



Fakulta elektrotechniky  
a informatiky

# FLEXIBILNÁ ELEKTRONIKA

Technológie nanášania vrstiev na flexibilné substráty

časť I. – kontaktné metódy

ING. PETER LUKÁCS, PHD.

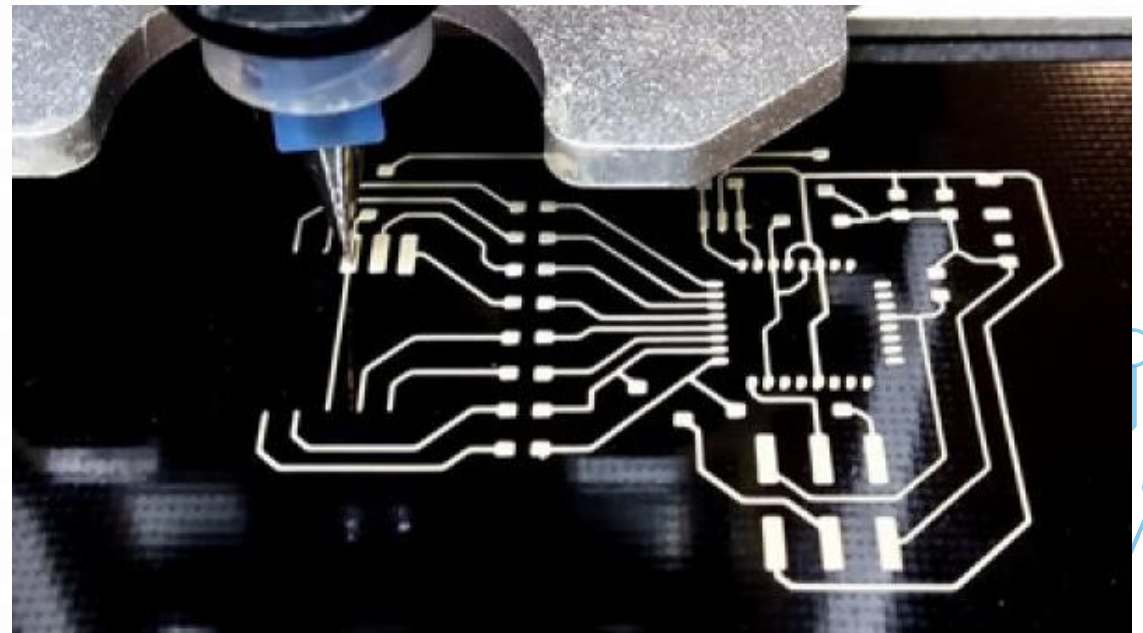
[peter.lukacs@tuke.sk](mailto:peter.lukacs@tuke.sk)

# ROZDELENIE TECHNOLOGIÍ

V posledných rokoch sa oblasť technológií výroby elektronických obvodov zameriava na aplikáciu bežne používaných technológií tlače do oblasti nanášania vodivých, polovodičových, dielektrických, ale aj funkčných vrstiev na flexibilné substráty. Tieto technológie zaznamenávajú dynamický progres najmä v súvislosti s nástupom nano-technológií. Metódy nanášania vrstiev na substráty sa vo všeobecnosti delia na:

- **kontaktné,**
- **bezkontaktné metódy tlače.**

Iné rozdelenie metód spočíva v **použití šablóny na tlač, príp. bezšablónové, tzv. digitálne metódy tlače.**

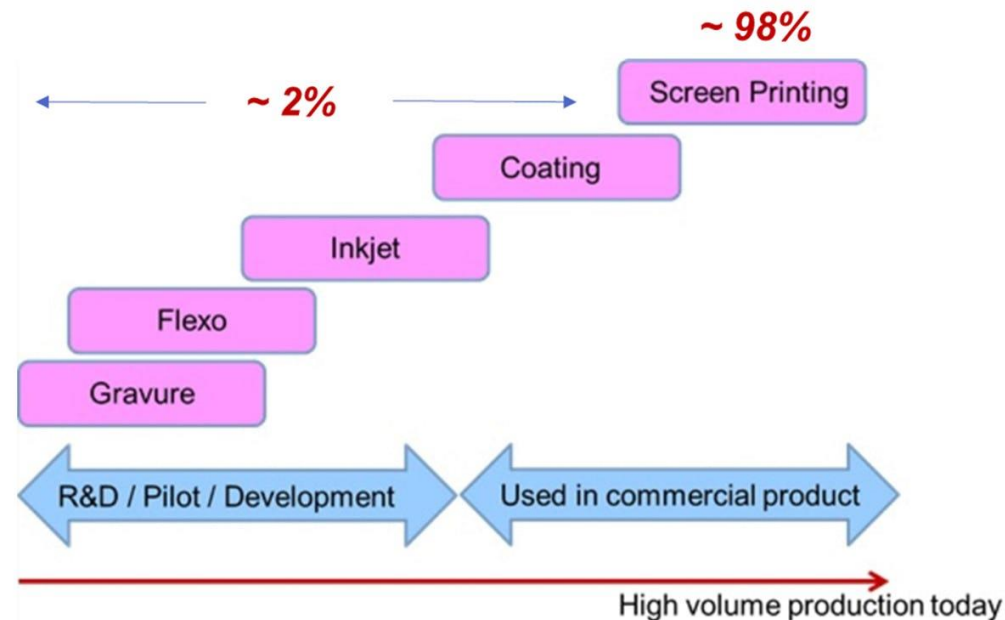


3D tlač strieborných vrstiev

# ROZDELENIE TECHNOLOGÍÍ

## Metóda Sheets by Batch (metóda dávkového spracovania):

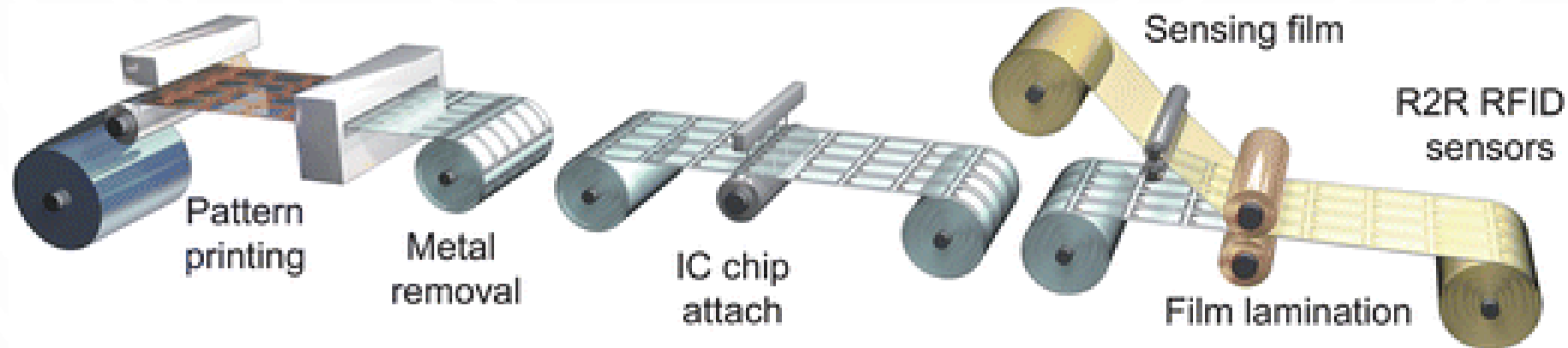
Substráty sú vopred „narezané“ na tenké, flexibilné fólie ako náhrada za pevné a neohybné substráty a postupnými krokmi sa na fólie nanášajú funkčné vrstvy (vodivé, dielektrické, izolačné, polovodičové a iné) aditívnymi technológiami.



# ROZDELENIE TECHNOLOGÍÍ

## Metóda Roll-to-Roll (metóda navíjania substrátu na rolku/z rolky):

Metóda Roll-to-Roll spočíva v rolovaní flexibilného substrátu z jedného valca, nanášaní vrstiev na substrát a následného navíjania substrátu na druhý valec.



Metóda Roll-to-roll

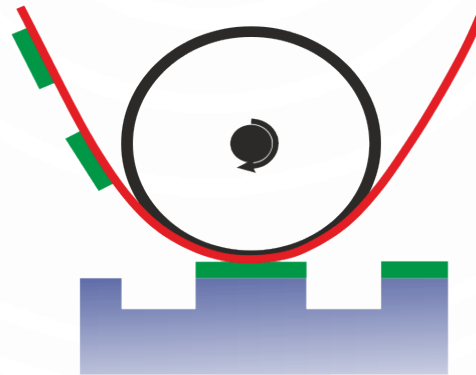
<https://www.youtube.com/watch?v=zeVKiaif9po>

# ROZDELENIE TECHNOLOGÍÍ

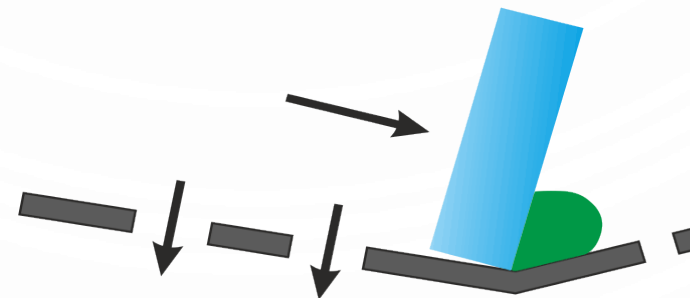
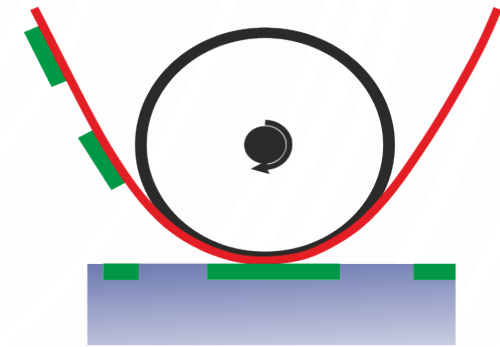
Najčastejšie používané technológie nanášania vrstiev na flexibilné substráty:

- flexografia,
- hĺbkotlač,
- sieťotlač,
- inkjet printing,
- 3D tlač,
- aerosol jet printing,
- naprašovanie,
- naparovanie.

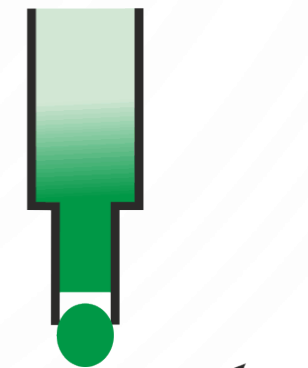
flexografia



hĺbkotlač



sieťotlač



inkjet printing

Najčastejšie používané technológie tlače na flexibilné substráty

# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## **Technológia vákuovej metalizácie:**

Vákuová metalizácia je proces pot'ahovania substrátu veľmi tenkou kovovou vrstvou pri vysokom vákuu.

## **Proces metalizácie:**

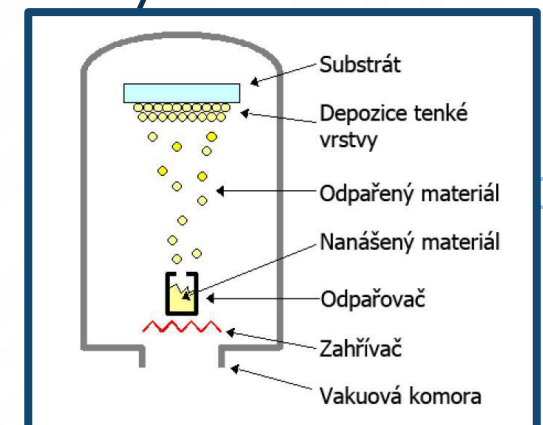
Pri technológií naparovania je nutné kov či inú nanášajú látku premeniť na plynnú štruktúru (skupenstvo) a následne ho naniesť na substrát. Pri tomto procese je nevyhnutné dosiahnuť vákuum (tlak) nižší než  $2 \times 10^{-3}$  Pa. Substrát sa umiestni do vákuovej komory.

# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 1. Metóda tepelného naparovania:

Najjednoduchší spôsob naparovania kovu, dielektrík či polovodičov pomocou odporových naparovačov, tzv. metóda „boat“ (naparovacia lodička). „Boat“ sú vyrábané z keramiky alebo materiálu s vysokým bodom tavenia (Wolfram, Molybden). Ako elektricky vodivý materiál sa používa  $TiB_2$  (boritan titaničitý) s BN (nitrid bóru).

Naparovaná látka je ohrievaná na teplotu  $1500^{\circ}C$ . Pokiaľ sa naparovaný materiál dostane do styku s „boat“, okamžite sa rozpustí a mení sa na paru. Pary sa následne ihneď kondenzujú na chladenom povrchu a vytvorí sa tenký film.

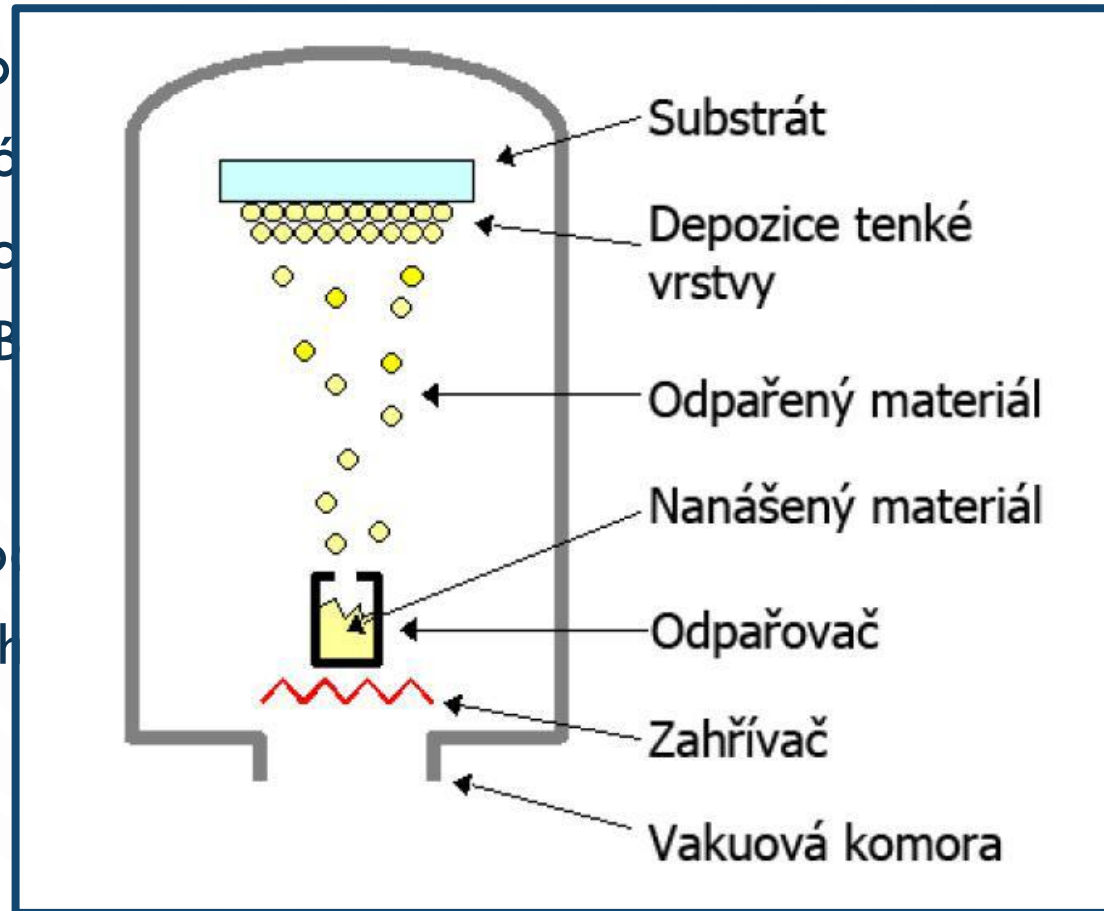


# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 1. Metóda tepelného naparovania:

Najjednoduchší spôsob naparovania je pomocou odporových naparovačov, tzv. metóda tepelného naparovania. Naparovacia látka alebo materiál s vysokou teplotou sa používa TiB.

Naparovaná látka je zahrievaná a dostane do styku s „brazou“, ktorá okamžite kondenzujú na chladnejšom substráte.



Metóda tepelného naparovania

vy pomocou odporových naparovačov, tzv. metóda tepelného naparovania. Naparovacia látka alebo materiál s vysokou teplotou sa používa TiB. Ako elektricky vodivý

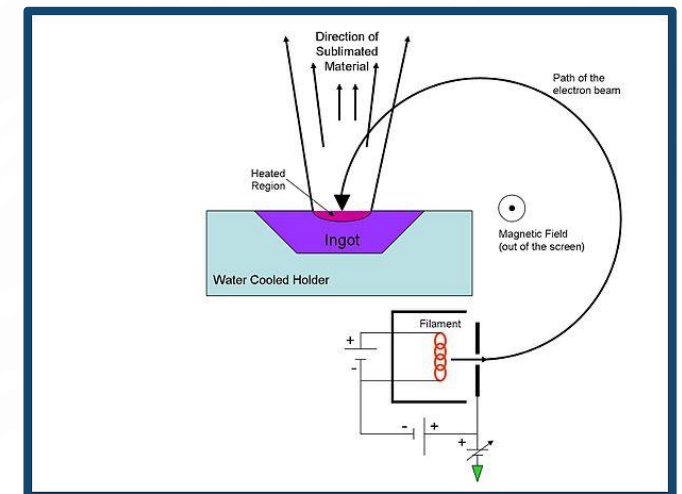
naparovovaný materiál sa používa na výrobu tenkých vrstiev. Pary sa následne



# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 2. Metóda naparovania pomocou elektrónového lúča:

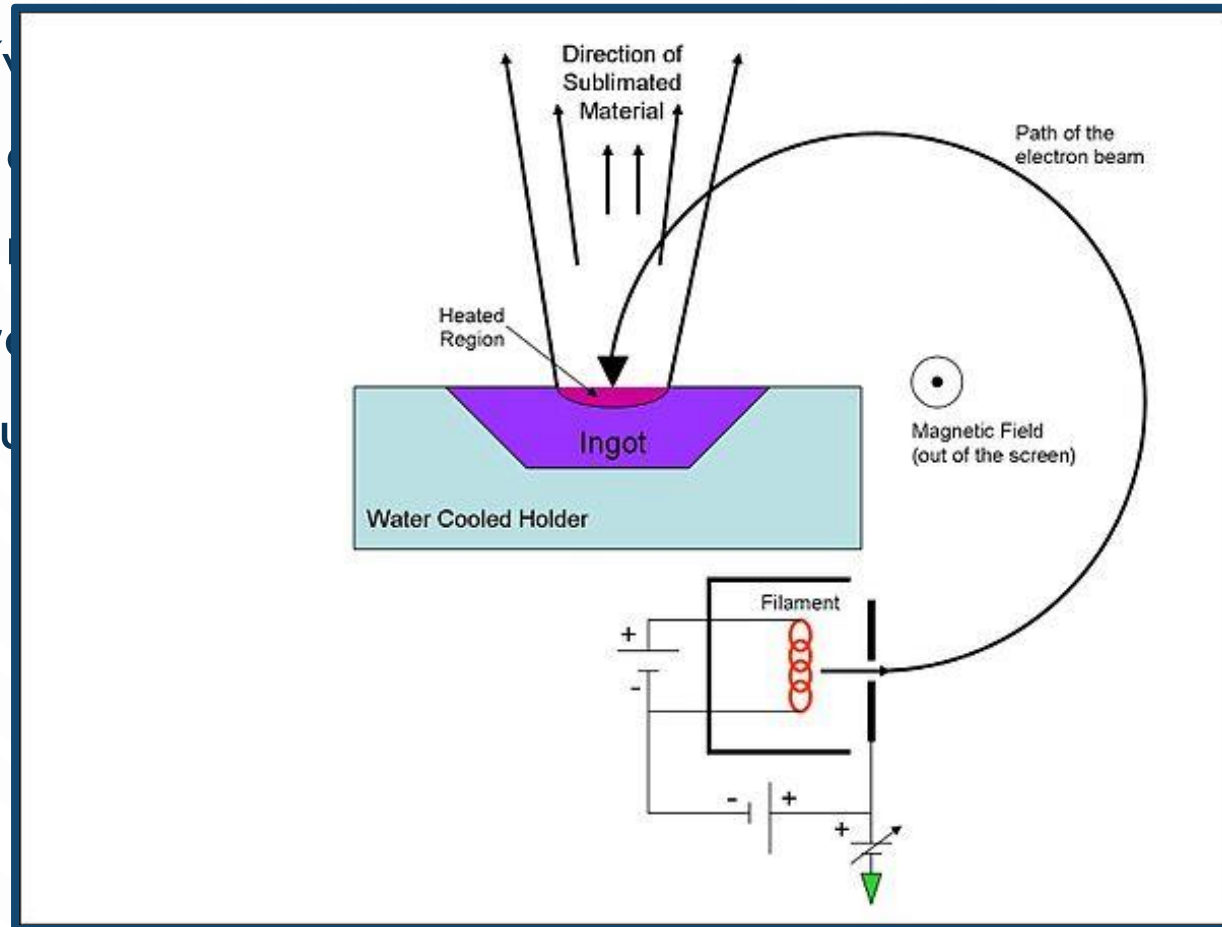
Táto metóda využíva zahrievanie naparovanej látky pomocou elektrónového lúča. Pri tejto technológii je elektrónový lúč zameraný na odparovanú látku, ktorá je zahrievaná a odparuje sa. Pri metóde naparovania pomocou elektrónového lúča sa využíva vyššia teplota, než pri predošlej metóde a dá sa tak nanášať aj materiál, ako napr. Ni, Co alebo B. Nevýhodou je vysoká cena prístroja.



# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 2. Metóda naparovania pomocou elektrónového lúča:

Táto metóda využíva elektrónový lúč, ktorý zahrieva materiál a odparuje sa. Pri tomto procese sa dosahuje vyššia teplota, než pri prečišťovaní alebo B. Nevýhodou



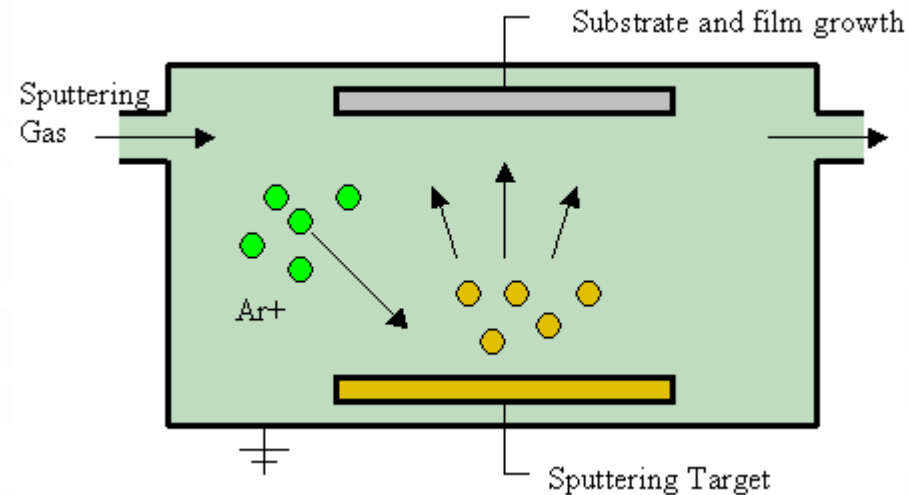
elektrónového lúča. Pri tomto procese sa dosahuje vyššia teplota, než pri prečišťovaní alebo B. Nevýhodou

Metóda naparovania pomocou elektrónového lúča

# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 3. Metóda katódového naprašovania:

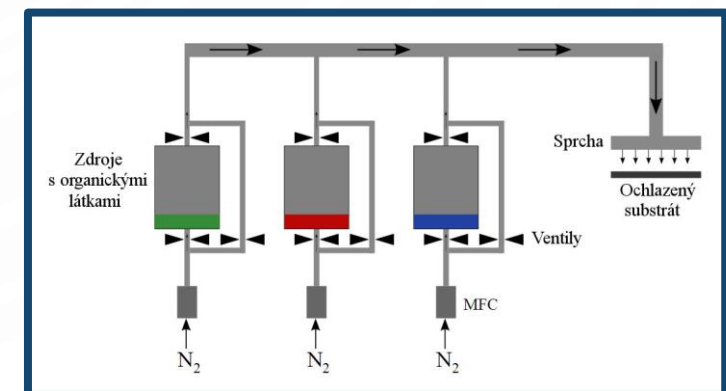
Ďalšou známou metódou je metóda katódového naprašovania. Pri tejto technológii je naprašovaná látka „bombardovaná“ iónovými časticami, ktoré sa následne uvoľňujú a v podobe veľmi malých častíc sa rozprašuje na substrát. Rýchlosť procesu sa dá jednoducho riadiť pomocou prúdu alebo napätia. Táto metóda je vhodná pre materiály, ktoré sú predošlými metódami ťažko zpracovateľné, ako napr. vrstva cínu dotovaného oxidom india ITO.



# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 4. Plynná epitaxia organických zlúčenín:

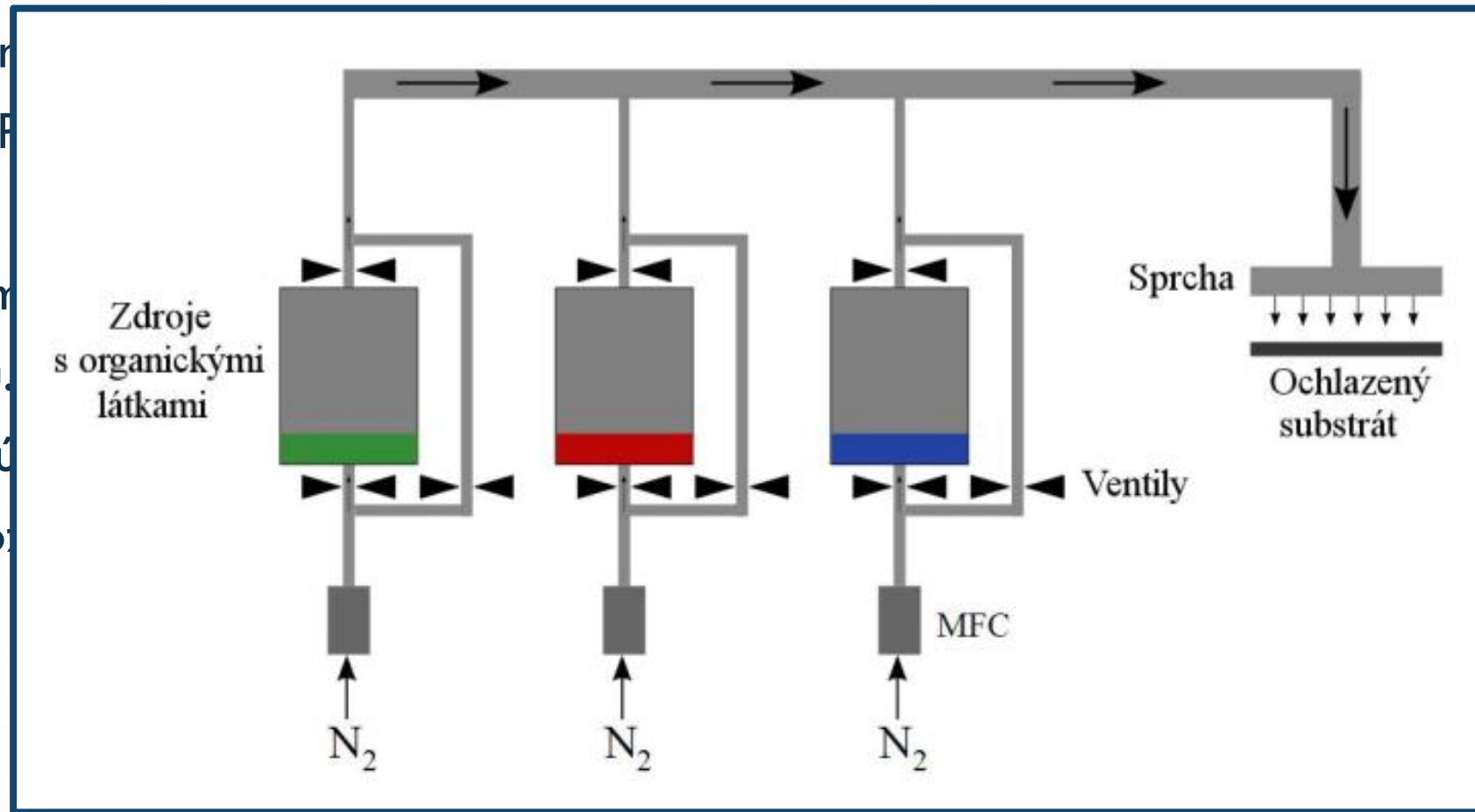
K odparovaniu organického materiálu dochádza v jednotlivých oddelených kremíkových potrubíach. Pri tejto technológii je v každom z týchto potrubí presné množstvo nosného plynu, napr. dusíka. Organické molekuly sú pomocou nosného plynu privádzané do vyhriatej komory, kde dochádza k zmiešaniu 2 a viac organických látok a k následnému odparovaniu. V poslednom kroku sa tieto organické látky v plynnom skupenstve rozptýlia a kondenzujú na chladenom substráte. Použitie nosného plynu pri tejto technológii je za účelom depozície materiálu pod tlakom  $0,13$  až  $10^3$  Pa.



# MATERIÁLY V PLYNNOM SKUPENSTVE

## 4. Plynná epitaxia organických zlúčenín:

K odparovaniu v  
potrubíach. Plyn  
plynu, napr.  
vyhriatej komory  
odparovaniu  
a kondenzujú  
účelom depo



emíkových  
o nosného  
dzané do  
áslednému  
rozptýlia  
lógii je za

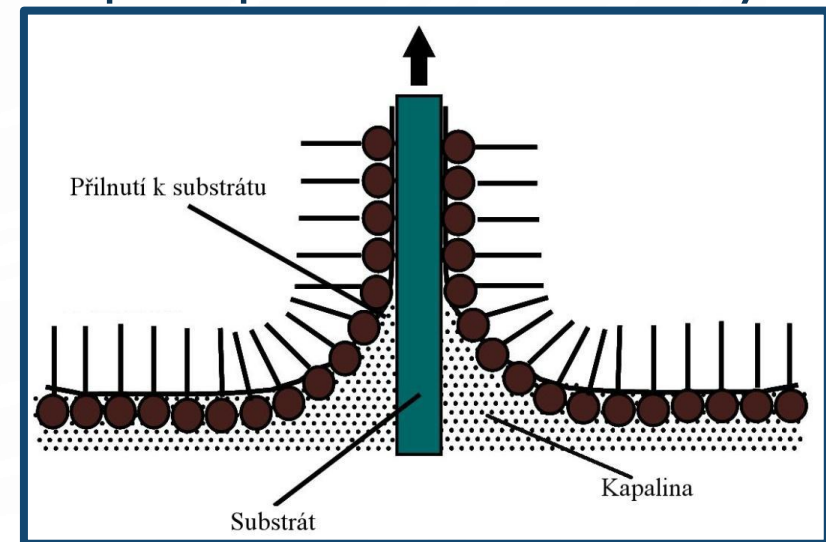
Plynná epitaxia organických zlúčenín

# MATERIÁLY V KVAPALNOM SKUPENSTVE

## Metóda Langmuir-Blodgett:

Táto technológia nám umožňuje vyrábať ultra tenké, usporiadané organické štruktúry. Pri tejto metóde sa jedna monomolekulová vrstva (hrúbka vrstvy o veľkosti jednej molekuly) rozprestrie na rozhraní vody a vzduchu a je ďalej prenášaná na substrát. Tento proces môže byť opakovaný a tým môžu byť nanášané ďalšie vrstvy na jeden substrát. Nanášanie tenkej vrstvy na substrát prebieha pomocou postupného vnárania a vynárania substrátu do/z kvapaliny cez Langmuirovu vrstvu.

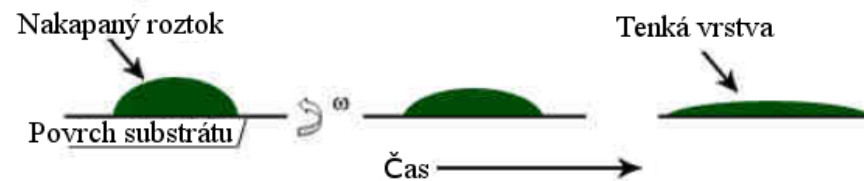
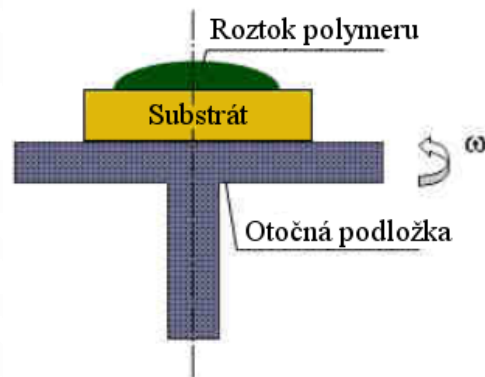
[https://www.youtube.com/watch?v=NQ6H3ys6-\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=NQ6H3ys6-_o)



# MATERIÁLY V KVAPALNOM SKUPENSTVE

## Rotačné nanášanie (spin coating):

Princíp tejto technológie spočíva v upevnení substrátu na rotačnú podložku a v následnom „nakvapnutí“ väčšieho množstva roztoku polyméru a roztočení rotačnej podložky. Pomocou odstredivej sily sa vrstva polyméru začne stenčovať a rozpínať do strán. Roztok je nestály a začne sa odparovať a stekať po okraji substrátu. Keď dôjde k naneseniu dostatočného množstva polyméru na substrát, proces sa zastaví. Rýchlosť otáčania podložky je okolo 3000 otáčok/min. Hrúbka vrstvy sa dá regulovať množstvom naneseného polyméru alebo uhlovou rýchlosťou otáčania rotačnej podložky.

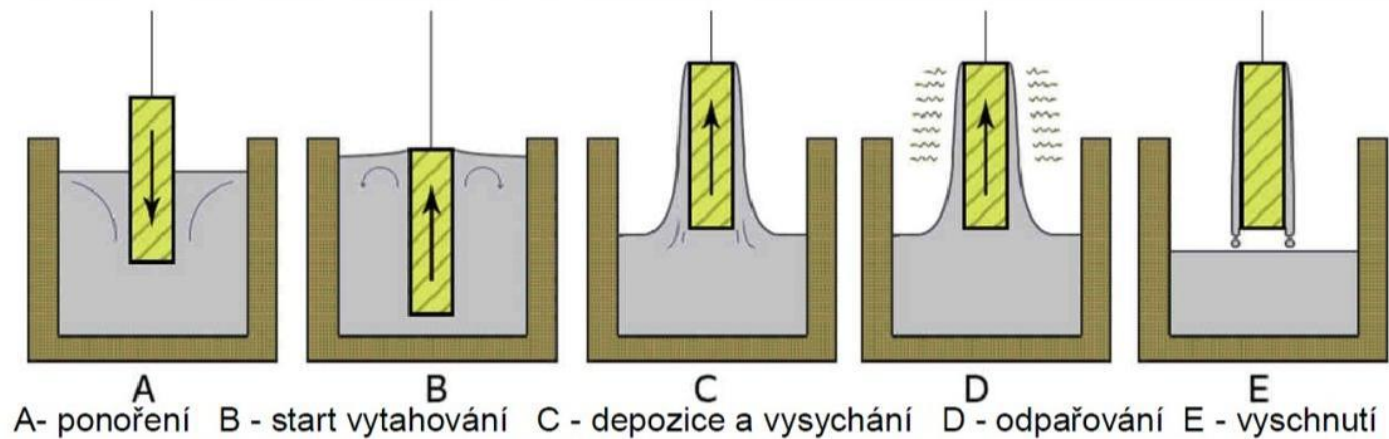


<https://www.youtube.com/watch?v=WAFE6pZBT9c>

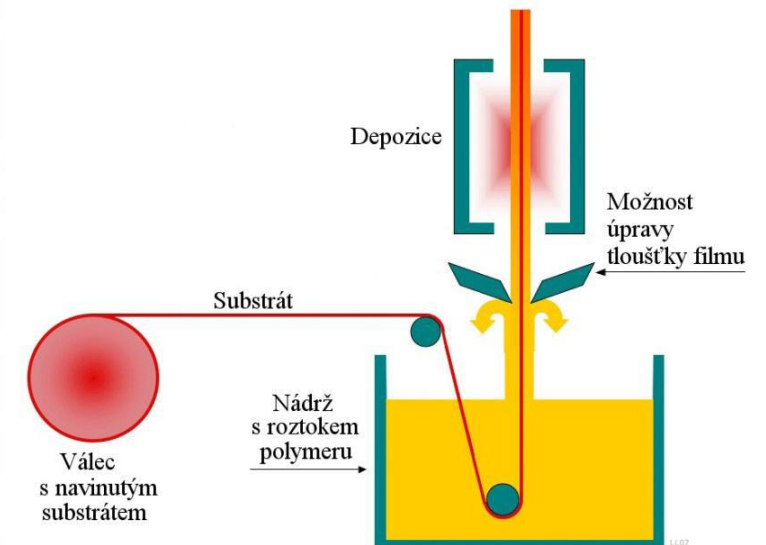
# MATERIÁLY V KVAPALNOM SKUPENSTVE

## Nanášanie ponorom (dip coating):

Princíp tejto metódy spočíva v ponáraní substrátu do chemicky polarizovaného roztoku, kedy u niektorých materiálov dochádza k príľnutiu na substrát. Pri ponorení substrátu do roztoku monoméru a oxidantu sa monomér prichytí na substrát, zpolymerizuje sa a vytvorí tenkú vrstvu. Tento proces je možné opakovať a tak vytvárať viacvrstvé štruktúry. Hrúbka vrstvy je ovplyvnená dobou ponoru substrátu v roztoku.



[https://www.youtube.com/watch?v=PRUIU78\\_img](https://www.youtube.com/watch?v=PRUIU78_img)





# KONTAKTNÉ METÓDY NANÁŠANIA

**Kontaktné metódy nanášania vrstiev** spočívajú v priamom kontakte masky, príp. dispenzera pasty a substrátu. Medzi kontaktné metódy nanášania vrstiev patria najmä sieťotlač, hĺbkotlač, flexografia a litografia. Pri týchto metódach dochádza k priamemu styku hrubovrstvovej sieťky alebo valca s motívom a substrátu.

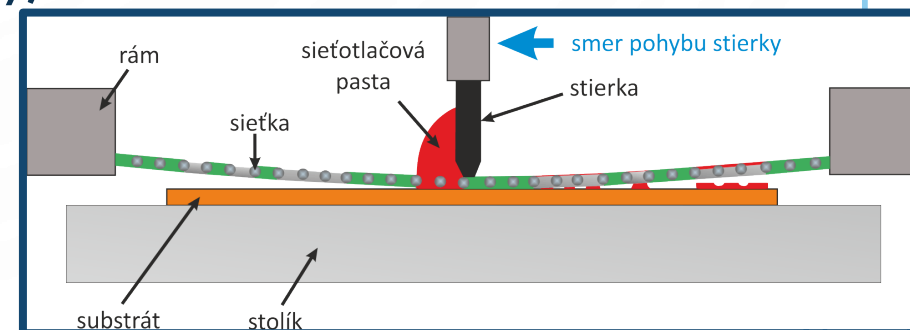
## **Nevýhody kontaktných metód:**

- nevhodnosť použitia substrátov citlivých na tlak,
- modifikácia povrchových vlastností polymérnych flexibilných substrátov.

# SIEŤOTLAČOVÁ TECHNOLOGIA

Pod pojmom **sieťotlačová technológia** sa rozumie pretláčanie pasty cez voľné oká sieťky, na ktorej bola vytvorená predloha požadovaného motívu. Kvalitu sieťotlače, jej precíznosť, hrúbku a vlastnosti nanesej vrstvy ovplyvňuje niekoľko faktorov:

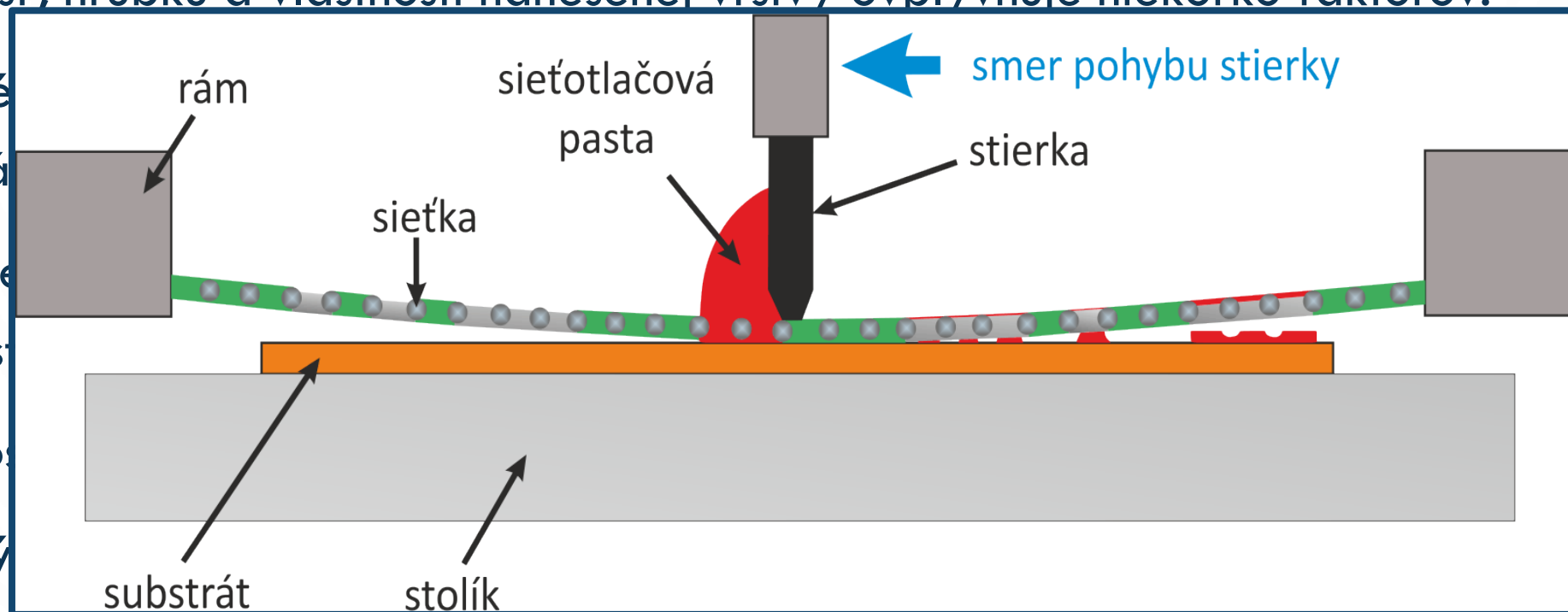
- použité sieťky, príp. šablóny – sieťky sú vyrobené z polyesteru, nylonu alebo ocele a vyberá sa podľa konkrétneho použitia tejto technológie,
- parametre sieťotlače, medzi ktoré patria najmä tlak stierky, odskok stierky od sieťky, rýchlosť pohybu stierky, smer pohybu stierky a iné,
- vlastnosti nanášanej pasty – viskozita a tixotropia pasty,
- použitý substrát a kvalita jeho povrchu.



# SIETOTLAČOVÁ TECHNOLOGIA

Pod pojmom **sietotlačová technológia** sa rozumie pretláčanie pasty cez voľné oká sieťky, na ktorej bola vytvorená predloha požadovaného motívu. Kvalitu sietotlače, jej precíznosť, hrúbku a vlastnosti nanesej vrstvy ovplyvňuje niekoľko faktorov:

- použité
- vyberá
- parametre
- rýchlosť
- vlastnosti
- použitý



ocele a  
d sieťky,

# SIETĽOTLAČOVÁ TECHNOLOGIA

Presnosť sieťotlače ovplyvňujú najmä nasledovné faktory:

- uhol smeru vlákien vzhľadom na tlačný motív,
- dĺžka dráhy, tvar, šírka a tvrdosť stierky,
- odskok stierky od sieťky,
- prítlak stierky na sieťku počas tlače,
- správne umiestnenie motívu na sieťke,
- rýchlosť pohybu stierky po sieťke,
- uhol kontaktu stierky a sieťky.

# SIETŔOTLAČOVÁ TECHNOLOGIA

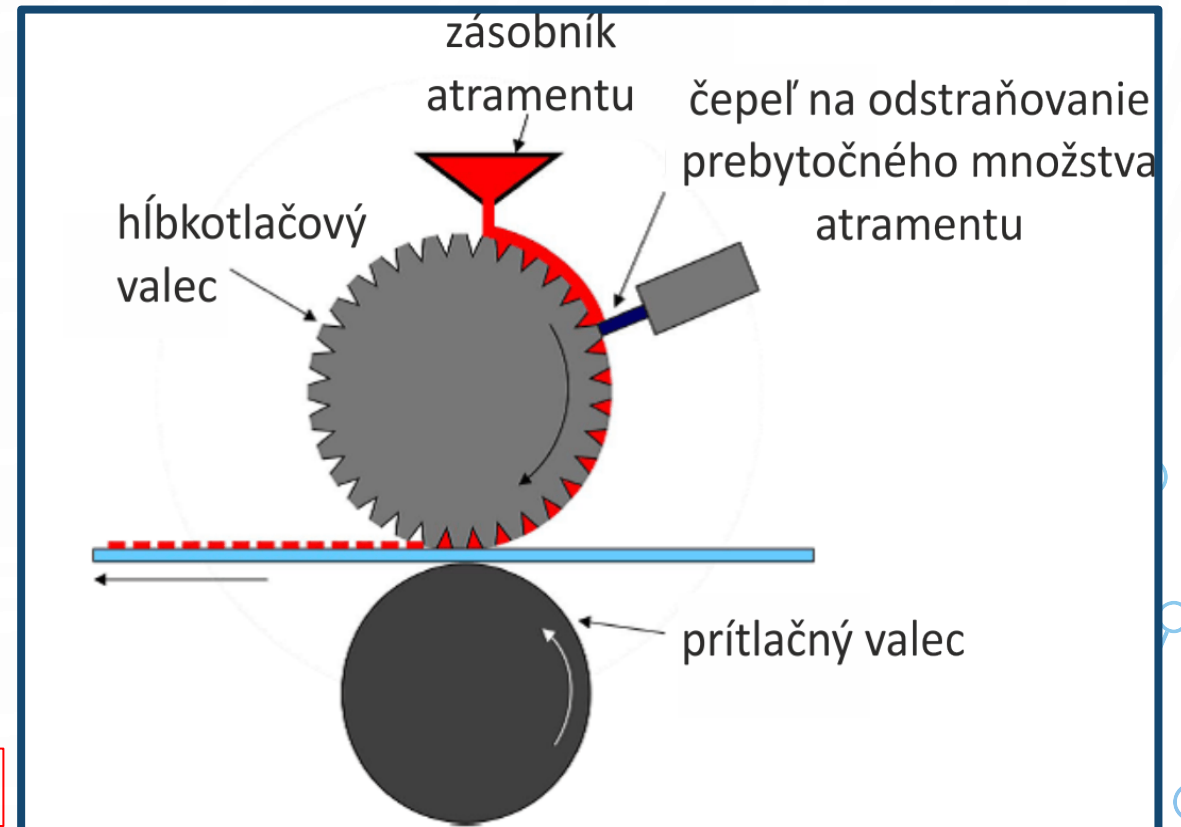
Medzi základné výhody tejto technológie patrí najmä možnosť veľkoplošnej tlače. Za nevýhodu opisovanej technológie sa považuje problémová precíznosť nanášania (minimálna šírka natlačenej čiary pod  $100\ \mu\text{m}$ ), vysoká viskozita používaných pást, ktorá sa pohybuje v rozmedzí od 0,1 do 50 Pa.s a v tej súvislosti aj vysoká citlivosť na zmenu teploty a taktiež nízka rýchlosť pohybu stierky  $5\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Použitím polymérnych pást je táto technológia vhodná aj na nanášanie vodivých, polovodičových a izolačných vrstiev na flexibilné substráty

# HĹBKOTLAČ (GRAVURE PRINTING)

Technológia **hĺbkotlače** používa na prenos motívu na substrát kovový valec, na ktorom je vyleptaný alebo vyrytý motív, ktorý má byť prenesený na substrát. Na kovový valec je nanosená pasta, pričom prebytok sa odstráni nožom, ktorý je pevne pritlačený k valcu.

Následne na valci ostane pasta len v štrbinách, čo predstavuje motív. Napustený valec tak prichádza do kontaktu so substrátom, ktorý je vložený medzi kovový valec s motívom a prítlačný (nosný) valec, vplyvom čoho sa pasta z kovového valca prenáša na substrát.



<https://www.youtube.com/watch?v=JOzDcQka3IM>

# HÍBKOTLAČ (GRAVURE PRINTING)

Proces odstraňovania prebytočného množstva pasty z valca je kritickým aspektom samotnej technológie. Čepel' musí odstrániť prebytočnú pastu bezo zvyšku z povrchu valca. To kladie prísne nároky na povrchovú úpravu valca, jeho tvrdosť a tvar, ale aj na materiál čepele a prítlak čepele na valec. Na splnenie týchto požiadaviek sa na výrobu valca používajú tvrdé materiály, ako je meď s chrómovým povrchom, príp. priemyselná keramika. Prevažná väčšina valcov je vyrobená z ocele alebo z hliníkového jadra s vrstvou galvanickej medi, ktorá sa ľahko obrába. Následne sa naniesie vrstva chrómu, ktorá poskytuje dobrú odolnosť voči opotrebeniu valca vplyvom trenia valca o čepel' a substrát. Híbkotlačová technológia používa pasty založené zvyčajne na báze vody, rozpúšťadiel alebo pasty, ktoré sa zatvrdzujú aplikáciou UV svetla s viskozitou v rozmedzí od 0,01 do 0,2 Pa.s.

# HĹBKOTLAČ (GRAVURE PRINTING)

Medzi najviac používané atramenty v tejto technológii patrí najmä atrament založený na báze nano-častíc oxidu india a cínu (ITO), ktorý sa používa pre výrobu displejov, senzorov a taktiež solárnych článkov. Ostatné funkčné atramenty, ako sú vodivé polyméry, svetlo-emitujúce polyméry a dielektrické atramenty sa taktiež používajú v tejto technológii a sú formulované tak, aby spĺňali požiadavky kladené na materiály v tejto technológii.

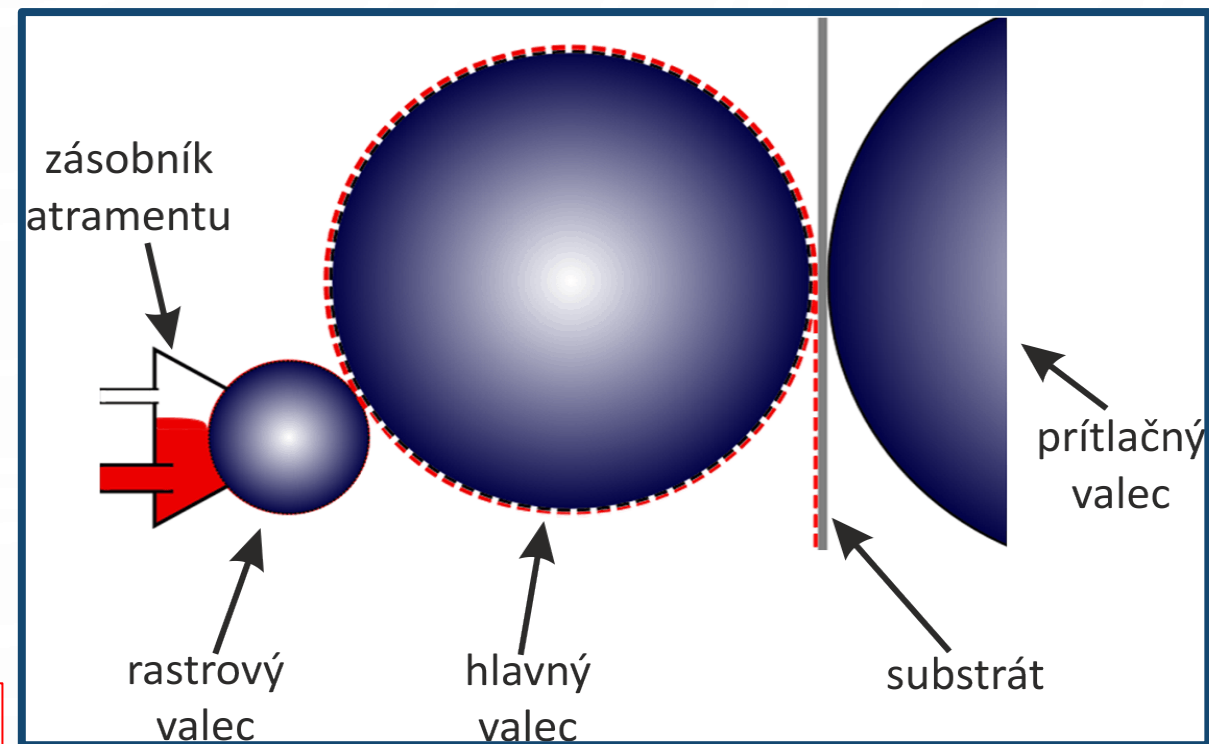
Opisovaná technológia nanášania vrstiev na substráty sa zaradzuje medzi technológie s vysokou rýchlosťou tlače, pričom pre tlač sa vyžadujú atramenty s nízkou viskozitou. Na druhej strane, náklady na tlač sú vysoké, z dôvodu potreby špeciálnych valcov pre tlač, ako je to uvedené vyššie. Pre zabezpečenie nízkej viskozity atramentov sa ako rozpúšťadlo používa najmä toluén, xylén a lieh, príp. kombinácia týchto rozpúšťadiel s vodou. Výsledná kvalita natlačenej vrstvy závisí zvyčajne od vlastností použitého substrátu, ako napr. drsnosť povrchu, stlačiteľnosť, pórovitosť, citlivosť na zložky atramentu a zmáčavosť substrátu, ale aj od vlastností atramentov, ako napr. odparovanie rozpúšťadiel, viskozita a reologické vlastnosti atramentov. Táto technológia je vhodná napr. na výrobu RFID antén pracujúcich na vysokých frekvenciách, alebo na výrobu zobrazovacích zariadení na báze OLED.



# FLEXOGRAFIA

Flexografia je reliéfná metóda prenosu motívu na substrát. Valec, na ktorom je umiestnený motív, je zvyčajne vyrobený z gumených materiálov, pričom pre zvýšenie rozlíšenia sa používa aj fotopolymér. V prípade nanášania vrstiev na papier, na flexibilné polymérne substráty alebo na kovové fólie s malou hrúbkou sa používajú valce z plastických materiálov. Pasta sa najprv nanesie z rezervoára na rastrový valec, z ktorého sa následne pasta otláči na valec, na ktorom sa nachádza motív. Hrúbka nanesej vrstvy atramentu na substrát závisí najmä od rýchlosti otáčania valca, typu použitého materiálu valcov a taktiež od tlaku, ktorý sa aplikuje na substrát počas tlače.

<https://www.youtube.com/watch?v=9pocAG01M5s>



# FLEXOGRAFIA

Atrament používaný v technológii flexografie môže byť založený buď na báze vody, alebo na báze rozpúšťadiel tak, aby doba schnutia atramentu bola minimálna. Na základe tejto požiadavky je možné použiť túto technológiu na nanášanie vrstiev na flexibilné fólie. Roztekavosť naneseného atramentu na substráte po tlači (haló efekt) je možné eliminovať použitím odpružených valcov, príp. krytov na valce z polymérov. Hrúbka takto nanesej vrstvy predstavuje 0,01 až 2  $\mu\text{m}$ .

Ďakujem za pozornosť.

---



**Faculty of Electrical Engineering  
and Informatics**

**Peter Lukacs, Ph.D.**

Department of Technologies in Electronics  
Faculty of Electrical Engineering and Informatics  
Technical University of Košice  
Košice, Slovakia  
[peter.lukacs@tuke.sk](mailto:peter.lukacs@tuke.sk)