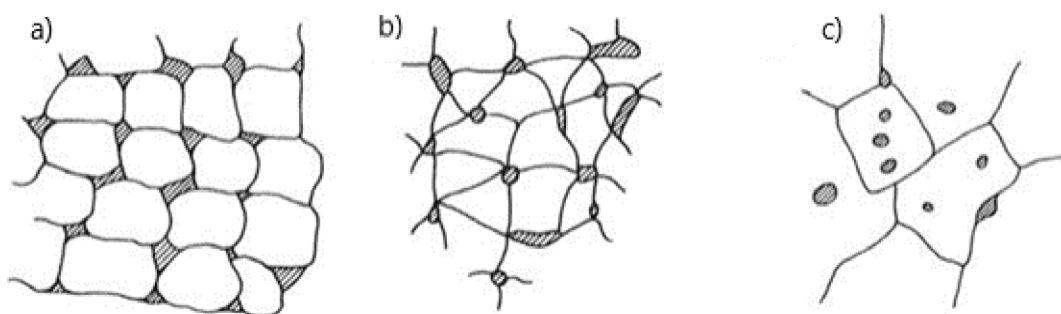
**Obrázek 3.8:** Tlaková nádoba pro izostatické zhutňování za tepla a) izolační víko, b) izolační plášť, c) pec, d) drátěná tlaková nádoba, e) část k lisování, f) spodní víko nádoby (Kaysser a Weise, 2000)

## 4 Slinování

Jde o aktivní tepelný proces, při kterém dochází k přeměně rozptýleného prášku na mechanicky pevné těleso za účelem zvýšení jeho pevnosti a definovaných vlastností (Šalák et al., 2005). Slinování probíhá při zvýšených teplotách pod bodem tavení základního kovu, výsledkem je stimulace a pohyb atomů (Upadhyaya, 2012). Kovy vykazují náchylnost k oxidaci, z tohoto důvodu probíhá slinování v řízených ochranných atmosférách inertního či redukčního plynu. Nejčastěji se využívají redukční atmosféry, jejichž výhodou je redukce jakéhokoliv oxidu vyskytující se na povrchu částic prášku. Mezi další klíčové faktory důležité pro řízení během slinování je rychlost ohřevu, rychlost ochlazení, doba slinování, teplota slinování a slinovací atmosféra. Volba parametrů se odvíjí od konkrétního kovu, který bude slinován (German, 2013).

Proces slinování lze rozdělit do několika fází (Schatt, 1992). Zpočátku se částice ve velkém nebo lisovaném stavu setkávají v bodech nebo vysoce deformovaných lisovacích kontaktech (viz obrázek 4.1a) V raných fázích slinování se vytvářejí a rostou kovové mezičásticové kontakty, porozita mezi částicemi je stále propojená a otevřená (viz obrázek 4.1b). V pozdější fázi dochází k rychlému smršťování, póry se uzavřou a izolují se jeden od druhého (viz obrázek 4.1c). V konečné fázi se zbývající pórovitost snižuje a dochází k hrubnutí zrna (Dlapka., 2010).

Dominující fáze závisí na použitém výchozím prášku. U jemných a vysoce aktivních výchozích prášků je smrštění výrazné a lze dosáhnout téměř 100% hustoty.



Obrázek 4.1: Schématický popis slinovacích stupňů v práškových výliscích a) Zelený stav, b) Otevřená pórovitost, c) Uzavřená pórovitost (Kaysser a Weise, 1993)

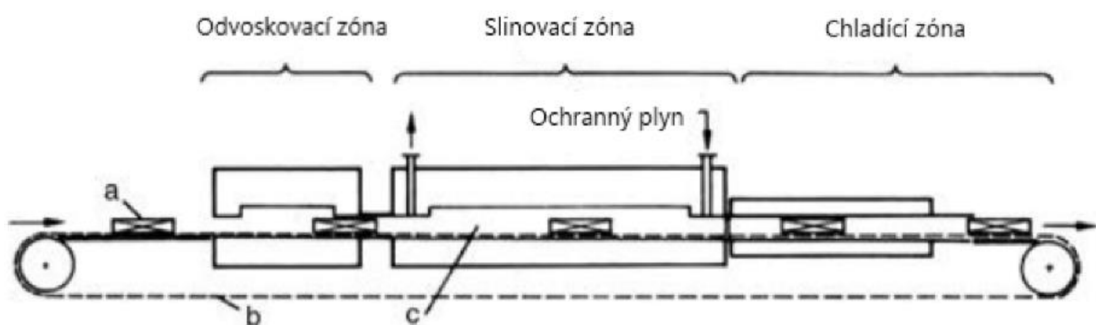


## 4.1 Slinovací pece

Mezi dva základní typy pecí vhodné pro slinovací operace se řadí pece kontinuální a vsázkové (Crease, 1984). Spolu s volbou slinovací pece se dle materiálu volí provozní teplota, typ a čistota atmosféry. Teploty se pohybují v rozmezí 600 °C pro Al a jeho slitiny, 800–900 °C pro slitiny Cu, železné slitiny 1120–1280 °C, tvrdé kovy 1400 °C a slitiny wolframu do teplot až 2800 °C. Slinování se vyznačuje vysokou energetickou náročností (Ernst, 2013).

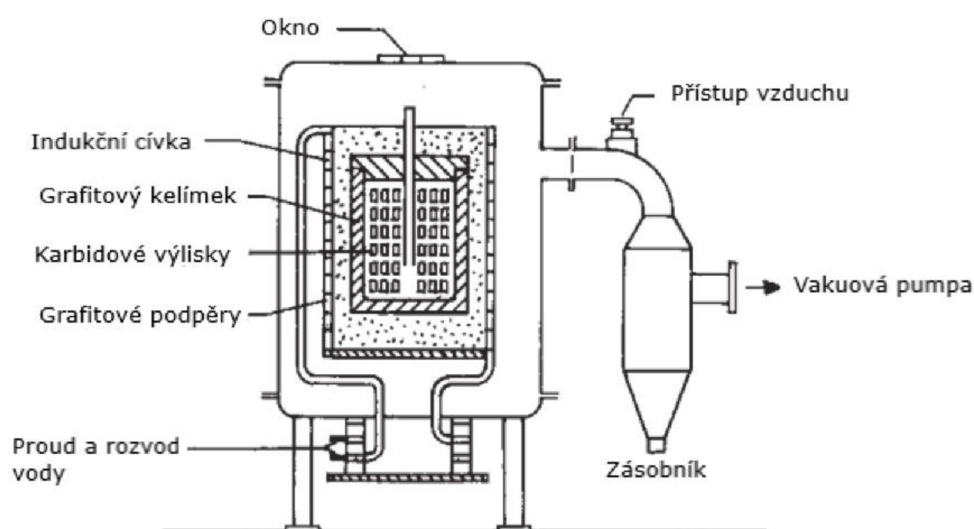
Pro hromadnou výrobu železných dílů se využívají průběžné kontinuální pece, kde jsou součásti dopravovány vyhříváním tunelem do jednotlivých sekcí. (Bradbury, 1986). V první části jsou komponenty vystaveny teplotám 600 až 800 °C za účelem odstranění lisovacího maziva. V druhé sekci se provádí samotné slinování. Poté následuje zóna obnovy uhlíku, pokud je vyžadován nebo zóna rychlého ochlazení prostřednictvím studeného dusíku. Úplné ochlazení probíhá stále pod ochrannou atmosférou v chladicím tunelu (Ernst, 2013).

Běžně používané typy pecí dopravují komponenty prostřednictvím nekonečného netkaného pásu, viz obrázek 4.2, pásového dopravníku, či dopravníku tlačného nebo válečkového typu. Vyhřívání je prováděno plynem či elektricky. U pecí vybavených pásovým dopravníkem je maximální provozuschopná teplota 1150 °C, při vyšších teplotách má životnost pásu tendenci dramaticky klesat. Pece jsou na obou koncích otevřené, vybaveny plamennými clonami zamezující pronikání kyslíku do slinovací zóny. Čistota ochranné atmosféry každopádně nedosahuje té nejvyšší kvality. Pro dosažení vyšší kvality ochranné atmosféry a dosažení vyšších teplot jsou vhodné krokové pece vybaveny na obou koncích zón zámky. Tyto pece jsou elektricky vyhřívány, obvykle s prvky Mo, mohou být provozovány až do 1400 °C, jsou však výrazně dražší a obvykle neumožňují rychlé chlazení (Upadhaya, 2012).



Obrázek 4.2: Schéma síťové slinovací pece a) Slinovací táci, b) Dopravní pás, c) Mufle pece (Kang a Yoon, 1977)

Vsázkové pece, viz obrázek 4.3, se vyznačují nižší produktivitou a rychlostí výroby než pece průběžné. Pece vsázkového typu se používají pro slinování žáruvzdorných kovů a tvrdokovů jako je W nebo Mo (Navar, 1998). Slinování slinutých karbidů je prováděno v elektricky vyhřívaných pecích s grafitovými topnými články za přítomnosti vodíku jako ochranné atmosféry. Plyný vodík lze využít v případě, že WC neobsahuje žádné jiné karbidy. Ostatní druhy obsahující přídavek TiC nebo TaC jsou slinovány ve vakuu, z důvodu zabránění vzniku hydridů Ti a Ta (Datta., 2014).



Obrázek 4.3: Vakuová pec vsázkového typu (Upadhyaya, 2002)

## 4.2 Slinovací atmosféra

Slinování kovových prášků vyžaduje ochrannou atmosféru za účelem zabránění oxidace (Bradbury, 1986). V neposlední řadě ovlivňuje průběh veškerých slinovacích fází zahrnující odmašťování, difúzi a výsledné vlastnosti součásti spojené s následným obráběním. Mimo jiné odstraňuje reakční produkty jako je odparafinování či redukce oxidů vyskytujících se na povrchu prášku (Nayar, 1998). Bradbury (1986) dodává, že proudění atmosféry při odstranění reakčních produktů je laminární, to má za následek pomalé odstraňování maziva.

Atmosféra ve formě kyslíku může být inertní či redukční s možností nauhličení či oduhličení. V některých případech, jako u nerezových ocelí a měkkých magnetických materiálů, je nutné vzít v úvahu také nitridační efekty. Vzhledem k vysokému vlivu obsahu uhlíku na vlastnosti ocelí se kontrola uhlíku u těchto materiálů stává stále důležitějším úkolem (Hryha et al., 2013).



---

Vakuum je atmosféra s vhodností pro tvrdé nebo vysoce reaktivní kovy v podobě Ti, u kterého je hlavním účelem snížení kyslíku během zpracování. U vakuového slinování je nutné vzít úvahu tlak par prvků přítomných ve vzorcích. Při slinování v kapalně fázi mohou příliš nízké tlaky způsobit odpařování kapalinotvorné přísady (Kaysser a Weise, 1993).

Disociovaný čpavek je využíván v ranných procesech slinování kvůli snadnému skladování a přepravě  $\text{NH}_3$ . V průmyslově vyspělých zemích bývá nahrazen směsí  $\text{NH}_2$  (Pieczonka et al., 2008).  $\text{N}_2$  je atmosféra standartní pro slinování Al, v tomto případě je nutná definovaná reaktivita k překonání pasivačního efektu oxidových vrstev. Vodík se používá pro slinování žáruvzdorných kovů. Riziko vodíkové atmosféry je spojeno s následnou křehkostí výchozího komponentu a vyššími náklady za provoz (Schaffer et al., 2008).

### **4.3 Slinovací čas**

Parametry slinovací teploty závisí na materiálových systémech, způsobu přípravy, požadovaných výsledných vlastnostech a slinovací teplotě. Časový interval se obvykle pohybuje v rozmezí několika desítek minut až několika hodin. Z ekonomických důvodů lze v některých případech proces slinování urychlit zvýšením slinovací teploty (Šalák et al., 2005).

---

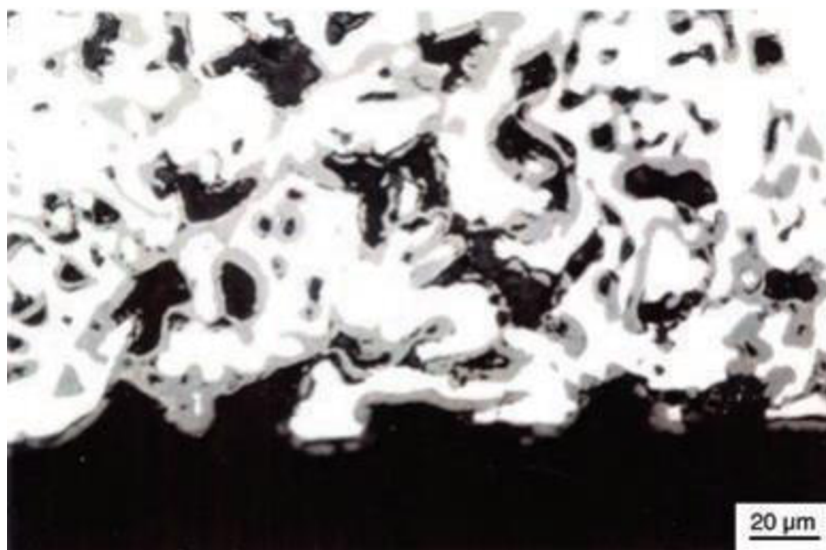
## 5 Konečná úprava povrchu

Cílem konečných povrchových úprav je získání nebo zvýšení konkrétních fyzikálních a mechanických vlastností v závislosti na specifickém využití dané součásti. Mezi povrchové úpravy se řadí nauhličení povrchu, brokování, parní úpravy atd. (Danninger et al., 2017).

### 5.1 Proces parní úpravy

Jedná se o proces prováděný u železných materiálů ke zvýšení odolnosti proti korozi a utěsnění porézности z důvodu pronikání kapalin a plynů do povrchových pórů. Díly jsou vystaveny působení přehřáté páry o teplotě 400 až 600 °C po dobu 1 až 4 hodin. V důsledku reakce s vodní párou vzniká na povrchu dobře přilnavý modrošedý oxid (magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), viz obrázek 5.1 (Pease et al., 1988).

Teplota a složení atmosféry musí být pečlivě kontrolovány a jsou podmiňujícím faktorem k tvorbě magnetitu  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nikoliv hematitu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , jejímž důsledkem by byly špatné adhezivní vlastnosti s nedostatečnou odolností proti korozi. Penetrace a tloušťka naneseného oxidu jsou primárně určeny podmínkami úpravy, typem použitého základního prášku, hustotou materiálu a předchozími operacemi, které by mohly uzavřít pórovitost povrchu. Vlivem parní úpravy se na povrchu materiálu zvyšuje tlakové napětí a odolnost proti abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení. Zvýšení či snížení pevnosti v tahu se odvíjí v závislosti na tloušťce vytvořeného oxidu (Schubert, 2016). Navazujícími operacemi jsou pokovování či ponoření dílů do oleje, tím je podpořena zvýšená odolnost proti korozi a zvýraznění modrošedé barvy (Pease et al., 1988).



Obrázek 5.1: Typická mikrostruktura po úpravě párou (Danninger et al., 2017)

---

## 5.2 Nauhličení

Povrch materiálu je sycen uhlíkem prostřednictvím za současného zahřátí materiálu na teplotu těsně pod bodem tavení, obvykle při teplotě 800 až 950 °C ve speciální atmosféře tvořené kombinací plynů (40 % N<sub>2</sub>–40 % H<sub>2</sub>–20 % CO<sub>2</sub>), která je nejvíce využívána (Pelissier, 2000). Kudělka et al. (2021) dodává, že uhlík mimo zvýšení tvrdosti materiálu zajišťuje vyšší odolnost proti otěru, zároveň však snižuje houževnatost a stává se křehčím.

Po nasycení materiálu uhlíkem je následným krokem zakalení materiálu pro zachování houževnatého jádra. Spojení procesu nauhličení a kalení je znám jako proces cementace. Cementace obvykle probíhá do hloubky 1 až maximálně 2 mm (Daďourek, 2006).

Za účelem lepší kontroly nauhličené vrstvy je aplikováno nízkotlaké nauhličení prováděné ve vakuové peci tvořené uhlovodíkovými plyny. Plyny ve formě propanu či acetyleny pulzují v přesně definovaných časových úsecích (Pelissier, 2000). Mulin, H. et al. (2014) ve svém článku uvádějí, že pro difúzi a hloubku nauhličené vrstvy je rozhodující teplota, počet a délka pulsů a čas mezi pulsy kombinované s vysokotlakým ochlazením. Dlapka et al. (2012) dodává, že proces nízkotlakého nauhličení je vhodný zejména pro materiály s vysokou afinitou ke kyslíku.

## 5.3 Obrábění

Při obrábění dílů PM a dílů odlévaných či tvářených vidíme určité rozdíly, přičemž ty nejzásadnější v případě PM jsou ovlivněny mikrostrukturou, chemickým složením, hustotou a přísadami. Obtížnost obrábění se odvíjí od úrovně pórovitosti a heterogenních struktur. Pórovitost ovlivňuje tvorbu třísky, tepelnou vodivost, řezné síly a vlastnosti povrchu vzniklého po obrábění (Šalák et al., 2006). Specifickou technikou práškové metalurgie je surové obrábění, při kterém jsou obráběny lisované, ale nikoliv slinované díly. To lze provádět pouze u materiálů vykazující pevnost již v surovém stavu dosažené předslinováním či lisováním za tepla (Beiss, 1989).

Většina údajů o obrobiteľnosti PM ocelí je založena na zkoušce vrtání, jelikož jde o metodu levnou, rychlou a snadno reprodukovatelnou. Test obrobiteľnosti se hodnotí podle určitého opotřebení vrtáku a počtu vyvrtaných děr (Sanderow et al., 1997). Obrobiteľnost lze zvýšit zařazením určitých přísad před zhutněním práškové směsi (olovo, síra, grafit, měď atd.). Šalák et al. (2006) dodávají, že v běžné praxi se pro dosažení vyšší obrobiteľnosti impregnují póry polymerem.

---

Díly PM lze obrábět tradičními metodami obrábění jako je soustružení, frézování, broušení, honování, lapování, závitování či vrtání (Lindsley a Schade, 2006). Broušení je velmi běžná dokončovací operace umožňující úpravu povrchu o vysoké rozměrové přesnosti. Při broušení se kovové třísky kontaktně oddělují s brusným kotoučem. Mezi konvenční brusné materiály se řadí SiC a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vhodné pro nízkolegované práškové oceli. CBN brusné kotouče lze použít pro rychlořezné oceli a tvrdokovy. Nejčastěji používaným brusivem jsou diamantové kotouče (Šalák et al., 2006).

#### 5.4 Odstraňování otřepů

Cílem je odstranění otřepů, vzniklých hran a nepravidelností povrchu v důsledku zhutňování či obrábění. Odjehlování lze provádět otryskáváním, omíláním, kartáčováním či leštěním. Omílání dílů v běžné praxi probíhá za použití kapalného media s abrazivními částicemi uložené v rotujících sudech či vibračních vanách formou vibračního odjehlování. Za účelem eliminace vzniku koroze v povrchových pórech jsou do kapalných medií přidávány inhibitory. Dalším řešením je impregnace dílů olejem nebo pryskyřicí pro minimalizaci absorpce vody během procesu odstraňování otřepů (Danninger et al., 2017).

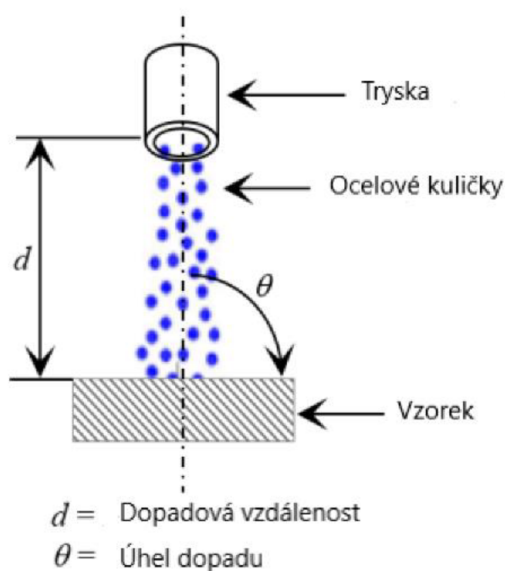
#### 5.5 Brokování

Je metoda využívaná pro součásti PM ke zvýšení únavové životnosti mechanicky zatížených povrchových zón (Beiss, 1989). Tento proces tváření za studena využívá sférická média (kovových, keramických, skleněných částic), viz obrázek 5.2, dopadající na povrch součásti s dostatečnou energií (až  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) za vzniku plastické deformace. Částice nemají abrazivní účinek (Brychta, 2008). V povrchu se tak vytváří tlaková zbytková napěťová vrstva, jejichž mechanické vlastnosti jsou modifikovány účinkem deformačního zpevnění. Hloubka dosažené vrstvy se pohybuje do  $250 \mu\text{m}$  (Gallitelli et al., 2016). V porézních materiálech PM vyvolává zhuštění povrchu uzavření menších pórů a zmenšení velikosti větších pórů (Rivolta et al., 2012). Tím je docíleno zvýšené únavové odolnosti a odolnosti proti poškození povrchu. Mimo uvedené funkce brokování je vedlejší funkcí čištění povrchu a nárůst jeho drsnosti (Wang et al., 1998).

Nejčastějším typem použitého sférického media jsou ocelové kuličky či kuličky z bílé litiny o průměru  $0,2\text{--}3 \text{ mm}$ . Další využívanou variantu tvoří keramické kuličky (průměr částice  $0,15\text{--}1,5 \text{ mm}$ ) a skleněné kuličky (o průměru  $0,05\text{--}0,85 \text{ mm}$ ). Metoda brokování je vhodná především pro cyklicky namáhané součásti ve formě ozubených kol, hřídel, pružin či pístů (Masato et al., 2017).

**Tabulka 5.1: Faktory ovlivňující proces brokování (Maliwemu et al., 2018)**

<b>Parametry metody brokování povrchu</b>	
Parametry základního materiálu	Tvrdost, tuhost, předpjatý stav, chemické složení
Parametry toku částic	Rychlost, vzdálenost, úhel dopadu, hmotnostní průtok, tlak
Parametry částic	Typ, hustota, velikost, tvar, tuhost



**Obrázek 5.2: Schéma procesu brokování (Maliwemu et al., 2018)**

---

## 6 Vývoj a využití práškových směsí a materiálů

Specifické vlastnosti získané spojením kovových a nekovových materiálů dávají vzniknout novým příležitostem ve formě kompozitů vykazující vlastnosti, které by běžnými konvenčními metodami bylo těžké či nemožné vytvořit (Chang a Zhao, 2013).

### 6.1 Aplikace práškových směsí v dopravní a manipulační technice

Dopravní a manipulační technika se řadí se mezi klíčové sektory. Nároky na dopravní a manipulační techniku se stále zvyšují, a to prakticky ve všech jejich parametrech, jde například o bezpečnost, odolnost, spolehlivost, vynikající výkon při nízké hmotnosti, energetickou spotřebu, a to vše při zachování dostupné ceny (Chang a Zhao, 2013).

Oproti tradičním výrobním metodám (lití, vytlačování, kování atd.) nabízí PM energetickou úsporu, ekologicky nižší zatížení na prostředí, lepší výkon a tvarovou flexibilitu designu. Za tímto účelem byla vyvinuta a zkonstruována široká škála lisů zahrnující řízené CNC lisy s uzavřenou smyčkou řízených pohybů, vysokorychlostní lisy, servomotory a vysokorychlostní zhutňování (Hinzmann a Sterkenburg, 2007). EPMA (2008) ve své publikaci představuje výrobní technologie a zpracování výrobků prostřednictvím práškové metalurgie, které vlivem své variability nabízí široké pole působnosti. Technologie zahrnují zpracování od lisování, slinování až po izostatické lisování za tepla, kování prášku či vstřikování kovů. Uplatnění nalézá při výrobě nákladních a osobních automobilů, dodávek, prostředků dopravní a manipulační techniky, autobusů, motocyklů, jízdních kol a mnohých dalších.

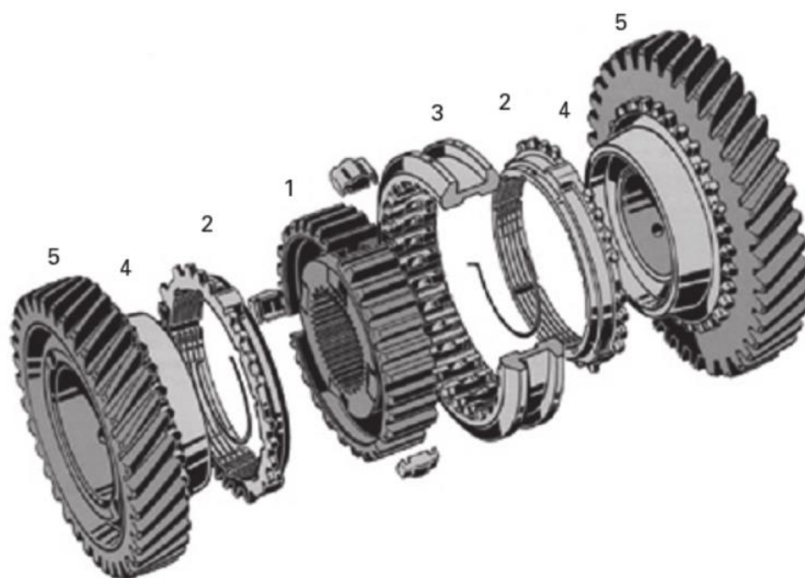
Díly z práškové metalurgie lze kromě typizace dle daného dopravního a manipulačního prostředku dále klasifikovat na podvozky, motory, převodovky a další součásti. Tvar, velikost, geometrie i funkce jednotlivých dílů je závislá od konkrétní použité aplikace (Fujiki, 2001).

#### 6.1.1 Převodové ústrojí

Dle konstrukčního uspořádání rozlišujeme převodovky manuální, poloautomatické či automatické, případně můžeme využívat variabilního časování ventilů. Manuální převodovky osobních a nákladních automobilů jsou vybaveny synchronizační jednotkou zajišťující plynulejší a snadnější řazení, jejíž výkon je rozhodující pro správnou funkci převodů. (Sigl a Rasch, 2009).

Jednotka se skládá z hřídele, ložiska, náboje, namontovaného vstupního hřídele a kluzné spojky, které přenáší kroučící moment ze sestavy hřídel-náboj na ozubené

kolo spojky. V automatických převodovkách se používají zubová a lopatková čerpadla, lamely a náboj spojky, náboj turbíny měniče, spojky měniče, díly převodníku s uzávěrem, parkovací převody, vnitřní a vnější kroužky, řetězová kola. Je vyžadována vysoká geometrická přesnost ozubených kol, viz obrázek 6.1, se záměrem docílit tichého a spolehlivého přenosu točivého momentu. Vyznačují se úzkými tolerancemi produktů.



**Obrázek 6.1:** Klíčové součásti synchronizačního systému 1) Rozbočovač synchronizátoru, 2) Synchronizační kroužek, 3) Posuvné pouzdro, 4) Spojkové kolo s kuželem, 5) Přenos (Chang a Zhao, 2013)

### 6.1.2 Motorová část

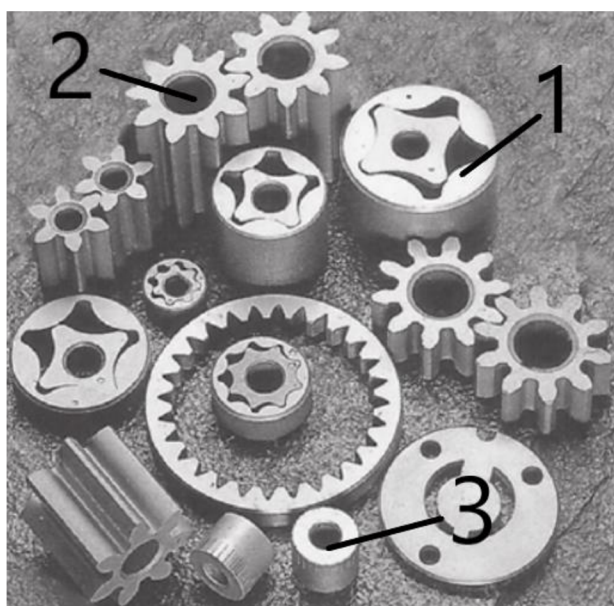
Prášková metalurgie sehrála při vývoji nových motorů důležitou roli spočívající ve vylepšení stávajících komponentů či zlepšení konstrukčních možností komponent v nově vyvíjených systémech. Praktickým příkladem je nahrazení vačkové hřídele vyrobené z plných kovaných tyčí hřídelí vyrobenou technologií PM za použití vaček a mezikroužků na duté trubce. Výhodou oproti nahrazené kované hřídeli je vyšší rozměrová přesnost, menší opracování, odolnost proti opotřebení a lehčí montáž. Mezi další díly se řadí práškově vyráběné kované ojnice, ozubená kola vačkového a klikového hřídele, olejová čerpadla (viz obrázek 6.2), řemenice, rozdělovací kladky, vložky sedel ventilů, nerezové vložky škrťací klapky, turbodmychadla a díly vstřikování paliva (Chang a Zhao, 2013).

Rozvodné kladky, další z dílů vyráběných metodou PM a přechod z karburátoru na benzínové vstřikovací systémy zajišťující nižší emise a spotřebu paliva. K zajištění

---

těchto aspektů musí použité ventily a pohony vykazovat odolnost při práci za vysokých teplot v prostředí s agresivními spalinami (Chang a Zhao, 2013).

Další oblasti využití PM v automobilové průmyslu zahrnují odpružení, řízení, části zámků dveří, brzd atd. Mezi díly tlumičů vyráběné PM spadají vodítka vzpěr, kompresní ventily, konce pístových válců a části sklápění sedel (Chang a Zhao, 2013). Babu a Dheeraj (2008) dodávají, že komponenty PM jsou zastoupeny i v protiblokovacích brzdových systémech ABS v podobě sensorových kroužků, jejich držáků, spolu s třecími materiály ve formě brzdových destiček.



**Obrázek 6.2:** Díly PM 1) Rotor olejového čerpadla, 2) Ozubená kola, 3) Pouzdro ze slinuté bronzové mosazi (Chang a Zhao, 2013)

### 6.1.3 Materiály

Trend při návrhu a výrobě automobilových součástí je zaměřen na využití tepelného zpracování s možností povrchových úprav, vyšší rozměrové přesnosti, zvyšování pevnosti a nižší hmotnosti. Škála používaných materiálů je proto velmi různorodá zahrnující kromě magnetických a elektromagnetických materiálů též legovaných či korozivzdorných ocelí, titanových slitin, kompozitu, mědi a bronzu atd. (Chang a Zhao, 2013).

### Železo a ocel

Pro konstrukční aplikace v podobě synchronizačních kroužků, ojníc, vačkových hřídelí, vík ložisek, ozubených kol olejových čerpadel či klikových hřídelí ozubených kol se využívá kategorie železných kovů zastoupená Fe-C, Fe-Cu, Fe-Cu-C a Fe-Mo-Cu-



---

Ni-C. Z důvodu úspory nákladů jsou drahé prvky (Mo, Ni a Cu) nahrazovány levnějšími Cr, Si či Mn. Tímto způsobem byly vytvořeny kompozice Fe-Mn-C, Fe-Si-Cr-Mo-C, Fe-Si-Cr-Mo-C. Další skupinu tvoří kompozice Fe-Cr-Mo-W-V-C, Fe-Cu-Sn-P-C, Fe-Cr-Ni-Mo-P-C charakteristické pro svoji odolnost proti opotřebení vhodné pro výrobu sedel ventilů, vedení ventilů či výrobu vačkových hřídelí. Nerezové oceli s označením 304L, 430L, 174PH mohou být rovněž potencionálně využity k výrobě sedel ventilů motoru (Chang a Zhao, 2013).

### **Hliník, titan a další materiály**

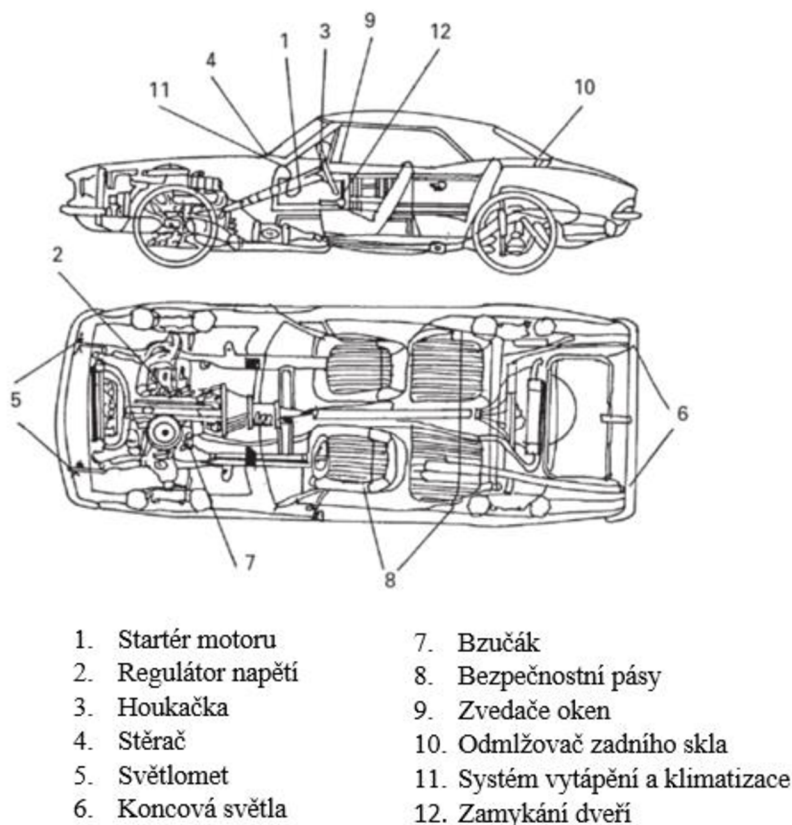
Hliník a jeho slitiny jsou používány z důvodu zvýšení palivové účinnosti vozidla a snížení hmotnosti. Komponenty vyráběné z hliníkových slitin tvoří převážně rotory olejových čerpadel, vložky válců, hliníková víka ložisek vačkových hřídelí, řemenic a dílů tlumičů. Nejčastěji používanými slitinami jsou Al-Si, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg. Výroba slitin probíhá za procesu lisování-slinování, při kterém se hliníkové prášky mísí s prášky předslitiny požadovaných vlastností (Chang a Zhao, 2013). Dalšího zlepšení dosavadních vlastností lze dosáhnout prostřednictvím rychlého ztuhnutí prášku a následného lisování za tepla (Delarbre a Krehl, 2000).

Další ze zástupců kovů využívaných v PM je titan. Vyznačuje se vysokou pevností, odolností proti korozi a nízkou hustotou. U slitiny Ti-6Al-4V byla prokázána proveditelnost automobilových dílů v podobě rozvodových řemenic, šroubů a matic, filtrů palivových čerpadel za pomoci elementárních a slitinových prášků (Ivasishin et al., 2002). Další využití titanu vyráběného metodou práškové metalurgie je v komponentech hnacích ústrojí, zejména v aplikacích s vratným pohybem (Pattanayak et al., 2007).

Měď, slitiny mosazi a bronzu, ložiskové slitiny Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Pb a Fe-Cu-Pb-C jsou vhodné pro výrobu kluzných a samomazných kartáčových ložisek, obložení, spojkových segmentů a brzdových pásů. Kompozity Cu-C nalézají uplatnění v regulátorech napětí, startérech a obvodových schránkách. Rovněž se využívají v elektricky řídicích systémech, zvedáků oken, houkaček, stěračů či světlometů, viz obrázek 6.3 (Chang a Zhao, 2013). Materiály pro výrobu el. kontaktů tvoří vícesložkové systémy kombinující drahé kovy, zejména zlato, stříbro, platina s kovy Cu, W, Ni či Mo a kompozitů na bázi stříbra jako je Ag-CdO či Ag-SnO (Joshi et al., 1998).

PM je technologie zaměřená na výrobu precizně konstruovaných součástí s ohledem na udržitelnou výrobní technologii. Cílem této technologie je trvale zlepšit kvalitu

stávajících komponent, spolu se zavedením inovativních komponent do nových systémů. Příležitostí do budoucna je spolupodílení se při vývoji ekologických automobilů na trh, primárně při vývoji nových produktů v oblastech funkčního elektromagnetického ovládání a pohonů (Chang a Zhao, 2013).



**Obrázek 6.3:** Schéma automobilu znázorňující typické aplikace kontaktů (Chang a Zhao, 2013)

## 6.2 Řezné materiály

Mezi řezné materiály se řadí rychlořezné materiály, keramika, tvrdokovy, kubický nitríd boru, diamant, cermety. Dle dané náročnosti musí materiály splňovat níže uvedené vlastnosti.

- Dostatečnou houževnatost způsobující vibrace během obráběcího procesu
- Tvrdost
- Chemickou stabilitu vůči materiálu obrobku

Výběr obecně závisí na typu operace, parametrech obrábění a obrobitelnosti konkrétního materiálu. Zároveň musí při obrábění vykazovat odolnosti proti:

- Opotřebení, ke kterému dochází na břitu nástroje

- 
- Mechanický nebo tepelný ráz spojený s řezáním
  - Teplo generované energií potřebné k vytvoření a odstranění materiálu z obrobku (Edwards, 1993).

### 6.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály vzniklé kombinací karbidových prášků a kovového pojiva. Používají se zejména ve formě břitových destiček mechanicky upínaných do řezných nástrojů určených pro obrábění široké skupiny materiálů. Základními prvky pro výrobu veškerých povlakových i nepovlakových druhů slinutých karbidů jsou karbid wolframu (WC) ve spojení s kobaltem (Co) jako pojiva (Lassner a Schubert, 1999).

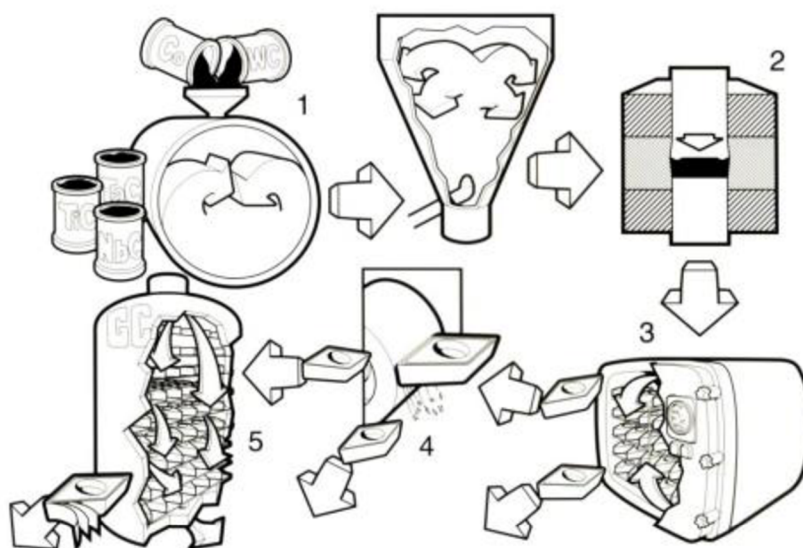
Kombinace houževnatého kobaltu a tvrdého a zároveň křehkého karbidu vytváří jedinečné kombinace tvrdosti a houževnatosti vhodné zejména pro obrábění kovů s vysokými posuvnými rychlostmi. (Schedler, 1988). Hlavní faktory ovlivňující řezné vlastnosti WC-Co jsou velikost zrna karbidu wolframu a samotný obsah kobaltu. V závislosti na konkrétním použití se velikost zrna WC může pohybovat od 0,3 do 30 mikrometrů při obsahu pojiva v rozmezí 3 a 30 % hmotnosti (Brookes, 1992). Jako další mohou být použity karbidy tantalu (TaC), niobu (NbC), chromu (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) či titanu (TiC) (Humár, 2006).

#### 6.3.1 Výroba slinutých karbidů

První fáze spočívá v přípravě výchozích karbidových a pojivových prášků v požadovaném poměru a jejich následném intenzivním míchání a mletí za použití kulových mlýnů. Cílem této operace je vytvořit homogenní, jemnozrnnou směs karbidů a pojivového kovu. Takto připravená směs je formována za použití hydraulických lisů do pomocných forem nebo metodou vytlačování přes tryšku do požadovaného tvaru. Lisovací tlaky se pohybují v rozmezí 50–150 MPa. Výlisek musí vykazovat rovnoměrné zhutnění v celém objemu (Humár, 2003).

V následující fázi jsou výlisky vystaveny procesu slinování, při kterém dochází ke změně struktury a přeměně na kompaktní výrobek vlivem teplotních, fyzikálních a chemických pochodů. Slinování probíhá v ochranné atmosféře tvořené vodíkem nebo vakuem, kde je proces rozdělen do tří částí. Jedná se o předběžný ohřev v rozmezí 700–1000 °C, ohřev na pracovní teplotu a výdrž na této teplotě (pro materiály WC-Co a materiály WC-TiC-Co s nízkým obsahem TiC) se pohybuje v rozmezí

1350–1650 °C, následuje konečné ochlazení, viz obrázek 6.4. Dodatečně prováděnými úpravami jsou broušení a povlakování (Humár, 2003).



**Obrázek 6.4:** Schéma pracovního postupu výroby slinutých karbidů 1) Příprava směsi uvezených prášků, 2) Formování směsi, 3) Slinování 4) Broušení, 5) Povlakování (Humár, 2003)

### 6.3.2 Rozdělení slinutých karbidů

Nepovlakové slinuté karbidy jsou dle normy ČSN ISO 513 rozděleny do jedné ze tří hlavních obráběcích skupin označených písmeny P, M a K. Mimo svojí charakteristickou barvu značení a předpony ve formě písmene hlavní obráběcí skupiny jsou dle konkrétní aplikace odlišeny číslicemi (German, 1998). Čím vyšší číslo, tím se karbid vyznačuje vyšší houževnatostí, pevností v ohybu a vyšším obsahem pojícího kovu, zároveň dosahuje nižší tvrdosti a otěruvzdornosti (Humár, 2006).

- Skupina P, viz tabulka 6.1, (Kód barvy modrá) je charakteristická pro vysoké množství TiC a Tac zlepšující odolnost proti opotřebení na čele nástroje v místech styku a tvorby třísky (Šalák a Selecká, 2005). Tato skupina je určena pro obrábění slitinových ocelí, korozivzdorných ocelí a uhlíkových ocelí vytvářecí při úběru materiálu dlouhou třísku. Přísada TiC zajišťuje v porovnání s WC vyšší tvrdost za vyšších teplot. S vyšší tvrdostí narůstá křehkost a nižší odolnost proti abrazi. Skupina je rozdělena na P (01,10,20,30,40,50) (Edwards, 1993).
- Skupina M (Kód barvy žlutá) je rozdělena na M (10, 20, 30, 40) obsahující v porovnání se skupinou P méně TiC uvedené viz tabulka 6.2 (Edwards, 1993).

Vhodná pro obrábění manganových ocelí, austenitických ocelí, žáruvzdorných a neželezných slitin a lité oceli. Při úběru materiálu vytváří střední třísku. Je náchylná na vydrolování ostří (Humár, 2006).

- Skupina K, viz tabulka 6.3, (Kód barvy červená) je charakteristická pro svoji krátkou a drobnou třísku. Dlouhá tříška vlivem většího styku s čelem nástroje způsobuje vyšší tepelnou zátěž (Edwards, 1993). Mezi materiály vhodné k obrábění se řadí austenitické nerezové oceli, temperovaná litina a neželezných kovů a slitin na bázi Al a Cu. Převládá abrazivní a adhezivní opotřebení za relativně nízkých rezných sil. Jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny slinutých karbidů tvoří karbid wolframu (Humár, 2006).

**Tabulka 6.1: Charakteristické vlastnosti a dělení skupiny P (Humár, 2003)**

Značení	Vhodnost použití	Chemické složení [%]			Pevnost v ohybu [Mpa]	Pevnost v tlaku [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tvrdost [HV]
		WC	TiC	Co				
P01	Pro jemné soustružení a vyvrtávání děr do nerezové oceli a lité oceli při velkých rezných rychlostech a posuvech do 0,15 mm/ot	WC	TiC	Co	750	3500	xxx	1800
		74	20	6				
P10	Pro dokončování, případně polohrubování při soustružení, frézování a kopírování. Nevhodný pro přerušovaný řez a velké úběry třísek	WC	TiC	Co	1300	4600	530	1600
		78	16	6				
P20	Vhodný pro kopírování, frézování na čisto, pro vrtání hlubokých děr, na záhlubníky, frézy	WC	TiC	Co	1500	4800	540	1550
		78	14	8				
P30	Vhodný pro soustružení, frézování a hoblování při větších průřezech třísky i při přerušovaném řezu	WC	TiC	Co	1700	5000	560	1500
		84	8	8				
P40	Pro soustružení, frézování, hoblování, obrážení a částečně pro práce na automatech	WC	TiC	Co	1900	4900	550	1400
		85	4	9				
P50	Určen k velmi těžkému hrubování soustružením, frézováním a hoblováním ocelí o nízké pevnosti, nerezavějících a žáruvzdorných ocelí	WC	TiC	Co	2100	4000	520	1300
		82	3	12				

**Tabulka 6.2: Charakteristické vlastnosti a dělené skupiny M (Humár, 2003)**

Značení	Vhodnost použití	Chemické složení [%]			Pevnost v ohybu [Mpa]	Pevnost v tlaku [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tvrdość [HV]
		WC	TiC	Co				
<b>M10</b>	Pro dokončovací soustružení a frézování oceli, lité oceli a temperované litiny nepřerušovaným řezem.	WC	TiC	Co	1350	5000	580	1750
		84	10	6				
<b>M20</b>	Je vhodný pro soustružení, frézování i hoblování legovaných ocelí a litiny při malých průřezech třísky.	WC	TiC	Co	1600	5000	570	1550
		82	10	8				
<b>M30</b>	Pro hoblování a hrubé frézování těžkoobrobitelných materiálů. Vhodný pro upichování na automatech.	WC	TiC	Co	1800	4800	550	1450
		81	10	9				
<b>M40</b>	Pro těžké hrubování a přerušované řezy při obrábění austenitických korozivzdorných ocelí a tvárné litiny	WC	TiC	Co	2100	4400	540	1300
		79	6	15				

**Tabulka 6.3: Charakterické vlastnosti a dělení skupiny K (Humár, 2003)**

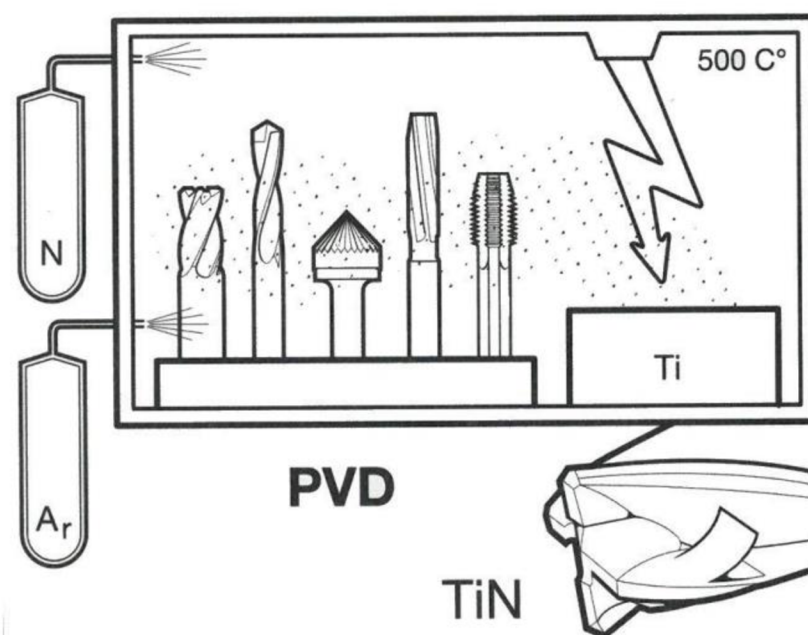
Značení	Vhodnost použití	Chemické složení [%]			Pevnost v ohybu [Mpa]	Pevnost v tlaku [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tvrdość [HV]
		WC	TiC	Co				
<b>K01</b>	Pro jemné soustružení, frézování a vrtání šedé litiny, hliníkových slitin s velkým obsahem křemíku, plastických hmot	WC	TiC	Co	1200	5900	670	1800
		92	4	4				
<b>K05</b>	Pro soustružení kalené oceli tvrdosti do 50 HRC a tvrzené litiny do 80 HRC s čistým povrchem nepřerušovaným řezem.	WC	TiC	Co	1400	5900	650	1750
		91	3	6				
<b>K10</b>	Pro obrábění litiny tvrdosti přes 200 HB, kalené oceli tvrdosti přes 50 HRC, temperované litiny, slitin mědi a křemíkových slitin hliníku	WC	TiC	Co	1500	5700	630	1600
		92	2	6				
<b>K20</b>	Pro obrábění litiny tvrdosti do 220 HB a neželezných kovů, pro vrtání hlubokých děr do šedé litiny a žárovzdorných ocelí	WC	TiC	Co	1700	5200	620	1550
		93	1	6				
<b>K30</b>	Pro soustružení, frézování a hoblování oceli a šedé litiny tvrdosti do 180 HB, pro obrábění barevných kovů, hliníku, zinku	WC	TiC	Co	1900	4700	580	1450
		90	1	9				
<b>K40</b>	Pro soustružení, frézování a hoblování všech druhů dřeva, lisovaných a plastických materiálů, barevných kovů, hliníku a zinku	WC	TiC	Co	2100	4500	570	1300
		87	1	12				

## 6.4 Povlakované slinuté karbidy

Metoda povlakování je založena na nanášení tenké vrstvy materiálu, vyznačující se vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení, na podklad v podobě běžných skupin slinutých karbidů. Povlak neobsahuje žádné pojivo, má méně strukturních defektů a jemnější zrnitost. Podílí se na zamezování tvorby nárůstku na břitu nástroje. Dle technologie nanášení lze povlakování rozdělit na:

- PVD povlaky (Physical Vapor Deposition), viz obrázek 6.5, kde povlakování probíhá za relativně nízkých teplot (400–600 °C) a tlaků 0,1 až 1 Pa. Proces je založen na přeměně povlakových materiálů (odprašování, napařování) z pevného skupenství do plynné fáze prostřednictvím iontové implementace (ion-plating), napařování (evaporation) nebo napařování (sputtering) (Humár, 2006).

Kondenzované a uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s reaktivními a inertními plyny (Ar, N<sub>2</sub>) tvořící ochrannou atmosféru komory za současného působení záporného napětí 50 až 400 V. Tím dochází k vylučování částic na povrchu substrátu (slinutého karbidu) a tvorbě tenké homogenní vrstvy o síle 3–5 μm. Tato metoda byla původně vyvinutá pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, následný vývoj vedl k rozšíření pracovního využití i pro slinuté karbidy (Humár, 2006)

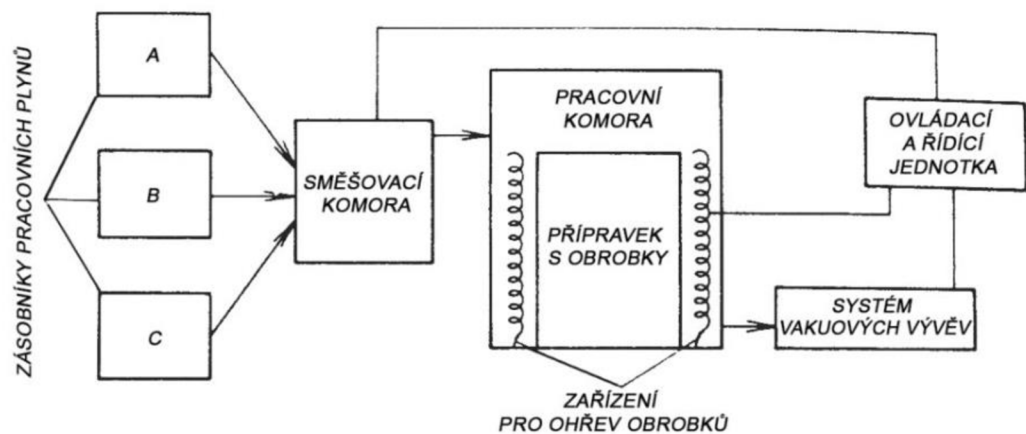


Obrázek 6.5: PVD metoda (Sandvik.coromant.com., 2019)



- CVD povlaky (Chemical Vapor Deposition), viz obrázek 6.6, jsou založeny na principu chemického napařování z plynné fáze při teplotách 700–1500 °C, při kterém jsou plynné chemické sloučeniny zavedeny do reakční komory za přítomnosti vloženého substrátu. V reakční komoře dochází k reakci těchto plynů za vytvoření pevného homogenního povlaku na povrchu substrátu aktivované prostřednictvím paprsku elektronů, laserového či plazmového záření (Humár, 2006).

Mísení plynů a jejich dávkování zajišťují směšovací komora a ovládací a řídicí jednotka přivádějící plyny do reaktivní pracovní komory, kde probíhá samotné povlakování. Součástí je zařízení pro ohřev obrobků a systém vakuových vývěv. CVD metoda je hlavní metodou povlakování slinutých karbidů (strojarskabible.cz, 2018).



Obrázek 6.6: CVD metoda (strojarskabible.cz, 2018)

#### 6.4.1 Praktické použití:

Povlakové i nepovlakové slinuté karbidy lze využít pro obrábění strojírenských a těžce obrobitelných materiálů. Povlakové karbidy jsou dostupné v širokém portfoliu řezných elementů a vyměnitelných řezných břitových destiček viz obrázek 6.8. Mezi hlavní aplikace použití se řadí vrtání, frézování, soustružení.

Druhá skupina je tvořena nepovlakovými karbidy vhodnými pro obrábění žáruvzdorných slitin, slitin Ti a hliníku, viz tabulka 6.4. Tuto skupinu doplňují monolitní karbidové nástroje z jemnozrnných slinutých karbidů, viz obrázek 6.7 (osu.cz, 1999).

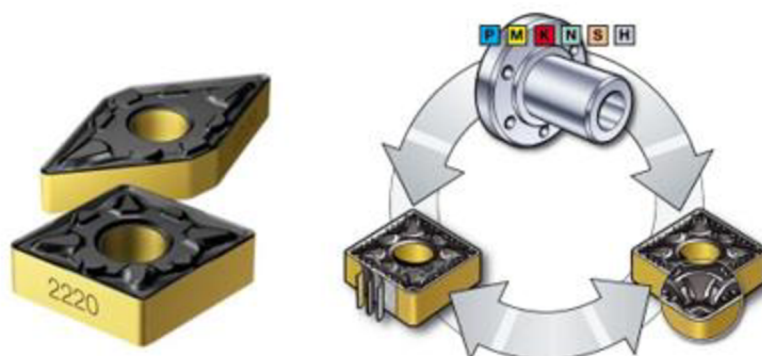
**Tabulka 6.4: Corodrill 860-GM (sandvik.coromant.com, 2019)**

Technické specifikace	
Vysoce výkonné vrtání krátkých děr	Obráběné materiály
Standartní rozsah průměru 3-16 mm	<b>P</b> Ocel
Hloubka vrtání 3-8 x D	<b>M</b> Korozivzdorné oceli
Dosažitelná tolerance díry H8-H9	<b>K</b> Litiny
Tolerance tělesa nástroje m7	



**Obrázek 6.7: Monolitický karbidový vrták Corodrill 860-GM (sandvik.coromant.com, 2019)**

Břítové destičky nástrojové třídy GC2020 s CVD povlakem jsou určeny pro hrubovací a polodokončovací operace při soustružení korozivzdorných ocelí, jejichž obrábění je spojeno s tvorbou velkého množství tepla a zvýšeným třením.



**Obrázek 6.8: Břítové destičky GC2020 s CVD povlakem (sandvik.coromant.com, 2019)**

Nabízí dobrou odolnost proti otěru a tepelným rázům při přerušovaných řezech. Dlouhá životnost a zvýšená odolnost proti plastické deformaci je zajištěna patentově chráněnou technologií povlakování Inveio (mmspektrum.com, 2019).

---

## 6.5 Samomazná ložiska

Princip samomazného ložiska je založen na tření vyvolané rotačním pohybem hřídele, při kterém dochází vlivem zvyšující se teploty a kapilárních sil k vytahování lubrikantu z pórů ložiska a tvorbě souvislého mazacího filmu. Po zastavení rotačního pohybu a postupném ochlazení se mazivo stáhne zpět do pórů ložiska. Pelletiers. et al., (2007) dodává, že poréznost kluzných ložisek je podmíněna výrobní technologií založené na slinování kovových prášků pod tlakem. Porézní kovy mají uplatnění i v dalších technických aplikacích jako jsou konstrukční díly, elektrochemická zařízení, filtry, membrány atd (Güngör. et al., 2015).

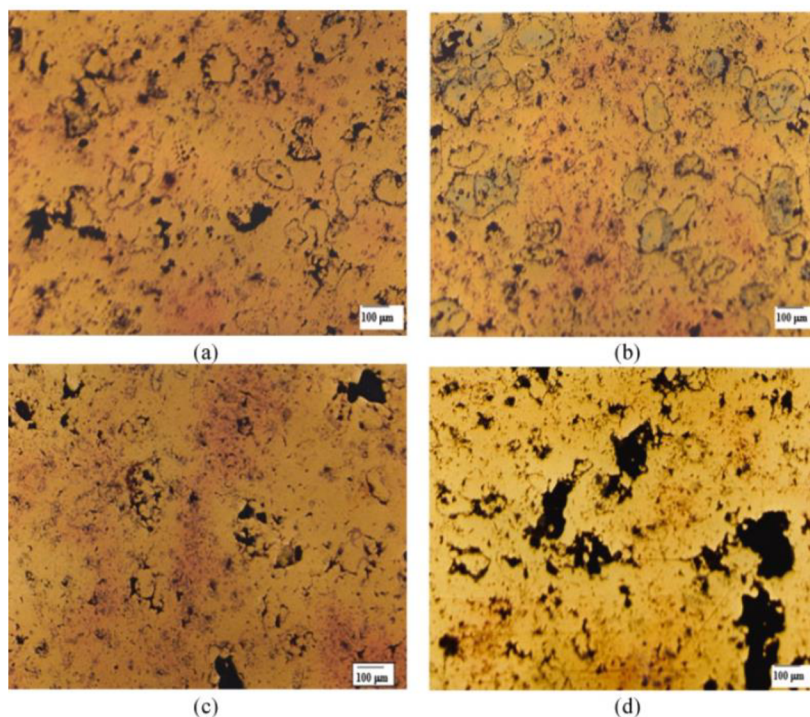
Nejvíce zastoupenými materiálem využívaný pro výrobu samomazných ložisek je Cu a její slitiny, dále pak slitiny niklu a stříbra (Suman et al., 2021). Ložiska musí vykazovat určité vlastnosti, jako je dobrá tepelná vodivost, nízká cena, vysoká odolnost proti opotřebení, nízký koeficient tření, snadná obrobitelnost, vysoká únosnost a odolnost proti korozi, nízká tepelná roztažnost a schopnost zalévání cizích částic (Unlu et al., 2011). Silvain (2020) dodává, že měď je materiál disponující dobrou mechanickou odolností a odolností proti opotřebení a potvrzuje vhodnost pro konstrukčně namáhané součásti. Slitiny mědi, v podobě mosazi a bronzu, jsou zastoupeny ve výrobě čepových ložisek (Ünlü, a Atik, 2010). Tvrzení o vhodnosti těchto materiálů dokládá ve své studii i Tufekci et al. (2016)., kteří došli k závěru, že samomazná ložiska PM na bázi Cu mají lepší třecí vlastnosti a vlastnosti proti opotřebení než ložiska na bázi Fe

Konkrétním představitelem pro výrobu samomazných ložisek je slitina Cu–Sn–Zn za použití tuhého maziva v podobě grafitu (Gr) vhodný pro velká zatížení za vysokých teplot (Chaira.,2021). Pan et al., (2019) dodává, že kromě snížení tření u materiálu zajišťuje grafit přidaný do slitin mědi a cínu v kombinaci s TiC vloženým mezi grafit a bronzovou maticí zajišťuje lepší mechanické a tribologické vlastnosti. Durak (2003) na základě experimentálních výsledků získaných a dokladovaných v jeho studii ukázaly, že správný výběr maziva a vhodné provozní podmínky jsou velmi důležité pro tribologické vlastnosti porézních ložisek.

Zkoumaný kompozit je zastoupen z 88 % hmotn. Cu, 9 % hmotn. Sn a 3 % hmotn. Zn s grafitovými hmotnostními frakcemi 0,5 % hmotn. C, 1,0 % hmotn. C, 1,5 % hmotn. C a 2,0 % hmotn.), viz obrázek 6.9, za účelem posouzení vlivu na požadované vlastnosti. Kompozit dosáhl optima mechanických vlastností při hmotnostním podílu grafitu 1,0 % hm. Tvrdost, hustota, pevnost v tlaku, pórovitost a rychlost opotřebení

---

byly 55 BHN,  $6,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 538 MPa,  $1,88 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$  a 23,3 % při tomto hmotnostním zlomku. Opakované pokusy zvýšení hmotnostního podílu grafitu nad 1,0 % hmotn. (1,5 % hmotn. C a 2,0 % hmotn. C v této studii) by mohlo snížit tvrdost, hustotu a pevnost v tlaku a zároveň zvýšit rychlost opotřebení a hodnotu pórovitosti.



**Obrázek 6.9: Změny v porovitosti procentuálního zastoupení grafitu (Susilowati et al., 2022)**

Snímky ukazují vliv procentuální zastoupení grafitu. Zvýšení hmotnostního % grafitu z 0,5% na 1% vedlo ke snížení pórů a jejímu vyplnění kapalnou fází Sn a Zn (a,b) (German, 1984). Zvýšením obsahu grafitu na 2 % (d) vykazoval materiál největší póry nezbytné pro skladování oleje. Přesto zmenšení pórů při 1 % grafitu poskytuje materiálu dostatečnou zásobárnu na uložení oleje, kde by s ohledem na požadované vlastnosti vykazuje poréznost mezi 20 až 25 % (Pawlak et al., 2013).

## 6.6 Elektrické kontakty

Kompozity wolfram-měď (WCu) jsou materiály vyznačující se vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, nízkým koeficientem tepelné roztažnosti (Güler, a Evin, 2009). Na základě zmiňovaných vlastností jsou vhodné pro aplikace, jako jsou pohyblivé nebo stacionární elektrické kontaktní materiály, chladiče a elektrody (Gök a Kaplan, 2011). Güler (2006) k tématu vlastností kompozitu WCu dodává, že pro zajištění integrity během provozu je podmiňující vysoká teplota tání a tepelná a elektrická vodivost.

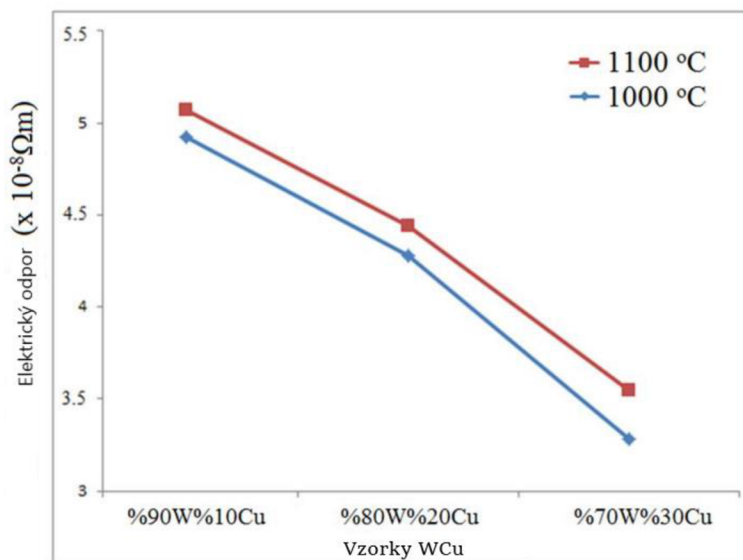
Luo et al., (2009) poukazuje na obtížnou výrobu kompozitu způsobenou rozdílným stavem skupenství při smíchání wolframu a mědi, je zde tedy nutnost použití obou materiálů společně. Dodatečné mechanické, protikorozi a elektrické úpravy kompozitních materiálů WCu lze provádět pomocí legujících prvků Ni, Co, Cu, Ag (Erçetin, 2015). Johnson a German (1993) dodává, že i smáčivost mezi mědi a wolframem regulovat a zlepšovat přidáním Pd, Ni, Co, Fe a Zn do W-Cu kompozitů. Ibrahim (2009) ve své studii konstatuje, že kompozity vyrobené z wolframových prášků potažených Cu vykazovaly vyšší hustotu, tvrdost, pevnost v tlaku a elektrickou vodivost než kompozity vyrobené z elementárních prášků. Problematikou elektrické vodivosti kontaktů WCu se ve své studii zabývají Erçetin a Aslantaş (2017), ve které zkoumají šest vzorků o rozdílném procentuálním zastoupení mědi a rozdílné slinovací teplotě uvedené v tabulce č.6.6.

**Tabulka 6.6: Hmotnostní složení zkoumaných vzorků (Erçetin a Aslantas, 2017)**

Název vzorku	Hmotnost. složení (%)	Slinovací teplota (°C)
WCu-1	%90W%10Cu	1000
WCu-2	%80W%20Cu	1000
WCu-3	%70W%30Cu	1100
WCu-4	%90W%10Cu	1100
WCu-5	%80W%20Cu	1100
WCu-6	%70W%30Cu	1100

Nejnižší hodnota elektrického odporu byla získána ze vzorku WCu-6 slinovaný při teplotě 1100 °C při 30% zastoupení mědi, zatímco nejvyšší hodnota elektrického odporu byla získána u vzorku WCu-1 slinutého při 1000 °C, viz obrázek 6.10. Výstupem studie bylo prokázáno, že s klesající hodnotou elektrického odporu a zvýšení poměru

mědi vede ke zvýšení elektrické vodivosti, matrice mědi je schopna se převést na kapalnou fázi (Erçetin a Aslantaş, 2017).



Obrázek 6.10: Graf elektrického odporu závislého na teplotě sliňování (Erçetin a Aslantaş, 2017)

## Stříbro

Různé typy kontaktních elektrických materiálů založené na bázi stříbra jsou běžně používány v nízkonapěťových aplikacích ve formě stykačů, spínačů či jističů (Sato a Hijikata, 1982). Holm (1999) dodává, že materiály na bázi stříbra jsou charakteristické pro svoji vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, dobrými mechanickými vlastnostmi, odolností proti svařování a oxidační odolností zamezující erozi.

Ag-SnO<sub>2</sub> a Ag-SnO<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v podobě elektrických kontaktů indukované zavedením nanočástic oxidů kovů jsou porovnávány s materiály Ag-SnO<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, Ag-SnO<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Ag-ZnO tvořené mikročásticemi oxidu kovu viz tabulka č. 6.7. Ag-ZnO a Ag-SnO<sub>2</sub> jsou kontaktními materiály zdokonalovány z hlediska výkonnosti a použitelnosti za účelem zahrazení kompozitu Ag-CdO. Zheng. (2009) k této problematice poukazuje na vhodnost AgSnO<sub>2</sub>, která je omezena poměrně špatným chováním založené na přehřívání v důsledku vysokého kontaktního odporu v povrchových vrstvách a obtížné zpracovatelnosti způsobené vysokou tvrdostí a velikostí částic SnO<sub>2</sub>. Wojtasik (2004) dodává, že zlepšení funkčních vlastností materiálu lze docílit přidáním druhé složky oxidu kovu ve formě In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO nebo WO<sub>3</sub> zvyšující disperzi SnO<sub>2</sub>.

WO<sub>3</sub> zlepšuje smáčivost a slinovatelnost SnO<sub>2</sub> v roztaveném stříbře, zároveň zlepšuje chování proti přehřátí a svařování. Přidáním složky In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> k Ag-SnO<sub>2</sub> je docíleno zlepšení mechanických vlastností při zachování dobré elektrické vodivosti (Lungu M., 2006).

**Tabulka 6.7: Hmotnostní složení zkoumaných vzorků (Ćosović et al., 2011)**

Vzorek	Složení (%)				
	Ag	SnO <sub>2</sub>	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WO <sub>3</sub>	ZnO
Ag-SnO <sub>2</sub>	92	8	–	–	–
Ag-SnO <sub>2</sub> nano	92	8	–	–	–
Ag-SnO <sub>2</sub> In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89,1	8	2,9	–	–
Ag-SnO <sub>2</sub> In <sub>3</sub> nano	89,1	8	2,9	–	–
Ag-SnO <sub>2</sub> WO <sub>3</sub>	90	9,5	–	0,5	–
Ag-ZnO	92	–	–	–	8

Nejdůležitější roli při určování vlastností materiálů elektrických kontaktů je mikrostruktura. Heringhaus (2000) ve své studii dodává, že optimální mikrostruktury lze dosáhnout homogenní distribucí částic oxidu kovů o průměrech 50–200 nm.

Mikrostrukturální analýza podrobila kompozity rozboru z hlediska hustoty, poréznosti, tvrdosti a zejména elektrické vodivosti podmiňující jejich uplatnění v podobě elektrických kontaktů, viz tabulka 6.8. Vysoká tvrdost a velmi dobré elektrické vlastnosti vykazuje zkoumaný kontaktní vzorek č.6 (Ag-ZnO). Lze to přičíst větší disperzi velmi jemných částic ZnO v matici stříbra. To je významné z hlediska lepší disperze oxidů a vyšší tvrdosti, které mohou zlepšit anti svařovací chování a odolnost proti opotřebení. Nejvyšší hodnotu elektrické vodivosti vykazuje vzorek obsahující mikro SnO<sub>2</sub> částice, lze to vysvětlit nižší disperzí částic oxidu kovu a existencí spojených zrn čistého stříbra (Ćosović et al., 2011).

**Tabulka 6.8: Fyzikální vlastnosti zkoumaných kontaktních materiálů (Ćosović et al., 2011)**

Vzorek	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Pórovitost [%]	Tvrdost [HV]	Elektrická vodivost [% IACS]
Ag-SnO <sub>2</sub>	9,37	7,08	68	68,61
Ag-SnO <sub>2</sub> nano	9,891	11,95	81	56,11
Ag-SnO <sub>2</sub> In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,4	6,14	73	53,02
Ag-SnO <sub>2</sub> In <sub>3</sub> nano	9,54	4,74	75	56,98
Ag-SnO <sub>2</sub> WO <sub>3</sub>	9,32	7,33	71	52,63
Ag-ZnO	9,61	2,08	82	66,63

---

Kompozity s nanočásticemi oxidu kovu se vyznačují nižší porézností a vyšší hustotou a tvrdostí než jejich protějšky. Rozdíly ve vlastnostech kontaktů s nano a mikro částicemi oxidů kovů se stanou prokazatelnějšími po dalších testech.

## 6.7 Magnetické materiály

Průmyslově využívané magnetické materiály lze rozdělit do dvou skupin v podobě tvrdých a měkkých magnetických materiálů. Magneticky měkké materiály jsou využívány pro zesilování a vedení magnetického toku. Vyznačují se úzkou a zároveň vysokou hysterezní smyčkou. Po odstranění vnějšího magnetického pole je magnetismus nulový. Jsou charakteristické vysokou čistotou, nízkou porézností a velkou velikostí zrn (Adler et al. 2006). Magneticky měkké materiály nejsou slinovány, pouze vytvrzovány nebo žhánány při teplotách pod 500 stupňů celsia na konečnou úroveň pevnosti která je nízká (Soinski a Moses, 2011). Schoppa et al. (2013) dodává, že díky nízké pevnosti jsou využívány v jádrech rotoru a statoru rotačních elektrických strojů. Lze použít měkké magnetické materiály s úzkou hysterezní smyčkou a nízkými ztrátami jádra v elektronických zařízeních, jako jsou výkonové transformátory v AC adaptérech (Pandey et al., 2019).

Tvrdé permanentní magnetické materiály jsou charakteristické pro široké a vysoké hysterezní smyčky, zmagnetizovaný materiál oproti měkkým magnetům i po odstranění vnějšího pole zůstává sám zdrojem magnetického pole. Vyznačují se širokou hysterezní smyčkou, vysokou zbytkovou indukci ( $B_r$ ), vysokou saturační indukci ( $B_s$ ) a velkou koercitivitou ( $H_c$ ) (Ferreira, 2016).

Hliníkový matricový kompozit (AMC) nalézá uplatnění v automobilových a leteckých aplikacích, multifunkčních elektrických obalech, obnovitelných energiích, lékařském vybavení či telekomunikačním průmyslu. Garg et al., (2019). Boon et al., (2012) uvádí, že hliník jako paramagnetická slitina je ve srovnání s železnými materiály jako je ocel, titan či litina charakteristický svými špatnými magnetickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti lze upravit vhodnou kombinací přídavných materiálů.

Magnetit ( $Fe_3O_4$ ) je nejrozšířenější magnetický materiál na Zemi. Je považován za vhodné plnivo, je levný a při reakci s hliníkem produkuje vysokou volnou energii Wang (2020). Magnetitové nanočástice se řadí mezi významné výplňové materiály s vynikajícími magnetickými vlastnostmi (Pandey et al., 2019). Výzkumy vlastností hliníkového kompozitu se zaměřením na magnetické vlastnosti odhalily, že nanočástice  $Fe_3O_4$  vedly ke zlepšení měkkých magnetických vlastností. Ashrafi et al. (2022)



---

ve své studii zkoumali magnetické vlastnosti AMC vyztuženého 10, 15, 20, 30 a 35 hm. %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  metodou práškové metalurgie. Bylo pozorováno, že  $M_s$  kompozitů se zvýšilo hmotnostní procento  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Výsledky magnetických vlastností ukazují, že přídavek  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  z 10 na 15 hm. % v kompozitu mírně zvýšil  $M_s$  z 2,49 na 6,55  $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$  a snížil  $H_c$  z 231,87 na 188,82 G. Zvýšením hmotnostního procenta  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (20–30 hm. %) se tyto hodnoty výrazně zlepšily na 10,06 a 11,06  $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$  a nakonec dosáhly maxima  $M_s$  13,06  $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$  pro Al-35 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , což je zlepšení o 424,5 %, zatímco  $H_c$  se snížilo na 142,34 G. Tvrdost se také zlepšila ze 43 na 47 HV z nejnižšího na nejvyšší hmotnostní procento  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  v kompozitu. Rozložení částic v AMC je homogenní, což zvýšilo hodnotu tvrdosti hliníku o 9,3 %. Tepelná vodivost Al-35 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  je 168  $\text{W} \cdot \text{mk}^{-1}$ . Elektrický odpor kompozitu Al-35 hm. %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $9,9 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ ). Na základě tvrdosti, magnetizace, tepelné vodivosti a elektrického odporu všech vzorků lze kompozit Al-35 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  vybrat jako optimální kompozit vhodný pro magnetické aplikace (Ashrafi et al. (2022)).

---

## Závěr

Cíl práce se podařilo splnit, v první části byly popsány jednotlivé operace procesu práškové metalurgie zahrnující přípravy, zpracování, zhutnění, slinování a konečné úpravy pro získání požadovaných vlastností finálního výrobku. Druhá část se zabývala vyhledáváním studií potvrzující vhodnost a uplatnitelnost práškové metalurgie v oblasti dopravní a manipulační techniky, které jsou jasně prokazatelné ze zpracovaných dat uvedené v závěrečné kapitole práce. Zároveň jsou výsledná data z vybraných studií přiložena níže, která zkoumanou problematiku a uplatnitelnost PM potvrzují.

Slitina Cu–Sn–Zn za použití tuhého maziva v podobě grafitu (Gr) je zkoumaný kompozit a představitel pro výrobu samomazných ložisek. Kompozit byl zastoupen z 88 % hmotn. Cu, 9 % hmotn. Sn a 3 % hmotn. Zn s grafitovými hmotnostními frakcemi 0,5 % hmotn. C, 1,0 % hmotn. C, 1,5 % hmotn. C a 2,0 % hmotn.) za účelem posouzení vlivu na požadované vlastnosti. Kompozit dosáhl optima mechanických vlastností při hmotnostním podílu grafitu 1,0 % hm. Tvrdost, hustota, pevnost v tlaku, pórovitost a rychlost opotřebení byly 55 BHN,  $6,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 538 MPa,  $1,88 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}$  a 23,3 % při tomto hmotnostním zlomku. Opakované pokusy zvýšení hmotnostního podílu grafitu nad 1,0 % hmotn. (1,5 % hmotn. C a 2,0 % hmotn. C v této studii) by mohlo snížit tvrdost, hustotu a pevnost v tlaku a zároveň zvýšit rychlost opotřebení a hodnotu pórovitosti (Susilowati et al., 2022).

Kompozity na bázi wolfram-měď (WCu) a stříbra jsou materiály vyznačující se vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Nejnižší hodnota elektrického odporu byla získána ze vzorku WCu-6 slinovaný při teplotě 1100 °C při 30% zastoupení mědi, zatímco nejvyšší hodnota elektrického odporu byla získána u vzorku WCu-1 slinutého při 1000 °C. Výstupem studie bylo prokázáno, že s klesající hodnotou elektrického odporu a zvýšení poměru mědi vede ke zvýšení elektrické vodivosti (Ercetin a Aslantas, 2017).

Dalšími kompozity jsou materiály Ag-SnO<sub>2</sub> a Ag-SnO<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indukované zavedením nanočástic oxidů kovů porovnávané s materiály Ag-SnO<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, Ag-SnO<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Ag-ZnO tvořené mikročásticemi oxidu kovu. Mikrostrukturální analýza podrobila kompozity rozboru hlediska hustoty, porézности, tvrdosti a zejména elektrické vodivosti podmiňující jejich uplatnění v podobě elektrických kontaktů. Vysoká tvrdost a velmi dobré elektrické vlastnosti vykazuje zkoumaný kontaktní vzorek č.6 (Ag-ZnO). To lze přičíst větší disperzi velmi jemných částic ZnO v matici stříbra. Nejvyšší

---

hodnotu elektrické vodivosti vykazuje vzorek obsahující mikro SnO<sub>2</sub> částice, lze to vysvětlit nižší disperzí částic oxidu kovu a existencí spojených zrn čistého stříbra. Kompozity s nanočásticemi oxidu kovu se vyznačují nižší porézností a vyšší hustou a tvrdostí než jejich protějšky. Rozdíly ve vlastnostech kontaktů s nano a mikro částicemi oxidů kovů se stanou prokazatelnějšími po dalších testech (Ćosović et al., 2011).

Výzkumy vlastností hliníkového kompozitu (AMC) se zaměřením na magnetické vlastnosti odhalily, že nanočástice Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> vedly ke zlepšení měkkých magnetických vlastností. Na základě výsledků 5 testovaných vzorků s rozdílným zastoupením Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (10, 15, 20, 30 a 35 hm. %), se kompozit Al-35Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> o tvrdosti (47 HV), magnetizaci (13,06 emu·g<sup>-1</sup>), tepelné vodivosti (159 w·mK<sup>-1</sup>) a elektrického odporu (9,9·10<sup>-4</sup> Ω·m) osvědčil pro použití na výrobu magnetických aplikací (Ashrafi et al. (2022)).

---

## Seznam použité literatury

Adetayo A.A., Ennis B.J. (1997). Unifying approach to modeling granule coalescence mechanisms, *Alche J.* 43, 927–934.

Adler, E., Reppel, W., Rodewald, W., Warlimont, H. (1986) How to Match Powder Metallurgy and Physics of Magnetic Materials, in *Powder Metallurgy in Science and Practical Technology*, vol. 2, Verlag Schmid, Freiburg, 155–176.

Angelo P., Subramanian R. (2008). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. 1st.ed. Delhi: PHI Learning Pvt, 312 s. ISBN 9788120332812

Apps.dtic.mil. (1966) *Review of the powder metallurgy process* [online]. [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0645456.pdf>

Ashrafi, N.; Mohamed Ariff, A.H.; Jung, D.-W.; Sarraf, M.; Foroughi, J.; Sulaiman, S.; Hong, T.S. Magnetic, Electrical, and Physical Properties Evolution in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanofiller Reinforced Aluminium Matrix Composite Produced by Powder Metallurgy Method. *Materials* 2022, 15, 4153.

Axe D. E. (1995). Factors affecting uniformity of a mix. *Animal Feed Science and Technology*, 53(2):211–220.

Babu G and Dheeraj G (2008). 'Sintered metallic disc brake for automobiles', *PMAI*, 34, 43-44.

Barrasso D., Tamrakar A., Ramachandran R. (2015). Model order reduction of a multi scale PBM-DEM description of a wet granulation process via ANN, *Procedia Eng.* 102, 1295–1304.

Beiss, P. (1989) Finishing processes in powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, 32, 277–284.

Boon, M.; Saw, W.S.; Mariatti, M. (2012). Magnetic, dielectric and thermal stability of Ni–Zn ferrite-epoxy composite thin films for electronic applications. *J. Magn. Mater.* 324, 755–760.

Bradbury, S. (1986) *Powder Metallurgy Equipment Manual*, 3rd edn, MPIF, Princeton NJ, 199 s., ISBN: 978-09-184-0468-8.

---

---

Brookes, Jak (1992). *Hardmetals and other Hard Materials*. Inter. Carbide Data, East Barnet, UK., 220 s., ISBN:978-09-508-9956-5

Brychta J. (2008) *Technologie II*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, ISBN 978-80-248-1822-1.

Cantin D.; Gibson M.; Lathabai S.; Ritchie D.; Wilson R. et al. (2008) *Schematic of CSIRO process for the continuous production of CP-Ti strip*. [Online] Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-CONTINUOUS-PROCESS-FOR-PRODUCTION-OF-CP-TITANIUM-Cantin-Gibson/d7b7024ff39f6a90fbc9e24518c76f9bfd6da82e/figure/3>. [cit. 2024-04-05].

Carpenter H.C.H. a Robertson J.M. (1930). The Metallography of Some Ancient Egyptian Implements, *J. Iron Steel Inst., Vol 121*: 417-448.

Ćosović, V., N. Talijan a D. Živković. (2011) Comparison of properties of silver-metal oxide electrical contact materials. Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Njegoševa 12, 11000 Belgrade, Serbia. *Journal of Mining and Metallurgy*.48 (1) B 131–141).

Crease, A.P. (1984) Production Sintering Equipment, in *Metals Handbook*, 9th edn, vol. 7, “Powder Metallurgy”, *Metals Park OH*, 351–359.

Dad'ourek K. (2006). *Vybrané technologie povrchového zpracování*. [Online] Dostupné z: <https://docplayer.cz/9871832-Vybrane-technologie-povrchoveho-zpracovani-vakuove-tepelne-zpracovani-doc-ing-karel-dadourek-2006.html>. [cit. 2024-04-05].

Danninger H., Calderon R. de O., Gierl-Mayer C. (2017) Encyklopedia of industrial chemistry., Technische Universität Wien (TUW), *Institute of Chemical Technologies and Analytics*, Vienna, Austria, 1-57.

Danninger, H., Spoljaric, D., Jangg, G., Weiss, B., Stickler, R. (1994) Characterization of pressed and sintered ferrous materials by quantitative fractography. *Practical Metallography*, 31 (2), 56–69.

Datta B. K. (2014) *Powder metallurgy, An advanced Technique of Processing Engineering Materials*. Second edition. Indian Institute of Technology Kharagpur: PHI Learning Private Limited, Delhi. ISBN 978-81-203-4942-1.

---

---

Delarbre P a Krehl M (2000). Powder Metallurgy Aluminium and Light Alloys for Automotive Applications, W F Jondeska, Jr and RA Chernenkoff (eds), *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey, 33-39.

Dlapka, M., Danninger, H., Gierl, C., Altena, H., Stetina, G., Orth, P. (2012) Niederdruckaufkohlung von chromhaltigen Sinterstählen für Zahnräder. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 67 (2), 158–165.

Dlapka, M., Strobl, S., Danninger, H., and Gierl, C. (2010) Austenite grain size in sinter hardened powder metallurgy steels. *Practical Metallography*, 47 (12), 686–699.

Dowson G., Whittaker D. (2008) Introduction to Powder Metallurgy The Process and Its Products. *Eur Powder Metall Assoc* 36:4–20.

Durak E. (2003). Experimental investigation of porous bearings under different lubricant and lubricating conditions, *KSME Int J*, 17 (9):1276-1286.

Edwards, R (1993) Cutting Tools. The Institute of Materials, London., 214 s. ISBN: 978-09-017-1648-4.

Erçetin A. (2015) *Manufacturing, characterization and micro machinability of W+Cu+(X) electrode utilized in resistance welding through powder metallurgy method*, (Master Thesis), Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey.

Erçetin, A. a Aslantaş, K. (2017) Production of WCu electrical contact material via conventional powder metallurgy method: Characterization, mechanical and electrical properties. *Tr. Doğa ve Fen Derg.*, *Turkish Journal of Nature and Science.*, Vol. 6 No.1, s. 1-6.

Eriez.com. (2024). *Permanentní magnetické bubnové separátory* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.eriez.com/NA/EN/Products/Magnetic-Separation/Permanent-Magnets/Drum-Separators.htm>

Ernst, E. (2013) Energy balance of a belt sintering furnace. *Powder Metallurgy*, 56 (2), 96–101.

European Powder Metallurgy Association (EPMA) (2008), *Powder Metallurgy. The Processes and its Products*, Shewsbury, UK.

---

---

Ferguson, L. B. and German, R.M. (1998) Powder Shaping and Consolidation Technologies in ASM Handbook, vol. 7, Powder Metal Technologies and Applications, *Metals Park OH*, 313–320.

Fernandes M.R.P., Martinelli A.E., Klein A.N., Binder C., Hammes G., Nascimento R.M. (2014) Plasma-assisted sintering TaC-NbC-Ni reinforced composites, *Euro PM2014 – Sinter Steel Mechanical Properties*.

Ferreira, L.-M.; Bayraktar, E.; Robert, M.-H. (2016). Magnetic and electrical properties of aluminium matrix composite reinforced with magnetic nano iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). *Adv. Mater. Process. Technol*, 2, 165–173.

Fujiki A. (2001), Present state and future prospects of powder metallurgy parts for automotive applications, *Mater Chem Phys*, 67, 298-306.

Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., et al. (2016) Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure. *Comptes Rendus Mécanique* 344(4-5), 355-374

Garg, P.; Jamwal, A.; Kumar, D.; Sadasivuni, K.K.; Hussain, C.M.; Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: Manufacturing & applications. *J. Mater. Res. Technol.* 8, 4924–4939.

German R.M. (1984). *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation, vol. 105, College Rd. E, Princeton, N. J. 279 s., ISBN 9780918404602

German R.M. (2005). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 528 s, ISBN 0976205718.

German, R.M. (2013) History of sintering—empirical phase. *Powder Metallurgy*, 56 (2), 117–123.

German, R.M. and Bose, A. (1997) *Injection Molding of Metals and Ceramics*, MPIF, Princeton NJ.

German, R.M. (1998) *Powder Metallurgy of Iron and Steel*. Wiley and Sons, Inc., New York

---

---

Gök, M.G., Kaplan, M. (2011) The production of electrical contact material by means of powder metallurgy and investigation its contact performance, *6th International Advanced Technologies Symposium*: 294–298.

Güler, Ö. (2006) *Investigation of electrical properties of oxide reinforced copper composite produced by mechanical alloying*, (Master Thesis), Firat University, Elazığ, Turkey.

Güler, Ö. and Evin, E. (2009). The investigation of contact performance of oxide reinforced copper composite via mechanical alloying, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3): 1286-1290.

Güngör K., Ozsert I., Demirer A., Ficici F, Demir A. (2015) Experimental optimization of wear parameters of sintered bronze based materials.

Heringhaus F., Braumann P., Ruhlicke D., Susnik E., Wolmer R. (2000). On the Dispersion in Ag<sub>4</sub>SnO<sub>2</sub> based Contact Materials, *Proc. 20th Int. Conf. on Electr. Contact Phenom. Stockholm*, 199-204.

Hinzmann G a Sterkenburg D (2007) 'High density multilevel PM components by high velocity comp action, Powder Metallurgy: Processing for Automotive, Electrical, Electronic and Engineering Industry, Ramakrishnan P (ed). *New Age International Publishers, New Delhi*, 63-67.

Holm R. (1999), *Electrical Contacts: Theory and Applications*, Springer Berlin Heidelberg 4th Ed., 484 s. ISBN: 3540038752

Hryha, E., Nyborg, L., Malas, A., Wiberg, S., a Berg, S. (2013) Carbon control in PM sintering: Industrial applications and experience. *Powder Metallurgy*, 56 (1), 5–11.

Humár A. (2006) Materiály pro řezné nástroje [online]. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)

HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část [online]. Studijní opory. VUT – FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)

---



---

Chaira, D. (2021). Powder metallurgy routes for composite materials production. *En-cycl. Mater. Compos.*, 2: 588-604

Chang, I. a Zhao. Y. (2013) *Advances in Powder Metallurgy*. UK: Woodhead Publishing Limited, ISBN 9780857094209.

Chen Y., Yang J., Dave R.N., Pfeffer R. (2009) Granulation of cohesive Geldart group C powders in a Mini-Glatt fluidized bed by pre-coating with nanoparticles, *Powder Technol.* 191, 206–217.

Ibrahim, A., Abdallah, M., Mostafa, S.F., Hegazy, A.A. (2009). An experimental investigation on the W-Cu composites, *Materials and Design*, 30, 1398–1403.

Injection molding Handbook (2008) (second ed), *Hanser, Ohio*, pp. 19-61

Ivasishin O M. Sarvakin D G. Moxson V S. Bondareval K A and Froes F H (2002). Titanium powder metallurgy for automotive components, *Mater Technol*, 17(1), 20-25

Iveson S.M., Litster J.D., Hapgood K., Ennis B.J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review, *Powder Technol.* 117, 3–39

Johnson, J.L., German, R.M. (1993) Phase equilibria effects in enhanced liquid phase sintering of tungsten–copper, *Metall. Mater. Trans. A*, 24, 2369–2377.

Joshi P. B. Prabha S Krishnan, Patel R H. Gadgeel and Ramakrishnan P. (1998). "New silver-zinc oxide DC contacts for automotive applications, Powder Metallurgy in Automotive Applications, Ramakrishnan P (ed), Oxford and IBH Publishers, New Delhi, 231-240.

Kálecký M. (2016). *Návrh pohonu 2- hřídelové drtičky odpadu*. Praha., Bakalářská práce. České vysoké učení technické v praze fakulta strojní. [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65606/F2-BP-2016-Kalecky-Martin-Bakalarska\\_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65606/F2-BP-2016-Kalecky-Martin-Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Kamal M.R., Isayev I.A., S. Liu S.—J. (2009). (Eds.), *Injection Molding: Technology and Fundamentals*, Hanser, Ohio

---

---

Kang S-S, Yoon D.N. (1977). The Effect of Cooling Rate on the Strength of Sintered Fe—Cu Compacts. *Powder Metallurgy*. ;20(2):70-73.

Kaysser, W.A. a Weise, W. (1993) Powder metallurgy and sintered materials, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol. A22, *VLH Verlagsgemeinschaft*, 105–142.

Kaysser, W.A. and Weise, W. (2000) *Powder Metallurgy and Sintered Materials*, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, Weinheim.

Kent, D., Drennan, J., a Schaffer, G.B. (2011) A morphological study of nitride formed on Al at low temperature in the presence of Mg. *Acta Materialia*, 59, 2469–2480.

Konvička, V. (2015) *Hornická skripta: Rudné úpravnictví* [online]. Ostrava, b.r. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/up\\_rudy/01.htm](http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/up_rudy/01.htm)

Koritta, J. (1951) *Kurz práškové metalurgie*, I. vydání, Průmyslové nakladatelství Praha, 292 s.

Králová, M. (2007). *Techmania Science Center-Využití elektrolýzy*. Online. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/elektricky-proud-v-kapalinach/vyuziti-elektrolyzy#>. [cit. 2024-04-3].

Ku N., Hare C., Ghadiri M., Murtagh M., Oram P., Haber R.A. (2015) Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration, *Procedia Eng.* 102, 72–80.

Kudělka V., Opletal J., Balej Z. (2021) *Nauhličení a oduhličení výrobku při procesu jeho výroby i jeho provozu*. Online. Dostupné z: <https://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=704>. [cit. 2024-04-05].

Lassner E. and Schubert, WD. (1999) *Tungsten*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York.

Li X., Wang Y., Lu D., Zheng X., Gao X. (2021). Optimization of airflow field for pneumatic drum magnetic separator to improve the separating efficiency, *Minerals*. 11, 122-128.

---

---

Lindsley, B. and Schade, C. (2006) Machinability additives for improved hard turning of PM steel alloys, in *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Part 6 Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ*, pp. 16–26.

Liu S., Wang W., Yang J., You J. (2012), Beneficiation of a low grade titanomagnetite ore in mining engineering, *AMR 577*, 187–190.

Lungu M, Gavrilu S, Canta T., Lucaci M., Enescu E., (2006) AgSnO<sub>2</sub> sintered electrical contacts with ultrafine and uniformly dispersed microstructure, *Journal of optoelectronics and advanced materials* 8 (2), 576.

Luo, S.D., Yi, J.H., Guo, Y.L., Peng, Y.D., Li, L.Y., Ran, J.M. (2009). Microwave sintering W-Cu composites: Analyses of densification and microstructural homogenization, *Journal of Alloys and Compounds*, 473, 317-325.

Maliwemu K., Umbu E., Malau V., Iswanto P.T. (2018). Effect of Shot Peening in Different Shot Distance and Shot Angle on Surface Morphology, Surface Roughness and Surface Hardness of 316L Biomaterial. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 299, 012051

Masato O., Shinya M., Matsubara H., Kozuka H., Tachiya H., Asakawa N. a Otsu M. (2017) Development and characterization of diamond tip burnishing with a rotary tool. *Journal of Materials Processing*, 244, 106-115

Mashl, S.J. (2013) Hot isostatic pressing (HIP) of large PM products: An industry poised for growth. *Powder Metallurgy Review*, 2 (2), 31–39.

Mashl, S.J. (2016) Combining Hot Isostatic Pressing and heat treatment: An elegant way to streamline the supply chain. *Powder Metallurgy Review*, 5 (2), 45–55.

Mikli V., Käerdi H., Kulu P., Besterci M. (2001). Characterization of powder particle morphology. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng*, 7:22–34

Mmspektrum.com. (2019). *Optimalizace soustružení korozivzdorných ocelí*. [Online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-soustruzeni-korozivzdornych-oceli>.

Molinari, A., Santuliana, E., Cristofolini, I., Rao, A., Libardi, S., a Marcon, P. (2011) Surface modifications induced by shot peening and their effect on the plane bending

---

---

fatigue strength of a Cr–Mo steel produced by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering A*, 528, 2904–2911.

Mpif.org. (2024) *Making Metal Powder* [online]. [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx>

Mulin, H., Giraud, Y., Since, J. a Larsson, M. (2014) Vacuum sintering and low pressure carburising of powder metallurgy components. *Powder Metallurgy Review*, 3 (2), 61–64.

Nakai Y., Mishima F., Akiyama Y., Nishijima S. (2010) Development of high gradient magnetic separation system under dry condition. *Physica C*, 182–187.

Nayar, H.S. (1998) Sintering atmospheres, in ASM Handbook vol. 7 “Powder Metal Technologies and Applications” *ASM: Materials Park OH*, 457–467.

Neveda.cz (2021). *proc-zelezny-sloup-v-dilli-nerezavi* [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://neveda.cz/proc-zelezny-sloup-v-dilli-nerezavi>

Oberteuffer J. (1974). Magnetic separation: a review of principles, devices, and applications, *IEEE T. Magn.* 10: 223–238.

Ortega-Rivas E., Juliano P., a Yan H. Food. (2006) Powders Physical Properties, Processing, and Functionality. *Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg*, 221-228.

Osu.cz. (1999). *Slimuté karbidy* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03007.html>

Pallini M., Carvalho T. (2006). Cost reduction in the Automotive Industry through Sintering. *Society of Automotive Engineers*, 01-06

Pan J., Yin J., Xia Y., Yao D., Liang H., Zuo K., Zeng Y. (2019). The microstructure and properties of bronze matrix composites with surface-modified graphite by titanium carbide adhesion. *Tribol. Int.*, 140: 1-7.

Pandey, N.; Chakrabarty, I.; Ram, S.C.; Majhi, M.R. (2019). Microstructure and Mechanical Behaviour of ABO<sub>w</sub> Reinforced Aluminium Matrix Composite Synthesized by Powder Metallurgy route. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 653.

---

---

Pattanayak D. K, Panigrahi B. B, Rama Mohan T. R. Godkhindi M. M. Dabhade V.V.and Ramakrishnan P (2007), Titanium and nano crystalline titanium for the automotive industry', Powder Metallurgy Processing for Automotive, Electrical, Electronic and Engineering Industry, Ramakrishnan P (ed), *New Age International Publishers, New Delhi*, 111-125

Pawlak Z., Urbaniak W., Kaldonski T., Oloyede A. (2013). Importance of bearing porosity in engineering and natural lubrication Biomaterials and Medical Tribology, *Woodhead Publishing*: 311-354

Pease, L.F. III, Collette, J.P., and Pease, D.A. (1988). Mechanical Properties of Steam Blackened P/M Materials, in Modern Developments in Powder Metallurgy, vol. 21. *Metal Powder Industries Federation, Princeton*, 275–299.

Pelissier, L. (2000) Modular vacuum thermal processing installation (2000), *U. S. Patent No. 6,065,964* 23 May.

Pelletiers T., Nadkarni A., Ijeoma R., Murphy T. (2007) Improving performance from self-lubricating bronze bearings. *Met. Powder Rep.*, 62 (4): 26-31.

Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., and Kieback, B. (2008) Dimensional behaviour of aluminium sintered in different atmospheres. *Materials Science and Engineering A*, 478, 251–256.

Powderprocess.net. (2024) *V Blender* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [https://powderprocess.net/Equipments%20html/V\\_Blender.html](https://powderprocess.net/Equipments%20html/V_Blender.html)

Price, P.E. (1998) Cold Isostatic Pressing, in ASM Handbook, vol. 7, Powder Metal Technologies and Applications, *Metals Park OH*, pp. 382–388.

Prvky.com (2021) *Mendělejevova periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/periodicka-tabulka.html>

Rivolta, B., Gerosa, R., Silva, G., Tavasci, A., a Engstrom, U. (2012) Wear performances of surface hardened PM steel from prealloyed powder. *Wear*, 289, 160–167.

Rotaryscreener.com. *Prosévací stroj na kovový prášek* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://cz.rotaryscreener.com/sieve/vibrating-screen/metal-powder-sieving-machine.html>

---

---

Sakr W.F., Ibrahim M.A., Alanazi F.K., Sakr A.A. (2012) Upgrading wet granulation monitoring from hand squeeze test to mixing torque rheometry, *Saudi Pharm. J* 20, 9–19.

Sanderow, H., Spirko, J., and Corrente, R. (1997) The machinability of P/M materials as determined by drilling tests, in *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, *Metal Powder Industries Federation, Princeton*, pp. 125–143.

Sandvik.coromant.com. (2019) *CoroDrill® 860*. [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrill-860>.

Sato M., Hijikata M. (1982). *Trans JIM*, 23(5): 267.

Semakina O.K., Babenko S.A., Vakhrameeva N.V. (2014). Using of the agglomeration-in-liquid for the technology of the fine materials, *Procedia Chem.* 10, 305–309.

Shenoy P. (2014). Dry mixing of spice powders investigation of effect of powder properties on mixture quality of binary powder mixtures. PhD thesis, *University College Cork*,

Shenoy P., Viau M., Tammel K., Innings F., Fitzpatrick J. a Ahrn' e L. (2015). Effect of powder densities, particle size and shape on mixture quality of binary food powder mixtures. *Powder Technology*, 272.

Schaffer, G.B., Yao, J.Y., Bonner, S.J., Crossin, E., Pas, S.J., a Hill, A.J. (2008) The effect of tin and nitrogen on liquid phase sintering of Al-Cu-Mg-Si alloys. *Acta Materialia*, 56 (11), 2615–2624.

Schatt, W. (1992) *Sintervorgänge–Grundlagen*, *VDI-Verlag, Düsseldorf*, (in German).

Schatt, W., Wieters, K. P., Kieback, B. (2007) *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 2nd ed. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 552 s. ISBN 978-3-540-23652-8.

Schedler, W. (1988) *Hardmetal for the Practician* (Hartmetall für den Praktiker). VDI-Verlag, Düsseldorf, in German.

---

---

Schoppa, A., Delabre, P., Holzmann, E., Silg, M. (2013) *Magnetic properties of soft magnetic powder composites at higher frequencies in comparison with electrical steels*, in Proc. IEEE EDPC Conf. Nuremberg. ISBN:978-1-4799-1105-9

Schubert T (2016) “Steam Oxidation of Ferrous PM Materials” in Materials Standards for PM Structural Parts, *MPIF STANDARD 35 Metal Powder Industries Federation: Princeton*, 89–91.

Sieklucka, B.; Pinkowicz, D. (2017). *Molecular Magnetic Materials: Concepts and Applications*; John Wiley & Sons: Weinheim, Germany.

Sigl L.S. and Rasch C (2009), 'PM components for synchronizer systems', Powder Metallurgy for Automotive and High Performance Engineering Industries, Ramakrishnan P (ed), *Narosa Publishing House Pvt. Ltd, New Delhi*, 45-56.

Silvain J.F., Heintz J.M., Veillere A., Constantin L., Lu Y.F. (2020). A review of processing of Cu/C base plate composites for interfacial control and improved properties, *Int. J. Extreme Manufact.*, 2 (2020), 1-21

Skotnicová, K. a Kurša, M. (2013) *Prášková metalurgie*, I. vydání, Technická univerzita Ostrava, 153 s., ISBN 978-80-248-3378-1

Smith C.R., Powder Metallurgy, J. Wulff, Ed., *American Society for Metals*, 1942, 4-7

Sobolewskoy P. a Physik Chem., Ann, Vol 109, 1834, p 99.

Soinski, M. and Moses, A.J. Anisotropy in Iron Bases Soft Magnetic Materials, in Handbook of Magnetic Materials, vol. 8, *North Holland, Amsterdam*, 325–415.

Strojařská bible (2018) *Povlakování*. [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.strojarskabible.cz/povlakovani/>.

Suman P., Bannaravuri P.K., Baburao G., Kandavalli S.R., Alam S., Raju M.S., Pulisheru K.S. (2021). Integrity on properties of Cu-based composites with the addition of reinforcement: a review. *Mater. Today: Proc.*, 47 (19):6609-6613

Susilowati S. E.; Fudholi A. a Sumardiyanto J. (2022). Mechanical and microstructural characteristics of Cu–Sn–Zn/ Gr metal matrix composites processed by powder metallurgy for bearing materials. *Results in Engineering.*, Elsevier B.V.14 100377.

---

---

Šalák A.; Selecká M. a Danninger, H. (2005) *Machinability of powder metallurgy steels*. 7 Meadow Walk, Great abington: Cambridge International Science Publishing., ISBN 1-898326-82-7.

Šalák, A., Selecká, M., a Danninger, H. (2006). *Machinability of Powder Metallurgy Steels*, 2nd edn, Cambridge International Science Publishing, Cambridge. 300 s., ISBN: 978-18-983-2682-3.

T.A. Osswald T.A., Turng L.-S., Gramann P.J. (2008) (Eds.), *Injection molding materials*, Injection molding Handbook (second ed), *Hanser, Ohio*, pp. 19-61

Thummler, F. a Oberacker, R. (1993) *An Introduction to Powder metalurgy*, 1st edition, The Institute of Materials Carlton House Terrace London SW1Y5DB, 347 s., ISBN 0-901716-26-X

Tüfekci K., Kurbanoğlu C., Durak E., Tunay R.F. (2006). Friction and wear properties of Cu and Fe-based P/M bearing mater, *J Mech Sci Technol*, 20 (4):513-521

Unlu B.S. (2011). Tribological and mechanical properties of PM journal bearings *Powder Metall*, 54 (3): 338-342.

Ünlü B.S., Atik E. (2010). Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties

Upadhyaya G.S. (2002) *Powder Metallurgy Technology*, 1st edition, *Cambridge International Science Publishing in England*, 170 s., ISBN 1-898326-40-1

Upadhyaya, G. S. (2012) *Powder Metallurgy Technology and Equipment: Selected Topics*. 8635 Zurich-Durnten. Switzerland: Trans Tech Publications. ISBN 978-3-03785-999-5.

W. Lee, P. (1998) *ASM Handbook: Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications*. 1st. edition. Materials Park: ASM International, 1147 p. ISBN 978-0871703873

Wang, L.; Yang, C.; Zhang, L.; Hu, Y.; Li, J.; Xu, S.; Li, H.J.V. (2020) The exchange coupling interaction in CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hard and soft magnetic nanocomposites. *Vacuum*, 181.

Wang, S., Li, Y.M., Yao, M., a Wang, R. (1998) Compressive residual stress introduced by shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, 73, 64–73.

---



---

WenChing Y. (2003). Handbook of Fluidization and Fluid-Particle, Siemens Westinghouse Power Corporation Pittsburgh *Systems*, CRC press, 213-217

Wikiskripta.eu (2018). *Elektrolýza* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Elektrol%C3%BDza>

Williams, B. (2012) Recent trends in HIP technology: Processing and applications. *Powder Metallurgy Review*, 1 (1), 23–29.

Xue B.C., Liu T., Huang H., Liu E.B. (2014) The effect of the intimate structure of the solid binder on material viscosity during drum granulation, *Powder Technol.* 253, 584–589.

Yuanrun-china.com. (2024) *Rotační prosévací stroj na práškové granule* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://cz.yuanrun-china.com/fine-screening-equipment/rotary-vibrating-screen-machine/powder-granules-rotary-sift-machine.html>

Zheng J., Songlin L., Fyqi D., Tonghui L. (2009)., *Rare Metals*, 28(1): 19.

---

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Sloup v Dillí (neveda.cz, 2021).....	10
Obrázek 1.2: Kulový mlýn a princip pohybu mlecích těles (Thummler a Oberacker, 1993) .....	13
Obrázek 1.3: Atritor, mokrý proces mletí (Thummler a Oberacker, 1993).....	14
Obrázek 1.4: Kládiový drtič (Podzemi.solvayovylomy.cz, 2015).....	15
Obrázek 1.5: Čelistový drtič (Kálecký, 2016).....	15
Obrázek 1.6: Princip elektrolýzy (wikiskripta.eu, 2018).....	17
Obrázek 2.1: V-mixér schéma (powderprocess.net, 2024).....	20
Obrázek 2.2: Princip prosevání (rotaryscreener.com, 2024).....	21
Obrázek 2.3: Magnetický odlučovač (eriez.com, 2024) .....	22
Obrázek 3.1: Princip lisování (Schatt et al., 2007) .....	24
Obrázek 3.2: Schéma vybraných typů lisování: a) Jednočinné lisování, b) Dvojčinné lisování, c) Lisování v plovoucích maticích (Thummler a Oberacker, 1993) .....	25
Obrázek 3.3: Princip válcového zhutňování (Thummler a Oberacker, 1993) .....	27
Obrázek 3.4: Proces válcování (Cantin et al., 2008).....	28
Obrázek 3.6: Princip vstřikování kovů (Thummler a Oberacker, 1993).....	29
Obrázek 3.5: Jednotlivé sekvence injekčního vstřikování kovů (Skotnicová a Kursá, 2013) .....	29
Obrázek 3.7: Jednoduchý suchý vak pro izostatické lisování za studena a) tlaková nádoba, b) membrána, c) prášek, d) tlakový výstup, e) jádrová tyč, f) tlakový vstup (Kaysser a Weise, 2000) .....	31
Obrázek 3.8: Tlaková nádoba pro izostatické zhutňování za tepla a) izolační víko, b) izolační plášť, c) pec, d) drátěná tlaková nádoba, e) část k lisování, f) spodní víko nádoby (Kaysser a Weise, 2000).....	31
Obrázek 4.1: Schématický popis slinovacích stupňů v práškových výliscích a) Zelený stav, b) Otevřená pórovitost, c) Uzavřená pórovitost (Kaysser a Weise, 1993) .....	32
Obrázek 4.2: Schéma síťové slinovací pece a) Slinovací táč, b) Dopravní pás, c) Mufle pece (Kang a Yoon, 1977) .....	33
Obrázek 4.3: Vakuová pec vsázkového typu (Upadhyaya, 2002) .....	34
Obrázek 5.1: Typická mikrostruktura po úpravě párou (Danninger et al., 2017).....	36
Obrázek 5.2: Schéma procesu brokování (Maliwemu et al., 2018).....	39

---

---

Obrázek 6.1: Klíčové součásti synchronizačního systému 1) Rozbočovač synchronizátoru, 2) Synchronizační kroužek, 3) Posuvné pouzdro, 4) Spojkové kolo s kuželem, 5) Přenos (Chang a Zhao, 2013).....	41
Obrázek 6.2: Díly PM 1) Rotor olejového čerpadla, 2) Ozubená kola, 3) Pouzdro ze slinuté bronzové mosazi (Chang a Zhao, 2013).....	42
Obrázek 6.3: Schéma automobilu znázorňující typické aplikace kontaktů (Chang a Zhao, 2013) .....	44
Obrázek 6.4: Schéma pracovního postupu výroby slinutých karbidů 1) Příprava směsi uvedených prášků, 2) Formování směsi, 3) Slinování 4) Broušení, 5) Povlakování (Humár, 2003).....	46
Obrázek 6.5: PVD metoda (Sandvik.coromant.com., 2019).....	50
Obrázek 6.6: CVD metoda (strojarskabible.cz, 2018).....	51
Obrázek 6.7: Monolitický karbidový vrták Corodril 860-GM (sandvik.coromant.com, 2019) .....	52
Obrázek 6.8: Břitové destičky GC2020 s CVD povlakem (sandvik.coromant.com, 2019) .....	52
Obrázek 6.9: Změny v porovitosti procentuálního zastoupení grafitu (Susilowati et al., 2022) .....	54
Obrázek 6.10: Graf elektrického odporu závislý na teplotě slinování (Ercetin a Aslantas, 2017).....	56

---

---

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Přehled materiálů používaných při mechanické metodě výroby prášku (prvky.com, 2021).....	16
Tabulka 1.2: Přehled prvků využívaných při elektrochemické metodě přípravy prášku (prvky.com, 2021).....	19
Tabulka 3.1: Přehled zhutňovacích metod (Angelo a Subramanian., 2008).....	23
Tabulka 5.1: Faktory ovlivňující proces brokování (Maliwemu et al., 2018) .....	39
Tabulka 6.1: Charakteristické vlastnosti a dělení skupiny P (Humár, 2003).....	47
Tabulka 6.2: Charakteristické vlastnosti a dělení skupiny M (Humár, 2003).....	48
Tabulka 6.3: Charakteristické vlastnosti a dělení skupiny K (Humár, 2003).....	49
Tabulka 6.4: Corodril 860-GM (sandvik.coromant.com, 2019).....	52
Tabulka 6.5: Corodril 860-GM (sandvik.coromant.com, 2019)Litiny .....	52
Tabulka 6.6: Hmotnostní složení zkoumaných vzorků (Ercetin a Aslantas, 2017) ...	55
Tabulka 6.7: Hmotnostní složení zkoumaných vzorků (Ćosović et al., 2011) .....	57
Tabulka 6.8: Fyzikální vlastnosti zkoumaných kontaktních materiálů (Ćosović et al., 2011) .....	57

---