

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Porovnání sítotiskové technologie a technologie aerosol
jet printing**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav ZIGO**
Osobní číslo: **E14B0277P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Porovnání sítotiskové technologie a technologie aerosol jet printing**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se se sítotiskovou technologií a technologií aerosol jet printing.
2. Jednotlivé technologie detailně popište.
3. Porovnejte tyto dvě technologie z technického a ekonomického hlediska.
4. Diskutujte možnosti využití kombinace obou výše zmíněných technologií.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. LEŠIKAR, Adam. Sítotisk: úvod do technologie sítotisku. V Praze: Nakladatelství grafické školy, 2010.
2. MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
3. Goth, C.; Putzo, S.; Franke, J., "Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications," Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011 IEEE 61st , vol., no., pp.1211,1216, May 31 2011-June 3 2011
doi: 10.1109/ECTC.2011.5898664

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Navrátil**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na technologii sítotisku a technologii Aerosol Jet[®] printingu a jejich vzájemnému porovnání. V práci jsou uvedeny principy jednotlivých technologií a podrobně popsány jejich jednotlivé části. Je uvedeno jaké pasty či inkousty je možno nanášet a jaké mohou být použity substráty.

Klíčová slova

Sítotisk, Aerosol Jet[®] printing, pasta, inkoust, substrát, tisk, síto, rám, těrka.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the technology of screen printing and Aerosol Jet[®] printing technology and their mutual comparison. The thesis describes the principles of individual technologies and details their individual parts. It's shown which pastes or inks can be applied and which substrates can be used.

Key words

Screen printing, Aerosol Jet[®] printing, paste, ink, substrate, printing, frame, squeegee.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Navrátilovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 SÍTOTISK	11
1.1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE SÍTOTISKU	11
1.1.1 Historie sítotisku.....	11
1.1.2 Základní princip sítotisku	12
1.2 RÁMY	13
1.3 SÍTA	14
1.4 NAPÍNAČÍ ZAŘÍZENÍ.....	15
1.5 PASTY	17
1.5.1 Pasty v elektrotechnice	18
1.6 SUBSTRÁTY	21
1.6.1 Substráty v elektrotechnice.....	21
1.7 TĚRKY.....	27
1.8 SÍTOTISKOVÉ STROJE.....	30
2 AEROSOL JET®	31
2.1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE AEROSOL JET®	31
2.1.1 Vznik Aerosol Jet®	31
2.1.2 Základní princip Aerosol Jet®	31
2.2 INKOUSTY	34
2.2.1 Typy inkoustů.....	35
2.3 SUBSTRÁTY	36
2.3.1 3D substráty.....	36
2.4 AEROSOL JET® PŘÍSTROJE	37
2.4.1 Aerosol Jet® 200.....	37
2.4.2 Aerosol Jet® 300.....	38
2.4.3 Aerosol Jet® 5X.....	39
2.4.4 Aerosol Jet® Marathon Print Engine.....	39
3 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ A DISKUZE	40
3.1 PŘESNOST A JEMNOST TISKU	40
3.2 SPOTŘEBA INKOUSTU	40
3.3 POTISK SUBSTRÁTŮ	41
3.4 ZMĚNY TISKNUTÝCH MOTIVŮ.....	41
3.5 EKONOMIČNOST	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na dvě aditivní technologie, kterými jsou sítotisk a Aerosol Jet[®] printing. Technologie sítotisku je již dlouho používána a tudíž prošla velkým vývojem. Naopak technologie Aerosol Jet[®] printingu je poměrně nová a tudíž se postupně zlepšuje, vyvíjí a zjišťují se její možnosti a využití.

Text bakalářské práce je rozdělen do tří částí. První část práce je zaměřena na princip a podrobnosti o technologii sítotisku. Tato technologie je představena a jsou rozebrány její jednotlivé části, jako je rám, síto, pasty aj. V druhé části je obdobně rozebrána i technologie Aerosol Jet[®] printingu. V poslední třetí části jsou stručně shrnuty možnosti, využití, ekonomičnost, klady a zápory jednotlivých technologií a jejich vzájemné porovnání.

Seznam symbolů a zkratk

2D	Dvourozměrný
3D	Třírozměrný
AJP	Aerosol Jet [®] printing
CAD.....	Počítačový program pro grafické projektování
CEM-1	Kompozitový substrát
DNA	Dvouřetězcová nukleová kyselina
FR-4.....	Skelný laminát (nehořlavý substrát)
MWCNTs	Víceúrovňové uhlíkové nanotrubičky
PEDOT:PSS	Vodivý polymer z dvou ionomerů
SU-8.....	Fotorezist
SWCNTs.....	Uhlíkové trubice s jednou stěnou
TCE.....	Koeficient tepelné roztažnosti
TLV	Tlusté vrstvy
UV	Ultrafialové záření
XXXPC.....	Fenolitický substrát

1 Sítotisk

1.1 Úvod do technologie sítotisku

Zamyslíme-li se obecně nad elektronickými obvody a elektronickými součástkami, můžeme si představit jakousi destičku neboli substrát, který na sobě nese určité součástky a vodivé cesty. Tyto vodivé cesty spojují elektronické součástky, aby správně fungovaly a aby se signály jimi vedené dostaly do požadovaného místa určení. Tím se dostáváme k aditivním technologiím, které umožňují vytváření vodivých či nevodivých obrazců na různých typech substrátů. Těmito technologiemi jsou například šablonový tisk, sítotisk, aerosol jet printing nebo technologie dispensingu [1].

1.1.1 Historie sítotisku

Tato aditivní technologie je pravděpodobně jednou z nejstarších a její vznik je připisován Dálnému východu, asijským zemím jako Čína, Japonsko či Korea. Podle různých odhadů je období vzniku datováno kolem 500 až 1000 let před naším letopočtem, právě v již zmíněné Číně. Technologie se přirozeně pomalu zdokonalovala, ovšem průmysl nebyl na dostatečné úrovni. [2],[3]

Chceme-li ovšem zjistit, kdy se sítotisk začal objevovat v současné formě, musíme se přesunout na počátek 20. století. Mladý malíř Samuel Simon obdivoval dávné asijské výtvary, které byly provedeny právě pomocí rané formy sítotisku. Začal se tedy o tuto techniku zajímat a uvědomil si, že tento proces by mohl znamenat revoluci v jeho podnikání. Stačilo mu jen vymyslet způsob, jak tuto techniku přenést do své každodenní práce. Zdokonalil tedy původní primitivní dřevěný rám a vymyslel vykrývací roztok. To mu umožnilo tisknout známky pořád dokola. Díky tomu si v roce 1907 ve Velké Británii právě tento mladík nechal svou technologii patentovat. Po pár letech napadlo Američana Johna Pilswortha ze San Franciska, že by mohl spojit několik různých šablon a zároveň i s několika různými barvami. Nechal si tedy patentovat tento způsob vícebarevného sítotisku. Jeho nový proces vyvolal v Americe v průběhu první světové války plakátovou

revoluci. Ve velkém se sítotiskem například vyráběl plakát "Strýčka Sama" (viz Obr. 1), který vyzýval muže, aby nastoupili do armády. [3],[4]



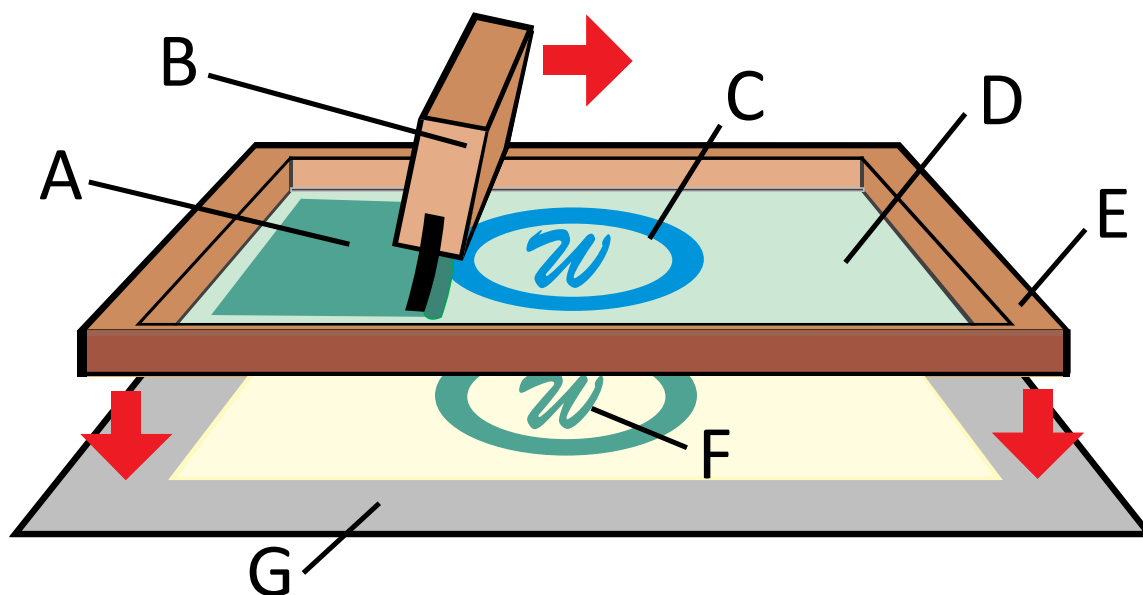
Obr. 1 Plakát Strýčka Sama vyzývající muže k připojení k armádě [5]

Dalšího pokroku pak technologie dosáhla v polovině 20. století díky pokroku v chemii, která během druhé světové války zaznamenala velký rozmach. To umožnilo vynalezení světlocitlivých roztoků, díky čemuž se začalo využívat fotochemického procesu. Rozmach v této době zažila i elektronika a její výroba, kde se začal využívat právě sítotisk. [2]

1.1.2 Základní princip sítotisku

Sítotisk je jedna z nejrozšířenějších aditivních technologií, obzvláště v elektrotechnice při výrobě plošných spojů. I když dnes již existují modernější technologie, sítotisk je stále aktuální a má velké uplatnění. Za to vděčí hlavně své hospodárnosti a výkonnosti. [1]

Dle Obr. 2 můžeme vidět, že základní princip spočívá ve vytlačování pasty (A) požadované viskozity s pomocí třerky (B) přes síto (D), na kterém je požadovaný koncový motiv (C). To je napnuto v dnes již kovovém nebo plastovém rámu (E). Díky tomu se nám na substrátu (G) vytvoří požadovaný vzor (F).



Obr. 2 Princip sítotiskové technologie (převzato a upraveno z [6])

1.2 Rámy

Základním úkolem rámu je nést síto. Důležité je, aby rám dokázal udržet síto dostatečně napnuté, jak je to požadováno. Proto je na materiál, ze kterého je vyroben, kladen velký nárok na pevnost při mechanickém namáhání. Historicky se rámy vyráběly ze dřeva, v dnešní době se můžeme setkat spíše s rámy z kovů, jako jsou hliník a ocel, nebo z plastů. Nejvíce se využívají hlavně hliníkové rámy, jelikož mají dostačující pevnost, odolávají korozi a jsou lehké, což se hodí hlavně při použití sít velkých rozměrů. Drtivá většina ráků je obdélníková, ovšem velmi vzácně se může objevit i jiný tvar. [7] Stručně řečeno, jakmile se síto uchytí do rámu a je napnuté, je třeba, aby rám dokázal být pevnou konstrukcí a udržel síto co nejdéle napnuté a odolal snaze síta se smrštít. Pokud by totiž toto nedokázal, vlivem poklesu napnutí síta by došlo ke změně požadovaného motivu na šabloně síta a tím pádem k nekvalitnímu tisku.

1.3 Síta

Síto je velmi důležitým komponentem této technologie a jeho hlavním úkolem je přenést požadovaný motiv na substrát. Mělo by být do jisté míry flexibilní a pružné, aby se po průchodu těrky vrátilo do původního tvaru. Podle [1], [7] a [8] jsou základními materiály, ze kterých se nejčastěji síta vyrábějí:

- přírodní materiály – hedvábí,
- syntetické – polyester; polyamid; nylon,
- kovové – nerezová ocel.

Přírodní materiály jako hedvábí se používají výhradně v serigrafii (umělecký sítotisk, který slouží k vytvoření originálních grafických listů; tisková forma/šablona, by měla být vytvořena ručně výtvarníkem). Nikde jinde kvůli svým špatným vlastnostem, jako je absorpce vlhka, rozměrová nestálost a nemožnost opakovaného použití, je není možno použít. Jejich jedinou výhodou je jejich nízká cena. [8],[9]

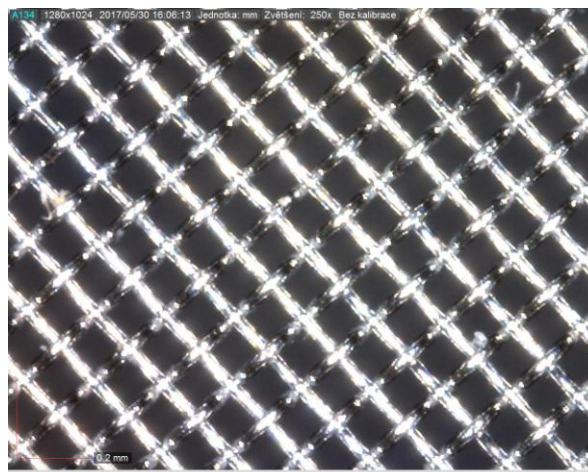
Obecně se nejčastěji využívají syntetické materiály, které také prošly za poslední desítky let největším vývojem. Pokud bychom je chtěli nějak obecně charakterizovat, tak vynikají v pevnosti v tahu, můžeme použít až dvojnásobnou sílu při napínání, pružnosti a mají dobrou rozměrovou stálost. Díky těmto vlastnostem můžeme síto víckrát očistit a použít na jiný motiv. [8],[9]

Kovová síta nemají prakticky žádnou pružnost, ale vynahrazují to svou rozměrovou stabilitou. Zároveň pokud jsou dobře napnuta, jsou téměř nezničitelná tiskem. Jsou ovšem dražší a hůř se napínají. Velké využití mají například ve výrobě obtisků na keramiku nebo v elektrotechnické výrobě. [8],[9]

Výběr ideálního síta není jednoduchý, jelikož všechny používané materiály na síta prošly řádným vývojem a všechny mají své pro a proti. Každé síto je tedy vyrobeno přesně podle toho, k čemu bude použito. Síta jsou používaná na různé substráty, motivy a nanášejí se přes ně různé pasty. Podle toho tedy musí být síto navrženo a vyrobeno. Mezi tyto základní požadavky patří podle [1] a [9]:

- přesnost rozměrů,
- tloušťka tisku,

- jemnost motivů,
- ostrost obrazce,
- velikost částic pasty,
- struktura povrchu,
- dobrá fixace tvaru,
- vysoká chemická odolnost,
- životnost.



Obr. 3 Detail kovového síta

Nesmíme také zapomenout na dobrý průchod pasty přes síto. Ten zajistíme tak, že velikost ok síta by měla být 2,5 až 3krát větší než velikost částic pasty. [1]

1.4 Napínací zařízení

Aby všechna snaha při výběru ideálního rámu a síta nebyla zbytečná, je třeba, aby bylo síto kvalitně napnuto. To splníme, když je podle [1]:

- dodrženo napětí doporučené výrobcem,
- napětí tkaniny rovnoměrné po celé ploše,
- dosaženo stabilizované hodnoty napětí v čase.

K dosažení těchto podmínek bylo v průběhu času vyrobeno velké množství sofistikovaných zařízení. Jednoduše bychom je mohli rozdělit na zařízení mechanická a pneumatická. Mechanická využívají napínání mechanickým tahem. Ten zprostředkovává šnekový mechanismus, který je poháněn klikou nebo motorem. Pneumatická zařízení využívají písty s tlakovým vzduchem a díky jejich lepším vlastnostem, jako je větší a rovnoměrnější tah, se dnes používají více. Samozřejmostí je více druhů těchto zařízení, která se liší například podle druhu upnutí, což má vliv na koncový výsledek. U rámu velkých rozměrů se používají dvouokruhové systémy napínání (protilehlé strany ovládá jedna řídicí jednotka). Při malých rozměrech nebo u rámu se stejnými délkami stran (čtvercových) se využívají jednookruhové systémy. [10]

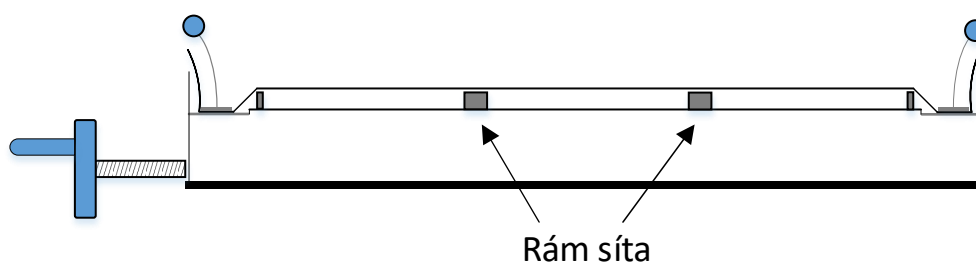


Obr. 4 Pneumatické napínací zařízení [11]

Při samotném napínání je potřeba, aby podle [1]:

- tkanina byla napínána s vlákny rovnoběžnými s napínacím rámem,
- napětí bylo zvyšováno postupně během minimálně 15 minut,
- napětí bylo průběžně měřeno v obou osách,
- síto bylo přilepeno na rám až po ustálení napětí minimálně po 15 minutách.

Princip samotného napínání spočívá v tom, že jednotlivé klapky se rozmístí po obvodu rámu a do čelistí se upne síťovina (viz Obr. 4). Čelisti jsou čisté a uzpůsobené tak, aby nemohlo dojít k vyklouznutí síťoviny při napínání. Poté se začne zvyšovat síla napínání, která se pomalu krokově zvyšuje na hodnotu o něco vyšší než je podle zadání, a to kvůli malému snížení pnutí tkaniny po určitém čase po napnutí. Toto snižování napětí se podle [1] ustálí nejdéle po 48 hodinách. Proto není vhodné síta používat ihned po napnutí.



Obr. 5 Napnuté síto [7]

Poté co je síto napnuté na požadovanou hodnotu, je třeba ho uchytit na rám, který je umístěn pod napnutým sítem (viz Obr. 5). Rám musí být dostatečně očištěn, aby dvousložkové lepidlo, které se nejčastěji používá právě na uchycení síta na rám, dostatečně drželo. Síto je tedy položeno na rám a plocha určená k připevnění k rámu je buďto již

potřena lepidlem nebo se následně lepidlem potře (což je běžnější). Základní lepidla bývají bezbarvá, ovšem často se do nich přimíchávají barviva. To umožňuje usnadnění ve výrobě, kde se následně síto používá, jelikož člověk který konečná síta používá, může podle barvy lepidla poznat, o jakou specifikaci síta se jedná. Například z jaké tkaniny je síto zhotoveno nebo jak velká jsou oka síta. Po úplném zaschnutí lepidla se zbavíme přebytečné síťoviny jejím odříznutím. Pokud se předpokládá, že síto bude při používání vystaveno agresivním látkám, je třeba, aby místo, kde je přilepeno, bylo potřeno speciálním lakem, který lepidlo chrání. [7],[10]

1.5 Pasty

Ani v této oblasti neexistuje jen jedna univerzální pasta, je třeba rozlišovat podle toho, pro jaký účel sítotisk používáme, jaké materiály potiskujeme a tudíž i zde můžeme najít velkou škálu druhů.

Některé pasty mají pouze funkci barev. Ty jsou tvořeny pomocí pojiva, barviva, pomocných prostředků a ředidel. Pigmenty jsou nejmenší namlety a zároveň smočené v pojivu pomocí třecích stolic. Jednotlivé částičky pigmentů nesmí být větší než 8 μm , aby bylo docíleno co nejpřesnějšího tisku. Pomocí pojiva a pomocných prostředků, jako jsou například změkčovadla či vosky, dosáhneme požadovaných mechanických vlastností pasty. Ředidla mají za úkol rozpustit pojiva a tím ovlivňovat viskozitu. [12]

Pasty využívané jako barvy bychom mohli dělit podle druhu jejich aplikace, na jaké materiály se mohou nanášet, způsobu schnutí nebo i jen podle jejich barvy. Mohou být nanášeny např. na papír, sklo nebo plast atd. Schnutí bychom mohli rozdělit na čtyři různé způsoby dle [12]:

- fyzikální – ředidla se odpařují, nedochází k žádné chemické změně,
- chemické – schnutí vyvolává tužidlo, které je třeba přimíchat a chrání před opětovným napadením ředidly,
- oxidativní – zesíťování působením vzdušného kyslíku,
- reaktivní – vytvrzování pomocí UV záření.

Co se týče elektrotechniky, zde se nejčastěji používají pasty, které bychom mohli rozdělit do dvou skupin, a to dle způsobu sušení či vytvrzování. Jedna skupina je sušena nebo tvrzena pomocí tepla. Tyto pasty obsahují fenolické, polyesterové, alkydové a další

pryskyřice, které slouží v pastách jako pojivo. Druhou skupinou jsou pryskyřice, které sušíme nebo vytvrzujeme pomocí UV záření. To jsou estery kyseliny akrylové a metakrylové. Samozřejmě opět se správným složením pasty dají ovlivnit její konečné vlastnosti, jako je tvrdost, odolnost, přilnavost nebo rychlost sušení, respektive tvrzení. [1]

1.5.1 Pasty v elektrotechnice

V elektrotechnice můžeme ve velkém vidět využití past jen jako barvy, například pro potisk desek plošných spojů (označení součástek, umístění aj.). Ovšem mohou být použity i na tlusté vrstvy (TLV), které se nanášejí na substráty. TLV technologii využíváme pro vytvoření vodivých, odporových či dielektrických vrstev, které nanese právě sítotiskem na substrát a poté vypálíme při vysoké teplotě (stovky stupňů Celsia). Tloušťka vrstev je v řádech desítek μm . Pasty, jež používáme na tyto vrstvy, jsou vícesložkové s různými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Zároveň je jejich viskozita závislá na mechanickém tlaku. [13]

Tyto pasty mají tři základní složky. Funkční, která nám určuje základní charakter pasty. Pokud chceme vodivou pastu, použijeme kovy. U dielektrické použijeme feroelektrika či rekrytalující skla a u odporové použijeme vodivé a polovodivé oxidy a sloučeniny. Druhá složka je tavivová, na kterou se používají nízkotavná skla, která zajistí vytvoření vazby mezi přidaným materiálem a substrátem. Poslední složkou je pojivová, na kterou se používají organické materiály jako terpineol nebo butyldiglykolacetát a která zajistí viskozitu. [14]

Vodivé pasty

U těchto past mohou tvořit funkční složku například drahé kovy jako zlato, stříbro, platina, palladium či běžnější měď nebo uhlík. Používají se také jejich směsi a slitiny, čímž můžeme dosáhnout lepších vlastností. V TLV technice se tyto pasty používají pro kontaktní systém rezistorů, propojovací vodivou síť, pájecí plošky, plošky pro lepení polovodičů, pro elektrody kondenzátorů a na senzory. [14] Požadované vlastnosti na tyto pasty jsou podle [13]:

- dobrá vodivost,
- dobrá adheze,

- spolehlivý základ pro připojení drátového vodiče,
- pasta musí mít dobrou eutektickou matici pro spojení,
- pájitelnost a dobrý přechodový odpor,
- stabilní a neměnné vlastnosti během výrobního procesu,
- dobrá přesnost tisku a rozlišitelnost natištěných čar,
- dobré tiskové vlastnosti bez roztečení pasty po tisku, tvorby skvrn nebo zvrásnění natištěné vrstvy,
- dlouhá životnost.

Tab. 1 Vlastnosti vodivých past (částečně převzato z:[13] a [14])

Vlastnost	Jednotka	Zlato	Palladium zlato	Platina zlato	Palladium stříbro
Plošný odpor	[Ω]	0,003-0,01	0,05-0,1	0,08-0,1	0,01-0,06
Teplota výpalu	[$^{\circ}\text{C}$]	760-1000	760-1000	800-1000	760-1000
Rozlišení	[μm]	50-400	50-400	50-400	50-400
Pájitelnost	-	Ne	Výborná	Výborná	Výborná
Kontaktovatelnost drátem	-	Výborná	Dobrá	Dobrá	Průměrná
Kontaktovatelnost tlakem	-	Výborná	Dobrá	Dobrá	Průměrná
Cena	-	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Nízká

Odporové pasty

U odporových past tvoří funkční složku kombinace práškového vodivého pigmentu a skelných boritokřemičitých fritů. Požadovanou hodnotu odporu dostaneme správným poměrem těchto dvou přísad. Pasty se vypalují při teplotách okolo 900°C (dle typu pasty) přibližně 60 minut. [15] Požadavky na tyto pasty podle [13] jsou:

- široký rozsah hodnot vrstevového odporu,
- stabilita odporové hodnoty, zvláště při zvýšených teplotách,
- nízký teplotní součinitel odporu,
- dobrá reprodukovatelnost parametrů na různých substrátech,
- nízký napěťový součinitel odporu,
- nízký šum,
- kompatibilita s vodivými pastami.

Dnes jsou již na trhu dostupné pasty na bázi kysličníků rhutenia, iridia a rhenia, díky čemuž jsou méně náchylné na změnu teplot a mají lepší stabilitu. [13]

Tab. 2 Vlastnosti odporových past [13]

Vlastnost	Jednotka	Pd-Ag	RuO ₂	Ruteničitany
Plošný odpor	[Ω]	10-10 ⁵	1-10 ⁷	10-10 ⁷
Rozptyl odporu po výpalu	[%]	30	10	10-25
Teplotní součinitel -55 až +125°C	[K ⁻¹]	300.10 ⁻⁶	300.10 ⁻⁶	50-250.10 ⁻⁶
Napěťový součinitel	[V ⁻¹]	150.10 ⁻⁶	400.10 ⁻⁶	-19.10 ⁻⁶
Vypalovací teplota	[°C]	850	980	850
Doba výpalu	[min]	60	45	60

Dielektrické pasty

Tyto pasty mají funkční složku podle toho, k jakému účelu jsou použity. Jsou-li použity například na izolaci mezi křížícími se vodiči, používáme materiály na bázi sklovin. Pokud má být pasta použita ke krycím účelům (tj. jako enkapsulant), jsou na bázi nízkotavných bezalkalických skel. [13] Další možnost využití dielektrických past je tvorba dielektrické vrstvy u kondenzátorů. Zde bývají použity materiály jako stabilit, rutilit a negatit, které se klasicky používají jako dielektrika pro keramické kondenzátory. [14] Požadované vlastnosti jsou podle [13]:

- vysoká elektrická pevnost (10⁷ V/m),
- dobrý izolační odpor (10²² Ω/m²),
- nízký ztrátový činitel (<0,001 pro křížení, pro kondenzátory ještě lepší),
- pro křížení malá permitivita, pro kondenzátory dobrá teplotní stabilita (permitivita do několika desítek).

Tab. 3 Vlastnosti dielektrických past [14]

Vlastnost	Jednotka	Sklovina jednoduchá	Sklovina rekrytalizační	Sklo-keramika
Tloušťka vrstvy	[μm]	37-50	37-50	37-50
Relativní permitivita	-	6-9	10-20	11
Ztrátový činitel tg δ (při 1kHz)	-	0,005	0,005	0,005
Činitel jakosti Q (při 1kHz)	-	500	1000	-
Izolační odpor (při 100 V)	[Ω]	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹³
Elektrická pevnost E _d	[kVmm ⁻¹]	8,5	11	20
Vypalovací teplota	[°C]	875	850	850
Doba výpalu	[min]	60	60	45

1.6 Substráty

Obecně si pod pojmem substrát můžeme představit jakýkoliv materiál, který představuje nosnou plochu pro nanášené pasty. V textilním sítotisku to tedy bude tričko nebo například mikina. V grafickém sítotisku to může být papír či karton. U průmyslového sítotisku to mohou být keramické výrobky, lahve, plastové výlisky či desky plošných spojů.

1.6.1 Substráty v elektrotechnice

V elektrotechnice substráty tvoří základní nosnou plochu pro integrované obvody, proto je volba jeho materiálu důležitá pro výslednou spolehlivost. Tento substrát neboli podložka musí splňovat určité elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti. [16]

Elektrické vlastnosti

Jednou z nejdůležitějších elektrických vlastností je vnitřní a povrchová rezistivita, která se pohybuje v hodnotách až $10^{15} \Omega$. Ta zajišťuje dostatečné izolační podmínky, aby byly signály na desce přenášeny pouze k tomu určenými vodivými cestami. Dalšími vlastnostmi je relativní permitivita a ztrátový činitel, které jsou důležité, pokud bude substrát použit pro obvody s vysokými hodnotami frekvence. Další důležitý parametr je elektrická pevnost. Význam tohoto parametru narůstá s vyšším použitým napětím na desce plošných spojů (například u výkonové elektrotechniky). [1],[17]

Tepelné vlastnosti

Teplo je energie, která v elektronických systémech vzniká ztrátami z energie elektrické. Tyto ztráty jsou povětšinou nežádoucí, ale musíme s nimi počítat, protože teplota má vliv na konečné parametry součástek a materiálů (např. životnost, spolehlivost). Z toho důvodu musíme u substrátů myslet na správné odvádění tepla, které provádíme podle [1] pomocí:

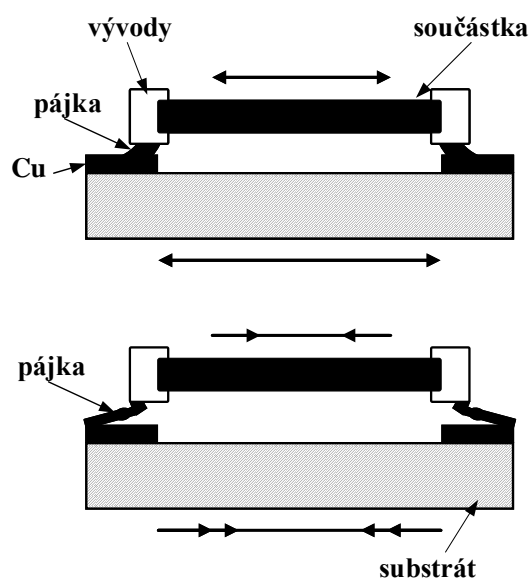
- vedení – šíří se trojdimenzionálně z místa s vyšší teplotou do místa s nižší,
- proudění – nejčastěji se využívá vzduch (je třeba myslet na jeho filtraci kvůli prachu a chemickým nečistotám),
- sálání – v elektrotechnice se moc nevyužívá kvůli své nízké účinnosti.

Dalšími důležitými vlastnostmi jsou například teplota skelného přechodu T_g (teplota, při které deska přechází z elastického stavu do plastického), tepelná odolnost při pájení (deska musí odolat delaminaci), trvalá tepelná odolnost (určuje tepelný rozsah použití desek) či hořlavost (schopnost materiálu nevznítit se). [17]

Mechanické vlastnosti

Momentálně se ve výrobě integrovaných obvodů snižují rozměry a zvyšuje úroveň integrace. To má za následek, že se zvyšují nároky na mechanické vlastnosti substrátů. Podle [1] a [17] jsou těmito vlastnostmi:

- pevnost,
- nehořlavost,
- stálost rozměrů,
- rovinnost, prohnutí, zkroucení,
- odolnost vůči výrobnímu a provoznímu prostředí,
- tepelná roztažnost,
- mez pevnosti v ohybu,
- nasákavost vodou.



Obr. 6 Působení roztažnosti (překresleno podle [1])

Na Obr. 6 můžeme vidět, jak tepelná roztažnost ovlivňuje a zároveň deformuje integrované obvody. Podle [1] obecně i při pokojové teplotě vzniká pnutí mezi substrátem, součástkou a pájkou, protože pájka bývá měkčí. Z toho důvodu je pájka namáhána stříhem, smykem i tahem. Snižit vlivy tepelné roztažnosti můžeme dle [1] třemi možnostmi:

- volba materiálu s podobným koeficientem tepelné roztažnosti (keramický substrát),
- volba spoje se schopností pohltit rozměrové diference (podstavcový rámeček),
- volba substrátu se schopností pohltit rozměrové diference (pružnější substráty).

Konstrukce substrátů

Substráty se skládají ze tří základních stavebních prvků - dielektrikum, výztuž a vodič. Dielektrikum, které bývá vyztuženo až několika vrstvami výztuže, je nejčastěji dominantním materiálem celého substrátu. Obecně se jako dielektrikum nejčastěji využívá

pryskyřičný systém z fenolitické nebo epoxidové pryskyřice. Výztuž pak bývá tvořena skelnou tkaninou, buničitým papírem nebo křemenným/uhlíkovým/aramidovým vláknem. Pokud jde o ohebné desky, jako pojivo se používají termoplasty (např. plyetermid, polytetrafluoretylen, polyétersulfon aj.). Na základní materiál je poté nanesena měděná vodivá fólie o čistotě 99,5 %. [1],[17]

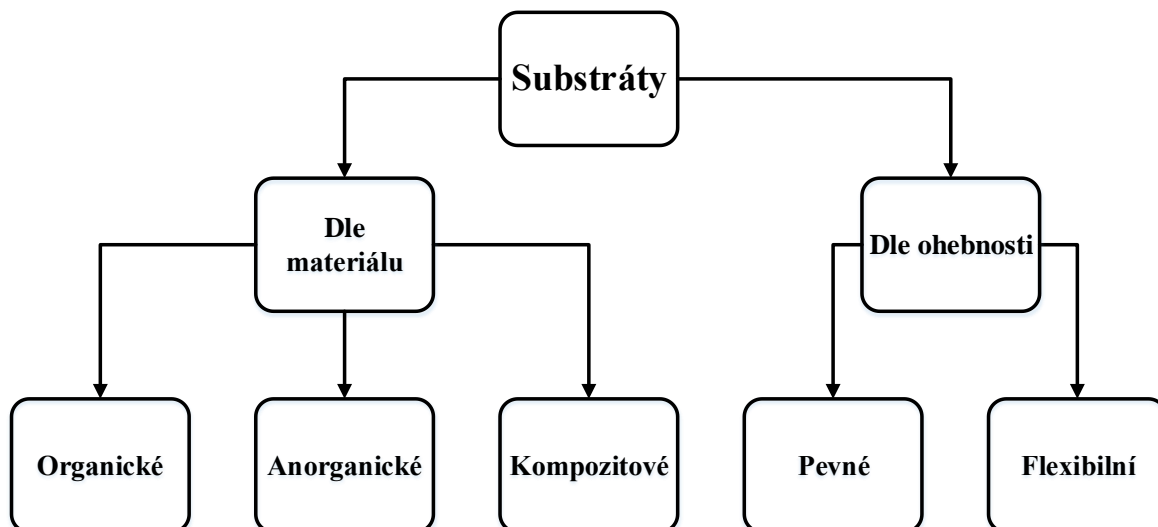
Základní vlastnosti pro vodivé fólie podle [17] jsou:

- mechanické:
 - pevnost v loupání měděné fólie,
 - tloušťka fólie,
- elektrické:
 - proudová zatížitelnost plošných měděných spojů,
 - elektroizolační vlastnosti (šířka vodiče a mezery),
 - parazitní kapacita a indukčnost.

Tab. 4 Přehled složek základního materiálu[1]

Výztuž	Dielektrikum	Vodič
Bez výztuže	epoxid	měď
Skelná tkanina	fenol	nikl
Bavlněný papír	bismaleimid-triazin	měď/invar/měď
Buničitý papír	modifikovaný epoxid	měď/molybden/měď
Netkané skelné vlákno	polyamid	nikl/měď
Křemenné sklo	kyanatan esteru	
Aramidová tkanina	PTFE	
Netkané aramidové vlákno	polyester	
Lehčená PTFE tkanina	melamin	
Kevlarové vlákno		
Skelná rohož		

Druhy substrátů



Obr. 7 Dělení substrátů

Organické substráty

Tyto substráty mají základ na izolantu z organické pryskyřice. Podle [1] jsou nejvíce využívanými fenolické a epoxidové pryskyřice.

Fenolické substráty jsou hojně užívány právě díky své nízké ceně a dobrým elektrickým vlastnostem. Samotná pryskyřice většinou tvoří třetinu až dvě třetiny obsahu materiálu. Se zvětšujícím se podílem pryskyřice se zvyšuje tvrdost a křehkost. Jako výztuž se používá papír. Jako příklad můžeme uvést typ XXXPC (XXX- tvrdost, PC- možnost razit otvory za studena), který se doporučuje pro aplikace, kde je potřeba vysoký izolační odpor a nízké dielektrické ztráty při vyšších vlhkostech [18]. Výhodou je již zmíněná nízká cena a elektrické vlastnosti. Nevýhodou navlhavost a špatná odolnost vůči elektrickému oblouku. [1],[19]

Epoxidové substráty jsou vyráběny z etylenchlorhydrinu a bisfenolu A. Nehořlavý typ FR-4, který je jedním z nejrozšířenějších, se stal světovým standardem. Jejich výhodou jsou lepší elektrické a mechanické vlastnosti, navlhavost a rozměrová stabilita, která se zlepšuje s rostoucím obsahem skla. Nevýhodou je, že při mechanickém obrábění se taví epoxid a dále znečišťuje desku. Dále pak vyšší cena základního materiálu. [1],[19]

Anorganické substráty

Tyto substráty nejčastěji na bázi keramiky se využívají hlavně u tenkých či tlustých vrstev. Anorganické substráty mají oproti těm organickým podle [1] a [17] výhodu v:

- velmi dobrá tepelná odolnost,
- malá hodnota koeficientu tepelné roztažnosti (TCE),
- dobrá chemická odolnost,
- vyspělá technologie,
- mechanická hermetičnost,
- široká použitelnost.

Nevýhody pak v:

- vyšší hmotnost,
- vyšší cena,
- křehkost,
- rozměrová limitace,
- toxicita některých typů (BeO keramika),
- velká relativní permitivita,
- omezená možnost oprav.

Keramické substráty se vyrábí dvěma způsoby – litím nebo válcováním. U obou metod je mletý prášek smíchaný s přísadami vložen do zásobníku, odkud u lití směs vytéká přes stírací nůž, který určuje tloušťku a šířku a následně prochází sušicím tunelem. U válcování se ze zásobníku směs vytlačuje mezi lisovací válce, které opět určují výchozí rozměry. U obou se pak suchý pás keramiky stáčí do role. Poté při spékacím procesu keramika dostává své konečné vlastnosti. Pro substráty se využívá výhradně keramika s relativní permitivitou nižší než 12. Využívá se například korundové keramiky, pro velmi speciální použití (kvůli své toxicitě) beryliové keramiky. [1],[17]

Tab. 5 Vlastnosti keramiky[17]

Vlastnost	Jednotka	Korundová keramika	Beryliová keramika
TCE xy	[ppmK ⁻¹]	7,5 - 8	8,5
Tepelná vodivost	[Js ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹]	34 - 38	250
Permitivita (1 MHz)	-	9 - 10	6,5
Ztrátový činitel (1 MHz)	-	0,08	0,04

Kompozitové substráty

Tyto substráty spojují nejlepší vlastnosti různých materiálů. Hojně se využívá především vlastností, které má papír a sklo. Typickým zástupcem je CEM-1, který má jádro z epoxidu impregnovaného celulózového papíru, oboustranně pokrytého skloepoxidovým prepregem. Díky tomu má dobrou děrovatelnost, nízkou cenu, rozměrovou stabilitu a dobré elektrické vlastnosti. [1]

Tab. 6 Porovnání některých vlastností organických a kompozitních substrátů[1]

Vlastnost	Jednotka	XXXPC	FR-4	CEM-1
Povrchová rezistivita	[Ω]	10^9	10^{10}	10^{10}
Vnitřní rezistivita	[Ωcm]	10^9	10^{12}	10^{12}
Nasákavost vodou	[% váhy]	0,75	0,25	0,30
Elektrická pevnost	[kV]	15	40	40
Relativní permitivita, max při 1 MHz	-	4,8	5,4	5,0
Ztrátový činitel, při 1 MHz	-	0,04	0,035	0,04

Flexibilní substráty

Flexibilní (též nazývané ohebné) substráty bývají z materiálů na bázi termoplastů nebo ze stejných pryskyřičných systémů jako substráty tuhé, ovšem postrádají výztuž. Jako základní materiál se používají podle [1] a [17] převážně:

- Polyamid PI (Kapton) – teploty až 400 °C (stálá pracovní teplota 135 °C) – pájitelný,
- Polyester (Mylar) – použití omezeno do 85 °C – horší pájitelnost, nižší cena,
- PET folie (Melinex) – použití do 150 °C,
- PEN folie (Teonex) – použití také do 150 °C.

Výhodami ohebných substrátů podle [1] a [20] jsou:

- ohebnost umožňující snazší instalaci a servis,
- nízká cena,
- úspora hmotnosti a místa,
- vysoká spolehlivost,
- možnost recyklace.

Naopak nevýhodami jsou:

- rozměrová nestálost,

- obtížné pokovení otvorů,
- problémy při osazení součástkami.

Často se používá i vyztužování ohebných substrátů, a to v místech, kde chceme osazovat součástky. V těchto místech je možno přilepit výztuž ze spodní strany substrátu. Ohebné substráty bývají využity v aplikacích, kde není použita vysoká hustota součástek. [17]

3D substráty

V rámci modernizace a lepšího využití prostoru se již využívají i 3D substráty. Pro představu mimo elektrotechniku to může být například potisk skleněných lahví nebo džbánů. V elektrotechnice to jsou desky plošných spojů, které musíme vložit do určitého prostoru, jemuž jsou náležitě přizpůsobeny a získají tím tak požadovaný tvar na který musíme být schopny nanést požadovaný vzor. Jako základní materiál se využívají vysokoteplotní termoplasty (polyetermid, polyetylentereftalát aj.) nebo termosety s plnivou (plniva – skelná vlákna, minerální plniva aj.), které mají požadované mechanické a elektrické vlastnosti. [1]

Výrobu 3D substrátů velmi zjednodušila a rozšířila technologie 3D tisku. Jedná se o aditivní technologii, která dokáže tvořit třídímenzionální pevné objekty, které jsou digitálně navržené, pokládáním souvislých vrstev materiálu. Tato technologie je poměrně nová a její možnosti se teprve zkoumají. Lékaři například pomocí této technologie dokážou vyrobit a implantovat člověku náhradní kosti, čelisti či pouze zuby. [21],[22]

1.7 Těrky

Základní funkcí těrky je protlačování tiskové pasty přes síto na materiál (substrát), čímž přímo ovlivňuje kvalitu výsledného tisku. Těrka je složena ze dvou částí – držáku a těrkového listu.

Držák může být přizpůsobený buďto pro ruční nebo strojový tisk. Pro ruční tisk bývá držák vyroben ze dřeva, kovu či plastu. Musí mít tvar, který zaručí pohodlné uchycení do dlaně. Strojový držák bývá zpravidla kovový a je uzpůsoben tak, aby se dal co nejpevněji a zároveň co nejjednodušeji uchytnit do stroje. [8]

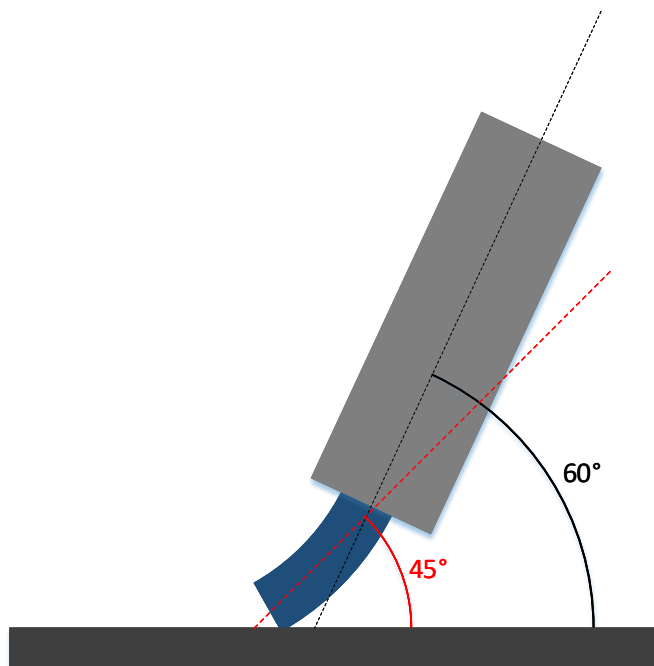
Požadavky na držák podle [23] jsou:

- musí být tuhý a rovný,
- musí spolehlivě sevřít po celé délce těrkový list,
- musí být opřen v dlani, nikoli jen na prstech (platí pro ruční držák),
- musí mít takový tvar, aby bylo možné upnutí do brousícího stroje.

Těrkový list je rovný pás pružného materiálu, na jehož výrobu se v současnosti nejvíce využívá polyuretan. Jeho šířka musí být taková, aby list rovnoměrně tlačil po celé šířce síta. List musí být chemicky odolný, aby odolal různým rozpouštědlům, použitým pastám a čisticím prostředkům. Opatření listu přímo závisí na použitých sítích, tlaku těrky a pastě. Tímto opatřením se list ničí a vznikají na něm nerovnosti. Z toho důvodu se po nějaké době těrkový list musí nabrousit jedním ze tří způsobů – broušením dlouhým pásem, kotoučem nebo oběžným pásem. Jelikož většina těrkových listů je vyrobena z elastomeru, který se při broušení nesmí zahřát, je třeba brousit postupně a do záběru přidávat pouze po 0,1 mm. [7],[23]

U ručního tisku se používá pouze tato pružná těrka, pomocí které tiskneme a při zpětném pohybu natahujeme barvu. U strojového tisku se ale používají těrky dvě. Jedna je pro tisk (viz předchozí odstavec). Druhá slouží jako předplňovací těrka, která natahuje barvu (zaplavuje síto pastou) a při tisku je odstavena. Tato předplňovací těrka bývá vyrobena z kovu. [8]

Pro tisk je také velmi důležitá rychlost a úhel, pod kterým těrka pastu přes síto nanáší. Pokud tedy požadujeme silnější nános, je třeba, aby byl úhel ostřejší. Pokud ale nechceme tlusté vrstvy a potřebujeme zachovat detailní tisk, musí být úhel spíše tupější. Při experimentu podle [7] bylo zjištěno, že pokud má těrka úhel 60° proti sítu a působíme na její list takovou silou, aby se ohnul tak, aby svíral se sítem úhel 45° , dostaneme vlastnosti, které stačí pro většinu aplikací (viz Obr. 8). [7],[8]

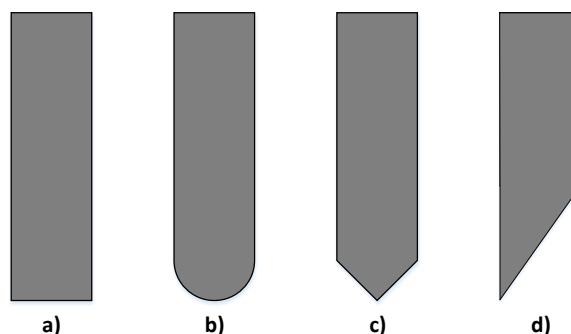


Obr. 8 Úhel těrky

Těrky můžeme dle [8] dělit podle:

1) Profilu (viz Obr. 9):

- a) pravoúhlý – univerzální a nejpoužívanější. Čím jsou hrany ostřejší, tím jsou ostřejší kontury tisku. Je oboustranný.
- b) zaoblený – pro větší nánosy barvy či pro lakování.
- c) klínový (šípový) – pro potisk vícerozměrných předmětů a předmětů s malou plochou, potisk skla.
- d) zkosený – jako u klínového.



Obr. 9 Profily těrek (překresleno podle [8])

2) Tvrdosti

Polyuretanové těrky jsou vyráběny v rozmezí od 55 do 100 Shore. Těrky z tohoto materiálu mají ovšem tendenci zvyšovat tvrdost, pokud jsou vystaveny silnému světlu. Měli by tedy být skladovány ve tmě a za stálé teploty. [7]

3) Tloušťky a výšky těrkového listu

Tloušťka listů bývá nejčastěji 5,7, a 10 mm. Obecně platí, že čím je tloušťka větší, tím se těrkový list méně ohýbá a tisk je ostřejší. Výška přímo ovlivňuje, jak moc se bude těrkový list ohýbat.

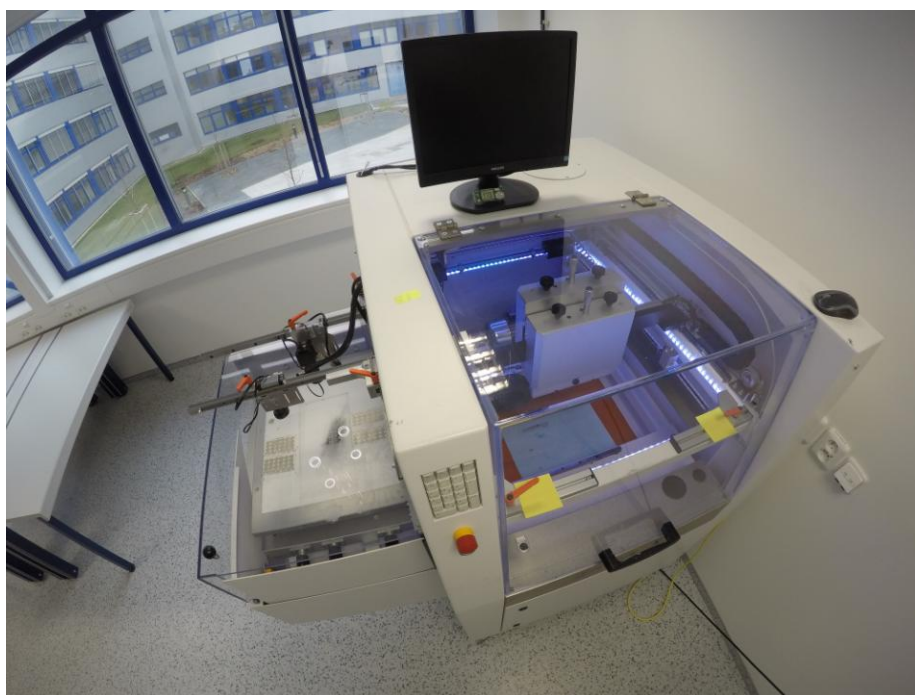
1.8 Sítotiskové stroje

Sítotiskové stroje můžeme dělit podle mnoha kritérií. Mezi nejčastější patří dělení podle druhů potiskovaného materiálu, technického řešení nebo pohonu. U prvního zmíněného jde o tisk - plochý, tvarovaný, cylindrický a rotační. [8],[24] Nejpoužívanějším dělením podle [24] bývá právě druhé zmíněné – podle technického řešení:

- ruční,
- poloautomaty – ruční nakládání a vykládání potiskovaného materiálu; automatizovaný pohyb těrky a tiskové formy,
- třičtvrťautomaty – ruční nakládání; automatický tisk a vykládání potiskového materiálu,
- automaty – plně automatické.

Pohon těchto strojů je buďto mechanický (pohání motor přes systém ozubených kol a řemenů), pneumatický (za pomoci kompresoru poháníme stlačeným vzduchem), nebo kombinovaný (kombinací dvou předchozích). [8]

Samozřejmě při výběru sítotiskového stroje musíme hledět na více vlastností (maximální rozměr a hmotnost síta, správný typ těrky aj.), aby stroj správně fungoval pro naši aplikaci. Na *Obr. 10* můžeme vidět poloautomatický sítotiskový stroj.



Obr. 10 Poloautomatický sítotiskový stroj EKRA E2 z RICE ZČU

2 Aerosol Jet[®]

2.1 Úvod do technologie Aerosol Jet[®]

Technologie Aerosol Jet[®] printing (AJP) je aditivní, selektivní a depoziční technologií, která se za použití CAD systémů využívá pro vytváření elektrických obvodů a součástek či tisku vrstev a motivů různorodých materiálů i mimo elektrotechnickou oblast. Jedná se o technologii, která bezkontaktně deponuje inkoust na určenou plochu využitím aerodynamiky nosného plynu. Díky tomu tato technologie nepotřebuje síta či jiné šablony, aby nanesla požadovaný motiv. Zároveň díky svému způsobu nanášení je možno tisknout na téměř jakýkoliv povrch. [25],[26]

2.1.1 Vznik Aerosol Jet[®]

Aerosol Jet[®] printing je poměrně nová technologie, která byla vynalezena na zakázku agentury DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency – Agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty [27]), která spadá pod americké ministerstvo obrany, firmou Optomec. Tato firma sídlí ve Spojených státech amerických, přesněji ve státě Nové Mexiko, zároveň vlastní patent na tuto technologii a je výrobcem strojů pro tuto technologii. Zakázka byla zadána koncem devadesátých let 20. století a jejím účelem bylo vymyslet technologii, která by dokázala rychle vyrábět moderní elektroniku za přímého použití CAD systémů a byla nikoliv konkurencí ale doplňkem technologií inkjet a sítotisk. Technologie musela být schopná využívat široké spektrum materiálů a jejich tisk na jakýkoliv poklad. [28],[25]

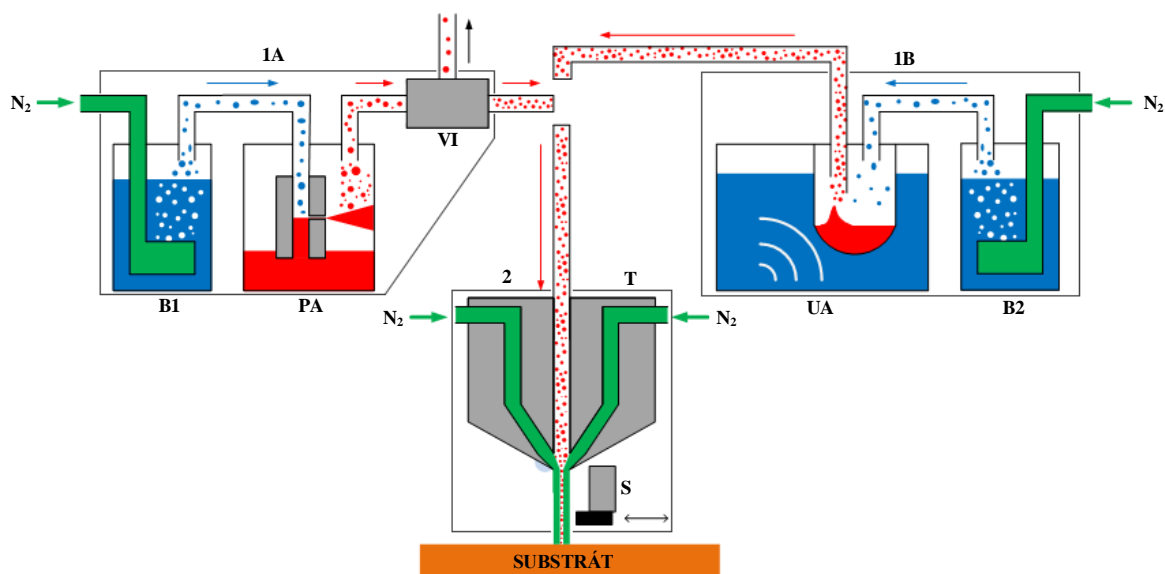
2.1.2 Základní princip Aerosol Jet[®]

Jak již bylo uvedeno výše, technologie Aerosol Jet[®] nepotřebuje žádná síta či šablony jako technologie sítotisku nebo šablonového tisku. Základním principem je bezkontaktní depoziční inkoustu ve formě aerosolu (směs malých pevných nebo kapalných částic v plynu) na přesně definovanou plochu pomocí aerodynamických vlastností nosného plynu (N₂ – technický dusík). Návrh těchto obvodů se provádí v programu CAD.

Na Obr. 11 můžeme vidět zjednodušené schéma systému AJP. Tento systém lze rozdělit na dvě základní části. První část slouží k přípravě aerosolu z inkoustu (1A či 1B) a druhá část slouží k nanášení inkoustu ve formě aerosolu na substrát (2). Nutno dodat, že systém může využívat pro tvorbu aerosolu buď část 1A nebo část 1B – nelze využívat oba systémy současně.

Na levé straně začíná první část 1A Bubblerem (B1). Ten slouží k přivedení kapiček rozpouštědla do původního inkoustu, čímž napomáhá atomizéru k tvorbě aerosolu. K výrobě aerosolu se používá zařízení nazývané atomizér. Je možno použít dva typy atomizéru – pneumatický nebo ultrazvukový. Část 1A využívá pneumatického atomizéru (PA), který rozbíjí inkoust o stěnu nádoby, čímž tvoří již zmíněný aerosol. Využívá k tomu nasávání inkoustu ze dna nádoby a jeho následným tryskáním o stěnu nádoby ho rozbíjí na malé kapičky o velikosti 1-5 μm , které poté nosný plyn unáší do dalšího prvku (VI). Pneumatický atomizér je vhodný pro inkousty s vyšší viskozitou (0,7–1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$) a pokud je třeba, lze inkoust promíchávat či vyhřívat. Ovšem je potřeba minimálně 30 ml inkoustu pro kvalitní tvorbu aerosolu a tisk. Za pneumatickým atomizérem je ještě jeden funkční prvek, který se nazývá Virtual Impactor (VI). Ten odtahuje větší částice (kapičky) inkoustu a přebytečný dusík, čímž vytváří homogennější a hustší aerosol, který poté míří do druhé části systému (2). [26],[29],[30]

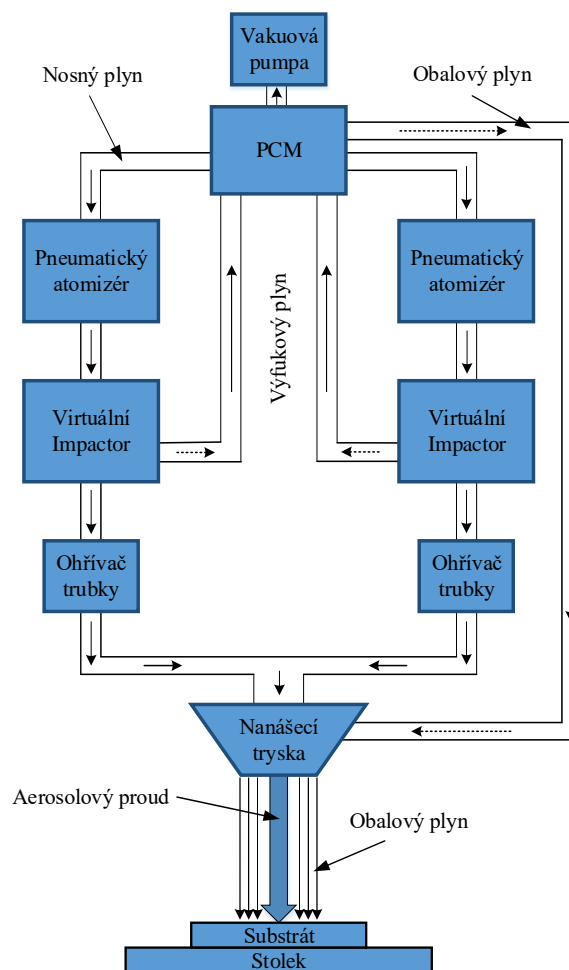
Na pravé straně v části 1B vidíme na začátku také již zmíněný Bubbler (B2), který plní stejnou funkci jako v předešlé části (1A). Tato část systému ovšem používá ultrazvukový atomizér (UA), který rozbíjí částice inkoustu pomocí ultrazvukových vln o frekvenci 1,6–2,4 MHz. Inkoust se uchovává v atomizační lahvičce, která je ponořená ve vodě a nad převodníkem. Převodník vibruje ultrazvukovými vlnami a tím zapříčiňuje poruchy v krystalické mřížce inkoustu, čímž se uvolňují kapičky inkoustu. Ty poté unáší nosný plyn do druhé části systému (2). Je vhodný pro inkousty méně viskozitní (0,7–10 $\text{mPa}\cdot\text{s}$) a jeho velkou výhodou je, že potřebuje pro svou správnou činnost pouze 1 ml inkoustu. [26],[29],[30]



Obr. 11 Princip technologie Aerosol Jet® (převzato a upraveno z [28])

Druhá část systému (2), která se stará o nanášení aerosolového inkoustu na substrát, je pro oba systémy (1A a 1B) stejná. Tvoří ji tryska (T) a shutter (S). Přes trysku prochází aerosol, který je ze všech stran prstencově obklopen a usměrňován dusíkem. Ten se stará o správnou šířku nanášeného motivu na programem určenou plochu. Trysky bývají vyrobeny z keramiky nebo oceli a je možné je mít v různých tvarových a velikostních variantách. Tvar a velikost trysky je volen dle toho, jestli je požadováno nanášet velmi tenké a jemné motivy, nebo pokrývat širší plochy. Tryska má odstup od substrátu v řádech milimetrů (1 až 5 mm), díky čemuž je možno tisknout na nejrůznější tvary a druhy materiálů. Shutter, který se nachází pod tryskou, slouží k téměř okamžitému zastavení depozice aerosolu na substrát (v podstatě se jedná o jakousi kovovou lžičku na kterou je aerosol nanášen místo substrátu) a umožňuje tedy tisk nespojitých motivů bez přerušení generace aerosolu. Často bývá odsáván do odpadní nádoby, odkud se vymývá, aby se na něm neusazoval přebytečný materiál. Dále je ještě zařízení vybaveno vyhřívaným posuvným stolcem, na kterém je substrát připevněn (možnost i vakuového přisání substrátu). [28],[26]

Široké využití také může mít speciální dvojitá atomizační sestava, která byla původně navržena pro tisk kompozitní katodové a anodové mezivrstvy. Ta umožňuje funkční třídění vrstev a míchání materiálů. Místo toho aby se materiály míchaly klasickými metodami kompozitních materiálů, zde jsou individuálně aerosolově inkousty smíchané dohromady přímo při tisku pomocí dvou kompletních jednotek pneumatických atomizérů, které jsou spojeny dle Obr. 12 a poté klasicky ústí do tryskové hlavičky. Obě jednotky mohou být nezávisle řízeny, což umožňuje jejich současné nebo individuální použití. Toto míchání má výhody oproti klasickému, jelikož pomocí změny nastavení jednotlivých jednotek je možno změnit poměr vstupních materiálů. Tato technologie tedy nabízí širokou škálu složení konečného materiálu. [29]



Obr. 12 Schéma dvojité atomizační soustavy (překresleno podle [29])

2.2 Inkousty

Aerosol Jet[®] tiskárny dokážou nanášet širokou škálu dostupných materiálů. Mezi ně patří například pasty na tlusté vrstvy, termosetové polymery, jako jsou epoxidy vytvrzované UV zářením či polymery na bázi rozpouštědel, např. polyuretan a polyimid. Jak již bylo zmíněno, tiskárny dokážou nanášet inkousty o viskozitě od 0,7–1000 mPa·s (za použití pneumatického atomizéru; u ultrazvukového 0,7–10 mPa·s). Dále byly vyvinuty vodivé inkousty na bázi stříbra, platiny, palladia a mědi, které se vytvrzují za teplot nižších než 120 °C. Dále je také možno vytvrzovat keramiku, rutenáty a ferity pomocí vlastního laseru. Díky nízkoteplotnímu zpracování je dokonce možno nanášet biomateriály, jako jsou proteiny a DNA, aniž by byly degradovány. [31]

Rezistivní materiály, polovodiče, dielektrická lepidla a leptadla, uhlíkové nanotrubičky (CNT), nanodrátové materiály (např. ZnO nanodráty) jsou dalšími z řady aplikací, které je možno pomocí Aerosol Jet[®] nanést na širokou škálu substrátů od polyesterových, skleněných až po keramické a kovové materiály. Zároveň mají zákazníci firmy Optomec přístup do jejich databáze inkoustových receptur, výrobců, nastavení parametrů pro určité aplikace aj. [31]

2.2.1 Typy inkoustů

Typicky inkousty pro Aerosol Jet[®] obsahují rozpouštědla s vysokým bodem varu a nízkým tlakem par, nebo s nízkým bodem varu a vysokým tlakem par. Velikost částic, pokud je inkoust obsahuje, se pohybuje mezi 300 až maximálně 500 nm (ideálně menší než 200 nm) a obsah pevných částic v inkoustu se pohybuje mezi 5–70 %. Viskozita, jak již bylo zmíněno, se pohybuje mezi 0,7–1000 mPa·s. [32] Podíváme-li se na dělení inkoustů, které uvádí výrobce Optomec [32], dalo by se říct, že základní dělení inkoustu pro Aerosol Jet[®] je dle materiálových příměsí.

Kovové inkousty

Jsou společně s odporovými a dielektrickými nejpoužívanější v elektronice. Využívají se stejně jako vodivé pasty u sítotisku (viz kapitola 1.5.1) hlavně na vodivé cesty plošných spojů, spojování součástek aj. Na jejich výrobu se používají nanočástice z materiálů jako platina, stříbro, měď, nikl, palladium, hliník a zlato. [32],[33]

Nekovové vodivé inkousty

Na inkousty z nekovových vodičů jsou používány uhlíkové nanotrubičky s jednou stěnou (SWCNTs), víceúrovňové uhlíkové nanotrubičky (MWCNTs) a vodivý polymer z dvou ionomerů (PEDOT:PSS). [32],[34]

Odporové inkousty

Jsou využívány na odporové cesty nebo při nanášení rezistorů pomocí tisku. Na jejich výrobu se používá uhlík či ruthenium. [32]

Dielektrické a adhezivní inkousty

Používány jsou hlavně na nevodivé části obvodů či jako lepidla. Na jejich výrobu se využívají polyimidy, teflon AF, UV adheziva a také fotorezist SU-8. [32]

Polovodičové inkousty

Na tyto inkousty se využívá organických polovodičů a uhlíkových nanotrubic s jednou stěnou (SWCNTs). [32]

Další inkousty

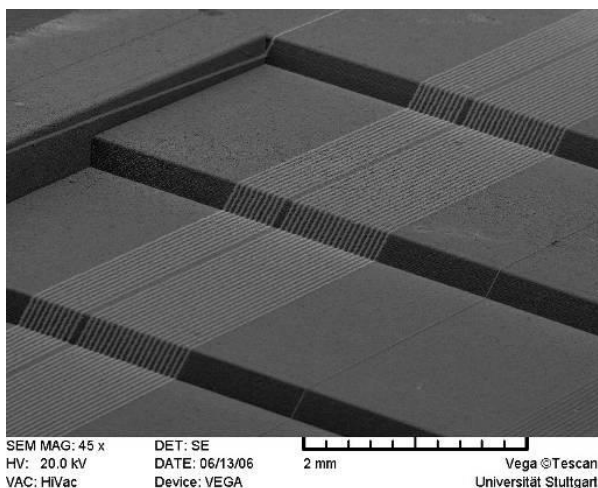
Do této skupiny bychom mohli zařadit inkousty, které obsahují již zmíněné biomateriály jako DNA či proteiny. Dále pak inkousty, které slouží jako rozpouštědla, kyseliny, zásady, foto/leptu vzdorné materiály či magnetické inkousty. [32]

2.3 Substráty

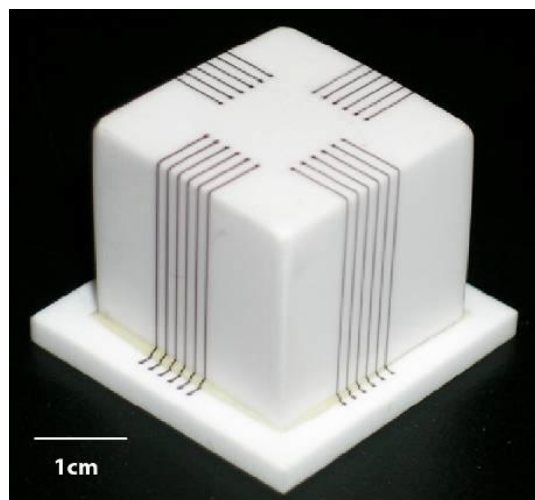
Díky tomu, že tryska bývá vzdálena od substrátu 1 až 5 mm, je možno tisknout na téměř jakýkoliv materiál. Ať už je hladký, drsný, rovný (2D) či zahnutý (3D). Co se týče rozměrů substrátů, momentálně firma Optomec nabízí přístroj Aerosol Jet[®] 300, u kterého je možno potiskovat substráty o rozměrech až 370 mm x 470 mm [35]. Samozřejmostí je potiskování substrátů z kapitoly 1.6.1.

2.3.1 3D substráty

Jelikož technologie Aerosol Jet[®] dokáže přesně nanášet materiály na nerovinné povrchy (viz *Obr. 13* a *Obr. 14*) a zároveň se nemusí žádnou svou částí dotýkat substrátu, umožňuje poměrně jednoduché nanášení materiálů na 3D povrchy či do žlábků. Toho je možno využít například pro tisk integrovaných senzorů, antén aj. [36]



Obr. 13 20 μ m široké Ag čáry na nerovinném povrchu [36]



Obr. 14 150 μ m široké čáry na kostce [36]

Na Obr. 14 můžeme vidět výsledek nanášení stříbra na kostku z oxidu hlinitého pomocí již zmíněného Aerosol Jet[®] 300. Výškový rozsah substrátu tvoří u této konkrétní aplikace 25 mm a depoziční hlava (tryska) byla při nanášení na svislou stěnu (osa Z) nakloněná pod úhlem 45°.

2.4 Aerosol Jet[®] přístroje

Americká firma Optomec momentálně nabízí 4 varianty přístrojů pro použití technologie Aerosol Jet[®], které se dají využít na 2D či 3D nanášení materiálů. [35]

2.4.1 Aerosol Jet[®] 200

Jedná se o profesionální stolní systém, který je ideální pro univerzity, vývojáře inkoustu a další, kteří zkoumají přínos aditivní technologie. Standardně je dodáván s jemnou tiskovou hlavou se shutterem, ultrazvukovým atomizérem, vyhřívaným podtlakovým stolkem o rozměrech 175 mm x 200 mm a procesní kamerou. [35],[37]

U toho přístroje je možno tisknout jemné motivy od velikosti 10 μ m. Tisková hlava se může nacházet až ve výšce 5 mm nad místem nanášení a mechanický shutter reaguje během 2 ms. Přístroj pracuje na již zmíněné rozloze 175 mm x 200 mm a jeho maximální rychlost nanášení je 100 mm/s. [37]



Obr. 15 Příklad přístroje Aerosol Jet[®] 200 [37]

2.4.2 Aerosol Jet[®] 300

Toto pokročilejší zařízení je vhodné například pro vývoj ve fotovoltaice, při výrobě dotykových obrazovek či při výrobě tištěné elektroniky a nanášení biologických materiálů.

Přístroj je dodáván s vysoce výkonnou hlavicí a shutterem, se dvěma atomizéry (ultrazvukový i pneumatický) a vyhřívaným podtlakovým stolem (do 120 °C) o standardních rozměrech 300 mm x 300 mm (volitelně až 370 mm x 470 mm). Dále je možno aby přístroj měl vlastní laser, který slouží k selektivnímu tepelnému vytvrzování nanášených motivů. Stejně jako u přístroje Aerosol Jet[®] 200 je výška tiskové hlavy od místa nanášení až 5 mm a mechanický shutter reaguje během 2 ms. Přesnost nanášených motivů se pohybuje kolem +/- 6 μm ve všech směrech. [28],[38]



Obr. 16 Příklad přístroje Aerosol Jet[®] 300 [44]

2.4.3 Aerosol Jet[®] 5X

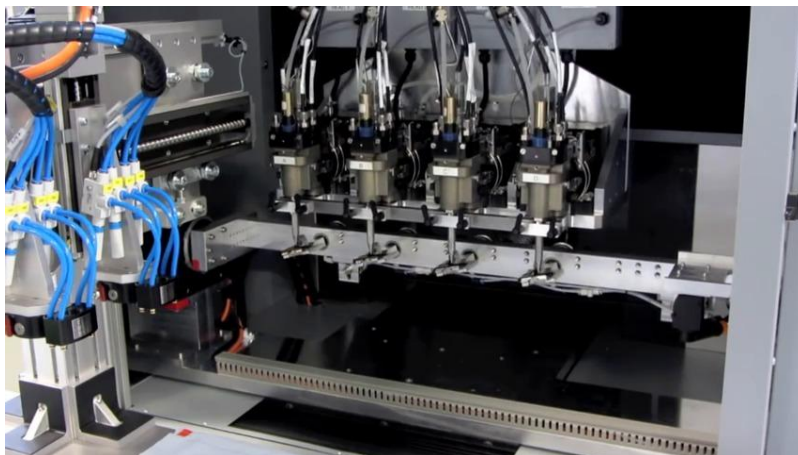
Aerosol Jet[®] 5X byl vyvinut speciálně pro 3D tisk elektrotechnických aplikací jako jsou například tištěné antény a senzory. Přístroj je vybaven tiskovým modulem Optomec Sprint, který je ideální pro tisk s vysokým rozlišením elektronických obvodů. Zároveň se hodí pro rychlé prototypování, vývoj a vyhodnocení tiskových materiálů. Může být dodán i volitelný tiskový modul Optomec Marathon, který slouží pro vývoj procesů a nízkoobjemovou výrobu. Dále přístroj obsahuje ultrazvukový i pneumatický atomizér. Relativní pohyb substrátu vůči tiskové hlavě lze řídit v 5 osách na rozloze 200 mm x 300 mm x 200 mm (x, y, z) při přesnosti +/- 10 µm a při maximálním odstupu od bodu nanášení opět až 5 mm. [39],[40]



Obr. 17 Přístroj Aerosol Jet[®] 5X [39]

2.4.4 Aerosol Jet[®] Marathon Print Engine

Aerosol Jet[®] Marathon Print Engine je ideální pro průmyslovou výrobu při aplikacích pro nanášení materiálů. Přístroj může samostatně řídit až 4 tiskové moduly umožňující simultánní tisk až na čtyřech substrátech nebo sekvenční tisk 4 různých materiálů na jednom substrátu. Stroj je optimalizován pro nanášení tištěné elektroniky, jako jsou například antény pro chytré telefony, tablety aj. Je také možno integrovat na vlastní či komerční automatizační platformy výroby. Podporovány jsou inkousty o viskozitě 1–500 mPa·s. Odstup tiskové hlavy od místa nanášení je až 8 mm. [41],[42]



Obr. 18 Příklad přístroje Aerosol Jet[®] Marathon Print Engine [41]

3 Porovnání technologií a diskuze

3.1 Přesnost a jemnost tisku

Přesnost tisku u sítotisku ovlivňuje celá řada faktorů – síto, jeho momentální stav a počet a průměr jeho vláken, úhel mezi vlákny síta a tištěným motivem; těrka a tlak a rychlost na ní použita; nanášená pasta; vzdálenost síta od podložky aj. Pokud ovšem zvolíme všechny zmíněné faktory správně, dolní hranice šíře linie nanesené pomocí sítotisku se podle [1] pohybuje kolem 70 μm .

I přesto, že je technologie Aerosol Jet[®] pořád spíše ve vývoji, jsou její možnosti v tomto případě již dnes daleko lepší. I tady ovlivňuje jemnost nanesených motivů například výběr inkoustu, ovšem šíře linie se pohybuje od 8 μm [26]. Přesnost nanesených motivů se pohybuje od +/- 6 μm [38]. Na základě těchto hodnot se tato technologie více hodí pro výrobu elektroniky, jelikož umožňuje větší integraci a zmenšování elektrických obvodů než zmíněný sítotisk.

3.2 Spotřeba inkoustu

Jelikož technologie Aerosol Jet[®] dokáže vstupní materiál využívat efektivněji než jiné aditivní technologie, je také považována za “zelenou“. Vděčí za to hlavně svému selektivnímu způsobu nanášení, díky čemuž nevzniká téměř žádný odpad a minimálnímu množství inkoustu pro tisk od pouhého 1 ml (pokud je použit ultrazvukový atomizér). Dále

při výrobě substrátů není vyžadováno používat leptavé chemikálie jako u jiných subtraktivních technologií. [26],[36]

3.3 Potisk substrátů

U obou technologií je možno potiskovat velké množství materiálů a substrátů. Pomocí sítotisku se dají potiskovat plochy od několika centimetrů čtverečních až po několik metrů čtverečních. Ovšem dalo by se říct, že v naprosté většině se jedná o ploché (2D) substráty. Samozřejmě i sítotiskem se potiskují oblé předměty jako například nápojové sklo. Ovšem je třeba na to speciální stroje a na námi nanášené médium (substrát) jsou kladeny omezení - maximální hmotnost a rozměry [43].

Jelikož Aerosol Jet[®] byl primárně vynalezen na vytváření elektrických obvodů a součástek, nemůžeme zatím počítat s tím, že bychom mohli nanášet inkousty na tak velké plochy jako u sítotisku. Momentálně jsou největšími rozměry substrátů u přístroje Aerosol Jet[®] 300 – 370 mm x 470 mm. Ovšem jelikož se jedná o bezkontaktní metodu nanášení pomocí aerodynamických vlastností plynu, je možno nanášet inkousty i na 3D substráty do rozměrů 200 mm x 300 mm x 200 mm u přístroje Aerosol Jet[®] 5X.

3.4 Změny tisknutých motivů

Pokud chceme změnit tisknutý motiv u sítotisku, musíme nechat předělat síto, které se musí napnout a zarámovat. Poté je možné použít nový motiv. Pokud ovšem je třeba znovu něco předělat nebo ještě zlepšit, je třeba tento postup opakovat. To samozřejmě není ideální z hlediska času a financí.

U Aerosol Jet[®] si ovšem pouze stačí sednout k počítači, změnit motiv v počítačovém programu CAD a poslat ho digitálně do přístroje. Z hlediska výzkumu, vývoje a návrhu plošných spojů je to neocenitelná výhoda, která může ušetřit spoustu peněz a času. Zařízení Aerosol Jet[®] je tedy velmi vhodně pro tzv. rapid prototyping.

3.5 Ekonomičnost

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (3.4), Aerosol Jet[®] dokáže díky své rychlé a bezproblémové změně motivů ušetřit peníze i čas. Stejně je to i s jejím efektivnějším využitím vstupních materiálů, kdy se inkousty dají nanášet již od 1 ml jejich objemu, a

jelikož se jedná o bezkontaktní selektivní aditivní metodu, vznikající odpad je proti sítotisku značně minimalizován. Díky tomu můžeme ušetřit další peníze za použité drahé materiály. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1.2, zároveň je možno vytvářet různorodé kompozitní tiskové materiály přímo v přístroji, což také ušetří peníze a čas.

Podíváme-li se na sítotisk, zde vzniká odpad při nanášených past, jelikož se pasty lijí na síta a roztírají pomocí třerky. Na použití nového motivu je potřeba nové síto (jeho natažení a zarámování) a je třeba obsluhovat hned několik strojů.

Ovšem jelikož je sítotisk již známá a zasetá technologie, při vysokoobjemové výrobě jdou náklady strmě dolů. Z tohoto důvodu a podle [36] se při momentálním stavu hodí technologie Aerosol Jet[®] spíše pro výrobu menších sérií a při výzkumu, kde se ocení hlavně její rychlost a možnost kdykoliv rychle změnit motiv či materiál. Sítotisk se hodí spíše pro masovou výrobu velkých sérií, kde se jen zřídka mění tiskový motiv.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se se sítotiskovou technologií a technologií Aerosol Jet[®] printing, jednotlivé technologie detailně popsat a vzájemně je porovnat a diskutovat možnosti využití.

V první části této práce je tedy představena technologie sítotisku. Je uvedeno, jak funguje a za pomoci *Obr. 2* je vysvětlen její princip. Dále jsou probrány jednotlivé komponenty technologie, jako je síto, jeho natahování a následné přichycení do rámu. Poté jsou také rozepsány jednotlivé pasty, které se nanášejí pomocí této technologie. Co je tvoří a z jakých materiálů jsou vytvořeny. Dále je uvedeno, na jaké materiály je možno pomocí sítotiskové technologie nanášet. Převážně jsou to rovinné plochy o rozměrech od několika centimetrů čtverečních až po metry čtvereční. Na závěr první části práce je ještě vysvětlen princip a konstrukce těrky, pomocí které protlačíme pastu přes síto a je uvedeno dělení sítotiskových strojů.

Další druhá část práce je zaměřena na technologii Aerosol Jet[®] printing. Za pomoci *Obr. 11* je opět vysvětlen princip technologie a jsou popsány jednotlivé části tohoto systému (Bubbler, pneumaticky a ultrazvukový atomizér, Virtual Impactor, tryska, shutter a posuvný stolek). Dále je uveden princip speciální dvojité atomizační soustavy, pomocí které se dají například míchat kompozitní materiály. Poté jsou uvedené využívané inkousty a substráty, na něž je možno pomocí technologie Aerosol Jet[®] nanášet materiály a jsou představeny vyráběné přístroje pro tuto technologii.

V poslední třetí části jsou stručně obě technologie porovnány a jsou uvedeny některé jejich výhody či nevýhody. Bylo také zjištěno, že technologie sítotisku se hodí spíše pro výrobu velkých sérií, kde se nemění motiv. Naopak technologie Aerosol Jet[®] se hodí spíše pro výrobu menších sérií a tam, kde je potřeba rychlá změna tiskového motivu či změna depozičního materiálu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektrotechnice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Sítotisk (serigrafie)* [online]. 2011 [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_IV/VY_32_INOVACE_B-05-17.pdf
- [3] SC-BRNO. *Historie sítotisku* [online]. [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.sc-brno.cz/cz/sitotisk/historie-sitotisku>
- [4] ROBERTS, Gordon. *History's Influence on Screen Printing's Future* [online]. 2006 [vid. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.screenweb.com/content/historys-influence-screen-printings-future#.WM0cYjvhCU>
- [5] PIKWEAR. *THE A-Z OF T-SHIRT PRINTING (2)* [online]. [vid. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.pikwear.com/page285.html>
- [6] WAD, Harry. *Screenprinting* [online]. [vid. 2017-04-20]. Dostupné z: https://simple.wikipedia.org/wiki/Screen_printing
- [7] HOBBY, Alan. *SCREEN PRINTING FOR THE INDUSTRIAL USER* [online]. 1997 [vid. 2017-03-20]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html#principle
- [8] LEŠIKAR, Adam. *Sítotisk: úvod do technologie sítotisku*. Praha: Nakladatelství grafické školy v Praze, 2010. ISBN 80-86824-09-8.
- [9] THOMA, Patrik. *Sítotiskové rámy a síťovina. Svět tisku* [online]. 2005 [vid. 2017-03-21]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717&
- [10] THOMA, Patrik. *Napínání sítotiskových ráků. Svět tisku* [online]. 2005 [vid. 2017-03-24]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1872&buxus_svettisku=
- [11] GRUNING. *obrazek napínacího zařízení* [online]. [vid. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.grunig.ch/en/products/stretching/g-stretch-215.html>
- [12] THOMA, Patrik. *Sítotiskové barvy - úvod do problematiky. Svět tisku* [online]. 2006 [vid. 2017-03-29]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2708
- [13] IVAN SZENDIUCH, FELLOW IMAPS, Vysoké Učení Technické v Brně. *Tlusté vrstvy (2)* [online]. 2012 [vid. 2017-03-31]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tluste_vrstvy%28Bc%29.pdf
- [14] FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě* [online]. [vid. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11122685-1-vytvareni-tlustovrstve-pasivni-site.html>
- [15] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FEKT, ÚMEL. *Tlusté vrstvy* [online]. [vid. 2017-03-29]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf

- [16] SZENDIUCH, Ivan. *Pouzdření v elektronice - substráty, tepelný management a moderní typy pouzder (7)* [online]. [vid. 2017-04-20]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Moderní pouzdra a substráty\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Moderní_pouzdra_a_substráty(Bc).pdf)
- [17] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902733-2-7.
- [18] POLYMER PLASTIC COMPANY. *XXX, XXXP, XXXPC Paper* [online]. [vid. 2017-04-23]. Dostupné z: http://www.polymerplastics.com/composite_xxxpc.shtml
- [19] VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ. *Materiály pro desky plošných spojů* [online]. [vid. 2017-04-23]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hav278/Konstrukce_zarizeni_prumyslove_elektroniky/Studijni_opory/Desky_plosnych_spoju.pdf
- [20] OLMR, Vít. *Co jsou ohebné plošné spoje a k čemu se hodí* [online]. 2006 [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/produkty/co-jsou-ohebne-plosne-spoje-a-k-cemu-se-hodi.html>
- [21] EASYCNC. *Informace o technologiích 3D tisku* [online]. [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [22] SCIENCEWORLD. *3D tisk v medicíně: Dnešní realita a budoucnost* [online]. 2014 [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.scienceworld.cz/aktuality/3d-tisk-v-medicine-dnesni-realita-a-budoucnost/>
- [23] WWW.SSHOPCZ.CZ. *SÍTOTISK* [online]. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://sshopct.cz/polygrafie/all/8/data/3.sitotisk-sterky.pdf>
- [24] THOMA, Patrik. Úvod do problematiky sítotiskových strojů. *Svět tisku* [online]. 2006 [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2393&buxus_svetisku=
- [25] OPTOMECH. *Aerosol Jet Technology for 3D printed electronics* [online]. [vid. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [26] VYVOJ.HW.CZ. *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. 2015 [vid. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [27] WIKIPEDIA. *DARPA* [online]. [vid. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA>
- [28] NAVRÁTIL, Jiří. *Možnosti systému Aerosol Jet ® Opportunities of the Aerosol Jet ® system*. 2015. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [29] REITZ, Thomas a Mary AYYADURAI. *AEROSOL JET DEPOSITION OF CERAMIC THIN FILMS FOR ELECTROCHEMICAL APPLICATIONS* [online]. 2012 [vid. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA559584>
- [30] SOUKUP, Radek, Jiri NAVRATIL, Jan REBOUN a Tomas RERICHA. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2015, 30–35. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2015.7247956
- [31] OPTOMECH. *Aerosol Jet Materials* [online]. [vid. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [32] OPTOMECH INC. *Aerosol Jet Material faq. [Online]* [online]. 2014 [vid. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/wp->

- content/uploads/2014/04/AJ_Materials_FAQs_DS_v3.pdf
- [33] HEDGES, Martin a Aaron Borrás MARIN. 3D Aerosol Jet® Printing - Adding Electronics Functionality to RP/RM. *WHITEPAPER - Optomec* [online]. 2012 [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201504958
- [34] OSSILA. *PEDOT:PSS* [online]. [vid. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/products/pedot-pss>
- [35] OPTOMECC. *Aerosol Jet System Configurations* [online]. [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/>
- [36] OPTOMECC. Aerosol Jet ® Printed Electronics Overview [online]. nedatováno, 6. Dostupné z: http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf
- [37] OPTOMECC. *LAB SYSTEMS AEROSOL JET ® 200 SERIES SYSTEMS Printed Electronics Exploration and Development* [online]. 2017 [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ-200_System_Web3-17.pdf
- [38] OPTOMECC. *300 SERIES SYSTEMS For Development of Printed Electronics and Biologics* [online]. 2016 [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/08/AJ_300_WEB_0216.pdf
- [39] OPTOMECC. *Aerosol Jet 5X Systems* [online]. [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-5x-system/>
- [40] OPTOMECC. *LAB SYSTEMS AEROSOL JET ® 5X SYSTEM For 3D Printed Electronics Applications* [online]. 2017 [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ5X_System_Web3-17.pdf
- [41] OPTOMECC. *Aerosol jet marathon print engine ®* [online]. [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/08/AJ-Marathon-Print-Engine-Datasheet.pdf>
- [42] OPTOMECC. *Aerosol Jet Marathon Print Engine* [online]. [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-marathon-print-engine/>
- [43] DOLEŽAL, Ivan. Potisk nápojového skla sítotiskem. *Svět tisku* [online]. 2006 [vid. 2017-06-25]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2737
- [44] OPTOMECC. *Aerosol Jet 300 Series Systems* [online]. [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-300-series-systems/>

