VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVLAKY CVD A PVD PRO DEKORATIVNÍ ÚČELY
CVD AND PVD COATINGS FOR DECORATIVE PURPOSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Filip Švéda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Filip Švéda**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Povlaky CVD a PVD pro dekorativní účely

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Možnosti povlakování v oblasti mimo obráběcí procesy.

Cíle bakalářské práce:

– Charakteristika povlakovacích metod a jejich využití.
– Specifické podmínky pro dekorativní účely.
– Rozbor vytipované situace.
– Zhodnocení výsledných efektů.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

MICHNA, Štefan et al. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na povlakování pomocí metod CVD a PVD, nikoliv však nástrojů, ale pouze pro dekorativní účely. V úvodních kapitolách je zde přehled jednotlivých metod a jejich popisy. Dále vytipované příklady povlakovaných předmětů. V závěru je zhodnocení výsledných efektů.

Klíčová slova

CVD, PVD, dekorativní, povlakování.

ABSTRACT

The bachelor work is aimed to the surface coating using CVD and PVD method, not for tools but for decorative purposes. In introduction of this paper is overview of coating method and their description. Selected examples of coating items. At the end of work is evaluation of resulting effects.

Keywords

CVD, PVD, decorative, coating.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVÉDA, Filip. Povlaky CVD a PVD pro dekorativní účely. Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116034. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Povlaky CVD a PVD pro dekorativní účely** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Filip Švéda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Panu Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině za podporu a pomoc při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT 3
PROHLÁŠENÍ 4
PODĚKOVÁNÍ 5
OBSAH 6
ÚVOD 7
1 POVLAKOVACÍ METODY 8
1.1 Vývoj povlakovacích metod 8
1.2 Typy povlakovacích metod 9
2 CVD 10
2.1 HFCVD (CVD se žhavicím vláknem) 11
2.2 LICVD (CVD indukovaná laserem) 11
2.3 APCVD (CVD za atmosférického tlaku) 12
2.4 LPCVD (CVD za nízkého tlaku) 12
2.5 PECVD (CVD pomocí plazmy) 12
3 PVD 14
3.1 Naprašování 15
3.1.1Naprašování doutnavým výbojem 15
3.1.2 Naprašování magnetronové 16
3.1.3 Naprašování iontovým paprskem 16
3.2 Napařování 17
3.2.1 Odpařování elektronovým paprskem 17
3.2.2 Obloukové napařování 18
4 POVLAKOVÁNÍ V OBLASTI DEKORACÍ 19
4.1 Volba vhodné metody povlakování 19
4.2 Předměty vhodné pro dekorativní povlaky 20
4.3 Ekonomické zhodnocení 20
4.4 Materiály vhodné pro vytvoření povlaku 20
5 POVLAKOVÁNÍ VE ŠPERKAŘSTVÍ 22
ZÁVĚR 24
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 25
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 28

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na povlakování pomocí metod PVD (*Physical Vapour Deposition*) a CVD (*Chemical vapour deposition*). Ve většině případů se povlakují nástroje, aby se zvýšily jejich mechanické vlastnosti, a zároveň jejich trvanlivost. Díky povlakům se také kromě jiného zvýší i jejich životnost.

Téma CVD a PVD povlakování je rozděleno do dvou částí. V první části je historický vývoj technologií povlakování, rozdělení CVD a PVD metod, jejich modifikací a v neposlední řadě jejich popis. Ve druhé části je popsáno použití povlakovacích metod pro dekorativní účely a jejich zhodnocení. Ve druhé části textu jsou také rozebrány vhodné podmínky pro dekorativní povlakování, volba materiálu, ekonomické faktory a volba předmětu k povlakování.

Účelem vypracovaného textu je zhodnocení použití povlakovacích metod pro jiné než řezné a pracovní nástroje. Konkrétněji pro využití pro specifickou oblast šperkařství.

1 POVLAKOVACÍ METODY

Nejčastější metody pro povlakování nástrojů jsou CVD (*Chemical vapour deposition*) a PVD (*Physical Vapour Deposition*). Nástroje se povlakují za účelem zvýšení mechanických vlastností, tím pádem zvýšení životnosti a snížení nákladů na výrobu. Díky povlakům se zvýší povrchová tvrdost, otěruvzdornost a ochrana proti korozi. Nejčastěji se povlakují nejrůznější typy ocelí a vyměnitelné břitové destičky (dále už jen VBD), vyobrazeno na obr. 1. Ovšem při povlakování je třeba zohlednit nejrůznější činitele, aby byla zachována účinnost povlaku, jako je například tepelná vodivost, modul pružnosti, adheze, chemické složení, tloušťka, tvrdost, zvolená metoda povlakování a jiné [1].

Obr. 1 Vyměnitelné břitové destičky [14].

K zásadnímu rozvoji povlakovacích metod došlo ve 20. století. Jako hlavní předměty určené k povlakování byly a jsou dodnes vyměnitelné břitové destičky (VBD) ze slinutých karbidů. První povlaky byly nanášeny metodou CVD a nanášela se vrstva TiC o tloušťce 5 µm. Tento povlak měl však špatnou přilnavost k materiálu a záhy se přestal používat samostatně. Pro vícevrstevné povlaky jako Al_2O_3 se povlak TiC používal jako pojivo, aby došlo k lepší adhezi s podkladem. Metoda PVD se začala používat až ke konci 20. století. Nejvíce používaný povlak byl TiN [2].

Dříve postačovalo pouze pár povlaků jako konkurence jiným nástrojům. Avšak v současnosti je každoročně vyvíjeno několik druhů povlaků s různým chemickým složením a různým počtem vrstev ke zlepšení fyzikálních vlastností. Kombinace faktorů jako jsou tloušťka vrstvy, metoda nanášení, kombinace vrstev, druh povlaku a mnoho dalších, je velice zásadní, protože na správné kombinaci těchto faktorů závisí účinnost jeho využití [2].

1.1 Vývoj povlakovacích metod

Povlakování se dělí do jednotlivých vývojových stupňů.

1) Jako první se používal jednovrstevný povlak TiC, ale kvůli špatné technologii výroby docházelo k nedostatečnému přilnutí povlakované vrstvy k materiálu. Nedostatečné přilnutí způsobovaly eta-karbidy, které jsou velice křehké a

vznikaly mezi materiálem a povlakovanou vrstvou. Celkem rychle došlo k odlupování vrstvy a znehodnocení nástroje. Materiály pro povlaky se používaly TiN, TiC, Al_2O_3 [1].

2) Díky zdokonalení metody povlakování, přestalo docházet v mezivrstvě ke tvorbě eta-karbidů a povlakovaná vrstva se již neloupala. Zdokonalená technologie, také umožnila tvorbu silnějších vrstev až 10 µm. Materiál k nanášení se používal TiC, TiCN, TiN [1].
3) V této fázi vývoje se začínají používat vícevrstevné povlaky. Díky této technologii se můžou používat různé povlaky bez ohledu na přilnavost k povrchu. Jako první vrstva se volí s dobrou přilnavostí k povrchu. Další vrstvy se mohou volit dle potřeby na mechanickou tvrdost, otěruvzdornost a korozivzdornost [1].
4) V současnosti se používají multivrstvé povlaky. Jedná se celkem o více než 10 vrstev. Používají se stejné materiály povlaků jako v předchozí fázi vývoje, ale mezi hlavní výhody této metody patří schopnost povlaku zabránit šíření trhlin. Povlaky v této fázi jsou diamantové, inteligentní, gradientní, nanokompozitní, supermřížkové či kubický nitrid boru [1].

1.2 Typy povlakovacích metod

CVD

- HFCVD (CVD se žhavicím vláknem),
- LICVD (CVD indukovaná laserem),
- APCVD (CVD za atmosférického tlaku),
- LPCVD (CVD za nízkého tlaku),
- PECVD (CVD pomocí plazmy).

PVD

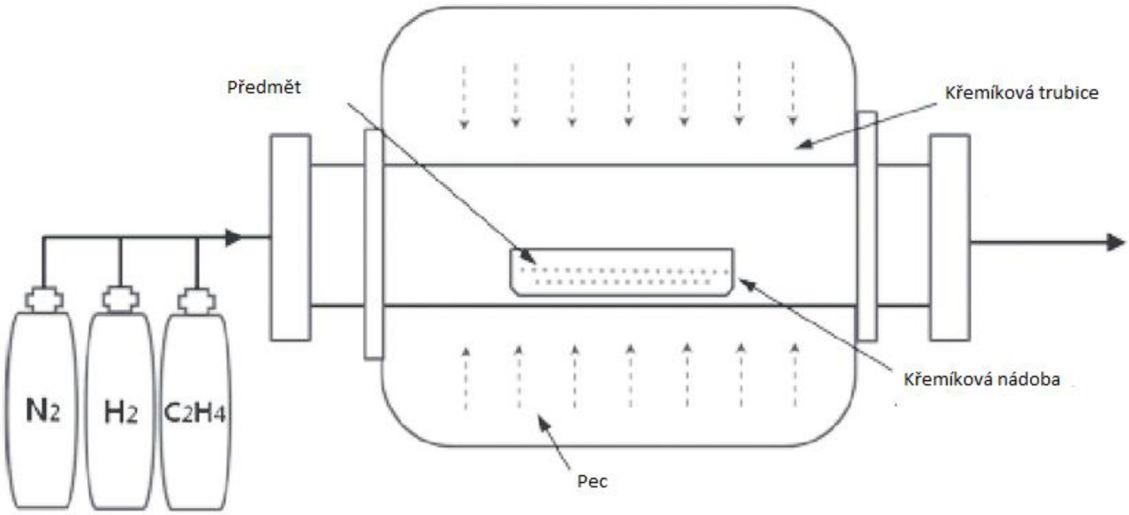
- naprašování doutnavým výbojem,
- naprašování magnetronové,
- naprašování iontovým paprskem,
- odpačování elektronovým paprskem,
- obloukové napařování.

2 CVD

Jedná se o chemické napařování z plynné fáze ve vakuu, který ošetří povrch kovu. Nástroje se povlakují, aby se zvýšily jejich mechanické vlastnosti. Tato metoda využívá pro depozici směs reaktivních plynů ohřátých na vysokou teplotu 900-1000 °C. Dnes se povlaky nanáší většinou na břitové destičky ze slinutých karbidů. Povlaky lze nanášet různými metodami. Jedná se o modifikace základní metody CVD [1,4,28].

CVD povlakování se provádí v komoře, kde je na podložce umístěn předmět, který je zvolen na povlakování. Schéma povlakování CVD metodou je popsáno na obr. 2. Celý chemický proces je založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostředním okolí předmětu, který se má povlakovat, a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Jako nosný plyn se používá argon nebo vodík [1,4,28].

Jsou dva druhy nanášení povlaku na předmět. Používá se komora se studenou stěnou a komora s horkou stěnou. V případě komory se studenou stěnou je ohřátá pouze podložka a předmět, který se má povlakovat. U tohoto způsobu nanášení, nedochází k znečištění ze stěn komory. Reakce probíhá přednostně na předmětu, protože má vyšší teplotu, něž jsou stěny komory. Tento způsob je vhodný pro endotermické reakce. U komory s horkou stěnou je ohřátý předmět s podložkou včetně stěny komory. Může dojít ke kontaminaci od stěny komory. Tato metoda je vhodná pro exotermické reakce [1,4,28].



Obr. 2 Schéma povlakování CVD metodou [15].

Výhody

- velice dobrá přilnavost k povrchu povlakovaného materiálu,
- velice kvalitní povrch (hustota, stabilita, rozložení povlaku),
- potažení povlakem celé součásti,
- schopnost nanášet složité vrstvy povlaků,
- možnost nanášet vrstvy i jiné než nitridy kovu (uhlíkové vrstvy, diamantové vrstvy, Al_2O_3),

- relativně levná tvorba i silnějších vrstev povlaků.

Nevýhody

- doba nanášení povlaku až 10 h,
- kvůli ohřevu až na 1000 °C je vysoká energetická náročnost,
- vysoké teploty mohou mít špatný dopad na povlakovaný předmět,
- neschopnost vytvořit povlak na ostrých hranách,
- toxické pracovní plyny,
- možnost vzniku napětí v povlakované vrstvě.

2.1 HFCVD (CVD se žhavicím vláknem)

V současnosti se používají čím dál častěji různé modifikace této metody. HFCVD (*Hot filament Chemical vapour deposition*) je metoda, kdy se pracovní plyn aktivuje pomocí rozžhaveného wolframového drátu. Plyn je přiváděn na drát přes mřížku, aby bylo zajištěno jeho rovnoměrné rozložení. Teplota drátu je kolem 2400 °C a je umístěn blízko substrátu (80 mm). Ohřátý drát, přes který se přivádí pracovní plyn, je zobrazen na obr. 3. Plyn přiváděný přes rozžhavený drát je rozložen a následně se ukládá na povrchu předmětu, kde vytváří výsledný povlak. Tato modifikovaná metoda je oproti klasickému CVD povlakování rychlejší. Avšak problém je, že pracovní teploty drátu jsou velice vysoké a nejsou odolné proti oxidaci. Tato metoda je vhodná pouze pro konkrétní pracovní plyn. Často se používá pro nanášení diamantových povlaků [28].

Obr. 3 Ohřátý wolframový drát, přes který je přiváděn plyn [16].

2.2 LICVD (CVD indukovaná laserem)

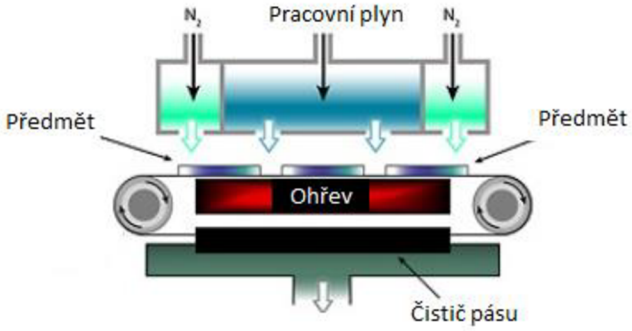
LICVD metoda využívá k ohřevu laser. Laser působí na předmět a tím je zahříván. Komora je naplněna pracovním plynem. Jak je předmět zahříván, tak dojde k rozpadu pracovního plynu a začne se na něm uchycovat tenký povlak. Jednotlivé atomy plynu se přichytí na povrch předmětu a navážou se pevnou vazbou, nebo se uvolní zpátky do prostředí. Problém této metody spočívá v tom, že zahřátá oblast je v rozmezí několika µm, proto se využívají modifikace této metody a to pyrolitická a fotolytická [1,2].

Pyrolitická metoda využívá toho, že pracovní plyn na rozhraní plyn-předmět je ohříván pomoc laseru. Z tohoto rozhraní jsou molekuly přeneseny na předmět a vzniká vrstva povlaku. Pyrolitická metoda dosahuje lepších výsledných vrstev povlaku [1,2].

Fotolitická metoda funguje díky fotochemické reakci na povrchu předmětu. Molekuly poblíž předmětu jsou štěpeny pomocí fotochemické reakce. Fotolytická metoda nevyžaduje tak vysokých teplot jako metoda pyrolitická [1,2].

2.3 APCVD (CVD za atmosférického tlaku)

Celý proces APCVD probíhá za atmosférického tlaku. Do komory jsou přiváděny předměty k povlakování na pásovém dopravníku, který je zároveň ohříván. Schéma dopravníku a způsobu povlakování je schematicky zobrazeno na obr. 4. Do komory je přiváděn pracovní plyn a probíhá povlakování. Kolem stěn je hnán dusík a vytváří tzv. plynovou stěnu, aby nedocházelo k předčasným reakcím s předmětem. Výhodou této metody je vysoká produktivita a možnost povlakovat velké plochy. Mezi nevýhody řadíme častější čištění komory [5].



Obr. 4 Schéma dopravy předmětů a metody APCVD [17].

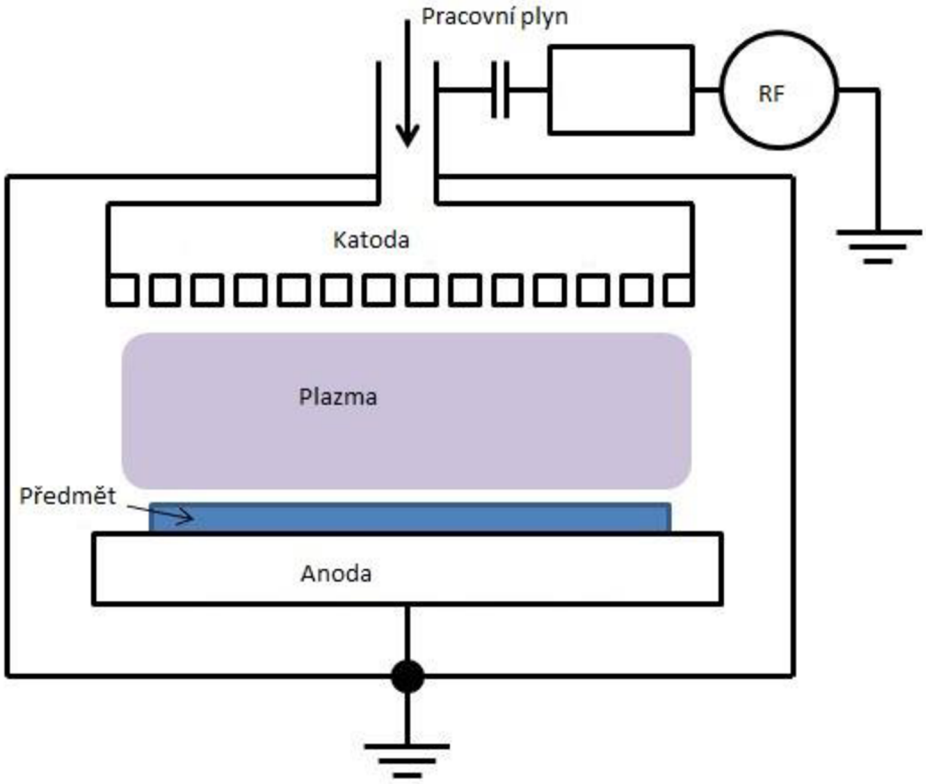
2.4 LPCVD (CVD za nízkého tlaku)

Metoda LPCVD probíhá za nízkého tlaku 30 až 250 Pa. Díky sníženému tlaku je rychlost přenosu hmoty mnohem větší než rychlost reakce na povrchu. Což vede k lepšímu pokrytí předmětu, lepšímu rozložení po povrchu a k lepším vlastnostem povrchové vrstvy. Díky povlakování za sníženého tlaku má povlak vysokou čistotu, je rovnoměrný a homogenní. Nevýhoda této metody je vysoká provozní teplota [1,2].

2.5 PECVD (CVD pomocí plazmy)

Rozpad pracovního plynu je zajištěn díky elektrickému výboji v plazmatu. Do komory je přiváděn pracovní plyn a ten se díky plazmatu rozkládá a reaguje na povrchu předmětu, kde vytváří vrstvu povlaku. Schéma komory pro PECVD je na obr. 5. Díky

rozpadu pomocí plazmy tato metoda nevyžaduje tak vysoké provozní teploty, proces probíhá při teplotách okolo 300 °C. Předmět je umístěn mezi elektrodami, kde probíhá ionizace. Nevýhodou tohoto procesu je, že povlak může obsahovat velké množství nečistot [1,2].

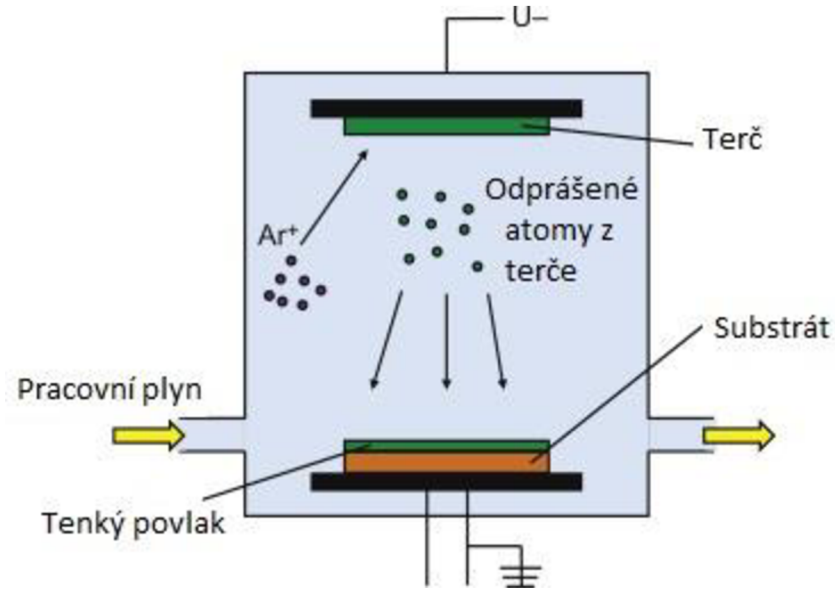


Obr. 5 Schéma komory pro PECVD [18].

3 PVD

Metoda PVD je v současnosti velice prosazovaná metoda. Hlavním rozdílem oproti metodě CVD je schopnost částic odpařovat se z pevné fáze (terčů). Celý proces probíhá za nižších teplot, které se pohybují kolem 500 °C a za nízkých tlaků (kolem 1 Pa). Částice jsou uvolňovány z terčů pomocí metody rozprašování či odpařováním. Uvolněné částice jsou následně urychlovány k předmětu určenému k povlakování. Následně dojde k usazení částic na daném předmětu a vytvoření vrstvy povlaku. V komorách se používají inertní a reaktivní plyny např. argon a dusík. Vyobrazení procesu PVD povlakování je zobrazeno na obr. 6 [1,7,30].

Částice, které jsou uvolněny z pevné fáze a jsou unášeny k předmětu, se na jejím povrchu postupně zachycují. Buďto se přichytí pevnou vazbou nebo se uvolní zpět. Na uchycené molekuly povlaku se navazují další částice a vzniká vrstva povlaku, která postupně roste. Nevýhodou této metody je vznik stínového efektu, vyobrazen na obr. 7. To znamená, že se předmětem musí rovnoměrně otáčet, aby se proud částic nanášel v rovnoměrné vrstvě po celém povrchu předmětu. Na plochách, které leží na opačné straně, než je směr proudu odpařovaných částic, se vytváří nerovnoměrná vrstva povlaku [1,7,30].



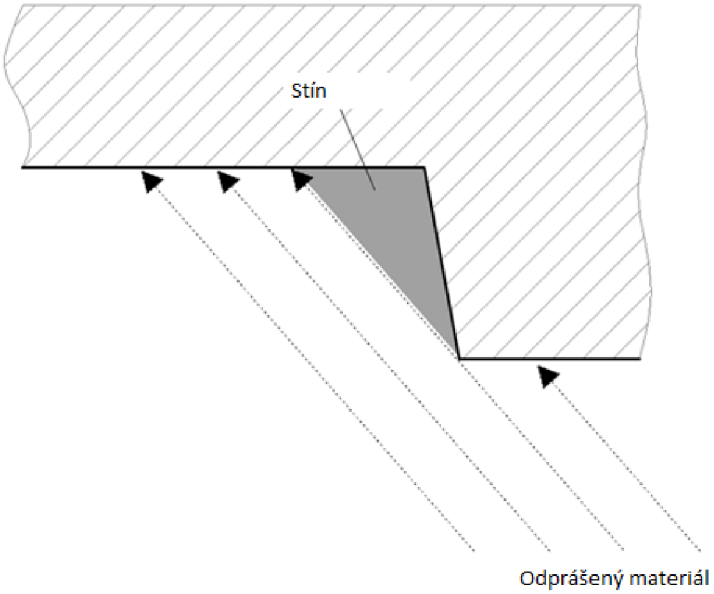
Obr. 6 Schéma procesu PVD povlakování [19].

Výhody

- proces probíhá za nízkých teplot,
- možnost povlakovat i ostré hrany,
- použití netoxických látek,
- možnost použít velké množství různých materiálů.

Nevýhody

- vznik stínového efektu,
- nutnost rovnoměrně otáčet povlakovaným předmětem,
- komory s vakuovým systémem.



Obr. 7 Zobrazení stínového efektu [20].

3.1 Naprašování

Metoda naprašování se používá především tehdy, když je potřeba povlakovat předmět materiálem, který má vysokou teplotu tání. Proces probíhá za nízkého tlaku a v zředěné atmosféře. Materiál je odprašován z terče (terč je tvořen přímo materiálem, kterým se má povlakovat) pomocí elektrického výboje. U terče je udržována argonová plazma, která bombarduje terč, ze kterého se oddělují částice. Následně dochází ke kondenzaci částic na povrchu předmětu, který potřebujeme povlakovat. Také lze nevyrábět terč přímo z materiálu, který bude tvořit povlak předmětu, ale ze základního materiálu, jenž následně zreaguje s reaktivním plynem, např. dusíkem a ten se uchytí na předmětu a vytvoří povlak [6].

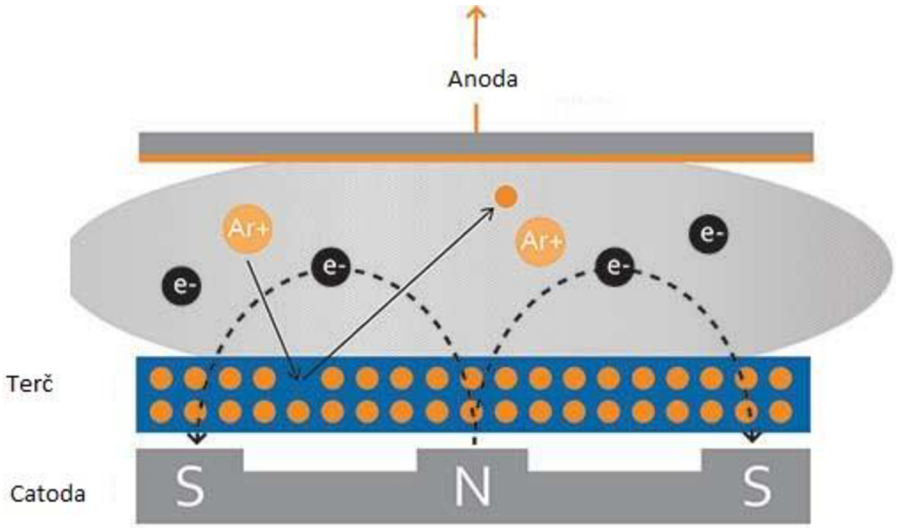
3.1.1Naprašování doutnavým výbojem

Při metodě naprašování pomocí doutnavého výboje je terč vytvořen z materiálů, které budou zároveň sloužit i jako povlak. Terč je připojen ke stejnosměrnému proudu jako katoda a povlakovaný předmět je připojen jako anoda. Terč a předmět jsou v komoře umístěny proti sobě a v relativní blízkosti cca 10 cm od sebe. Do komory je pouštěn inertní plyn. Při nadbytečném množství inertního plynu může dojít ke snížení účinnosti povlakování. Celý proces probíhá za sníženého tlaku v jednotkách pascalu [1,6].

U terče je zapálen oblouk a dojde k odprašování materiálu z terče vlivem kladných iontů. Odprášený materiál je unášen a následně usazen na povrchu předmětu, kde začne tvořit povlak. K zefektivnění této metody se dá použít chlazení terče a regulace plynu. Výhodou této metody je její relativní jednoduchost, nízká teplota procesu a možnost odprašování z terčů, které lze vyrobit z nejrůznějších materiálů. Nevýhody této metody jsou pomalá rychlost povlakování a horší přilnutí povlaku k předmětu [1,6].

3.1.2 Naprašování magnetronové

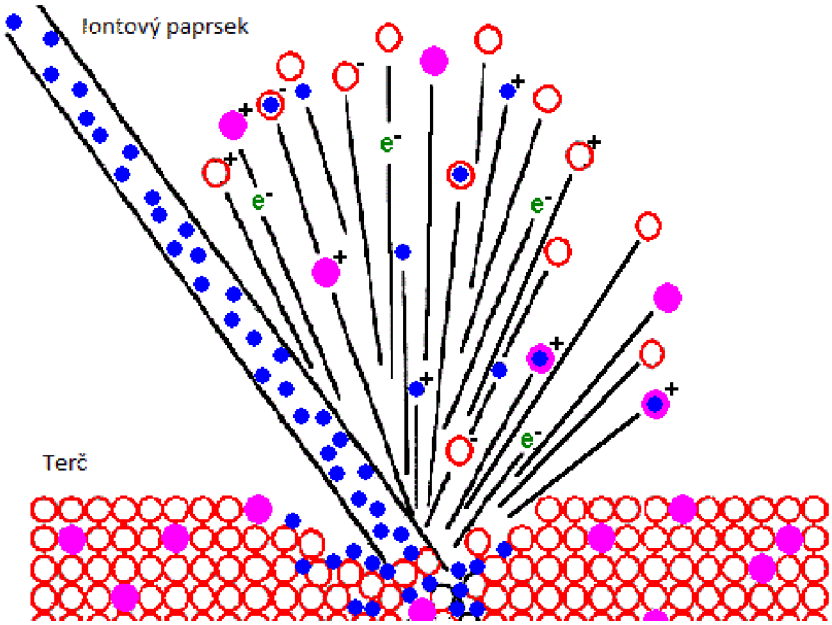
Magnetronové naprašování je modifikovaná metoda klasického naprašování. Terč s předmětem (katoda a anoda) je vložen do silného magnetické pole. Tím dojde ke zvětšení a zhuštění oblasti plazmy. Kladné ionty urychlené elektrickým polem dopadají na terč a odprašují materiál, ten se přichycuje na předmět a tvoří se povlak. Schéma metody magnetronového naprašování je na obr. 8. Zvyšuje se počet těchto částic a dochází k celkovému zefektivnění naprašování. Při zvýšení počtu částic je možné snížení potřebného napětí a hustoty plynu bez zvýšení tlaku v komoře. Výhody jsou větší rychlost naprašování a jednoduché odprašování i z terčů s vysokou teplotou tavení. Terče však nesmí obsahovat dutiny a trhliny, aby nedocházelo k lokálnímu natavení či praskání [1,6].



Obr. 8 Schéma magnetronového naprašování [21].

3.1.3 Naprašování iontovým paprskem

Při této metodě je iontový paprsek o vysoké energii namířen na terč s materiálem (popis na obr. 9). Zdrojem paprsku je inertní nebo reaktivní plyn. Předmět, který se má povlakovat je umístěn tak, aby zachytával odprášený materiál. Při této metodě nedochází k ohřevu povlakovaného předmětu. Jsme schopni řídit tok plynu, teplotu předmětu, typ částic proudících na terč, tlak plynu, avšak rychlost naprašování je nižší [1].



Obr. 9 Schéma vystřelování molekul z terče pomocí iontového paprsku [22].

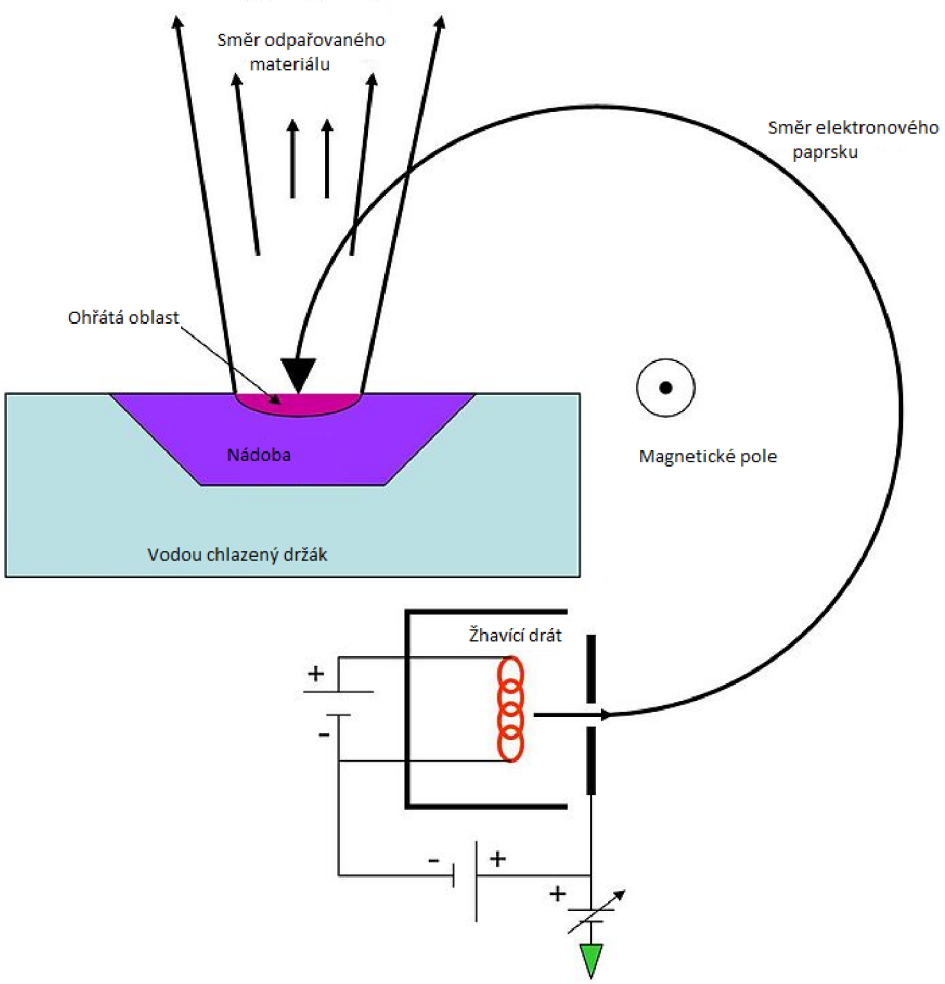
3.2 Napařování

Proces napařování probíhá ve vakuu za nízkých tlaků (10^{-2} až 10^{-8} Pa). Materiál je ohříván pomocí střídavého nebo stejnosměrného proudu, indukčně, odporově, obloukem, paprskem elektronů, pomocí laseru a dalšími metodami. Při ohřívání probíhá změna z pevné fáze na plynnou. Aby byla na předmětu vytvořena rovnoměrná struktura povlaku, je do komory přiváděn plyn jako například argon. Díky pracovnímu plynu se odpařené částice několikrát srazí a vytváří se rovnoměrná struktura [31].

Při napařování je mnoho způsobů ohřevu materiálu, ale mezi častější způsob ohřevu patří odporový drát. Jedná se o jednoduchou a levnou metodu napařování. Drát je z materiálů, které mají vysokou teplotu tání, takže nedochází ke kontaminaci povlaku [31].

3.2.1 Odpařování elektronovým paprskem

Pro odpařování materiálu je při této metodě použit elektronový paprsek o vysokém výkonu. Odpařené částice jsou ionizovány a následně se ukládají na povrchu předmětu. Ionizaci způsobuje žhavící drát, který je připojen jako katoda. Jako anoda je připojen materiál, který se má odpařovat. Popis principu je vyobrazen na obr. 10. Při této metodě odpařování, je možnost snadno regulovat množství odpařovaného materiálu a následné nanášení materiálu je velice stabilní. Proces lze provádět ve vakuu bez přítomnosti pracovního plynu [1,8].



Obr 10. Schéma odpařování pomocí elektronového paprsku [23].

3.2.2 Obloukové napařování

Terč s materiálem je připojen jako katoda a anoda je komora. Mezi anodou a katodou je vytvořen výboj a z terče se začíná odpařovat materiál. K odpařování dochází jen ve velmi malé oblasti, která se neustále pohybuje. Lze ji usměrnit pomocí magnetického pole, aby docházelo k rovnoměrnému odpařování z terče. Díky elektrickému oblouku je odpařovaný materiál ionizován a lépe se přichycuje na povlakovaný předmět. Odpařovat je možné pouze z vodivých terčů. [1,8]

4 POVLAKOVÁNÍ V OBLASTI DEKORACÍ

V kapitolách 2 a 3 byly představeny a popsány nejrůznější metody a jejich modifikace pro povlakování předmětů. Nejčastější předměty, které jsou povlakovány těmito metodami, jsou VBD a nástroje pro obrábění. Důvod je ten, že povrchová vrstva, která se vytvoří díky povlaku, je tvrdá, otěruvzdorná, zabraňuje korozi povrchu, snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem a odolává teplotnímu namáhání. Díky povlakům se kvalita povrchové vrstvy stává mnohonásobně lepší než samotný nástroj bez povlaku [9].

Povlaky se nanáší z nejrůznějších materiálů a každý nanesený materiál vytváří jiné spektrum barev, což je vedlejší produkt povlakované vrstvy. U povlakování nástrojů je tento jev vedlejší, ale u povlakování např. obruby pro brýle je i estetický vzhled důležitý. U povlakování pro dekorativní účely už není tak důležitá mechanická stránka povlaku, ale více se zaměřujeme na estetickou stránku. Proto se nevolí materiál povlaku na základě toho, jaké vytvoří mechanické vlastnosti, ale jakou utvoří barvu na povlakovaném předmětu [9].

Charakterizace povlakování pro dekorativní účely:

- teplota povlakování se pohybuje mezi 190 až 300 °C (pokud to materiál dovoluje, je možné zvolit i jiné rozmezí teplot),
- povlakování ABS plasty se pohybuje kolem 80 °C,
- tvrdost výsledného povlaku se pohybuje kolem 2000 HV,
- zvyšuje odolnost proti poškrábání, zvýšení životnosti, chemicky nereaktivní, netoxický, hypoalergení (zabraňuje přímému kontaktu s kovem), snížení koeficintu tření,
- vhodné pro potravinářský průmysl a chirurgické nástroje,
- šetrné k životnímu prostředí,
- vynikající přilnavost k předmětu,
- rozmanitost a opakovatelnost barev (vhodné pro sériovou výrobu),
- flexibilní pro různé tvary a velikosti předmětů a jejich množství,
- laserové gravírování je možné před i po povlakování.

4.1 Volba vhodné metody povlakování

Nástroje, které se povlakují jsou většinou vyrobeny z materiálů, které mají vysokou teplotu tání, takže se může vybírat z velké škály různých metod pro povlakování. Pokud je materiál náchylný k popuštění za vyšších teplot, tak se musí volit metoda, při které se nedosahuje tak vysokých teplot. Pro dekorativní povlakování platí to samé. Předměty, které se mají povlakovat většinou nejsou z materiálů, které mají vysokou teplotu tání. Musí se volit metoda nanášení vrstvy, aby nedošlo k roztavení nebo natavení povlakovaného předmětu. Za tímto účelem by se měla volit metoda PVD, při níž nedochází k tak vysokým pracovním teplotám. U PVD metody může být pracovní teplota i 200 °C, což je teplota, kterou vydrží hodně materiálů, ať už železných tak i neželezných. U CVD metody se proces pohybuje okolo 1000 °C, a proto je většinou nevhodný pro povlakování za dekorativním účelem [9].

4.2 Předměty vhodné pro dekorativní povlaky

Výroba PVD povlaků se skvělou dekorativní funkcí, která je k dispozici v široké škále barev, poskytuje vynikající odolnost proti poškrábání předmětů, jako jsou rukojeť u dveří, vodovodní baterie, pásy, pouzdra, automobilová zrcadla, reflektory osvětlení, módní doplňky, sportovní potřeby, medicínské potřeby, spotřební elektronika, šperkařství, obruby na brýle a předměty pro potravinářství. Vybrané předměty jsou ukázány na obr. 11 [10,11].

Obr. 11 Předměty pro dekorativní povlakování [24].

Potahování plastových výrobků v aplikacích, kde byly dříve použity kovové komponenty. V podstatě existují tři způsoby, jak potáhnout plastové díly; galvanické, malířské a PVD nátěry. Galvanické pokovování má typicky tloušťku kolem 30 µm a vyrovnává menší povrchové nedokonalosti. Jedná se o mokrý povlak, extrémně nešetrný k životnímu prostředí. Hlavní nevýhodou malby je absence atraktivního kovového vzhledu. PVD je proto přirozenou volbou pro potahování nabízí delší životnost, metalické barvy, ochranu proti poškrábání a je šetrný k životnímu prostředí [10,11].

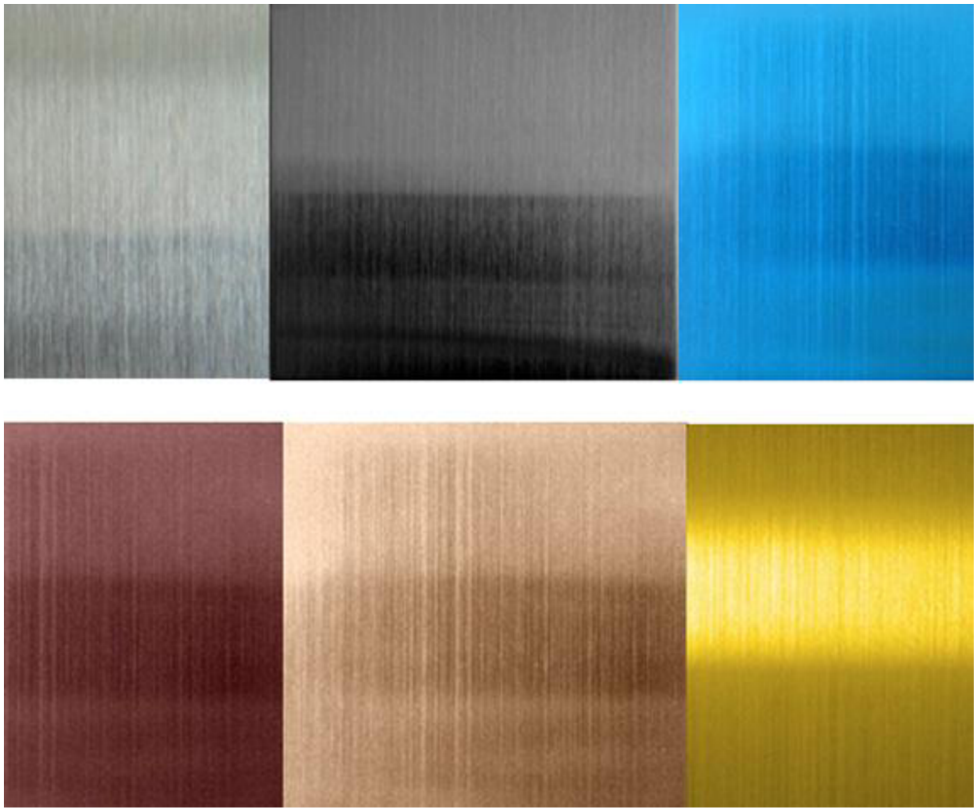
4.3 Ekonomické zhodnocení

Může se zdát, že když se předmět potáhne povlakem, tak se jeho cena rapidně zvýší. Ovšem to nemusí být pravda. Záleží, zda si předměty necháte povlakovat u výrobce PVD povlaků, nebo povlak vytvoříte vlastním zařízením ve vlastní firmě. Dále je důležité, jestli se jedná o sériovou nebo kusovou výrobu. Samozřejmě, že kusová výroba je vždy dražší než sériová. U sériové výroby povlaku je přístroj schopen potáhnout desítky až stovky předmětů v jedné dávce. To se také odvíjí od rozměrů zvolených předmětů. Díky vlastnímu přístroji na povlakování a sériové výrobě povlaků se cena za jeden povlak může pohybovat v řádu jednotek až desítek korun. Náklady na provoz PVD nátěrového systému zahrnují potahový zdrojový materiál, elektřinu, běžné plyny (jako je dusík a argon) a periodickou údržbu. Zdrojovým materiálem je často kov. V mnoha aplikacích může zdrojový materiál trvat několik měsíců před potřebou výměny. Zdrojový materiál PVD nátěru je obvykle nejnákladnější spotřební materiál. Pokud se zvolí správná povlakovací metoda a vhodný přístroj, tak se může maximalizovat využití materiálu a ztráty jsou minimální. [12]

4.4 Materiály vhodné pro vytvoření povlaku

PVD povlaky lze nanášet v širokém rozsahu barev. Kovy používané jako cílový materiál v dekorativních procesech PVD jsou zirkon, titan, chrom, slitiny titanu a hliníku a niob. Pro zvýšení tvrdosti povlaku se nanášejí keramické povlaky. Toho je dosaženo zavedením reaktivních plynů během procesu nanášení. Dekorativní povlaky jsou vyráběny v určitém barevném rozmezí v závislosti na poměru kov-plyn v povlaku a struktuře

povlaku. Oba tyto faktory ovlivňují změny parametrů depozice. Celý proces povlakování je monitorován počítačem. Každý nanesený odstín barvy má určité parametry a ty jsou uchovány v knihovně. Díky této knihovně je výrobce schopen přesně reprodukovat stejný průběh povlakování a vytvořit stejný odstín barvy povlaku. Některé barevné možnosti jsou znázorněny na obr. 12 [13].



Obr 12 Ukázka barev vytvořených pomocí PVD povlakování [25].

Zirkon je nejrozšířenějším cílovým materiálem pro dekorativní nátěry u sanitárních zařízení, dveřních kování a dalších aplikacích, jako jsou např. pouzdra hodinek z důvodu relativně širokého rozsahu barev, který je možný, např. ZrN může vypadat úplně stejně jako zlato, pokud je kompozice správná. Díky této vlastnosti ZrN se můžou předměty jevit jako vyrobené ze zlata, avšak je tvrdší, je odolný vůči korozi a je to levnější způsob úravy. [13]

5 POVLAKOVÁNÍ VE ŠPERKAŘSTVÍ

Když se řekne šperkařství, tak by většinu lidí ani nenapadlo, že by to mohlo mít nějakou souvislost s PVD povlakovací metodou. V tomto odvětví se hojně využívá kovových i nekovových materiálů např. zlato, korozivzdorná ocel, chirurgická ocel, titan a mnoho dalších. Většina těchto kovů je velice drahá. Díky povlakování by se mohla snížit cena šperků. Jako základ, na který se bude nanášet povlak je možno použít levnější kov, než celý výrobek vytvořit z čirého zlata a na ten nanést povlak, znázorněno na obr. 13. Díky velké rozmanitosti barev nanášených povlaků je možno zvolit ZrN, který vypadá přesně jako zlato. Také je možné jako základ zvolit korozivzdornou ocel, na ní nanést vrstvu TiN a na povlakovanou vrstvu následně nanést tenkou vrstvu v řádu desetin mikrometru zlata [9].

I když existuje velké množství výhod pro PVD povlakování, tento proces je nejvhodnější pro velké výrobce s výrobními cykly spíše než pro menší umělce a výrobce šperků [9].

Obr. 13 Prsten vyrobený z chirurgické oceli a povlakován titanem zlaté barvy [26].

Pokovování zlatem dává vzhled opravdového zlata. Díky metodě PVD se však k tomu vzhledu velice blížíme. Jak technologie PVD postupuje, mezera mezi oběma procesy by se měla snížit. PVD nátěr má výraznou výhodu oproti pozlacení v tom, že škrábance a opotřebení mohou v případě pozlacení odhalit základní kov. Pevnost a odolnost PVD tomu zabrání. Vzhledem k tomu, že šperky jako prsteny, náramky a hodinky, jsou vystaveny kontaktu s pokožkou, je důležité zvolit trvanlivý povlak odolný proti poškrábání, jako je PVD [28,29].

V oblasti šperkařství je možno využít i CVD metodu a to k výrobě umělých diamantů. Tyto umělé diamanty se mohou vsazovat do šperků nebo jsou často využívány k řezným nástrojům. Díky umělé výrobě diamantů je jejich cena o dost nižší než pravých diamantů [28,29].

Dříve se k výrobě umělých diamantů používala metoda HPHT (*High pressure high temperature*). Tato metoda imituje přírodní růst diamantů, ale je to velice drahá metoda a

diamanty takto vytvořené měli nažloutlou až hnědou barvu, což je nechtěné. Tvorba umělých diamantů pomocí metody CVD využívá jako pracovní plyn metan. Ten je vháněn do komory a následně vystaven mikrovlnám, které roztrhají molekuly metanu na uhlík a vodík. Uhlík je následně zachycován na předmětu, kde se akumuluje. Diamanty vyrobené metodou CVD dosahují velké čistoty a kvality. Tyto drahokamy jsou stejně odolné a atraktivní jako přírodní diamant (obr. 14). Je možnost vyrobit i barevné kameny. Díky umělé výrobě je cena nižší než u pravých kamenů a vzhledově, chemicky a fyzicky jsou si velice podobné [28,29]

Obr. 14 Umělý pěti karátový diamant vyrobený metodou CVD [27].

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo popsat jednotlivé metody nanášení povlaků a jejich využití. Následně určit konkrétní podmínky pro dekorativní účely a vybrat vytipovanou situaci a zhodnotit ji.

V kapitole 1 je stručný popis PVD a CVD metod povlakování a jejich rozvoj až do současnosti. Povlakovací metody jsou relativně mladé, protože jejich rozvoj začal až ve 20. století. Ovšem díky těmto povlakům je možno vyrobit tvrdší nástroje s lepšími mechanickými vlastnostmi.

V kapitole 2 a 3 jsou detailně popsány metody PVD a CVD a jejich modifikace. Povlakovacích metod a jejich modifikací je relativně hodně. Je potřeba zvolit správnou metodu, aby bylo dosaženo správného poměru nízké ceny a kvality nástroje pro obrábění. Také je potřeba vzít v úvahu, aby bylo zvolenou metodou dosaženo požadovaných mechanický vlastností.

Kapitola 4 je určena k popisu problematiky povlakování pro dekorativní účely. Při povlakování pro dekorativní účely je potřeba zohlednit teplotu procesu při nanášení povlaku, aby nedocházelo k natavení nebo roztavení předmětu. S tím také souvisí volba správné povlakovací metody. Jako nejvhodnější metoda nanášení povlaku je metoda PVD, protože proces neprobíhá při tak vysokých teplotách. Dále je potřeba zohlednit nanášený materiál, aby došlo ke chtěnému výsledku barvy povlaku. Vedlejším efektem dekorativního povlakování je zvýšení mechanických vlastností, jako je otěruvzdornost, což je zároveň žádoucím efektem.

V poslední kapitole byla jako vytipovaná situace zvoleno dekorativní povlakování ve šperkařství. Ve šperkařství se využívá PVD metody k nanášení povlaku s barvou zlata. Díky tomu je možno jako základní materiál použít např. korozivzdornou ocel a povlakovat tento levnější materiál. Výsledný efekt je, že předmět vypadá jako ze zlata. CVD metoda se využívá také avšak k výrobě syntetický diamantů s vysokou čistotou.

Díky povlakovacím metodám je možnost vyrábět předměty stejné kvality, ovšem s lepšími mechanickými vlastnostmi. Cena takto povlakovaných výrobků by neměla být o moc vyšší, avšak to záleží na sériovosti výroby a zvolené metodě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Praha: MM Publishing, 2008 [cit. 2019-02-05]. ISBN 978-80-254-2250-2. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf

2. MM Průmyslové Spektrum: Výroba/Obrábění. Trendy v povlakování slinutých karbidů [online]. 2001-07-11, č. 7, str. 43, doi: 010705 [cit. 2019-03-16]. Dostupný z: http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html.

3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

4. MÁDL, Jan. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, ÚTŘV, 2003. ISBN 80-704-4539-4.

5. MCEVOY, A. J., T. MARKVART a Luis CASTAÑER. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications* [online]. 2nd ed. Waltham, MA: Academic Press, c2012 [cit. 2019-03-20]. ISBN 01-238-5934-4. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=gf6oN2Hl3RYC&dq=apcvd+description&hl=cs&source=gbs_navlinks_s

6. *Naprašování tenkých vrstev: Tenké vrstvy pro elektrotechniku* [online]. 2003, **2003**(07) [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441

7. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.

8. DAĎOUREK, Karel. Vybrané technologie povrchových úprav. *KMT* [online]. 2008 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/13metody%20na%20vrstvy.pdf

9. Decorative pvd coating. *Prirev* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.prirev.com/download/171212155225en.pdf

10. Potravinářské bezpečné nátěry. *Titaniumtarget* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://cz.titaniumtarget.com/info/tin-titanium-nitride-coating-20804848.html

11. PVD coating. *Kenosistec* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://www.kenosistec.com/en/product_card.php?id=10&categoria=2

12. Economy of PVD. *Vaportech* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://vaportech.com/pvd-coating-costs-20-per-batch-or-20-per-part/

13. Pvd-coatings. *Pvd-coatings* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.pvd-coatings.co.uk/applications/decorative/

14. Vyměnitelná břitová destička. In: *Sandvik Cotomant* [online]. ©2000-2012 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/turning-inserts-grades-stainless-steel/pages/default.aspx

15. Schéma povlakování CVD metodou. In: *Researchgate* [online]. 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-CVD-apparatus-for-preparation-of-CNFs_fig3_307575666

16. Ohřátý wolframový drát, přes který je přiváděn plyn. In: *Plasma Physics Research Center* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://pprc.srbiau.ac.ir/en/page/2931/hfcvd

17. Schéma dopravy předmětů a metody APCVD. In: *Slideshere* [online]. 2015 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/anshukg/chemical-vapor-deposition-cvd

18. Schéma komory pro PECVD. In: *Lnf-wiki* [online]. 2015 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/File:PECVD_chamber_diagram.jpg

19. Schéma procesu PVD povlakování. In: *Sigmaaldrich* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=108832720

20. Zobrazení stínového efektu. In: *Tinmodel* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.tinmodel.com/Self_shadowing.png

21. Schéma magnetronového naprašování. In: *Dentonvacuum* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/

22. Schéma vystřelování molekul z terče pomocí iontového paprsku. In: *Tripod* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://pprco.tripod.com/SIMS/Theory.htm

23. Schéma odpařování pomocí elektronového paprsku. In: *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_physical_vapor_deposition

24. Předměty pro dekorativní povlakování. In: *B2cloudev* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.b2cloudev.com/Decorative.aspx

25. Ukázka barev vytvořených pomocí PVD povlakování. In: *Anilmetaldesigns* [online]. 2017 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.anilmetaldesigns.com/pvd-stainless-steel-sheets.html

26. Prsten vyrobený z chirurgické oceli a povlakován titanem zlaté barvy. In: *Angelbodyjewellery* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.angelbodyjewellery.com/product/zircon-gold-pvd-hinged-ring/

27. Umělý pěti karátový diamant vyrobený metodou CVD. In: *GIA* [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.gia.edu/gems-gemology/winter-2016-labnotes-CVD-synthetic-diamond-over-5-carats-identified

28. UNIVERSITY OF BRISTOL. Microwave Plasma CVD [online]. School of Chemistry, poslední úpravy 2002-09-23 [cit. 2019-04-25]. Dostupný z: http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/jamespthesis/chapter1.htm

29. CVD metoda pro dekorativní účely. *GIA* [online]. 2019 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: https://www.gia.edu/gems-gemology/winter-2016-labnotes-CVD-synthetic-diamond-over-5-carats-identified

30. *PVD metoda* [online]. 2010 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.pvd.cz/

31. KANTAR, F. PVD povlaky nové generace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. [cit. 2019-05-03]. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
HFCVD	Hot Filament Chemical Vapour Deposition
HPHT	High pressure high temperature
HV	Tvrdost dle Vickerse
LICVD	Laser Induced Chemical Vapour Deposition
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapour Deposition
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
VBD	Vyměnitelná Břitová Destička