



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Teorie v praxi



CZ.1.07/1.1.22/02.0006

# Plazma a možnosti jeho využití

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky.

## Obsah

1. Úvod .....	3
2. Plazma .....	4
2.1. Stručná historie objevu plazmatu.....	4
2.2. Definice plazmatu .....	4
2.3. Výskyt plazmatu.....	5
2.4. Elementární procesy probíhající v plazmatu .....	6
2.5. Druhy plazmatu .....	8
2.6. Vznik umělého plazmatu .....	9
3. Vznik vakua.....	10
3.1. Vývěvy nízkého a středního vakua .....	10
3.2. Vývěvy vysokého vakua .....	12
4. Aplikace plazmatu .....	14
4.1. Plazmové modifikace povrchu.....	15
4.2. Technologie povlakování .....	17
4.3. Další možná použití.....	19
5. Použitá literatura.....	23

## 1. Úvod

Vesmír v oblasti dostupné pro lidské pozorování je ve stavu plazmatu. Všechny hvězdy jsou tvořeny horkým plazmatem, včetně Slunce. Také v mezihvězdném prostoru je plazma nejčastěji se vyskytujícím skupenstvím. Takže můžeme říci, že jen malá část hmoty ve vesmíru existuje ve třech zbylých skupenstvích: pevném, kapalném a plynném. Při podmínkách jako jsou na Zemi, se setkáváme s plazmatem docela často, jen si to nikdo z nás neuvědomuje. Obvykle se jedná o takzvané studené plazma. Vyskytuje se třeba jako plamen, jiskra, polární záře, v elektrickém oblouku při neonovém osvětlení ulice a dokonce i blesk. Také vnější vrstva zemské atmosféry, tzv. ionosféry je plazmou o nízké hustotě. V závislosti na parametrech plazmatu je možné také vidět jevy jako je sluneční vítr, konvenční hvězdy, mlhovina anebo ionosféra. Teplé plazma, jehož teplota je vyšší než  $30000^{\circ}\text{C}$ , se vyskytuje na Zemi při speciálních podmínkách ve vědeckých laboratořích a v průběhu jaderných a vodíkových explozí. Plazma našla své uplatnění v mnoha oblastech lidského života i výroby. Existuje mnoho technických (umělých) metod sloužících k tvorbě různých plazmatů. Tento skript popisuje základní problematiku plazmatu a možné jeho aplikace.

Kurz „**Plazma a možnosti jeho využití**“, navazuje na teoretické základy z oblasti fyziky a chemie, který je určen pro gymnázia a střední průmyslové školy. Posluchači kurzu jsou seznamováni se základními jevy, které jsou spojené s různými druhy plazmatu a nezbytným vybavením nutným pro tvorbu plazmatu v laboratorních podmínkách. V průběhu kurzu studenti mají možnost provést jak plazmové modifikace polymerních substrátů za účelem změn povrchových vlastností tak i provést depozice tenkých vrstev zlepšujících užité vlastnosti modifikovaných substrátů. Na níže uvedených obrázcích jsou znázorněny příklady přírodní a umělé plazmy, se kterou se žáci mají možnost seznámit v rámci kurzu.



Obr. 1. Příklady plazmatu a) polární záře [1], b) argonová plazma v reaktoru RF PACVD

## 2. Plazma

### 2.1. Stručná historie objevu plazmatu

První písemná zmínka týkající se plazmatu byla publikovaná v 18. století. Německý profesor matematiky G. C. Lichtenberg z Univerzity Göttingen prováděl svůj vědecký experiment, pro který vyrobil elektrody ve formě štětců, mezi kterými vznikl výboj. V průběhu experimentu uviděl dosud neznámý jev. Nicméně jako první se pokusil vysvětlit takové jevy anglický vědec Michael Faraday, objevitel elektromagnetismu, a to až v roce 1830. Jako první pojem „čtvrtý stav hmoty“ zavedl další Angličan Sir William Crookes který se zabýval výboji ve skleněné vakuované trubici. Crookes správně potvrdil existenci elektricky nabitých částic (iontů) v jeho trubici. V roce 1857 Werner von Siemens německý inženýr patentoval první technologickou aplikaci plynové plazmy, dokonce i základních znalostí fyziky plazmatu. Americký průmyslový vědec znázorněný na obr. 2 nositel Nobelovy ceny Irving Langmuir objevil v roce 1928 „plazmové oscilace“ v ionizovaných plynech a je považován za osobu, která první použila výraz „plazma“ tomto kontextu [2].

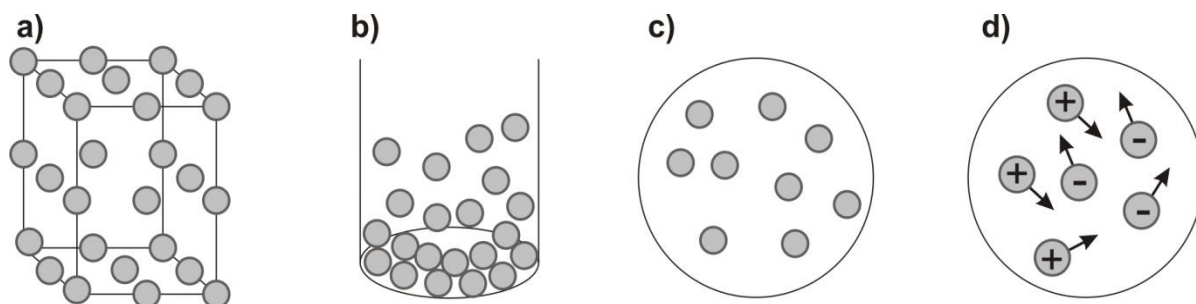


Obr. 2. Langmuir Irving (1881-1957)

### 2.2. Definice plazmatu

Je dobře známo, že všechny látky mohou existovat běžně ve třech stavech skupenství: pevném, kapalném a plynném. Nicméně když je velmi vysoká teplota plynu, atomy se sráží s velmi vysokou energií, následuje oddělení elektronu z atomu. V důsledku těchto událostí vzniká směs sestávající se ze záporně nabitých elektronů a volně se pohybujících kladných iontů. Tato směs se nazývá **plazma**. Plazma je jako celek elektricky neutrální (tj. má stejný počet pozitivních a negativních nábojů). Může být také vnímáno jako kapalina anebo plyn. Plazma je elektricky vodivé, a jeho elektrický odpor se snižuje se zvyšující se teplotou [3], obráceně než v případě kovů. Díky tomu, že plazma je vodivé reaguje na elektrické a magnetické pole, vykazuje kolektivní chování, znamená to, že je schopné svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na tato pole reagovat [4]. Pojem plazma je

možné velmi jednoduše vysvětlit na příkladu čtyř skupenství graficky znázorněných na obr. 3. Tento obrázek ukazuje přechod od pevného skupenství do plazmatického stavu.



Obr. 3. Čtyři skupenství hmoty: a) pevné, b) kapalné, c) plynné, d) plazma

V pevném skupenství atomy tvoří tzv. krystalovou mřížku, jsou vzájemně vázány v pevně definovaných pozicích a nemohou se volně pohybovat. V případě kapalného skupenství atomy nejsou uspořádány v krystalové mřížce, ale drží pohromadě přitažlivými silami. V plynném stavu je kinetická energie mnohem vyšší než síly vzájemné soudržnosti. Atomy a molekuly se pohybují volně. V plazmatickém stavu se z atomů uvolňují elektrony a tento jev se nazývá ionizace. Čím je vyšší energie plazmatu, tím mají molekuly vyšší stupeň ionizace [5]. Plazma je často nazývána čtvrtým skupenstvím, je specifickou směsí plynu, která zahrnuje elektrony, ionty, buzené atomy a částice, neutrální atomy a částice a také fotony. Protože plazma vzniká v důsledku ionizace plynu velmi často je nazývána ionizovaným plynem. Nicméně ne každý ionizovaný plyn může být nazván plazmou. Zda je ionizovaný plyn plazmatem závisí na jeho stupni ionizace. Stupněm ionizace se nazývá poměr koncentrace nabitých částic ke koncentraci částic plynu před ionizováním. V libovolném plynu v zemských podmínkách existuje vždy malé množství elektronů a iontů. Vznikají v důsledku ionizace kosmickým zářením a zářením přírodních zdrojů. Takový plyn nemůže vést proud, zatímco plazma může. Za hranice oddělující plyn od plazma se považuje okamžik, ve kterém dochází ke změně fyzikálních vlastností plynu, mezi něž patří vznik elektrické vodivosti a souběžná ztráta izolační schopnosti. Plazma obsahuje značné množství volných elektronů a iontů. Aby bylo možné ionizovaný plyn nazvat plazmatem, musí být splněny další podmínky. Jedná se o kvazineutralitu a kolektivní chování částic. Jestliže inertní plyn přechází do plazmatického stavu, proto v souladu se zákonem zachování náboje také vznikne plazma elektricky neutrální, protože obsahuje stejný počet kladných a záporných nábojů. Elektrická neutralita tzv. kvazineutralita je jednou ze základních vlastností plazmatu. Kolektivní chování znamená, že nabitě částice ovlivňují pohyb dalších nabitých částic na poměrně velké vzdálenosti. Je to způsobeno tím, že plazma dokáže generovat globální elektrické a magnetické pole a zároveň na ně reagovat [6,7].

### 2.3. Výskyt plazmatu

Plazma je normálním skupenstvím hmoty při teplotách kolem 10 000 K a vyšších. Je to nejrozšířenější forma existence hmoty ve vesmíru. Ve hvězdách ionizace nastává v důsledku vysoké teploty, zatímco v rozptýlených mlhovinách a mezihvězdném plynu jako důsledek

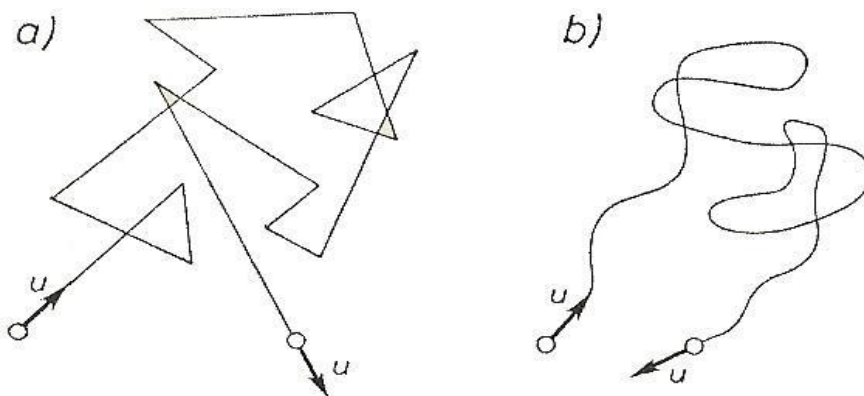
ultrafialového záření hvězd. Ve Sluneční soustavě, je složené výhradně z plazmatu Slunce a také vnější vrstvy zemské atmosféry (tzv. ionosféra) ionizované v důsledku slunečního záření. Protože hvězdy (které jsou obrovskými plazmovými koulemi) a také mezihvězdný plyn jsou prakticky v celém vesmíru, je možné bez větší chyby odhadnout, že více než 99,9% hmoty je v plazmatickém skupenství. Takže stav plazmy je normálním a nejčastěji se vyskytujícím stavem skupenství, výskyt jiných skupenství (pevné, kapalné a plynné) ve vesmíru je něčím vzácným a neobvyklým. Je možné říct, že žijeme v málem koutku vesmíru, který má méně než 0,1% hmoty a ve kterém se přírodní plazma vyskytuje např. v podobě:

- ✓ blesku – elektrostatický výboj produkovaný přirozeně v atmosféře, obvykle spojený s bouřkami;
- ✓ polární záře – světelný jev pozorovaný ve vysoké atmosféře (ve výškách od 80 do 1000 km) v blízkosti magnetických pólů planety;
- ✓ ionosféra Země – obsahuje velké množství plazmatu, k ionizaci dochází hlavně působením kosmického záření, ultrafialového a rentgenového záření slunce na molekuly atmosférických plynů. V ionosféře dochází k lomu, odrazu, absorpci a polarizaci rádiových vln.
- ✓ magnetosféra Země – část prostoru kolem Země, ve kterém magnetické pole má obrovský vliv na pohyb elektricky nabitých částic [8,9,10].

V zemských podmínkách se plazmatický stav vyskytuje docela často. Plazmu využívají různé zdroje světla jako např. zářivky, výbojky s velkým světelným výkonem, výbojky pro reklamy, displeje anebo obrazovky. Plazmu můžeme také najít v různých odvětvích průmyslu jako například jsou speciální plazmové hořáky pro svařování a řezání kovových materiálů. Různé druhy plazmatu můžeme taky potkat ve vědeckých plazmatických laboratořích, které se zabývají různými druhy plazmatu a její pomocí modifikují povrchy materiálů. Plazma našla své uplatnění téměř ve všech oborech lidské činnosti [11].

#### **2.4. Elementární procesy probíhající v plazmatu**

V plazmatu a v plynu, který přechází do stavu plazmatu, se vyskytuje celá řada různorodých procesů vzájemného působení částic. Nejdůležitější jsou ty procesy, které jsou spojeny se změnou vnitřní energie atomů anebo částic. Tyto procesy převážně vznikají během neelastických srážek, které vedou k ionizaci, disociaci a excitaci inertních částic s následným převodem plynu v plazma. Tyto jevy jsou neustále doprovázeny protichůdnými procesy tzv. procesy rekombinace, které vedou k ustavení rovnovážného stavu mezi koncentrací elektronů a kladných iontů, a to při určitých podmínkách (hodnotách tlaku, teploty, atd.). V důsledku přítomnosti kladně nabitých částic v plazmatu se vyskytuje spousta jiných jevů, které se nevyskytují v neionizovaných plynech. U neionizovaného plynu jsou podstatné jenom elastické srážky, zatímco mezi srážkami se částice pohybují nezávisle, to znamená, že na ně nepůsobí žádné síly. V případě plazmatu nabitě částice interagují s vnějšími elektrickými a magnetickými póly a také mezi sebou [12,13]. Tento jev je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4. Pohyb částic v důsledku srážek: a) v neutrálním plynu; b) v ionizovaném plynu

Elementární procesy v plazmatu můžeme rozdělit na 4 hlavní typy [14]:

✓ Ionizace molekul

Přivedením energie do atomu můžeme „odtrhnout“ jeden anebo větší počet elektronů. Po oddělení elektronu vznikají na místě neutrálního atomu dvě nabitě částice: záporný elektron a kladný iont. Tento proces se nazývá ionizace atomu. Může probíhat jednonásobná ionizace (odtržení jednoho elektronu) anebo vícenásobná v případě odtržení několika elektronů. Energie nezbytná pro odtržení elektronu se rovná energii vazby elektronu v atomu. Má odlišnou hodnotu pro různé elektrony v závislosti na elektronové hladině, ve které se elektron nachází a stupně vyplnění elektronové hladiny (umístění v periodické tabulce prvků). Po odtržení nejslaběji vázaného elektronu od atomu, který se nachází na valenční hladině, mohou být odtrženy další elektrony silněji vázané k atomu.

✓ Excitace atomu

Jestliže energie přivedena k atomu je menší než ionizační energie, může ji atom absorbovat a tím pádem zvětšit svoji vnitřní energii. Když jsou elektrony na nejnižších možných elektronových hladinách (tzn. jsou v blízkosti jádra), atom má nejmenší možnou energii a je v tzv. základním stavu. Kromě základního stavu existuje celá řada vyšších energetických stavů. V důsledku přivedené vnější energie, bude jeden z elektronů přesunutý na další hladinu od jádra atomu, tímto způsobem se zvyšuje vnitřní energie atomu. Tento proces se nazývá excitace atomu a atom s vyšší vnitřní energií buzeným atomem. Stav kdy je atom vybuzený, není stabilní a to znamená, že po době  $10^{-8}$  s, atom se vrací do základního stavu. Uvolněná energie je odvedena (vyzářena) v podobě kvanta energie - záření.

✓ Disociace molekul

Atomy v molekule drží pohromadě jen elektrickými silami, vazby mezi nimi nejsou tuhé, ale jsou elastické. Převedení molekuly do stavu vibračního je možné pomocí vnější energie (tato energie je velmi malá, menší než energie buzení atomu). V případě absorpce příliš velké energie skrz molekulu může dojít k poškození vazeb mezi atomy (dojde k jejímu rozdělení). Tento proces se nazývá procesem disociace. Charakteristická hodnota energie nezbytné pro rozdělení molekuly se nazývá energie disociace. Disociační produkty mohou být neutrální částice, buzené anebo ionizované atomy a částice.

- ✓ Rekombinace molekul

Rekombinace je reverzním procesem k ionizaci. V plazmatu kromě procesů ionizace probíhají neustále procesy rekombinace. V rovnovážném stavu se rychlosti průběhů těchto procesů rovnají. Prostorová rekombinace je hlavním důvodem ztráty elektronů a iontů v plazmatu, je to způsobené spojením dvou opačně nabitých částic. Rekombinovat se mohou elektrony s kladnými ionty (elektronová rekombinace), a také kladné ionty a záporné ionty mezi sebou (iontová rekombinace). Rekombinace iontů prochází daleko rychleji než rekombinace elektronů [15,16].

## 2.5. Druhy plazmatu

Rozsah tlaku a teplot, při kterých se plazma může vyskytovat je velmi široký. Na těchto parametrech závisí ve značné míře její vlastnosti. Plazma je možno rozdělit podle krajních teplot na vysokoteplotní a nízkoteplotní.

- ✓ Nízkoteplotní plazma je obvykle tvořena technickými metodami, vyskytuje se ve spalovacích komorách, magneto-hydro-dynamických generátorech (MHD), elektrických obloucích, obloukových plazmatronech a její teplotní rozsah je od několika Kelvinů do několika desítek tisíc Kelvinů. V nízkoteplotním plazmatu při tlacích blízkých atmosférickému existuje obvykle stav tepelné rovnováhy. Vícenásobné srážky mezi částicemi umožňují rychlou obnovu rovnováhy po jakémkoliv narušení. Tento druh plazmatu lze rozdělit do dvou dalších skupin: izotermické a neizotermické plazma. Izotermické plazma je charakterizována celkovou termickou rovnováhou všech jejích složek a také rovnoměrnou koncentrací všech částic, které se v ní nacházejí. Izotermické plazma existuje neomezený čas, to znamená, že hmotnostní úbytek v důsledku rekombinace je neustále kompenzovaný procesem ionizace. Neizotermické plazma je charakterizovaná tím, že teplota elektronů je větší než  $10^4$  Kelvinů, a teplota iontů a neutrálních částic je řádově menší, ale je pro tyto dvě složky plazmy stejná.
- ✓ Vysokoteplotní plazma se vyskytuje uvnitř Slunce, u výbuchu vodíkové bomby a zahrnuje teplotní rozsah od několika jednotek až do stovek milionů Kelvinů. Ve vysokoteplotním plazmatu existuje stav tepelné nerovnováhy, tzn. že elektrony mají jiné hodnoty energie než ionty. Velmi řídké vysokoteplotní plazma není možné udržet v žádném experimentálním prostoru [17].

Plazma je možné přiřadit do několika dalších skupin, jako například jsou:

- ✓ vakuová plazma – plazma vytvořena za sníženého tlaku,
- ✓ atmosférická plazma – plazma vytvořena za atmosférického tlaku.

Dalším možným rozdělením plazmatu je klasifikace podle stupně ionizace plynu [18]. Podle stupně ionizace se plazma rozděluje do dvou skupin:

- ✓ slabě ionizované plazma – nabitě částice se srážejí s molekulami plynu, to znamená, že poměr nabitých částic je malý ve srovnání s neutrálními částicemi,



- ✓ silně ionizované plazma – dochází k vzájemným srážkám nabitých částic, poměr nabitých částic je převažující ve srovnání s neutrálními molekulami plynu.

## 2.6. Vznik umělého plazmatu

V souladu s modelem atomu Bohra se všechny atomy skládají ze třech elementárních částic: elektronů, protonů a neutronů. Elektrony a protony mají elektrický náboj, neutrony jsou částice v jádře, které jsou neutrální. Kladný elektrický náboj protonu je velikostí přesně stejný jako záporný náboj elektronu. Tento náboj se nazývá „elementárním nábojem“ a je základní fyzikální konstantou, která má hodnotu  $e=1,602 \times 10^{-19}$  C. Pro vznik plazmatu je nutné přivést takové množství energie, aby došlo k ionizaci atomů plynu. Existují dvě hlavní metody, pomocí kterých je možné vytvořit plazmu. První metoda je založena na dodání energie pomocí ohřevu plynu, známá též jako termická ionizace [19]. Druhá metoda využívá pro vznik plazmatu elektrický výboj. Tato metoda je velice rozšířená v průmyslu z důvodu nižší teploty plazmatu. V tomto případě plazma vzniká interakcí nabitých částic s elektrickým polem [20]. Pod vlivem elektrického pole dochází k odtržení elektronu z valenční hladiny. Kinetická energie těchto elektronů se zvyšuje. V případě, že tato energie bude na tolik vysoká, že v průběhu další srážky tentýž elektron bude schopen rozbít další atom, dojde k uvolnění dalšího elektronu. Vznikající elektrony mohou ionizovat další molekuly plynu a proces ionizace se znásobuje. V tomto procesu vznikají elektronové laviny a výsledkem tohoto procesu je plazma. Na obr. 5 je schematicky znázorněn vznik elektronových lavin [21].



Obr. 5. Elektronová lavina v mezi-elektrodové oblasti

V současné době se nejčastěji využívá nízkoteplotní plazma. Je to hlavně proto, že během plazmových modifikací povrchu nedochází k teplotní degradaci substrátů. Pro vznik (buzení) tohoto druhu plazmatu se obvykle používají různé druhy elektrických zdrojů, jako jsou například: stejnosměrné DC, střídavé AC, pulzní a modulové. Střídavé zdroje je možné rozdělit do třech skupin, které se mezi sebou liší pouze frekvencí: nízkofrekvenční (kHz), radiofrekvenční (MHz) a mikrovlnné (GHz) [22].

### 3. Vznik vakua

Pro možnost reprodukovatelnosti procesů, a zajištění kontrolované atmosféry během plazmových procesů, je nezbytné provádět většinu plazmových procesů za sníženého tlaku – vakua. (Pozn. Vytváření povlaků a plazmové modifikace povrchů se obvykle provádí za sníženého tlaku.) Vakuum je stav, který existuje v objemu vyplněném plyny a párami, když jejich tlak je nižší než atmosférický tlak ( $10^6$  Pa).

V závislosti od hodnoty tlaku, vakuum je rozdělené do čtyř skupin:

- nízké vakuum  $10^5 - 10^2$  Pa,
- střední vakuum  $10^2 - 10^{-1}$  Pa,
- vysoké vakuum  $10^{-1} - 10^{-6}$  Pa,
- velmi vysoké vakuum méně než  $10^{-6}$  Pa.

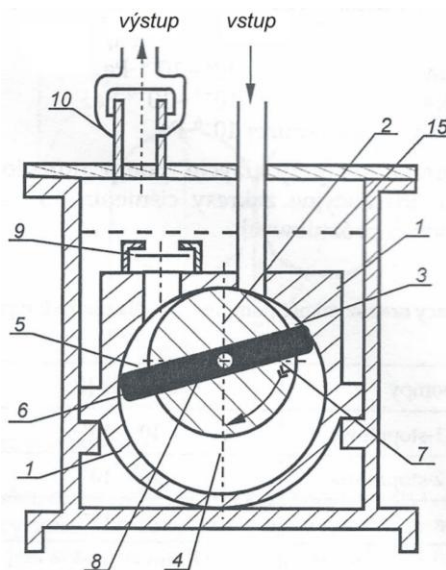
Vakuum se získává za pomoci vakuových vývěv. V tab. 1 jsou uvedené orientační rozsahy tlaků získávaných za pomoci různých vakuových vývěv.

Tab. 1. Orientační rozsahy pracovního tlaku a rychlosti čerpání pro jednotlivé druhy vývěv.

Druh vývěvy	Tlak [Pa]	Rychlost čerpání [l/s]
Rotační olejové 1-stupňové	$10^5 - 10^0$	1 – 100
Rotační olejové 2-stupňové	$10^5 - 10^{-1}$	1 – 100
Rootsova	$10^3 - 10^{-3}$	50 – 2000
Molekulární	$10^{-2} - 10^{-5}$	1 – 10
Turbomolekulární	$10^0 - 10^{-8}$	5 – 5000
Difuzní s vodním chlazením	$10^0 - 10^{-5}$	5 – 10000
Difuzní s vymrazováním	$10^{-1} - 10^{-8}$	3 – 60000
Iontová – sublimační	$10^{-4} - 10^{-10}$	$\leq 100000$

#### 3.1. Vývěvy nízkého a středního vakua

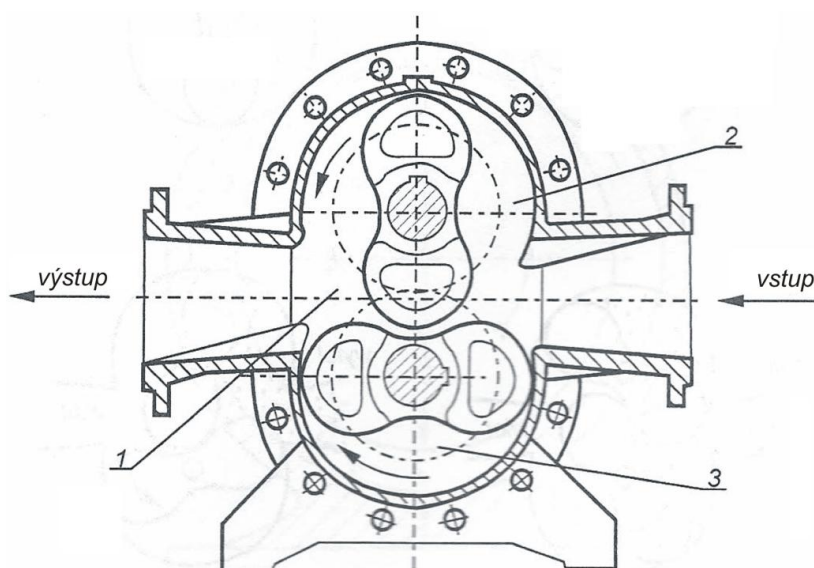
Nízké a střední vakuum se získává hlavně za použití rotačních olejových vývěv. Na obr. 6 je uvedeno schéma rotační olejové vývěvy. V korpusu vývěvy (1) se nachází excentrický rotor (2). V rotoru jsou umístěny dva posuvníky, na které jsou pomocí pružiny dotlačovány k válcové dutině korpusu. Rotor je částečně ponořen v oleji, který těsní a maže rotující části. Posuvníky rozdělují dutinu korpusu na tři oblasti: (3), (4) a (5). Oblast (3) je spojena s přívodem vývěvy, oblast (5) s výfukem vývěvy, oblast (4) je omezená dvěma posuvníky. Během otáčení rotoru se oblast (3) zvětšuje, oblast (5) se zmenšuje, oblast (4) se přesouvá do výstupu a přechází v oblast (5). Tímto způsobem se plyn posouvá směrem od vstupu do výstupu vývěvy. U výstupu vývěvy je umístěn automatický ventil (9), díky kterému je uvnitř vývěvy udržovaný tlak nižší než atmosférický. Tento ventil je využíván také jako bezpečnostní prvek a slouží k zabránění průniku oleje do odčerpávaného prostoru v případě zastavení vývěvy.



Obr. 6. Konstrukce rotační olejové vývěvy: 1 – korpus vývěvy; 2 – rotor; 3, 4, 5 – oblast komory; 6, 7 – posuvníky; 8 – pružina; 9 – automatický vypouštěcí ventil; 10 - odolejovač

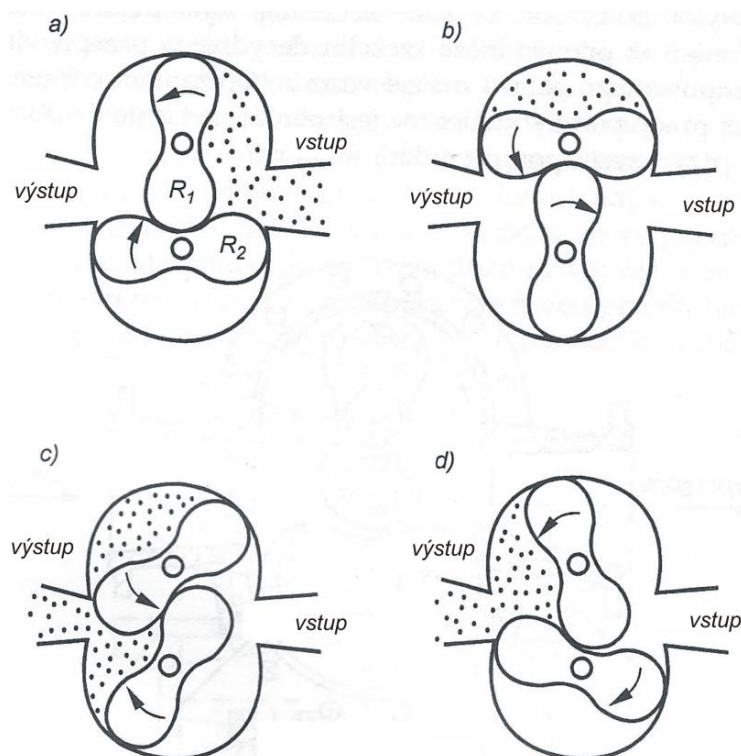
Hlavními nevýhodami rotačních olejových vývěv jsou např. pokles rychlosti odčerpávání při tlaku menším než 1 Pa a také průnik par oleje do odčerpávané komory.

Tyto nedostatky částečně vyřešila konstrukce rotační Rootsovy vývěvy. Konstrukce této vývěvy je schematicky znázorněna na obr. 7. Uvnitř korpusu jsou umístěny dva rotory. Vzhledem k tomu, že rotory se otáčejí proti sobě, dochází k odsávání plynu na vstupu vývěvy a také k odvedení plynu ve směru výfuku vývěvy. Oba rotory k sobě těsně doléhají, a štěrbin mezi nimi nesmí být větší než 0,1 – 0,2 mm. Protože velikost štěrbin rozhoduje o zpětném průtoku čerpaného plynu, klesá se sníženým tlakem a pro správnou práci vývěvy je nutné zajistit vstupní vakuum – Rootsova vývěva nemůže pracovat od atmosférického tlaku, a proto bývá obvykle dána do série s olejovou rotační vývěvou.



Obr. 7. Konstrukce Rootsovy vývěvy: 1 – výstupní komora; 2 – vstupní komora; 3 – komora

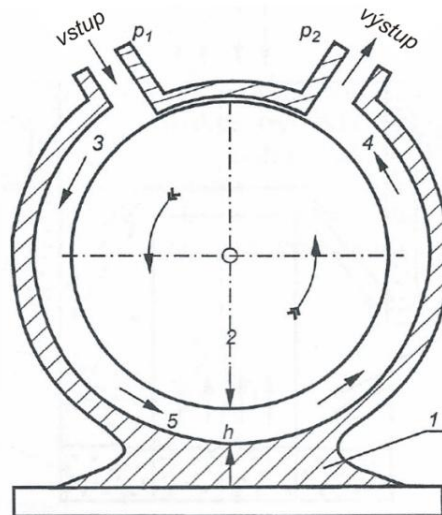
V plném pracovním cyklu Rootsovy vývěvy se vyskytují čtyři fáze, které lze posuzovat samostatně pro každý rotor. Na obr. 8a je uvedena fáze odsávání skrz rotor R1. Vstupní komora vývěvy je spojena s vstupním kanálem, který se naplňuje plynem z odčerpávaného prostoru komory. Tato fáze končí, když hrana rotoru R1 přejde hranu vstupní díry vývěvy. Začíná druhá fáze cyklu obr. 8b – stlačení plynu nacházejícího se mezi rotorem a korpusem vývěvy. Tato fáze trvá až do doby, kdy hrana rotoru projde přes výfuk vývěvy. Následuje otevření komory vývěvy do výfukového kanálu (obr. 8c). V oblasti výstupu vývěvy tlak plynu je mnohem větší než v komoře, tato fáze je spojená s intenzivním zpětným průtokem ve směru od výstupu vývěvy do komory. Při dalším pootočení rotoru se hodnoty tlaku vyrovnávají a následuje fáze vlastního výfuku (obr. 8d).



Obr. 8. Jednotlivé fáze práce Rootsovy vývěvy:  
a) fáze nasávání; b) fáze stlačení; fáze zpětného průtoku; d) fáze výfuku

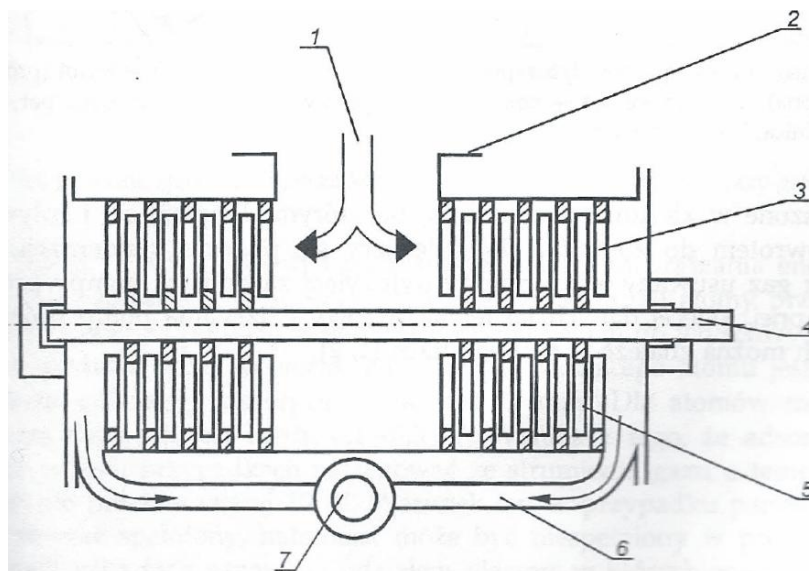
### 3.2. Vývěvy vysokého vakua

Vysoké vakuum se získává za pomoci molekulárních a difuzních vývěv. Molekulární vývěva (uvedena na obr. 9) se skládá se dvou koaxiálních válců: statoru (1) a rotoru (2), oddělených velmi malou štěrbinou. Stator má nepravidelný tvar, na určité části obvodu mezi body (3) a (4) je velmi malá štěrbinina, zatímco na zbývajících částech (3),(4),(5) vzniká prostor o výšce  $h$ . K čerpání plynu dochází na úseku (3),(5),(4). Rotor uvedený do pohybu přidává částicím plynů nacházejícím se ve štěrbině rychlost ve směru od vstupu do výstupu, důsledkem čehož vzniká rozdíl tlaku mezi vstupem a výstupem. Molekulární vývěva musí pracovat pouze v sérii s jinou vývěvou, a lze jí dosáhnout vakua až  $10^{-1} - 10^{-2}$  Pa. Hlavní nevýhodou popsané molekulární vývěvy je nízká rychlost čerpání.



Obr. 9. Konstrukce molekulární vývěvy: 1 – korpus vývěvy (stator); 2 – rotor; 3,4,5 – části obvodu rotoru

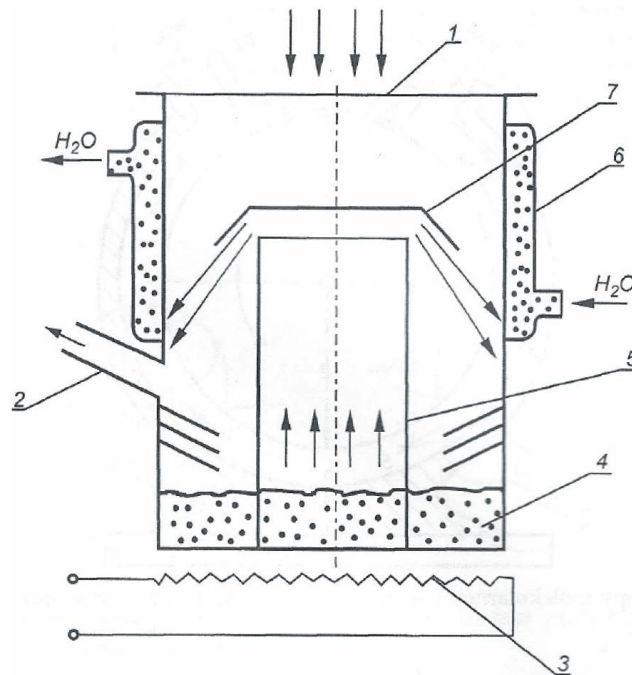
Turbomolekulární vývěva má významně zvýšenou rychlost čerpání. Schematická konstrukce vývěvy je uvedena na obr. 10. Konstrukce vývěvy připomíná vícestupňovou kompresorovou turbínu. V této vývěvě se vyskytuje sada rotorových a statorových kotoučů. Rotorové kotouče díky speciálním zářezům formují lopatky turbíny. Další sady rotorových a statorových kotoučů pracují sériově. Plyn je transportován z centrální části čerpadla ke vnitřním výstupním kanálům. Současné turbomolekulární vývěvy dosahují čerpací rychlosti řádově 5000 l/s a vytvářejí vakuum o hodnotě až  $10^{-8}$  Pa. Hlavní výhodou tohoto druhu vývěv je možnost získání velmi vysokého a čistého vakua. Tento druh vývěvy neznečišťuje vakuum vlastními párami (jako např. olejová vývěva).



Obr. 10. Schéma konstrukce turbomolekulární vývěvy: 1 – vstup plynu; 2 – stator; 3 – statorové kotouče; 4 – osa rotoru; 5 – rotorové kotouče; 6 – výstupní kolektor; 7 – výstup plynu

Difuzní vývěvy jsou proudové vývěvy, kde dochází k odpařování a kondenzaci par oleje. Konstrukce vývěvy je schematicky znázorněna na obr. 11. Zásobník vývěvy je naplněn olejem

ohříváným elektrickou odporovou spirálou. Páry pracovní látky (oleje) stoupají ve směru znázorněném šipkami (obr. 11). Skrz horní část vývěvy, která je spojena s odčerpávaným prostorem (např. depoziční komorou), částice plynu difundují dovnitř proudu par a jsou vedeny směrem ke kondenzoru, na kterém kondenzují a padají zpátky do zásobníku. Difuzní vývěva nemůže pracovat od atmosférického tlaku, a proto bývá obvykle dána do série s olejovou rotační vývěvou. Dosažitelné vakuum je omezeno tlakem nasycených par čerpací kapaliny [23,24,25].



Obr. 11. Schéma konstrukce difuzní vývěvy: 1 – vstup (vysoké vakuum); 2- výstup (vstupní vakuum); 3 – ohříváč; 4 – zásobník oleje; 5 – zásobník par; 6 – chladič; 7 – kondenzátor

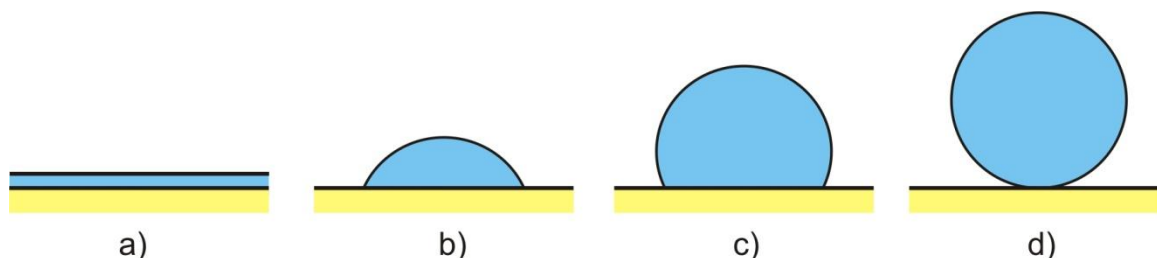
#### 4. Aplikace plazmatu

Plazma našla své uplatnění v mnoha oblastech života a lidské výroby. Hlavní použití plazmatu je v oblasti chemie a metalurgie: v pecích pro tavení hliníku, žáruvzdorných kovů, anebo jejich čištění, pro kalení a nitridování součástek (proces plazmové/iontové nitridace vytlačuje původní techniky právě kvůli šetrnějšímu přístupu k životnímu prostředí) [26]. Dalším možným použitím je při nanášení tenkých vrstev, které snižují tření, zajišťují delší životnost ložiskům a zlepšují jejich technické parametry. Průmysl není jediná oblast použití plazmy. Metody tepelných plazmových nástřiků našly své uplatnění také v medicíně. Biokompatibilita implantátů je zajišťována povlakováním kovového implantátu pomocí keramických nebo uhlíkových (DLC) vrstev [27]. Operační přístroje vybavené miniaturním plazmovým zdrojem jsou dalším hojně využívanou modernizací klasického lékařství, pozvolna se rozšiřuje jeho použití při odstranění nádorů, dále ve stomatologii například pro odstranění tzv. biofilmu, který zabraňuje pronikání bakterií ze zubních kanálků. Paradoxně je plazma používána pro sterilizování zařízení, která jsou lehce ovlivnitelná teplem - mění své vlastnosti, nebo se

stávají nestabilními. Enzymatické biosenzory implantované pod kůži jsou velmi citlivé na konvenční sterilizační techniky (převážně používající vodní páru), ale díky plazmové technologii je můžeme účinně a bezpečně sterilizovat těsně před implantací. Plazma se svou užitečností osvědčila při vytváření nástrojů s omezenou povrchovou energií v oblasti medicíny a technologie výroby. Pro farmaceutický průmysl to znamená snížení výrobních nákladů v důsledku prodloužení doby použitelnosti nástrojů díky „neovlivnění“ během "lepení" chemikálie na jejich povrch. V potravinářském průmyslu (obaly) díky plazmové modifikaci získáváme lepší povrchové vlastnosti, jako je například trvalý lesk, živé barvy, výjimečnou tvrdost nebo nepropustnost pro plyny [28]. Povlakováním PET lahví uhlíkovou vrstvou vzniklou za pomoci plazmy se třicetkrát snižuje propustnost  $O_2$ , propustnost  $CO_2$  až sedmkrát [29]. Technologie výroby tenkých povlaků pomocí plazmy (například s použitím metody PECVD a PVD) jsou založené na depozici z chemické nebo fyzické fáze. Tyto procesy jsou vždycky podporované plazmou, s jejíž pomocí vzniká na substrátu tenká vrstva s odlišnými vlastnostmi, které jsou závislé na zvolené technologii výroby a parametrech procesu. Podrobné informace na téma technik plazmového povlakování jsou popsány v kapitole 4.2. Široké spektrum vlastností plazmových povlaků našlo uplatnění prakticky ve všech možných odvětvích průmyslu od automobilového přes potravinářský až po biomedicínské použití. Plazma našla také uplatnění při ekologické likvidaci odpadů [30].

#### 4.1. Plazmové modifikace povrchu

Pro dosažení bezpečné, stabilní, dlouhodobé přilnavosti barev, laků, lepidel a dalších povrchových úprav se často používá modifikace povrchu pomocí plazmy. Klasickými metodami pro zpracovávání povrchu jsou následující způsoby: ionizační plamen, vysokotlaké chemické čištění, použití aktivátoru (primeru), mechanické čištění, plazma, a další. Plazmová aktivace povrchu může být provedena za použití techniky plazmatu nízkotlakého anebo atmosférického. Výsledkem této techniky je změna smáčivosti povrchu, jedná se vlastně o fyzikální vyjádření „ulpívání“ neboli „způsob rozlévání kapaliny po povrchu“. Tuto vlastnost je možné měnit v závislosti na požadovaném použití. Na obrázku 12 jsou znázorněny různé stupně smáčivosti povrchu.



Obr.12. Různé stupně smáčení povrchu kapkou vody: a) super hydrofilní, b) hydrofilní, c) hydrofobní, d) super hydrofobní

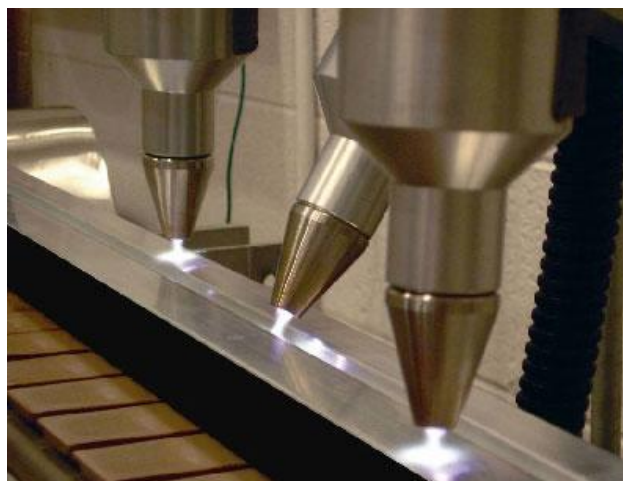
V případě nízkotlakého plazmatu dochází k ovlivňování povrchu různých součástí ve vakuové komoře, která je naplněna plynem (obvykle je to kyslík) s velmi nízkým tlakem. Plazma může být generováno pomocí mikrovln anebo radiových vln. Tím se vytvoří plazma se

sestavující z iontů s vysokou energií, elektronů a jiných reaktivních částic. Teplota nízkotlaké plazmy je o něco vyšší než pokojová, takže modifikované povrchy nemohou být tepelně poškozené. Během několika minut následuje leptání a aktivace povrchu v několika nejvyšších atomárních vrstvách, dochází k očištění povrchu od veškerých slabě chemicky vázaných nečistot. Nevýhodou tohoto způsobu modifikace je to, že se jedná o tzv. vsázkový proces, to znamená, že není možné zakomponovat ho do výrobní linky. Výhodou procesu je to, že celý povrch je opracován, dokonce i když jsou některé části povrchu odkloněny od zdroje plazmatu (v dírách nebo dutinách). Nicméně, opracování tenkých folií pomocí této technologie je obtížné vzhledem k nemožnosti posouvání folie ve vakuu [31]. Plazma efektivně působí na změnu v povrchové struktuře objektů umístěných v komoře pomocí:

- ✓ bombardování povrchu pomocí iontů
- ✓ působení použitého plynu na povrch
- ✓ poškození uhlovodíkových řetězců vznikajícím UV zářením

Tento proces může být řízený změnou hodnoty vakua, přivedenou elektrickou energií, časem expozice, průtokem a složením použitého plynu.

Opracování (ovlivnění) povrchu atmosférickým plazmatem je jednou z neúčinnějších technik čištění, aktivace a zušlechťování plastů, kovů (např. hliník), skla, kompozitních materiálů i recyklovatelných. Na rozdíl od nízkotlakého plazmatu není potřeba používat speciální vakuovou komoru. Proces aktivace se může provádět v pravidelných intervalech v průběhu kontinuální výroby. Technika atmosférického plazmatu spočívá v buzení atomů plynu (který má atmosférický tlak) pomocí vysokého napětí, až do zapálení plazmatu [32]. Plazma je vytlačovaná z trysky pomocí stlačeného vzduchu. Na obrázku 13 je uvedena atmosférická plazmová tryska během modifikace kovového povrchu.



Obr. 13. Ukázka plazmové modifikace povrchu pomocí atmosférického plazmatu [33]

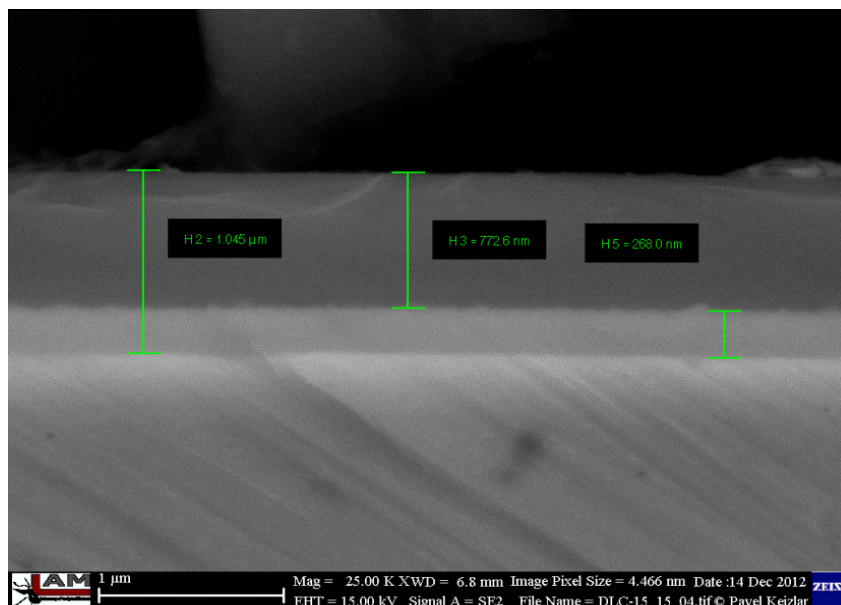
Reaktivní částice plazmatu způsobují aktivaci (rozbití povrchových vazeb) a čištění povrchů, na který je plazmový paprsek nasměrován. Výsledek dopadu plazmatu lze měnit za pomoci změny rychlosti posuvu a vzdálenost mezi tryskou a obráběným povrchem [34,35]. Hlavními výhodami atmosférického plazmatu jsou:



- ✓ kontinuální snadno automatizovatelný proces,
- ✓ aktivuje většinu polymerů, čistí je od mastnoty, prachu a vrstvy vody,
- ✓ vyznačuje se vysokou opakovatelností a spolehlivostí procesu,
- ✓ je levná v použití,
- ✓ nezanechává stopy zpracování,
- ✓ nepoškozuje modifikované substráty,
- ✓ neemituje škodlivé látky ani záření,
- ✓ nepoškozuje ani tenké folie.

#### 4.2. Technologie povlakování

V dnešní době jsou velmi často vytvářeny nanopovlaky a nanovrstvy na plastech, kovech a dalších slitinách pomocí plazmy. Podmínkou pro výrobu je vhodná volba parametrů procesů a druhu technologie bez poškození substrátů. Hlavním rozdílem mezi povlakem a vrstvou je to, že vrstva má difuzní charakter, zatímco povlak drží na substrátu adhezní silou. Tloušťky klasických plazmatických povlaků se pohybují v rozmezí od několika stovek nanometrů až do jednotek mikrometrů. Tenkovrstvá technika umožňuje modifikovat povrchy různých materiálů, což zvyšuje jejich mechanickou, chemickou odolnost, ale zároveň může zvyšovat estetický vzhled výrobků. Tato technika umožňuje získávat povlaky pro celou řadu aplikací od například elektroniky, přes biomedicínu až po stavební materiály. Na obrázku 14 je příklad povlaku DLC (diamond like carbon) s titanovou mezivrstvou. Tloušťka povlaku je 1  $\mu\text{m}$ , mezivrstva titanu má pouhých 200 nm [36].



Obr. 14. Obrázek z řádkovacího rastrovacího mikroskopu (SEM) povlaku DLC

Existují dvě různé metody získávání tenkých vrstev: fyzikální depozice z plynné fáze (PVD) a chemická depozice z plynné fáze (CVD). Metoda PVD umožňuje výrobu vrstev nanometrické tloušťky. Proces tvorby povlaků se skládá ze tří kroků:

- ✓ získání „páry“ požadovaného materiálu,
- ✓ transport par materiálu k substrátu,
- ✓ růst povlaku z adsorbovaných částic.

Jednou ze základních podmínek průběhu procesu je, aby teplota substrátu byla nižší než teplota zdroje páry, aby mohlo docházet k samovolnému odpařování. Existuje mnoho druhů PVD technik, které se odlišují od sebe způsobem a umístěním zdroje ionizace par aplikovaného materiálu a také způsobem krystalizace par. Depozice (narůstání vrstvy) probíhá v prostředí vakua, kde se tlak pohybuje od 100 do  $10^{-8}$  Pa a závisí na zvolené technologii. Mezi ně patří:

- ✓ iontové naprašování, také známé jako katodové (sputtering),
- ✓ magnetronové iontové naprašování (magnetron sputtering).

PVD povlaky našly uplatnění v různých odvětvích průmyslu. Zvyšují odolnost proti opotřebení nástrojů (44), v případě řezných nástrojů usnadňují odvedení třísky, zvyšují ochranu proti oxidaci povrchu nástroje, snižují rychlost difuze kov-kov, tepelně izolují, snižují tření. Aplikací PVD povlaků na řezné nástroje lze výrazně zvýšit jejich životnost, můžeme tak snížit náklady na výměnu a nákup nových nástrojů. S PVD povlaky je možné také výrazně zvýšit řeznou rychlost, omezit chlazení a pracovat s těžko obrobitelnými materiály.

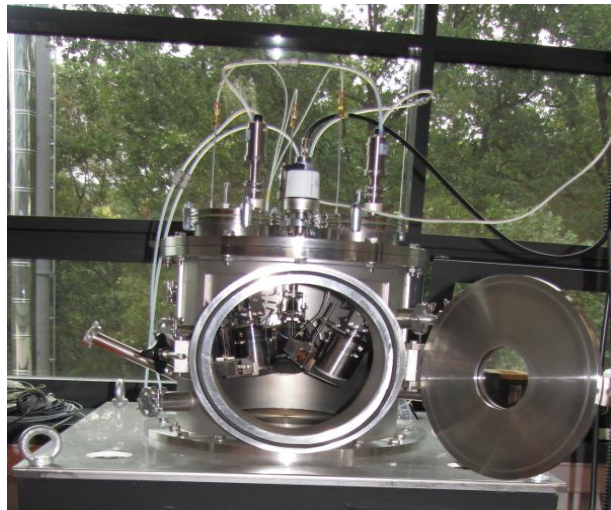
CVD je další technikou pro výrobu nanokrystalických vrstev. V průběhu chemických reakcí, na povrchu substrátu i v jeho blízkosti, se z plynných komponent vytvářejí pevné produkty (povlaky), a také těkavé vedlejší produkty. Konvenční (tzv. nepodporované) CVD procesy, s odporovým anebo indukčním ohřevem chemického reaktoru, lze provádět při atmosférickém nebo sníženém tlaku. Tyto procesy jsou charakteristické relativně vysokou teplotou 900 – 1100°C, která způsobuje disociaci molekul plynu. Hlavním faktorem, který iniciuje reakce složek atmosféry je právě tepelná energie. Tradiční CVD procesy jsou prováděny v uzavřených, odporově vytápěných komorách při atmosférickém nebo sníženém tlaku, kde reaktivní atmosférou může být čpavek jako nosič dusíku, metan jako nosič uhlíku. Přítomnost plynného vodíku podporuje redukční chemické reakce. Argon a dusík se používají jako inertní plyny – nevstupuje do chemických reakcí.

Proces CVD se skládá z následujících kroků:

- ✓ transport komponentů (nucená konvekce) do komory,
- ✓ transport komponentů (difúze) z plynného proudu na substrát,
- ✓ adsorpce reaktantů na substrátu,
- ✓ povrchové procesy (dekompozice komponentů anebo migrace vázání se substrátem),
- ✓ desorpce z vedlejších produktů,
- ✓ transport produktů (difúze) do proudu plynu ze substrátu,
- ✓ transport produktů (nucená konvekce) z komory.

Hlavní nevýhodou CVD procesu je vysoká depoziční teplota, což omezuje použití této technologie pro modifikace tepelně citlivých (teplotně nestabilních) substrátů. Přidání plazmy do CVD procesu (PA CVD – Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) umožňuje

snížení teploty substrátů na 450 – 560 °C. V této technice se využívá doutnavý výboj pro vznik plazmatu. Plazma působí na částice v komoře (ionizační procesy) a díky tomu nepotřebujeme tolik tepelné energie, aby došlo k disociaci molekul. Existují také metody tvorby tenkých vrstev, které spojují technologie PVD a PA CVD [37,38]. Příkladem může být technika RF PA CVD/MS (Radio Frequency Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition/Magnetron Sputtering). Plazma je buzena pomocí vysokofrekvenčního výboje (RF radiofrekvenčního výboje). Standardní frekvence jakou používá je 13,56 MHz nebo dvojnásobné. Vrstvy jsou deponované v přítomnosti plazmatu z plynné fáze. Chemické složení vrstev povlaků je možné široce kombinovat. Povlakovací komora využívající tuto technologii je znázorněná na obr. 15.



Obr. 15. Schéma zařízení RF PA CVD/MS

Pomocí CVD povlaků se obvykle získávají tvrdé a proti otěru a korozi odolné povlaky z karbidů, nitridů, karbonitridů a oxidů kovů, a to na ocelových substrátech, keramice a kovech s vysokou teplotou tání. Tyto povlaky jsou široce používány v povlakování rezných nástrojů a tvářecích nástrojů pro zpracování za studena i tepla. Tyto povlaky vícenásobně zvyšují jejich životnost [39].

### 4.3. Další možná použití

#### ✓ osvětlovací systémy na bázi plazmatů

Plazmové zdroje světla používají elektrické výboje v plynu pro konverzi elektrické energie na světelné záření. Mají obvykle tvar cylindrické anebo kulaté baňky, ve které se pod různými tlaky nachází plyn (obvykle inertní plyn), někdy s přísadou kovových par. Výboj následuje mezi elektrodami vtavenými (umístěnými) do stěny baňky. Někdy (v plazmových světelných zdrojích s uhlíkovým obloukem) elektrody pracují i za atmosférického tlaku.



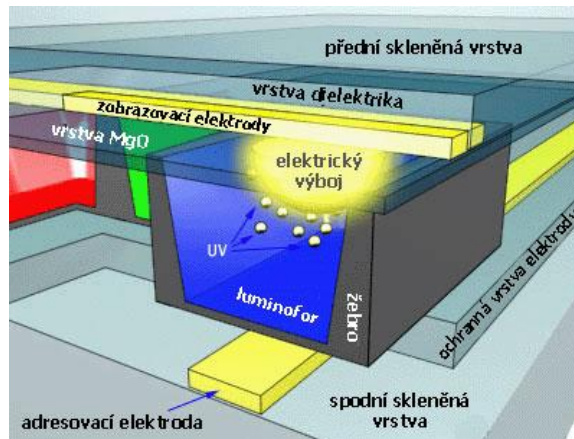
Obr. 16. Plazmová výbojka [40]

#### ✓ plazma v chemii

Plazma našla uplatnění v analytické chemii, jako například plazmové zdroje buzení u emisní spektroskopie – plazma indukčně vázaná, mikrovlnná plazma a také plazmochemie. Plazmochemie popisuje nekonvenční chemické syntézy, které mohou probíhat v široké škále teplot a tlaků. Reakce ionizovaných látek probíhají jiným odlišným než u klasických chemických metod způsobem. Díky tomu je možné získat zajímavé sloučeniny a využívá se jí k produkci krystalů (umělý růst).

#### ✓ zobrazovací systémy

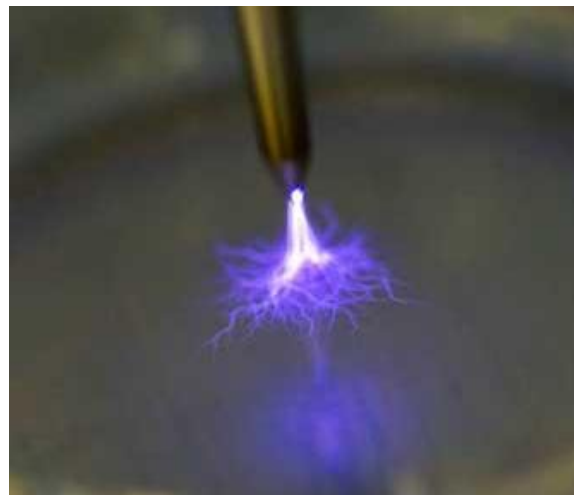
Princip fungování plazmového displeje spočívá v uvedení směsi plynů (především neon a xenon) uzavřeném v malé komoře do stavu plazmatu. Ionizovaný plyn začíná vyzařovat fotony ultrafialového světla, které dopadá na luminofor a stimuluje ho k emitaci viditelného světla.



Obr. 17. Plazmový displej [41]

✓ medicína a potravinářský průmysl

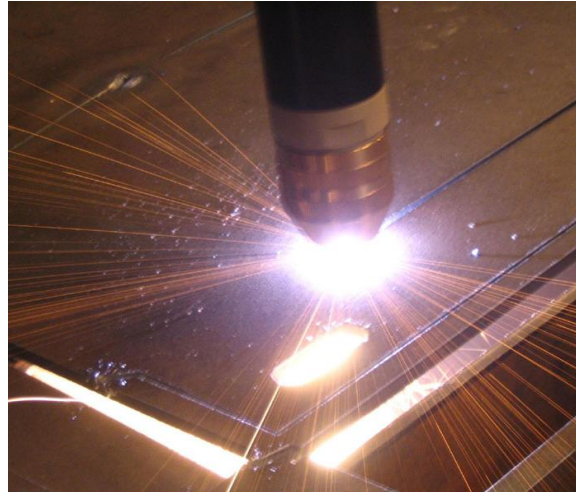
Plazma v medicíně se hlavně používá pro sterilizaci medického vybavení, a také při výrobě povlaků na medicínské implantáty. Ošetření potravinářských obalů vede k prodloužení trvanlivosti potravin i snížení množení bakterií. V posledních letech se vyvinula technologie plazmatu o aplikační teplotě menší než 40°C – studená atmosférická plazma (CAP), která umožnila rozšíření aplikací plazmatu v oblasti živých tkání.



Obr. 18. Sterilizace plazmou [42]

✓ řezání

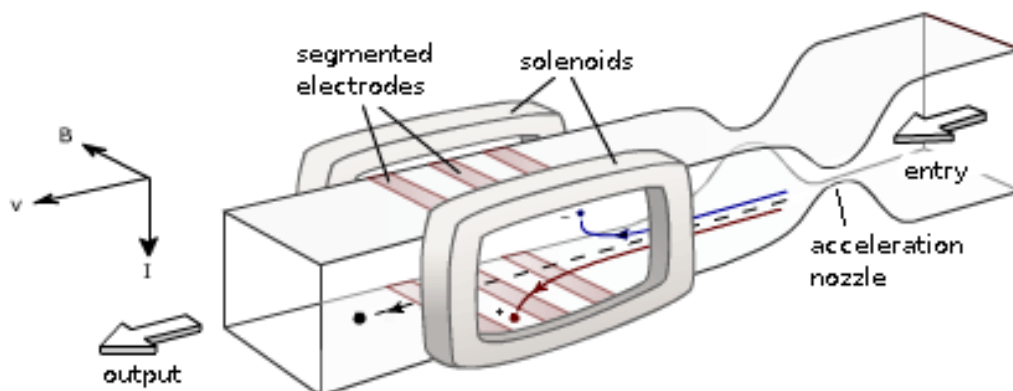
Plazmové řezání je druhem obloukového řezání a je charakteristické tvorbou vysoce koncentrovaného plazmového oblouku, zářící mezi elektrodou a materiálem, který se taví. Plazmový oblouk je tvořen silně ionizovaným plynem, který se pohybuje vysokou rychlostí.



Obr. 19. Plazmové řezání [43]

✓ generování elektrické energie

Generátory magnetohydrodynamické (MHD) jsou to zařízení pro transformování tepelné energie plynu na energii elektrickou. Princip fungování je založen na jevu vzniku elektrického proudu ve vodiči (kapalném nebo plynném), pohybujícím se v magnetickém poli [44].



Obr. 20. Schéma generátoru [45]

## 5. Použitá literatura

- [1] [on line 13.3.2015] <http://iluminaci.com/>
- [2] R. d'Agostino, P. Favia, C. Oehr, M. R. Wertheimer: Low Temperature Plasma Processing of Materials: Past, Present and Future, Plasma Processes and Polymers 2005, 2, 7–15.
- [3] L. Jones, P. Atkins: Chemia ogólna. Częsteczki, materia, reakcje, Wydawnictwo Naukowe PWN, ISBN 8301138106.
- [4] Martišovits Viktor: Základy fyziky plazmy: Učebný text pre magisterské štúdium. Bratislava 2006, Univerzita Komenského
- [5] L.A. Arcimowicz: Czwarty stan materii, Wiedza Powszechna, Warszawa 1972.
- [6] Orajewski W.N. Plazma na Ziemi i w kosmosie. Warszawa, PWN 1989.
- [7] B. R. Adhikari, R. Khanal: Introduction to the Plasma State of Matter, The Himalayan Physics, Vol.4, No.4, July 2013.
- [8] J. Harry: Introduction to Plasma Technology, Science, Engineering and Applications, 2010 WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, ISBN: 978-3-527-32763-8.
- [9] F.S. Denes, S. Manolache: Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science, Progress in Polymer Science, 29 (2004) 815–885.
- [10] Fizika ionosfery / B. Je. Brjunelli, A. A. Namgaladze. – 1. izd. – Moskva : Nauka, 1988
- [11] J. Hu, H.L. Tsai: Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 833–846.
- [12] Celinski Z.: Plazma, Warszawa 1980.
- [13] Freidberg, Jeffrey P.: Plasma physics and fusion energy, Cambridge University Press, 2007.
- [14] Goldston R., Rutherford P.: Introduction to plasma physics, 1995.
- [15] D.W. Flaherty, M.A. Kasper, J.E. Baio, D.B. Graves, H.F. Winters, C. Winstead, V. McKoy: Electron impact dissociation cross sections for C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, Journal of Physics D: Applied Physics, 39 (2006) 4393–4399.
- [16] Kracík J., Šesták B., Aubrecht L.: Základy klasické a kvantové fyziky plazmatu, Praha Academia, 1974.
- [17] R. Afshari, H. Hosseini: Non-thermal plasma as a new food preservation method, Its present and future prospect, Journal of Paramedical Sciences, Winter 2014 Vol.5, No.1 ISSN 2008-4978
- [18] P. Kobel, T. Mączka: Zastosowanie plazmy niskotemperaturowej w technice spalania, Archiwum Spalania, 2009, vol. 9, nr 3/4, s. 161-180.
- [19] J. Szatatkiewicz: Zastosowanie plazmy w technice– aktualne tendencje, Pomiar Automatyka Robotyka 2/2010.
- [20] B.T. Chiad, T. L. Al-zubaydi, M.K. Khalaf, A.I. Khudiar: Characterization of low pressure plasma- dc glow discharges(Ar, SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>/He) for Si etching, Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 48, October 2010, pp. 723-730.K.
- [21] Miernik: Działanie i budowa magnetronowych urządzeń rozpylających, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1997.

- [22] W. Kaczorowski: Warstwy węglowe wytwarzane w plazmie dwuczęstotliwościowej, Praca Doktorska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Łódzka 2005.
- [23] Helmut Bannwarth: Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems, Conventional and Hermetical design ISBN-13 978-3-527-32914-87.
- [24] Michalski A.: Fizykochemiczne podstawy otrzymywania powłok z fazy gazowej, Warszawa 2000, ISBN 83-7207-171-3.
- [25] Sprężarki i pompy próżniowe - Wymagania bezpieczeństwa - Część 2: Pompy próżniowe PN-EN 1012-2+A1, ISBN 8326684643, 2011.
- [26] V. Dembovský, Plasma metalurgy the principles, Elsevier, Amsterdam 1985.
- [27] Robert B. Heimann: Plasma-Spray Coating Principles and Applications ISBN 3-527-29430-9.
- [28] Szałatkiewicz J.: Zastosowania plazmy w technice – aktualne tendencje, PAR 2/2010, Warszawa.
- [29] A. Wiktor, M. Śledź, M. Nowacka, D. Witrowa-Rajchert: Możliwości zastosowania niskotemperaturowej plazmy w technologii żywności, ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość, 2013, 5 (90), 5 – 14.
- [30] K. Waćlawiak: Research area for reactors with electric spark discharge, producing low-temperature plasma for cleaning of gas, Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, ISSN 1733-4381, vol. 16, issue 1 (2014), p. 69-76.
- [31] Repetitively pulsed vacuum arc ion and plasma sources and new methods of ion and ion-plasma treatment of materials. Surface and Coatings Technology, Volume 96, Issue 1, 3 November 1997, Pages 9-15.
- [32] A. Kordus Plazma własności i zastosowanie w technice WNT, Warszawa 1985.
- [33] [on line 13.3.2015] <http://aktywaciapowierzchni.pl/wp-content/uploads/akt-plazmowa.jpg>
- [34] Jin-Jun Wang, Kwing-So Choi, Li-Hao Feng, Timothy N. Jukes, Richard D. Whalley Recent developments in DBD plasma flow control, Progress in Aerospace Sciences, Volume 62, October 2013, Pages 52-78.
- [35] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince Atmospheric pressure plasmas: A review Review Article, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 61, Issue 1, January 2006, Pages 2-30.
- [36] D. Batory, M. Cłapa, S. Mitura: Warstwy gradientowe Ti:C wytwarzane w plazmie RF PACVD z udziałem rozpylania magnetronowego, Inżynieria Materiałowa, Vol. 27, nr 5, 868—870, ISSN 0208-6247
- [37] N. Huang, G.J. Wan, Y. Leng, Y.X. Leng, H. Suna, P. Yang, J.Y. Chen, J. Wang, P.K. Chu: Deformation behavior of titanium nitride film prepared by plasma immersion ion implantation and deposition, Surface and Coatings Technology 156 (2002) 170–175.
- [38] H. Hedaiatmofidi, A.S.R. Aghdam, S. Ahangarani, M. Bozorg, M. Azadi, M. Valiei: Deposition of titanium layer on steel substrate using PECVD method: a parametric study, Materials Sciences and Applications, 2014, 5, 140-148.



- [39] L.A. Dobrzański, M. Staszuk: PVD and CVD gradient coatings on sintered carbides and sialon tool ceramics, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 43/2 (2010) 552-576.
- [40] [on line 13.3.2015] <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/aplikace/zarivka.jpg>
- [41] [on line 13.3.2015] <http://home.zcu.cz/~paitlova/schema.jpg>
- [42] [on line 13.3.2015] <http://akademon.cz/source/obr/plasma.jpg>
- [43] [on line 13.3.2015] [http://www.technologiaaserowa.cba.pl/U\\_Ciecie\\_Plazmowe.html](http://www.technologiaaserowa.cba.pl/U_Ciecie_Plazmowe.html)
- [44] Olszowiec P.: Nowe zastosowania technologii plazmowych w energetyce. Rozpala kotły utylizuje odpady. Gigawat Energia, nr 10, 2007.
- [45] [on line 13.3.2015] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/72/MHDgenerator%28En%29.png>

## **Plazma a možnosti jeho využití**

Mateusz Fijalkowski

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.