

Moderní inkousty pro pokročilé aplikace

Lukáš Petřkovský

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Lukáš Petřkovský
Osobní číslo:	T17045
Studijní program:	B2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Moderní inkousty pro pokročilé aplikace

Zásady pro vypracování

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá možnostmi přípravy inkoustů pro materiálový tisk a jejich možnými aplikacemi. V praktické části se bakalářská práce věnuje přípravě takového inkoustu pro inkjetový tisk a jeho následnou charakterizací, tj. určením jeho viskozity a povrchového napětí.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Derby, B 2010, "Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution", *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, no. 1, pp. 395-414.
2. Hudd, A. 2010, "Inkjet Printing Technologies", in: S Magdassi (ed.), *The Chemistry of Inkjet Inks*, World Scientific Publishing, Singapore, pp. 3-18.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Urbánek, PhD.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **3. února 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na přípravu inkoustů pro materiálový tisk, zejména ink-jetový materiálový tisk. V teoretické části práce je pozornost věnována technikám tisku, druhům inkoustů, možným aplikacím materiálového tisku a v neposlední řadě také materiálům vhodným pro materiálový tisk, zejména pro výrobu sensorů. Praktická část této práce je věnována přípravě a charakterizaci inkoustů na bázi vody a oxidu wolframového pro materiálový tisk. Připravené inkousty pak byly testovány, zda jsou dobře tisknutelné, pomocí materiálové tiskárny Fujifilm Dimatix DMP-2800.

Klíčová slova: ink-jetový tisk, materiálový tisk, nanočástice WO_3 , sensory

ABSTRACT

This work is focused on preparation of inks for material printing, especially ink-jet material printing. In the theoretical part of the work, attention is paid to printing techniques, types of inks, possible applications of material printing and, last but not least, materials suitable for material printing, especially for the production of sensors. The practical part of this work is devoted to the preparation and characterization of WO_3 nanoparticles water-based inks. The prepared inks were then tested for printability using a Fujifilm Dimatix DMP-2800 material printer.

Keywords: ink-jet printing, material printing, nanoparticles of WO_3 , sensors

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Pavlu Urbánkovi Ph.D. za odborné vedení, za pomoc, trpělivost a rady při zpracování této práce. Další poděkování patří mé rodině a přítelkyni za podporu, ohleduplnost a důvěru ve mě vloženou při studiích. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Milanu Masařovi Ph.D. za pomoc při přípravě a mikroskopické charakterizaci nanočástic použitých v praktické části této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MATERIÁLOVÝ TISK	12
1.1 PRINCIP	12
1.2 TECHNIKY TISKU	12
1.2.1 Ink-jetový tisk	12
1.2.2 Sítotisk.....	14
1.2.3 Tamponový tisk.....	15
1.2.4 Offsetový tisk	15
1.2.5 Gravírování	16
2 INKOUSTY PRO INK-JETOVÝ TISK	17
2.1 KLASIFIKACE INK-JETOVÝCH INKOUSTŮ	17
2.1.1 Inkousty na bázi vody	17
2.1.2 Inkousty na bázi rozpouštědla	18
2.1.3 Inkousty vytvrditelné ultrafialovým zářením	18
2.1.4 Inkousty založené na změně fáze	18
2.2 VLASTNOSTI INKOUSTŮ	18
2.2.1 Stabilita inkoustů.....	18
2.2.2 Viskozita	19
2.2.3 Povrchové napětí	19
2.2.4 Hustota	20
2.2.5 Bezrozměrná kritéria	20
3 APLIKACE MATERIÁLOVÉHO TISKU	22
3.1 SENSORY	22
3.1.1 Chemické sensory	22
3.1.2 Tištěné sensory	22
3.2 BATERIE	23
3.2.1 Tištěné baterie	24
3.3 SOLÁRNÍ ČLÁNKY	25
3.3.1 Tisknutelné fotovoltaické články	26
4 MATERIÁLY VHODNÉ PRO POUŽITÍ U SENSORŮ	29
4.1 OXID WOLFRAMOVÝ	29
4.2 OXID ZINEČNATÝ	30
4.3 OXID MĚDNATÝ	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
5.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE.....	33

5.1.1	Nanočástice WO ₃	33
5.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ	34
5.3	PRŮBĚH EXPERIMENTU	34
5.3.1	Příprava inkoustů	34
5.3.2	Měření hustoty	34
5.3.3	Měření povrchového napětí.....	35
5.3.4	Měření viskozity.....	35
5.3.5	Materiálový tisk	36
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	38
6.1	VLASTNOSTI PŘIPRAVENÝCH INKOUSTŮ	38
6.2	TISK A OPTIMALIZACE TISKU	40
	ZÁVĚR	44
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
	SEZNAM TABULEK.....	55

ÚVOD

Materiálový tisk patří mezi metody nanášení tenkých vrstev. Od běžného inkoustového tisku se ten materiálový odlišuje v použití tisknutého materiálu. Tisknutý materiál je také nazýván inkoustem, ale obsahuje nějakou aktivní složku, která po vytištění plní požadovanou funkci. Pro materiálový tisk je možno použít běžné tiskařské metody jako například ink-jetový tisk, sítotisk, ofsetový tisk a další. Častou aktivní složkou inkoustů pro materiálový tisk jsou polovodičové materiály, které jsou již dlouhou dobu pro své vlastnosti používány při výrobě elektronických zařízení. A právě materiálový tisk se dá považovat za technologii, která by mohla v budoucnu částečně nahradit tradiční polovodičovou výrobu. Materiálový tisk s sebou nese oproti tradiční výrobě polovodičových součástek mnoho výhod, mezi které patří například nízká cena, nižší zátěž vůči životnímu prostředí, možnost výroby ohebných součástek a malé rozměry výsledných produktů. Jelikož se jedná o technologii tenkých vrstev, je možné připravit velmi tenká elektronická zařízení o relativně velké ploše.

Metoda materiálového tisku má mimo jiné velký potenciál při výrobě různých sensorů. Sensor je obecně zařízení, které převádí neelektrický podnět na elektrický signál v různých formách. Tyto sensory mohou v praxi sloužit jako detektory různých plynů ať už při kontrole výrobních procesů nebo při možném vystavení životu nebezpečných plynů. Mezi další možné aplikace materiálového tisku patří například výroba malých a ohebných baterií, solárních článků, ohebných displejů a mnoho dalších elektronických zařízení.

Cílem této bakalářské práce je připravit a charakterizovat inkousty na bázi vody a nanočástic WO_3 a ověřit, zda mohou být použity pro tisk navrženého motivu za pomoci materiálové tiskárny Fujifilm Dimatix DMP-2800, což skýtá v oblasti přípravy sensorů velký potenciál, neboť WO_3 je citlivý na celou řadu plynů a páry organických rozpouštědel.

Předkládaná práce je členěna na teoretickou část, kde je popsána technologie materiálového tisku, dále jsou rozebrány nároky na inkousty pro materiálový ink-jetový tisk. Ve třetí kapitole je nastíněno, kde všude je možné aplikovat materiálový tisk. Čtvrtá kapitola popisuje materiály, které mohou být úspěšně použity jako aktivní součást inkoustů pro materiálový tisk. Praktická část této práce popisuje samotnou přípravu inkoustů pro materiálový tisk z aktivního materiálu na vodné bázi. Dosažené výsledky jsou prezentovány

v šesté kapitole a jsou diskutovány v rámci dané problematiky a jsou rovněž zasazeny do jejího věcného rámce.

Závěr práce shrnuje dosažené poznatky při přípravě a charakterizaci inkoustů na bázi WO_3 a vodného nosného média pro materiálový tisk s využitím ink-jetové tiskárny Fujifilm Dimatix DMP 2800.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MATERIÁLOVÝ TISK

1.1 Princip

Fundamentálně je tisk chápán jako proces, při kterém je vrstva inkoustu přenesena z razítka na substrát. Materiálový tisk se od normálního inkoustového tisku odlišuje v druhu použitého tištěného materiálu. Zvláště mimořádnou pozornost získala v poslední době tištěná elektronika. Cílem je využít tiskařské technologie jako náhradu za konvenční fotolitograficky založenou polovodičovou výrobu. Toto by mělo vyústit v podstatné zlevnění realizace jednoduchých polovodičových systémů na levných, ohebných substrátech jako např. plasty a ocelové fólie. Tisk může být na základě zvolené metody proveden téměř na jakémkoliv typu substrátu. Metody tisku zahrnují různé techniky jako např. ink-jetový tisk, sítotisk, tampónový tisk, gravírování a offsetový tisk [1,2].

1.2 Techniky tisku

1.2.1 Ink-jetový tisk

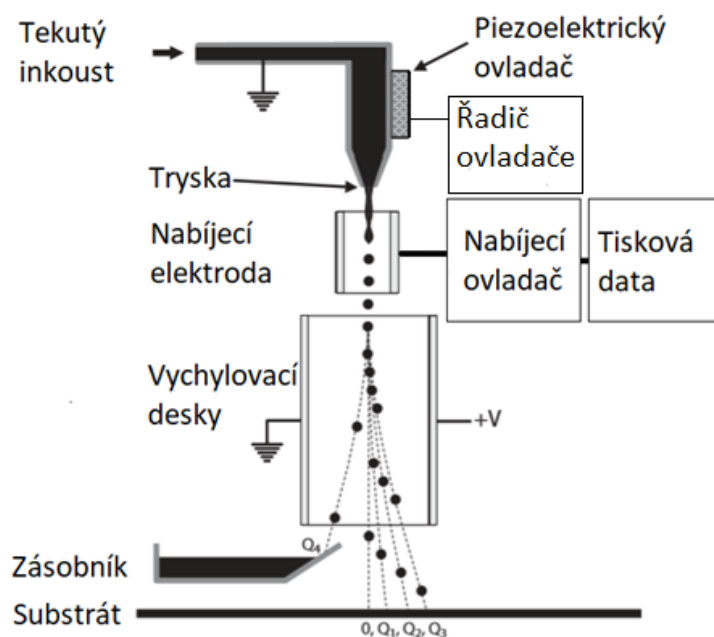
Způsob ink-jetové technologie byl vynalezen již v roce 1878 anglickým fyzikem lordem Rayleighem. Avšak komerčního využití se ink-jetové technologie dočkaly v 60. až 70. letech 20. století. Tato metoda tisku je momentálně velmi rozšířená ve všech odvětvích od malých domácích nebo kancelářských tiskáren až po široko-formátové tiskárny, které se používají v komerčním a průmyslovém odvětví. V porovnání s ostatními metodami je ink-jetový tisk považován za velmi cenově dostupný. Ink-jetový tisk je bezkontaktní metoda, která umožňuje depozici požadovaného množství materiálu (inkoustu) přímo ze zásobníku dle digitální šablony. Substrát není nijak limitován, může být pevný i ohebný. Při ink-jetovém tisku dochází k vytrysknutí inkoustu z tiskové hlavy ve formě velice malých kapek. Jedná se o primární technologii tisku, jelikož obraz je vytištěn přímo na podklad bez jakýchkoliv přechodných kroků. [1,3].

Na základě toho, jestli je inkoust vystřikován z tiskové hlavy přerušovaně nebo nepřerušovaně, může být tato metoda rozdělena na tzv. drop-on-demand ink-jetový tisk a kontinuální ink-jetový tisk. Vystřikování inkoustu z tiskové hlavy je řízeno na základě buď termických nebo mechanických procesů [1,2].

Pravděpodobně kvůli své relativní jednoduchosti a flexibilitě je ink-jetový tisk jednou z nejčastěji používaných technik v oblasti materiálového tisku, potažmo na poli tištěné elektroniky [4].

1.2.1.1 Kontinuální ink-jetový tisk

Při kontinuálním ink-jetovém tisku je inkoust vystřikován přes velice tenkou trysku. Vystřikování inkoustu probíhá ve formě kontinuálního proudu kapiček, které je aktivováno pomocí piezoelektrického ovladače. Tento proud kapiček prochází skrz nabíjecí elektrodu, kde jsou kapičky selektivně nabíjeny podle potřeby digitálního obrazu. Po selektivním nabíjení proud kapiček prochází přes vysokonapěťovou vychylovací desku, kde jsou nabité kapičky posílány v jednom směru a nenabitě kapky ve směru opačném. Nabité kapičky jsou nasměrovány směrem k substrátu za účelem vytvoření obrazu a nenabitě kapičky jsou nasměrovány do odtokového žlabu, ze kterého proudí zpět do zásobníku s inkoustem. Schéma kontinuálního ink-jetového tisku je znázorněno na Obrázku 1 [1,2,5].

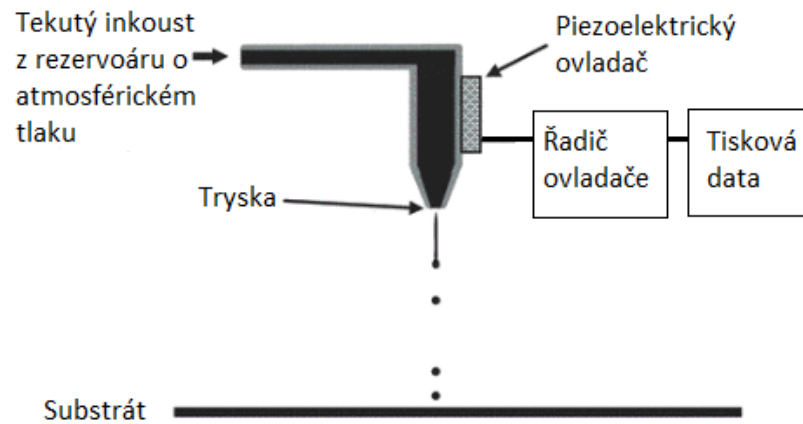


Obrázek 1 Schéma kontinuálního ink-jetového tisku, dle [5]

1.2.1.2 Drop-on-demand ink-jetový tisk

Při této metodě dochází k vystřikování malých kapiček inkoustu z trysek tlakovým pulzem pouze v případě potřeby na základě informace, která je zprostředkována digitálním vstupem. Podle způsobu vzniku tlakového pulzu jsou drop-on-demand tiskárny dále rozděleny na čtyři hlavní typy: termické, piezoelektrické, elektrostatické a akustické. Vysoká

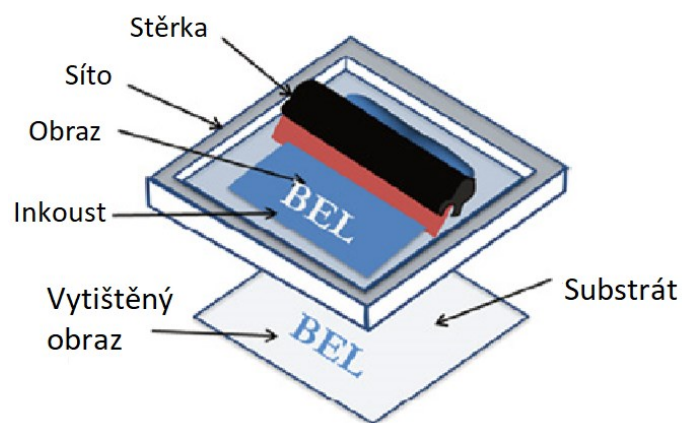
přesnost a malá velikost kapiček jsou klíčovými výhodami pro modelování funkčních materiálů. Schéma drop-on-demand ink-jetového tisku je znázorněno na Obrázku 2 [1,2,5].



Obrázek 2 Schéma drop-on-demand ink-jetového tisku, dle [5]

1.2.2 Sítotisk

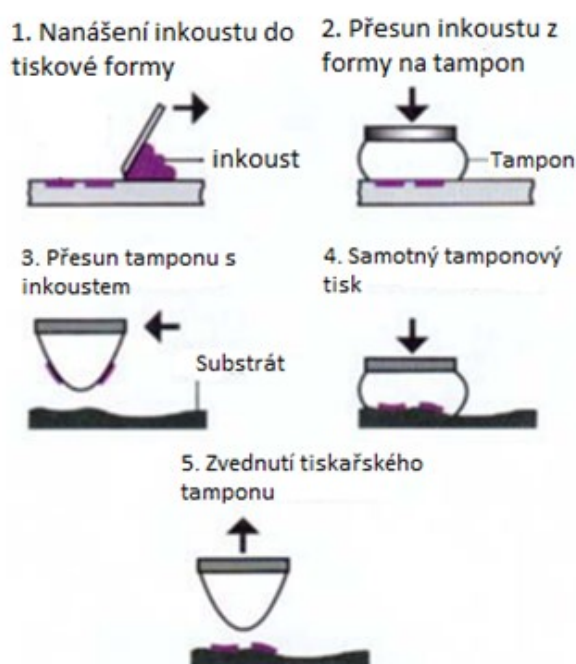
Sítotisk je jednoduchá a univerzální metoda, která je používána v mnoha aplikacích: výroba textilií nebo reklama. Základem sítotisku je používání šablon, které jsou složeny z rámu, na kterém je napnutá síťovina (ta je obvykle vyráběna z nylonu, polyesteru nebo nerezové oceli). Inkoust je pomocí stěrky protlačován přes prostupná místa v síťovině na průtiskový materiál. Pro tento proces jsou vyžadovány velice viskózní inkousty. Schéma sítotisku je zobrazeno na Obrázku 3 [2].



Obrázek 3 Schéma sítotisku, dle [2]

1.2.3 Tamponový tisk

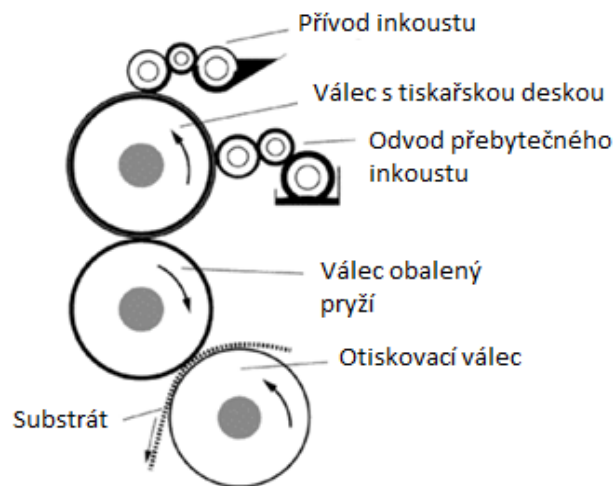
Základem tamponového tisku je nepřímý hlubotiskový proces. Výhodou této metody je schopnost tisknout na nepravidelné povrchy. Tamponový tisk je limitován relativně malými obrazy oproti např. sítotisku. V průběhu procesu tisku je použit prostřední prvek (tampón) pro přenos navrženého obrazu. Tyto tampóny jsou vyráběny převážně ze silikonu. Na začátku celého procesu je tisková forma naplněna inkoustem a pomocí ocelové čepele je odstraněn nadbytečný inkoust. Z tiskové formy je inkoust přenášen pomocí tampónu na substrát. Schéma tamponového tisku je zobrazeno na Obrázku 4 [2,6].



Obrázek 4 Schéma tamponového tisku, dle [6]

1.2.4 Offsetový tisk

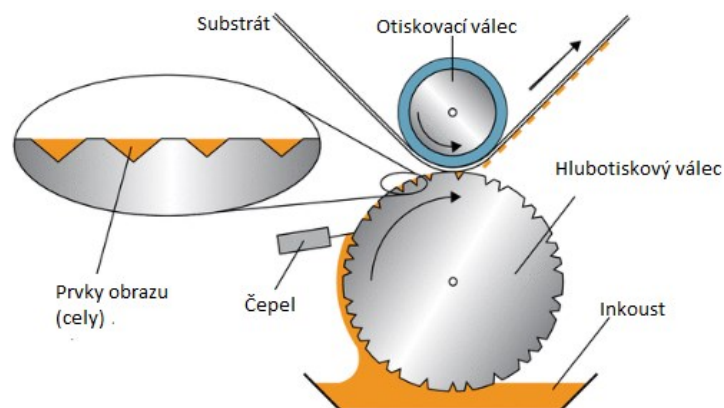
Litografický tisk byl vynalezen na konci osmnáctého století. V té době byla jako forma pro tisknutí použita forma z kamene, což je chápáno jako základ dnes velmi známého offsetového tisku. V dnešní době jsou však jako formy využívány kovové desky. Tato metoda tisku se vyznačuje velkou rychlostí tisku a kvalitou tisknutých produktů. Offsetový tisk patří mezi nepřímé metody tisku, tisknuté obrazy jsou nejdříve přesunuty z tiskové formy na válec potažený pryží. Desky používané pro offsetový tisk jsou vyráběny zejména z tenké vrstvy hliníku o tloušťce až 0,3 mm, pokryté tenkou fotocitlivou vrstvou o tloušťce okolo 1 μm [2,7].



Obrázek 5 Schéma offsetového tisku, dle [2]

1.2.5 Gravírování

Historie této techniky tisku sahá až do patnáctého století. Tato metoda je vhodná pro tisk ilustrací, jelikož vytváří velmi kvalitní obrazy. Mezi další výhody patří jednoduchost procesu tisknutí, vysoký výkon a konzistentní kvalita vyrobených produktů. Nevýhodou této metody je drahá a dlouhotrvající příprava hlubotiskového válce. Produkty gravírování bývají nejčastěji časopisy, katalogy, poštovní známky a bankovky. Podstatou této metody je použití hlubotiskového válce, do kterého jsou prvky obrazu vyryty nebo vyleptány. Těmto vyrytým nebo vyleptaným prvkům se říká cely. Během procesu tisku je inkoust nanesen na hlubotiskový válec a poté je setřen z netisknoucích ploch čepelí. Poté je inkoust přenesen za vysokého tlaku, který je zajištěn otiskovacím válcem, na substrát [7].



Obrázek 6 Schéma gravírování, dle [7]

2 INKOSTY PRO INK-JETOVÝ TISK

2.1 Klasifikace ink-jetových inkoustů

Inkousty vhodné pro ink-jetový tisk mohou být rozděleny do čtyř hlavních skupin:

- inkousty na bázi vody,
- inkousty na bázi rozpouštědla,
- inkousty založené na změně fáze,
- inkousty vytvrditelné ultrafialovým zářením [1].

Pro získání barevnosti inkoustu jsou používána barviva nebo pigmenty. Inkousty s obsahem barviva mají brilantní barvy a excelentní kontrast, ale s uplynulým časem mají tendenci vybledávat. Inkousty obsahující pigmenty velice rychle vysychají, přibližně stokrát rychleji než inkousty na bázi barviva. Jsou stabilní, je možno je po dlouhou dobu skladovat a nevybledávají, proto jsou vhodné pro venkovní aplikace [2].

2.1.1 Inkousty na bázi vody

Inkousty na bázi vody jsou nejběžnějším typem inkoustu pro domácí a kancelářské tiskárny. Jejich výhodou je relativní cenová dostupnost a šetrnost k životnímu prostředí. Tyto inkousty vyžadují porézní (papír) nebo speciálně upravené substráty [1,2].

V Tabulce 1 je uvedeno z jakých složek se běžně skládá obecný inkoust na bázi vody a jakou mají jednotlivé složky funkci.

Tabulka 1 Obecné složení inkoustu na bázi vody, dle [2]

Složka	Množství	Funkce
Voda	50-90 %	Nosné médium
Pigment/barvivo	1-15 %	Barva
Zvlhčovač	5-50 %	Udržuje trysky neucpané
Surfaktanty	0,1-2 %	Zlepšuje smáčení inkoustu
Pryskyřice	0,2-10 %	Zvyšuje stabilitu tisku
Biocidy/Fungicidy	0,02-0,4 %	Proti růstu mikroorganismů
Pufr	0,05-1 %	Upravuje pH
Antikorozní ochrana	0,01-1 %	Zpomaluje korozi
Celkem	100 %	

2.1.2 Inkousty na bázi rozpouštědla

Na rozdíl od inkoustů na bázi vody není u inkoustů na bázi rozpouštědla nosným médiem voda ale většinou organické rozpouštědlo. Mezi tato organická rozpouštědla patří např. etanol, propanol a toluen. Jejich nevýhodou je hořlavost a toxicita, jelikož jsou při vysychání uvolňovány páry rozpouštědla. Jejich výhodou jsou jejich variabilní vlastnosti, které umožňují tisk na různé typy substrátu a např. možnost pracovat s různými polymerními materiály ve formě roztoku [1,2].

2.1.3 Inkousty vytvrditelné ultrafialovým zářením

Inkousty vytvrditelné ultrafialovým zářením jsou složeny z akrylových monomerů a iniciátorů. Po vytisknutí je inkoust vytvrzen za pomoci silného ultrafialového záření. Výhodou těchto inkoustů je neucpávání trysky a rychlé schnutí. Vytvrzený film inkoustu je lesklý a odolný proti chemikáliím a vlhkosti. Nejsou produkovány těkavé organické látky, protože inkoust je vytvrzen ultrafialovým zářením namísto odpařením rozpouštědla. Výsledkem tisku za pomoci těchto inkoustů jsou mnohem sytější barvy, větší rozsah barev a ostřejší detaily obrazu než u inkoustů na bázi rozpouštědla a na bázi vody. Tyto inkousty nalézají využití ve všech formách digitálního tisku [1,8].

2.1.4 Inkousty založené na změně fáze

Základním principem inkoustů založených na změně fáze je, že při pokojové teplotě je inkoust v tuhé fázi. Teplota inkoustu je při tisku zvýšena nad teplotu tání a inkoust je vytrysknut z tiskové hlavy ve formě roztavených kapiček. Jakmile kapičky dopadnou na substrát, tak jsou rychle ochlazeny a udržují si svůj tvar bez ohledu na povrchovou strukturu substrátu. Kromě rychlého vysychání (tuhnutí) je další výhodou těchto inkoustů neprůhlednost a šetrnost k životnímu prostředí. Jejich největší nevýhodou je špatná trvanlivost a špatná odolnost vůči oděru. Inkousty založené na změně fáze se používají v různých aplikacích jako např. tištění čárových kódů na neporózní substráty [1,9].

2.2 Vlastnosti inkoustů

2.2.1 Stabilita inkoustů

Za stabilní inkoust je považován ten inkoust, ve kterém jsou všechny jeho vlastnosti konstantní v závislosti na čase. Stabilita inkoustů je dána měřením různých parametrů inkoustu za určitý delší časový úsek. V praxi jsou tato měření vedena po skladování

v akcelerujících podmínkách (vysoká nebo nízká teplota). Inkousty na bázi rozpouštědla (tedy i na bázi vody) jsou považovány za stabilní, nedochází-li k fázové separaci. V případě inkoustů, které obsahují malé pevné částice, se stabilita vyznačuje odporem k seskupování částic a sedimentaci. K zabránění seskupování molekul jsou používána aditiva. Těmito látkami je také ovlivňována sedimentace [1,10].

2.2.2 Viskozita

Viskozita inkoustů má značný vliv na jejich chování během vystřikování a přibližování se substrátu. Viskozita ink-jetových inkoustů je velmi nízká, obvykle pod $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, v závislosti na tiskové hlavě. Většina používaných ink-jetových inkoustů se řídí dle Newtonova zákona viskozity. To znamená, že mají konstantní viskozitu v širokém rozsahu smykové rychlosti [1].

Viskozita tekutin se projevuje při pohybu skutečných kapalin. Pohybují-li se sousední vrstvy kapaliny odlišnými rychlostmi, vzniká na jejich rozhraní smykové tření bránící pohybu. Pomalejší vrstva je zrychlována a rychlejší zpomalována. Toto zmenšení rychlosti je způsobeno tečnou silou, která je vyvolána vazkostí tekutiny neboli viskozitou. Bývá rozlišována viskozita dynamická a kinematická. Podle Newtonova zákona viskozity je dynamická viskozita koeficientem úměrnosti mezi tečným napětím a gradientem rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu:

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1)$$

Jednotkou dynamické viskozity v systému SI je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, často se užívá také jednotka Pa.s, v anglické literatuře lze také nalézt jednotku Poise [P] [pojs], přičemž platí: $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P}$; $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Kinematická viskozita, jejíž jednotkou v systému SI je $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, je definována jako dynamická viskozita podělená hustotou [11]:

$$V = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

2.2.3 Povrchové napětí

Povrchové napětí je primární faktor určující tvorbu kapiček inkoustu a v případě ink-jetových inkoustů je doporučená hodnota v rozmezí 22-45 mN/m. Povrchové napětí může být ovlivněno použitím povrchově aktivní látky a zvolením správného složení rozpouštědla. Povrchově aktivní látka bývá v inkoustech zastoupena ve velmi malých koncentracích, někdy okolo 1 hmotnostního procenta, většinou dokonce až pod 0,1 hmotnostního procenta.

To znamená, že i mírná změna v koncentraci povrchově aktivní látky může zapříčinit významnou změnu ve vlastnostech inkoustu [1,2].

Příčinou povrchového napětí jsou síly působící mezi molekulami kapaliny. V kapalině je každá molekula obklopena dalšími molekulami ze všech stran, takže se jejich síly vyrovnávají. Na rozhraní jsou molekuly obklopeny pouze z jedné strany, jejich síly nejsou vyrovnávány z druhé strany, a proto na molekuly působí síla směřující dovnitř kapaliny. Povrchové napětí je definováno jako síla vztažená na jednotku délky myšleného řezu povrchem kapaliny [12]:

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (3)$$

2.2.4 Hustota

Hustota materiálu je definována jako hmotnost na jednotku objemu (v soustavě jednotek SI je jednotkou hustoty $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Hustota také slouží k převádění viskozity, v případě, že kinematická viskozita je standardní hodnotou měření. Je-li inkoust během procesu tisku zahříván, je nutné vzít v potaz teplotní závislost hustoty [10].

2.2.5 Bezrozměrná kritéria

K nalezení vyhovujících korelací mezi viskozitou, povrchovým napětím a hustotou nejenom inkoustů bylo vynaloženo značné úsilí. Složení a vlastnosti použitých ink-jetových inkoustů může být analyzováno za pomoci bezrozměrných kritérií. Mezi tato kritéria patří – Reynoldsovo kritérium (Re), Weberovo kritérium (We), kapilární číslo (Ca) a Ohnesorgovo kritérium (Oh), jehož obrácená hodnota je značena symbolem Z . Platí následující vztahy:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot A}{\eta} \quad (4)$$

$$We = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot A}{\sigma} \quad (5)$$

$$Ca = \frac{We}{Re} = \frac{v \cdot \eta}{\sigma} \quad (6)$$

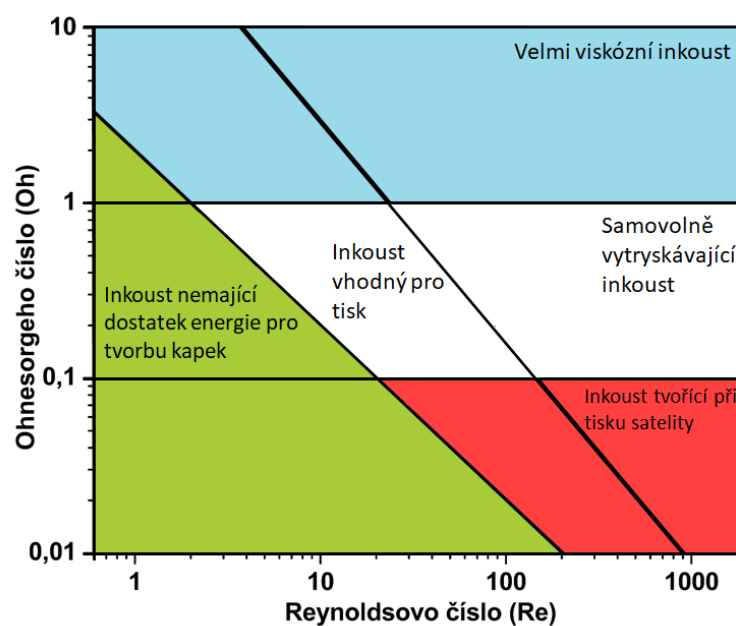
$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma \cdot \rho \cdot A}} = Z^{-1} \quad (7)$$

$$La = Oh^{-2} = \frac{Re}{Ca} = \frac{\rho \cdot \sigma \cdot A}{\eta^2} \quad (8)$$

, kde A je charakteristická délka související s rozměry tiskové trysky, η je dynamická viskozita, v je rychlost pohybující se kapky inkoustu po vytrysknutí z tryskové hlavy, ρ je hustota a σ je povrchové napětí. Obecně byl rozsah tisknutelnosti určován obrácenou

hodnotou Oh , tedy číslem Z . Bylo však prokázáno, že hodnota čísla Z je nedostatečná pro popis dynamiky tvorby kapek, jelikož všechny dynamické veličiny jsou v jeho rovnici vyrušeny a zbývají pouze materiálové konstanty a charakteristická délka. Hodnota Re představuje poměr mezi viskózními a setrvačnými silami v pohybující se kapalině. Hodnota We je závislé na poměru mezi setrvačností a povrchovým napětím. Hodnota Oh reflektuje fyzikální vlastnosti kapaliny. Hodnota Ca vyjadřuje poměr mezi viskózními a kapilárními silami [13].

Jak bylo zmíněno výše, inkousty je možné popsat různými bezrozměrnými kritérii. Ty jsou vynášeny do závislostí, podle kterých se dá jednoduše určit, zdali je inkoust o daných fyzikálních vlastnostech vhodný pro tisk. Jednou z takových závislostí popisující vhodnost inkoustu je závislost Oh na Re (Obrázek 7). Tento diagram ukazuje čtyřúhelníkové pole, ve kterém inkousty nabývají hodnot vhodných pro tisk. Hodnota Oh by měla být v rozsahu 0,1 až 1, to je v digramu znázorněno pomocí horizontálních čar. Je-li hodnota nižší, pak je inkoust příliš řídký a při tisku se tvoří tzv. satelitní kapičky. Je-li naopak tato hodnota vyšší, tak je inkoust příliš viskózní. Hodnota Re udává, bude-li inkoust optimálně „vytékat“ z tiskové hlavy. Pokud bude Re číslo malé, inkoust bude špatně vytékat a nebude ochotně tvořit kapky (hranici v diagramu tvoří levá diagonální čára), nebo naopak jestli bude Re vysoké, inkoust bude z tiskové hlavy samovolně vytékat (tuto hranici v diagramu představuje pravá diagonální čára). Proto by tedy hodnota Re měla být v rozsahu 3 až 130 [14].



Obrázek 7 Závislost Oh na Re znázorňující oblast tisku, dle [14]

3 APLIKACE MATERIÁLOVÉHO TISKU

3.1 Sensory

Sensor je zařízení, které převádí různé neelektrické podněty na elektrický signál. Výsledný elektrický signál se může měřit různou formou – např. se měří změna proudu, napětí anebo kapacity. Je složen ze dvou hlavních částí: aktivní složky (materiálu) a převodníku. Sensory jako takové představují část rozhraní mezi fyzikálním světem a světem elektronických zařízení. Nikdy nepracují samotné, vždy jsou součástí většího systému [15].

Mezi důležité vlastnosti popisující sensory patří správnost, přesnost a citlivost. Správnost udává, jak blízko je naměřená hodnota ke skutečné hodnotě. Teplotní sensor, který ukazuje teplotu 20,1 °C je správnější než ten, který ukazuje teplotu 22 °C, jestliže skutečná teplota je 20 °C. Přesnost charakterizuje schopnost senzoru detekovat (měřit) údaje blízké odpovídající pravé hodnotě veličiny, která je měřena. Přesnost je tím větší, čím menší jsou odchylky od této hodnoty. Citlivost senzoru je definována jako změna ve výstupu senzoru na jednotku změny měřeného parametru. Jinak řečeno, jedná se o nejmenší absolutní velikost změny, kterou lze detekovat měřením. Citlivost je absolutní veličina [16].

3.1.1 Chemické sensory

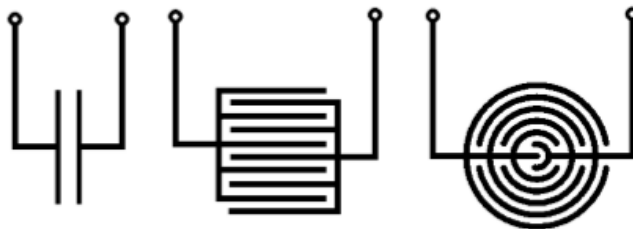
Chemické sensory jsou používány k identifikaci chemických sloučenin. Princip fungování těchto senzorů je jednoduchý. Je známo mnoho materiálů, které jsou citlivé v přítomnosti různých chemikálií. Většina materiálů podléhá oxidaci, jestliže jsou po dlouhou dobu vystavené vzduchu. Významná vrstva oxidu na povrchu kovu může změnit materiálové vlastnosti. Citlivost jednotlivých materiálů vůči specifickým chemikáliím je používána jako základní princip mnoha chemických senzorů. Chemické sensory je možno rozdělit dle fáze analytu na plynové a kapalinové sensory a sensory pevných částic. U plynových senzorů jsou pro zvýšení reaktivity s detekovanými plyny používány kovové katalyzátory, které jsou umístěny na povrchu senzoru. Díky nim jsou urychlovány chemické reakce a je zvýšena citlivost senzoru [16, 17].

3.1.2 Tištěné sensory

Tištěný sensor je tenké zařízení, které je jednoduše aplikovatelné tam, kde není možné použít tradiční sensory kvůli jejich rozměrům. Tištěné sensory se momentálně začínají vyrábět a uplatňovat v různých aplikacích. Mezi výhody tištěných senzorů patří

malé rozměry, nízká cena a jednoduchý výrobní proces. Typickými příklady běžně používaných tištěných sensorů jsou teplotní, chemické, elektrické, akustické a tlakové sensory [16, 18].

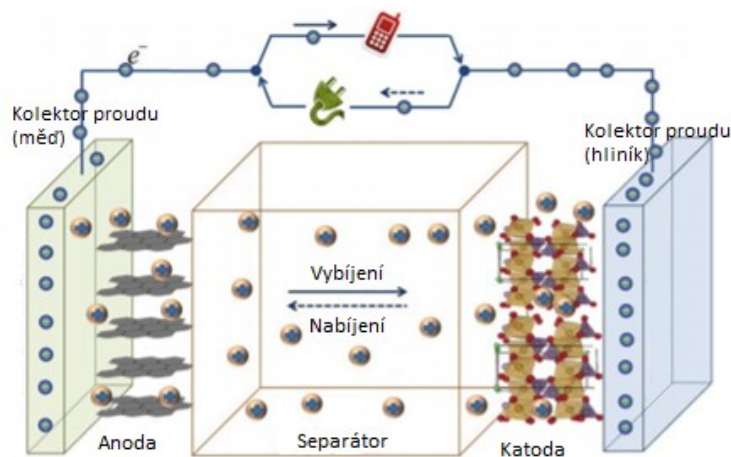
Nejjednodušší část obvodu senzoru může být vytvořena pouze za pomoci dvou elektrod, které jsou v kontaktu s plochou pokrytou vrstvou citlivého materiálu (Obrázek 8). Ve spojení s tištěnou elektronikou je často zmiňován pojem „interdigit“. Tento termín odkazuje na nejčastěji používaný tvar elektrod. Ty jsou formovány v rovině dvou vzájemně propojených, hřebenovitých, paralelních periodicky se opakujících vodivých drah. Tyto elektrody jsou ve styku s citlivým materiálem anebo přímo v něm. Vytvořením této struktury vznikne sensor se dvěma póly [19].



Obrázek 8 Jednoduché znázornění interdigitů, dle [19]

3.2 Baterie

Historie baterií sahá až do 18. století, kdy Italský fyzik Alessandro Volta vyrobil první zdroj stejnosměrného proudu. Baterie je shromáždění elektrických článků zapojených sériově anebo paralelně k dosažení určitého napětí a proudu. Jsou zdrojem stejnosměrného proudu. Je možno je rozdělit na primární a sekundární baterie. Primární baterie mohou být vybity pouze jednou, není možno je nabít. Sekundární baterie je možno nabít vícekrát. Bez ohledu na dělení baterií jsou vždy hlavními komponenty: pozitivní elektroda (katoda), negativní elektroda (anoda) a separátor. Při nabíjení ionty putují z katody na anodu, u vybíjení je tomu přesně opačně. Obrázek 9 znázorňuje schéma baterie při nabíjení a vybíjení [20].



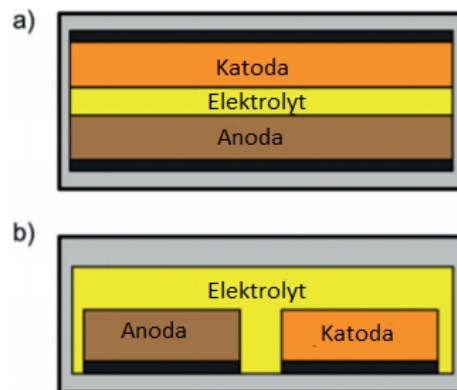
Obrázek 9 Schéma vybití a nabíjení baterie, dle [20]

3.2.1 Tištěné baterie

Předpokládá se, že technologie tištěných baterií by mohla zaplnit mezeru na trhu konvenčně vyráběných baterií. Zejména v aplikacích, u kterých je hlavním kritériem velikost a hustota energie. Stejně jako u ostatních druhů tištěné elektroniky patří mezi výhody tištěných baterií malá tloušťka, ohebnost a nízká cena. Na druhou stranu, tištěné baterie mají momentálně nedostatky v oblasti optimalizace výrobních procesů. Také je potřeba věnovat čas na výzkum vhodných inkoustů. Nejčastěji používaným typem tištěných baterií jsou baterie na bázi lithia a zinku. Důležitým faktem je, že jsou tištěné pouze elektrody. Separátor není tištěn, jelikož je složen z porózní membrány a obsahuje roztok elektrolytu. Výhody tištěných lithium-iontových baterií tkví v kompaktnosti, lehkosti a vysoké hustotě energie. Tištěné baterie na bázi zinku mají nízký vnitřní odpor a nízkou výrobní cenu, řadí se ale mezi primární baterie-nelze je tedy dobíjet. Tištěné baterie jsou nejčastěji vyráběny v sendvičové nebo paralelní architektuře [7,20,21].

Sendvičová architektura tištěných baterií je identická s architekturou konvenčně používaných baterií. Toto uspořádání vede k nízkému vnitřnímu odporu vlivem malé vzdálenosti, kterou musí ionty překonat mezi anodou a katodou. Krátké vzdálenosti mezi anodou a katodou zapříčiňují také kratší dobu nabíjení. Paralelní architektura je využívána v roztažitelných bateriích. Riziko zkratování během mechanického namáhání je minimální. Při tomto uspořádání není nutné použít separátor. Rozdílem oproti sendvičové struktuře je, že katoda a anoda jsou umístěny vedle sebe [7,21].

Nejpoužívanější architektury tištěných baterií jsou schematicky zobrazeny na Obrázku 10.

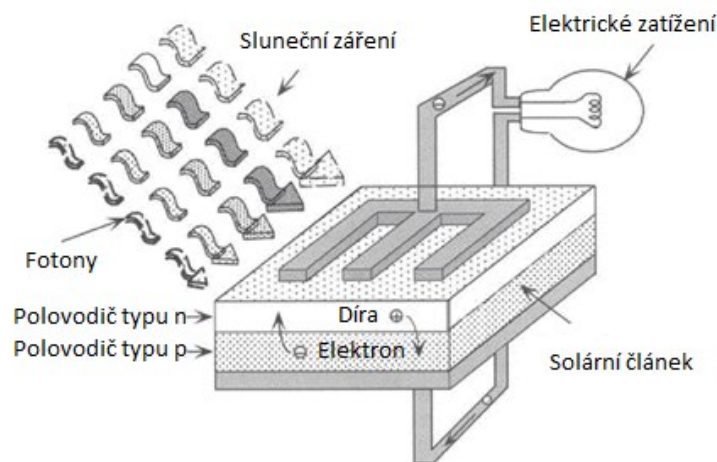


Obrázek 10 a) sendvičová architektura tištěných baterií, b) Paralelní architektura tištěných baterií, dle [21]

3.3 Solární články

Jedná se o polovodičová zařízení, která využívají fotovoltaický jev k přímé tvorbě elektrické energie ze slunečního záření. Solární články typicky obsahují PN přechod. PN přechod je tvořen polovodičem typu P a typu N. V polovodičích typu N je přebytek záporně nabitých částic (elektronů) a v polovodičích typu P jich je nedostatek. Tento nedostatek elektronů bývá označován jako „kladné díry“. PN přechod zabraňuje volnému pohybu elektronů z místa jejich nadbytku do místa jejich nedostatku [22].

Proces výroby elektrické energie pomocí solárních článků lze popsat následovně. Fotony vstupují do solárního článku skrze povrch. Fotony o vysoké energii (blízké ultrafialovému záření) jsou absorbovány blízko povrchu. Fotony z druhého konce viditelného spektra jsou absorbovány výrazně hlouběji. Při absorpci fotonu dochází k anihilaci fotonu a jeho energie v polovodiči uvolní elektron od atomu. Ve vrstvě typu P tedy stále přibývají částice se záporným nábojem. Nahromaděním volných elektronů vzniká mezi vrstvou P a N elektrické napětí. Jakmile připojíme spotřebič, vznikne uzavřený elektrický obvod (Obrázek 11) [22].



Obrázek 11 Nákres solárního článku zapojeného do elektrického obvodu, dle [22]

3.3.1 Tisknutelné fotovoltaické články

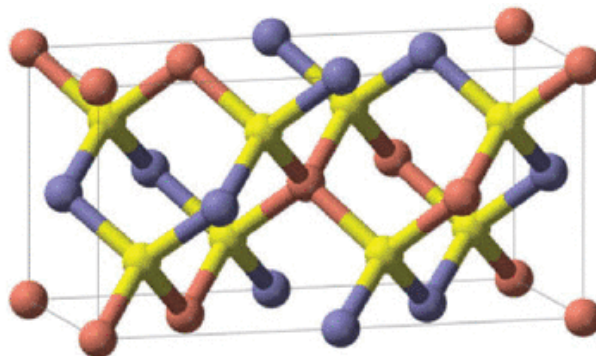
Důležitou podmínkou pro tisknutelnost solárních panelů je možnost mokrého zpracování – technika procesu z roztoku. Tento požadavek splňují 3 typy solárních panelů:

- solární článek obsahující měď, indium, galium a selen (CIGS),
- perovskitové solární články (PSC),
- organické solární články (OPV).

Ve všech třech případech se jedná o tenkovrstvé fotovoltaické články [22].

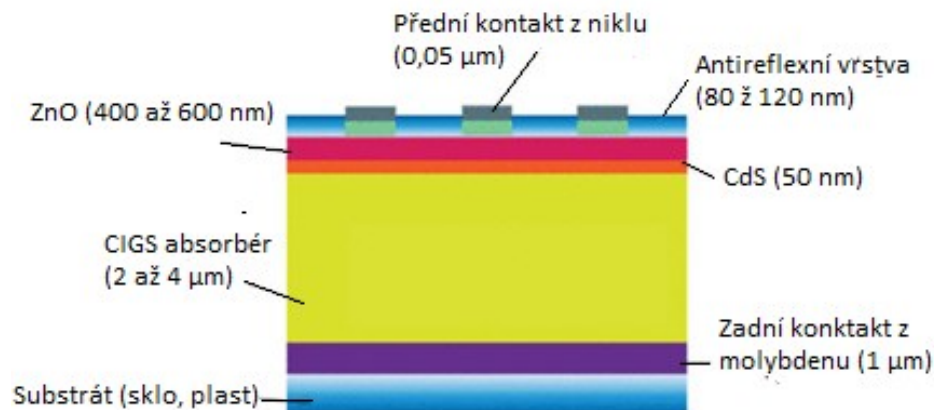
3.3.1.1 CIGS solární články

Ze všech tří druhů tisknutelných solárních článků je pouze tento typ komerčně dostupný. Základem těchto fotovoltaických článků je materiál CIGS – polovodič typu p, obsahující atomy mědi, india, galia a selenu. Tento materiál má shodnou krystalovou strukturu s chalkopyritem (Obrázek 12) [23].



Obrázek 12 Krystalová struktura sloučeniny CIGS (červená barva – atomy mědi; modrá barva – atomy india a galia; žlutá barva – atomy selenu), dle [23]

Důležitou součástí je také CdS, což je polovodič typu n. Právě na rozhraní materiálů CIGS a CdS je lokalizován PN přechod. Polovodič CIGS dokáže absorbovat většinu spektra slunečního světla a má velmi velký extinkční koeficient. Vrstva ZnO v článku slouží jako materiál, který transportuje elektrony. Naopak molybden slouží jako materiál transportující kladné díry, zároveň je také zadní kontaktem. [22]

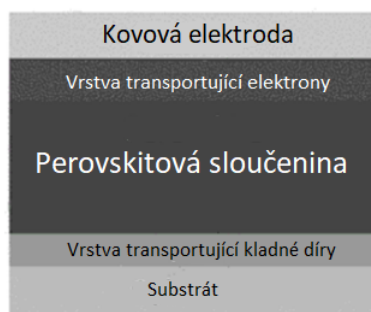


Obrázek 13 Struktura solárního panelu CIGS, dle [23]

Většinou jsou vyráběny vakuovým pokovováním. Mohou být však i vytisknuty z prekurzorů. Na skleněném substrátu je dosahováno větší účinnosti nežli na plastovém substrátu. To platí obecně pro všechny tenkovrstvé solární články. Velkou výhodou použití tištění nebo nanášení při výrobě těchto solárních článků je malé množství odpadního materiálu. Při běžně používaných vakuových procedurách vzniká velké odpadní množství india a galia, což způsobuje rychlejší ztenčování zásob [23]. Momentálně největší naměřená hodnota účinnosti CIGS je 22,9 % [24].

3.3.1.2 Perovskitové solární články

Jsou považovány za velmi slibnou technologii v oblasti fotovoltaických zařízení. V roce 2009 dosahovaly účinnosti pouhých 3,8 %, zatím co v roce 2019 se účinnost vyšplhala až na hodnotu 24,2 % [23]. Jsou složeny z perovskitové sloučeniny, vrstvy přemísťující elektrony, vrstvy přemísťující kladné díry a kovové elektrody. Tyto vrstvy jsou sekvenčně nanášeny na vodivý substrát (Obrázek 14). Jejich výroba nevyžaduje drahé a víceetapové procesy za vysokých teplot. Proto je možné je vyrobit materiálovým tiskem i ve standardních laboratorních podmínkách. Tyto solární články mají však i své nedostatky. Perovskitový absorber světla má problémy se stabilitou ve vlhkém prostředí a při vysoké teplotě [25].



Obrázek 14 Nákres struktury perovskitového solárního článku, dle [25]

Obecný vzorec halogenidových perovskitů je ABX_3 . Kde A je jednomocný kationt (Cs^+ , CH_3NH_3^+ nebo $\text{HN}=\text{CHNH}_3^+$), B je dvoumocný kationt (Pb^{2+} nebo Sn^{2+}) a X je halogenidový aniont (I^- , Br^- nebo Cl^-) [23].

3.3.1.3 Organické solární články

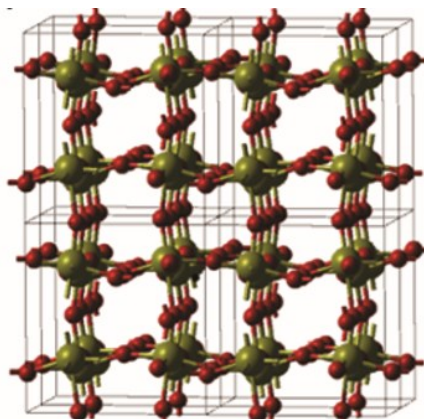
Organický solární článek je zařízení, ve kterém jsou použity polovodičové organické materiály pro absorpci světla a přenos náboje. Optický absorpční koeficient organických molekul je velký. Tím pádem může být velké množství slunečního záření pohlceno pomocí velmi tenké vrstvy tohoto organického materiálu. Organické solární články nabízejí nepřekonatelný poměr váhy k výkonu. Většina materiálů, ze kterých se vyrábějí, je rozpustná. A proto může být pro jejich výrobu použita řada tiskařských i nanášecích metod. Momentálně je však jejich problémem účinnost a dlouhodobá stabilita. Běžný organický solární článek se skládá z transparentní anody, která je tvořena jednou nebo dvěma vrstvami organického polovodiče. A kovového vodiče, který představuje katodu. Po absorbování světla dochází tedy k vytvoření nosiče náboje, v případě organických solárních článků je tímto nosičem náboje exciton [23].

4 MATERIÁLY VHODNÉ PRO POUŽITÍ U SENSORŮ

Velmi známou vlastností oxidů kovů je, že při zvýšené teplotě a v přítomnosti redukujících plynů (etanol, metan atd.) dochází ke změně jejich vlastností. Když jsou oxidy kovů udržovány při vyšší teplotě, tak obklopující plyny reagují s kyslíkem v těchto oxidech. Reakce plynů s kyslíkem zapříčiňuje změny ve vodivosti. Mezi oxidy kovů, které je možné použít pro výrobu sensorů, patří například SnO_2 , ZnO , V_2O_5 , WO_3 a další. Jedná se o polovodiče typu p a typu n, přednostně však typu n [26].

4.1 Oxid Wolframový

Oxid wolframový je chemická sloučenina obsahující atomy kyslíku a atom přechodného kovu – wolframu. Řadí se mezi polovodiče typu n s širokým band gapem. Hodnota band gapu se liší s ohledem na strukturu. Naměřené hodnoty band gapu se pohybují v rozmezí 2,5 eV až 3,2 eV. V případě nanočástic WO_3 band gap stoupá se snižujícími se rozměry částic. Nanočástice WO_3 je možno vyrobit syntézou z plynné nebo z kapalně fáze. Syntéza z plynné fáze může být čistě fyzikálním procesem – zdroj materiálu ve formě pevné látky nebo prášku je odpařován vlivem dodávání energie mnoha metodami. Syntéza z kapalně fáze nabízí lepší kontrolu morfologie a může být provedena za relativně nízkých teplot oproti syntéze z plynné fáze. Oxid wolframový má mnoho rozdílných krystalových struktur, ty jsou závislé na teplotě. Nejvíce se vyskytující a nejstabilnější z nich je monoklinická struktura (Obrázek 15), tu lze pozorovat při teplotách od 17 °C do 300 °C [27-29].

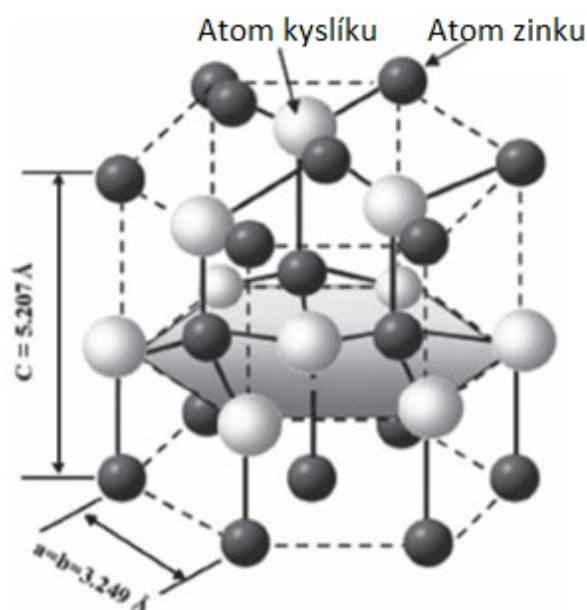


Obrázek 15 Monoklinická krystalová struktura oxidu wolframového, dle [29]

Oxidy wolframu jsou již dlouhou dobu známé pro své použití v senzorech, zejména v plynových senzorech. Mimo to se oxidy wolframu používají také v jiných elektrochemických a fotokatalytických zařízeních. Odezva plynových sensorů založených na oxidech wolframu spočívá ve změně vodivosti. Mechanismus procesu plynového sensoru na bázi WO_3 lze popsat následovně. V přítomnosti oxidujících plynů (například ozon, NO_2 a CO_2) jsou volné elektrony na povrchu zachyceny. Tyto elektrony redukují oxidující plyny, přičemž vznikají kyslíkové ionty a ty jsou adsorbovány na povrchu oxidu wolframového. Důsledkem je snížení vodivosti, které je úměrné množství adsorbovaného plynu. Naopak v přítomnosti redukujících plynů (H_2 , H_2S , NH_3 , CS_2 , CO a páry alkoholů) dochází ke zvýšení vodivosti. Elektrochemický efekt WO_3 je silně závislý na krystalové stechiometrii [28].

4.2 Oxid zinečnatý

Oxid zinečnatý je polovodič typu n s širokým band gapem o hodnotě 3,37 eV při pokojové teplotě. Vyskytuje se ve stabilní hexagonální wurtzitové krystalové struktuře (Obrázek 16). Vodivé vlastnosti oxidu zinečnatého jsou primárně řízeny elektrony generovanými kyslíkovými vakancemi a zinkovými intersticiálními atomy. Chemická vazba mezi zinkem a kyslíkem v molekule oxidu zinečnatého je převážně iontová [30,31].



Obrázek 16 Hexagonální wurtzitová krystalová struktura oxidu zinečnatého, dle [30]

Oxid zinečnatý je unikátní materiál, který přitahuje pozornost mnohých výzkumů týkajících se různých aplikací. Jeho nanostruktury jsou zkoumány pro použití v solárních

článcích. Tyto nanostruktury mohou nalézt uplatnění například v senzorech, převodnicích nebo jiných mikro nebo nano-elektromechanických systémech – má totiž piezoelektrické vlastnosti. Elektrická vodivost oxidu zinečnatého je silně ovlivňována chemickým složením povrchu. A proto je právě vhodným materiálem pro výrobu sensorů a detektorů. Pro použití u sensorů jsou nejpreferovanějšími nanostrukturami nanodrátky a nanotyčinky. Tyto nanostruktury totiž nabízejí dobrý poměr povrchu k objemu a snadný sběr elektrických signálů [31].

4.3 Oxid měďnatý

Oxid měďnatý se řadí mezi polovodiče typu p a má relativně nízkou hodnotu band gapu, přibližně 1,2 eV. Je základem některých vysokoteplotních supravodivých materiálů. Tento materiál je vhodný pro výrobu sensorů těkavých organických látek. Také může být použit pro výrobu bio-sensorů a sensorů plynů a vlhkosti. Tyto sensory nacházejí široké uplatnění v praxi. Kromě aplikací v senzorech, lze tento materiál použít na příklad ve fotodetektorech, superkondenzátorech a při fotokatalýze. Díky svým vynikajícím fyzikálním a chemickým vlastnostem získávají velkou pozornost zejména nanostruktury oxidu měďnatého. Nedávné výzkumy prokázaly, že tyto nanostruktury mohou být použity pro výrobu různých anorganicko-organických nanokompozitů s velkou tepelnou vodivostí, elektrickou vodivostí a odolností vůči vysoké teplotě [19].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Použité chemikálie

Nanočástice WO_3 – funkční část inkoustu.

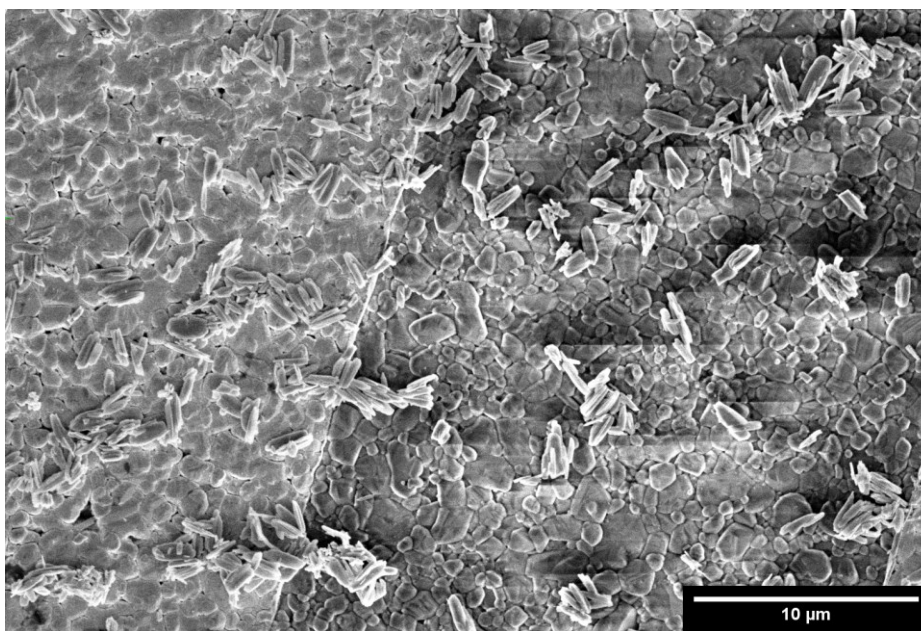
Destilovaná voda – nosné médium inkoustu.

BYK-348 – látka ovlivňující povrchové napětí, od firmy ALTANA.

DISPERBYK-190 – dispergační činidlo, od firmy ALTANA.

5.1.1 Nanočástice WO_3

Dvourozměrné nanodestičky WO_3 byly syntetizovány ve dvou krocích. V prvním kroku byla jako prekurzor použita kyselina peroxowolframová, která byla připravena rekrystalizací z roztoku získaného rozpuštěním 2 g prášku wolframu ve 20 ml peroxidu vodíku. Wolframový prášek byl rozpuštěn za intenzivního míchání a zvýšené teploty (50 až 60 °C), což vedlo ke vzniku průhledného roztoku. Odpařováním tohoto roztoku v laboratorní peci o teplotě 90 °C vznikl bílý krystalický prekurzor. Druhým krokem byl rozklad prekurzoru při teplotě 550 °C po dobu jedné hodiny – tím vznikly výsledné dvourozměrné nanočástice WO_3 . Pomocí elektronového mikroskopu Nova NanoSEM 450 (FEI) byly nanočástice pro názornost nasnímány (Obrázek 17).



Obrázek 17 Snímek nanočástic pořízený na elektronovém mikroskopu

5.2 Použité přístroje a zařízení

Hustoměr DMA 5000 M (Anton Paar).

Tenziometr Krüss K100.

Rotační reometr Bohlin CVOR 150.

Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix DMP-2800.

5.3 Průběh experimentu

5.3.1 Příprava inkoustů

Inkousty byly připraveny navážením a smícháním chemikálií v daných poměrech. Celkem byly připraveny a dále zkoumány 2 inkousty o celkové hmotnosti 20 g. Inkousty se od sebe lišily v množství obsaženého dispergačního činidla DISPERBYK-190 a vody. Složení těchto dvou inkoustů je zaznamenáno v Tabulce 2.

Tabulka 2 Složení připravených inkoustů

Vzorek	w _{hm} WO ₃ [%]	w _{hm} BYK-348 [%]	w _{hm} DISPERBYK-190 [%]	w _{hm} voda [%]
Inkoust č. 1	5,00	15,47	5,07	74,46
Inkoust č. 2	5,00	15,28	15,18	64,54

5.3.2 Měření hustoty

Pro měření hustoty byl použit hustoměr DMA 5000 M od firmy Anton Paar (Obrázek 18), který umožňuje měřit hustotu i omezeného množství (1 ml) kapalin. Měření bylo provedeno při teplotě 25 °C.



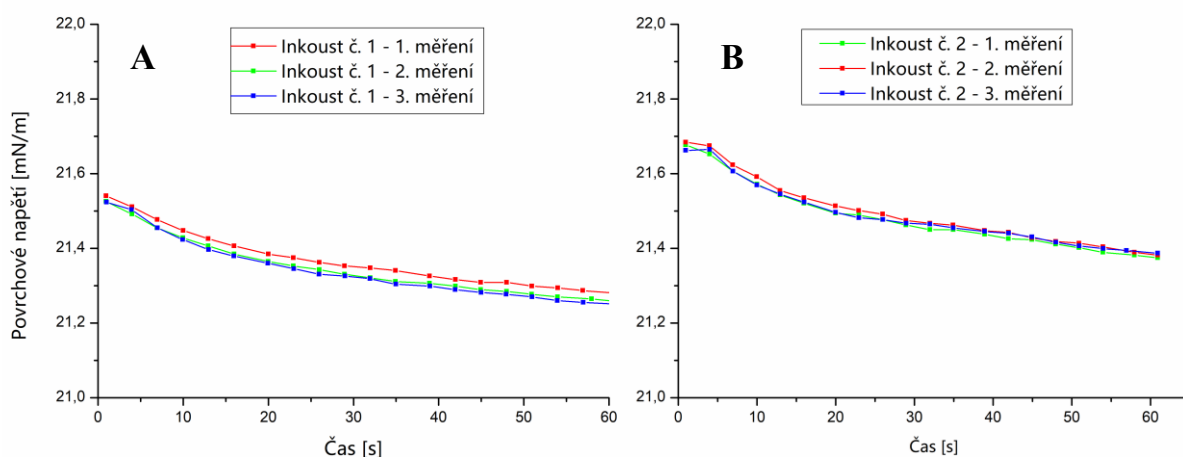
Obrázek 18 Hustoměr DMA 5000 M, převzato z [32]

5.3.3 Měření povrchového napětí

Pro měření povrchového napětí byl použit tenziometr Krüss K100 (Obrázek 19). Měření povrchového napětí bylo provedeno metodou Wilhelmyho destičky. Byla použita platinová destička. Tu bylo nutné před každým novým měřením opláchnout destilovanou vodou a etanolem a také ještě vyžít v plamenu. Povrchové napětí bylo pro každý inkoust změřeno třikrát (Obrázek 20).



Obrázek 19 Tenziometr Krüss K100



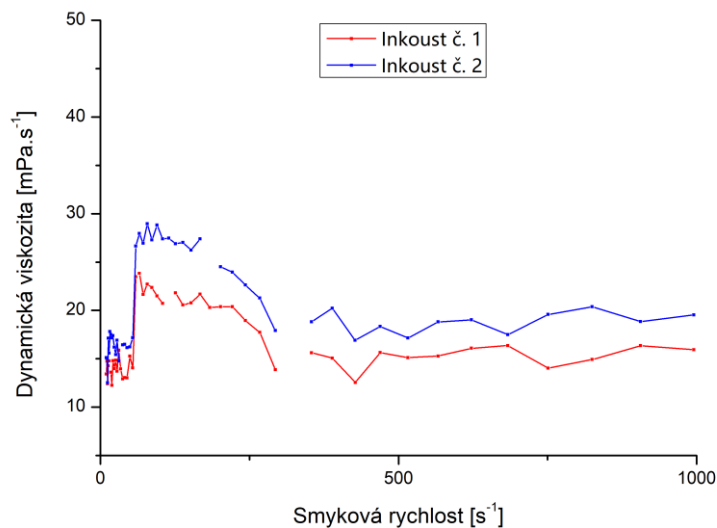
Obrázek 20 Křivky závislosti povrchového napětí na čase jako výsledek měření pomocí Tenziometru Krüss K100, A – inkoust č. 1, B – inkoust č. 2

5.3.4 Měření viskozity

Pro měření viskozity byl použit rotační reometr Bohlin CVOR 150 (Obrázek 21). Měření viskozity bylo taktéž provedeno při teplotě 25 °C. Viskozita byla měřena v rozsahu smykové rychlosti 10 až 1000 s⁻¹ (Obrázek 22).



Obrázek 21 Rotační reometr Bohlin CVOR 150



Obrázek 22 Naměřená závislost dynamické viskozity připravených inkoustů na smykové rychlosti

5.3.5 Materiálový tisk

Pro ověření, zda připravené inkousty budou tisknutelné a mohly by být použity pro tisk vrstev v elektronických zařízeních, bylo využito materiálové tiskárny FUJIFILM Dimatix DMP-2800 (Obrázek 23), jež umožňuje digitální materiálový tisk. Vystřikování inkoustu z této tiskárny je řízeno na bázi piezoelektrického jevu.



Obrázek 23 Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix DMP-2800, převzato z [33]

K tomu, aby bylo možné tisknout, musely být připravenými inkousty naplněny dvě cartridge dodávané výrobcem tiskárny. Cartridge se skládají ze dvou hlavních částí – zásobníku inkoustu o objemu přibližně 3 ml a tiskové hlavy. Inkousty o objemu přibližně 2 ml byly vpraveny do zásobníků za pomoci injekční stříkačky. Po naplnění byla na zásobník nasazena tisková hlava. Na Obrázku 24 je možné vidět již složenou a naplněnou cartridge připravenou k tisku. Takto naplněná cartridge již byla umístěna do držáku tiskové hlavy v tiskárně.



Obrázek 24 Složená a naplněná cartridge

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

Z hlediska materiálové náročnosti a zátěže na životní prostředí, je ideální vycházet při přípravě inkoustů pro materiálový tisk z vodní báze. Jednak je voda relativně levná chemikálie, za druhé je pak možné z ní při recyklaci inkoustu relativně pohodlně vyextrahovat aktivní materiál, který by mohl být zatěžující pro životní prostředí. Navíc, při tisku se může voda jako nosné médium lehce odpařit a získá se tak čistý aktivní materiál ve formě deponované vrstvy v požadovaném místě a tvaru. Další velkou výhodou, pokud se použije voda jako nosné médium, je, že nerozpouští téměř žádný substrát a je málo reaktivní. Na druhou stranu, z hlediska tisku, její nevýhodou je její poměrně vysoké povrchové napětí (okolo $70 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$) a relativně nízká viskozita ($1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Proto se většinou musí při přípravě inkoustů i po přidání aktivního materiálu povrchové napětí i viskozita ladit.

6.1 Vlastnosti připravených inkoustů

Parametry ideálního inkoustu pro použití v dostupné tiskárně Fujifilm Dimatix DMP 2800 se pohybují takto: viskozita by měla být v rozmezí 10 až $12 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a povrchové napětí v rozmezí 28 až $33 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Výrobce tiskárny ale také zároveň uvádí, že v případě inkoustů na bázi vody mohou hodnoty viskozity nabývat hodnot $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ až $30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a hodnoty povrchového napětí mohou být v rozmezí $20 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ až $70 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. [33]

Dle hodnot povrchových napětí a viskozity vody a inkoustu z WO_3 čistě na bázi vody a etanolu [34] je evidentní, že jistá optimalizace těchto parametrů pro dobrý tisk na DMP 2800 je nutná. Proto byly do inkoustů přidány další látky. Surfaktant BYK-348 a stabilizátor nanočástic DISPERBYK-190 v různém poměru (viz Tabulka 2).

V Tabulce 3 jsou uvedeny vlastnosti připravených inkoustů, vody, referenčního inkoustu bez přidání aditiv a připravených inkoustů s nanočásticemi oxidu wolframového. Vlastnosti referenčního inkoustu jsou popsány v [34]. Pro hustotu a viskozitu vody byly použity tabulkové hodnoty.

Lze jednoznačně vidět, že aditiva podstatným způsobem ovlivňují povrchové napětí a viskozitu a posouvají je k hodnotám doporučovaným výrobcem tiskárny. Přídavkem povrchově aktivní látky (surfaktantu) bylo docíleno požadovaného snížení povrchového napětí až k hodnotě okolo $20 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Nicméně surfaktant má nejenom pozitivní vliv na povrchové napětí, ale také napomáhá lepšímu smáčení substrátu, substráty na bázi polymerních fólií mívají povrchovou energii okolo $30 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Dispergační činidlo má za

úkol zlepšit separaci částic a zabránovat jejich usazování nebo shlukování. Co se týká viskozity, již samotný přírůdek WO_3 zvyšuje její hodnotu. Navíc přírůdek aditiv viskozitu dále zvyšuje. To je dáno tím, že aditiva jsou polymerní povahy a samotná mají vysokou viskozitu. Viskozita zkoumaných vzorků tedy závisí na celkové koncentraci aditiv a samozřejmě také na koncentraci pevné fáze. Hustota srovnávaných inkoustů je téměř stejná a není tedy pozorován vliv přírůdku aditiv.

Tabulka 3 Vlastnosti připravených inkoustů a referenčních vzorků při teplotě 25 °C

Vzorek	w_{hm} Surfaktant [%]	w_{hm} Dispergant [%]	Povrchové napětí [mN.m ⁻¹]	Hustota [g.cm ⁻³]	Viskozita [mPa.s]
Voda	-	-	71,97 ± 0,16	0,997	1,002
Voda/EtOH + WO_3 [34]	-	-	30 ± 10	1,05 ± 0,09	1,6 ± 0,1
Inkoust č. 1	15,47	5,07	21,4 ± 0,1	1,02 ± 0,08	17,1 ± 0,6
Inkoust č. 2	15,28	15,18	21,5 ± 0,1	1,03 ± 0,08	20,6 ± 0,9

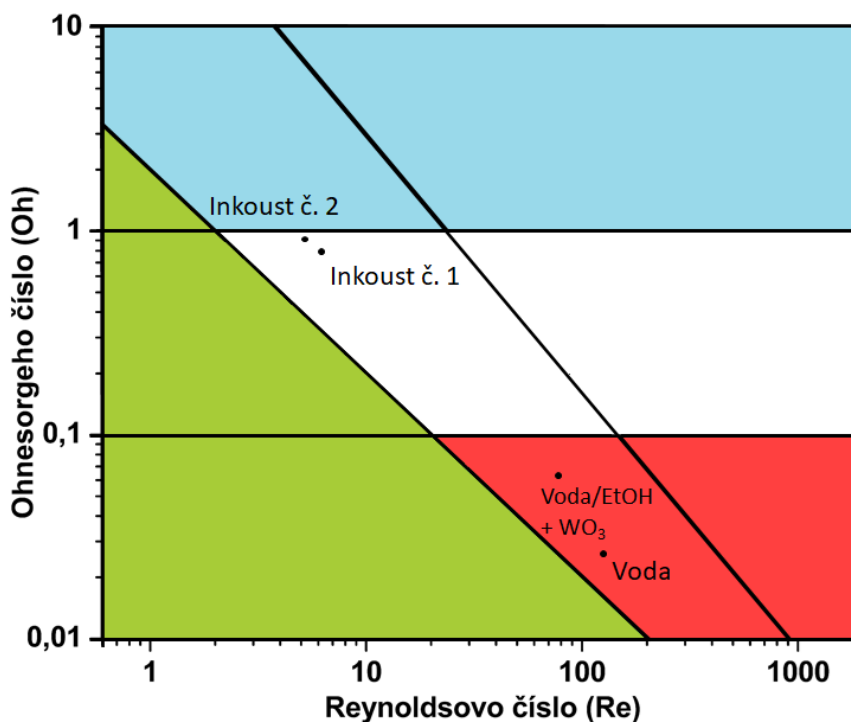
Pro vyjádření tisknutelnosti inkoustů a zahrnutí do procesního rámce materiálového tisku, byla vypočítána bezrozměrná kritéria Oh a Re srovnávaných kapalin a inkoustů (Tabulka 4) a byla vynesena do závislosti Oh na Re (Obrázek 25). Vypočtené hodnoty platí pro teplotu 25 °C a pro výrobcem doporučenou hodnotu rychlosti ($v = 6 \text{ m.s}^{-1}$) kapičky inkoustu po vytrysknutí z tryskové hlavy.

Tabulka 4 Bezrozměrná kritéria připravených inkoustů a referenčních vzorků při rychlosti 6 m.s⁻¹ a teplotě 25°C

Vzorek	Re	Oh
Voda	128,3	0,026
Voda/EtOH + WO_3	84,6	0,061
Inkoust č. 1	7,7	0,78
Inkoust č. 2	6,4	0,94

Z umístění bodů představujících jednotlivé inkousty a referenční kapalinu, je patrné, že díky svým vlastnostem vyjádřenými pomocí bezrozměrných kritérií spadají připravené inkousty do pracovního okna dobré tisknutelnosti pro drop-on-demand ink-jetový tisk. Naopak dva zbylé srovnávané vzorky jsou lokalizovány mimo tuto oblast. Přesněji jsou lokalizovány

v oblasti, ve které inkoust tvoří při tisku satelity, což může vést k výrazně zhoršené kvalitě tištěných motivů. Tato vlastnost je zapříčiněna hlavně vyšším povrchovým napětím a nižší viskozitou, které vystupují ve vzorci pro výpočet Oh . Jinak řečeno, čím vyšší je povrchové napětí, tím více vznikají při vytrysknutí z tiskové hlavy kapičky se satelity. Tomu je potřeba se při tisku vyvarovat.



Obrázek 25 Diagram Oh versus Re se znázorněnými porovnávanými vzorky

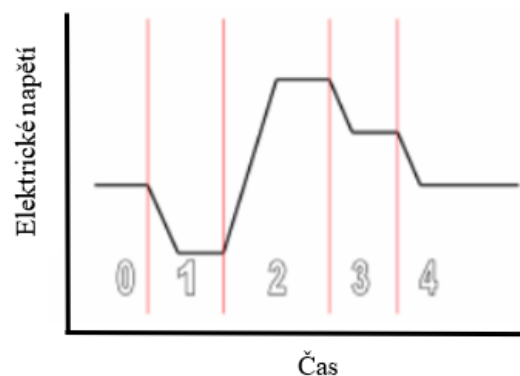
Pro nastavení optimálních vlastností inkoustu, tj. dosažení optimálního povrchového napětí a viskozity, je tedy nutné při práci ve vodné fázi použít surfaktant, přidávání aktivního dispergovaného materiálu může také do jisté míry ovlivnit povrchové napětí i viskozitu, záleží na koncentraci, ale tento vliv je minimální a ovlivňuje spíše viskozitu. Přídavek látek stabilizujících dispergovaný materiál neovlivňuje povrchové napětí, ale výrazně ovlivňuje viskozitu.

6.2 Tisk a optimalizace tisku

Návazným krokem na přípravu inkoustů a jejich charakterizaci při materiálovém tisku je doladění procesních parametrů tisku. To znamená, že je nutné nastavit optimální napětí na tryskách, dobu trvání jednotlivých segmentů procesu tvorby kapky, teplotu cartridge a

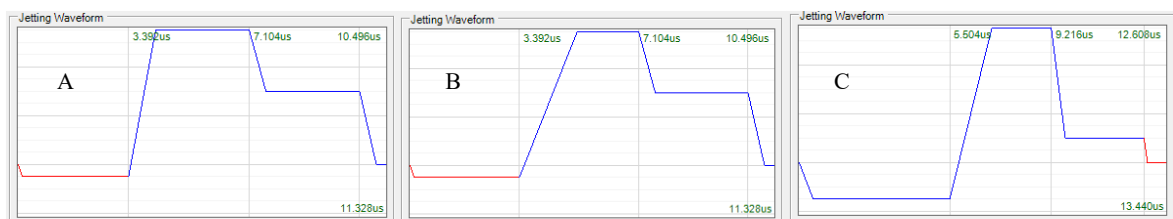
teplotu substrátu. Pro doladění procesu tvorby kapky na trysce využívá software ovládající tiskárnu DMP 2800 nastavení tzv. waveformy.

Základní waveforma je rozdělena do čtyř segmentů (Obrázek 26). Každý segment je popisován třemi vlastnostmi: dobou trvání, úrovní a rychlostí přeběhu. Nultý segment je připojen k poslednímu segmentu waveformy, je jmenován pro názornost pouze z důvodu lepšího pochopení systému waveforem. V prvním segmentu vždy dochází k poklesu na nulové napětí, tím se piezoelektrický element uvede do neutrální polohy a tisková hlava se tak může naplnit inkoustem na maximální objem. Druhý segment je zodpovědný za samotné vystřikování inkoustu – zvýší se napětí, piezoelektrický element generuje tlak v tiskové hlavě a tím pádem dochází k vystřikování inkoustu. Ve třetí a čtvrté fázi je napětí snižováno, tím dochází nejdříve k částečnému a poté úplnému naplnění tiskové hlavy [33].



Obrázek 26 Grafické znázornění waveformy, dle [33]

Na Obrázku 27 jsou znázorněny křivky použitých waveforem pro tisk připravených inkoustů. Waveformy byly nastaveny v programu Dimatix Drop Manager Software.

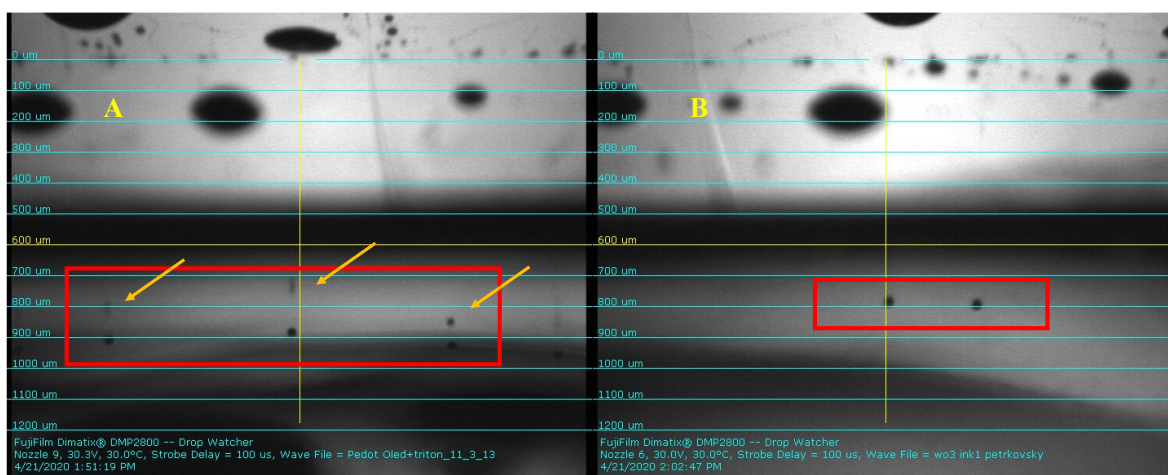


Obrázek 27 A – výchozí waveforma pro inkoust podobný připraveným inkoustům, B – waveforma pro inkoust č. 1, C – waveforma pro inkoust č. 2

Rozdíly ve waveformách jsou viditelné především v době trvání jednotlivých segmentů, tak i ve sklonu křivek, které značí náběhovou rychlost pro reakci piezoelektrického elementu v hlavě. Pro generování kapek byla jako výchozí waveforma

použita waveforma pro inkoust, který měl obdobné parametry (povrchové napětí a viskozita) jako inkousty připravené. Nicméně pro inkoust č. 1 bylo nutné modifikovat náběh druhého segmentu, to znamená zpomalit zvyšování napětí na trysce. Další segmenty u waveformy pro inkoust č. 1 zůstaly vzhledem k výchozí waveformě zachovány. Naproti tomu waveforma pro inkoust č. 2 musela doznat o poznání větších změn. Zde se projevila mírně vyšší viskozita inkoustu. První segment se prodloužil a snížila se jeho hladina. Náběhová hrana pro druhý segment byla prudší oproti waveformě pro inkoust č. 1. Také se změnila hladina třetího segmentu. Pro takto upravené waveformy bylo pozorováno, jak se generují jednotlivé kapky a zda se nevyskytují některé nežádoucí efekty.

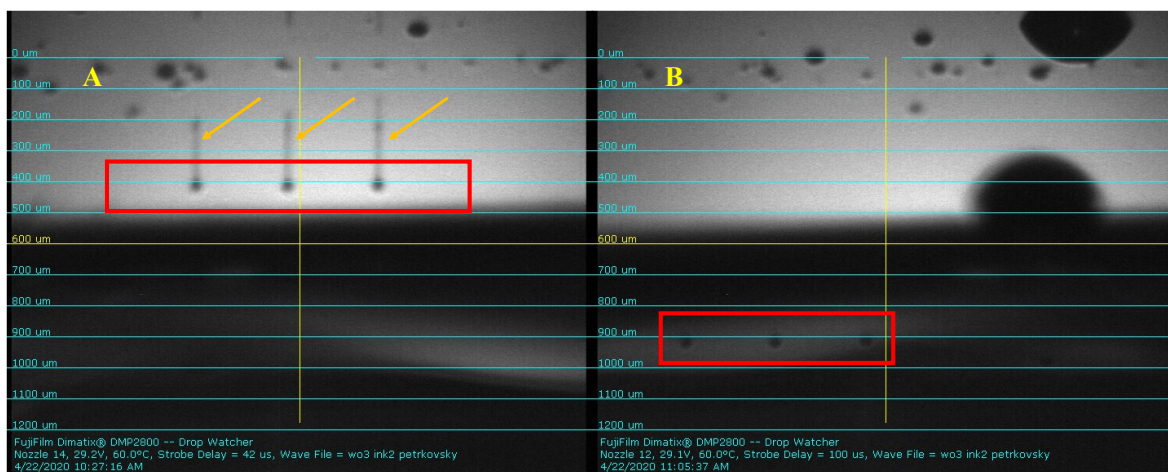
Na Obrázku 28 je možno vidět, jak se formovaly kapičky inkoustu č. 1, pokud byla použita výchozí waveforma a pokud byla použita upravená waveforma. V prvním případě (výchozí waveforma) docházelo k prudkému vytryskávání, a navíc formování satelitní kapky, která se s požadovanou kapkou nespojila, což by mohlo vést k nekvalitnímu a rozmazanému tisku. Oproti tomu při použití upravené waveformy byly generovány kvalitní jednotlivé kapky, i když při daném nastavení napětí na tryskách také měly o něco vyšší ($8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) než doporučovanou ($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) rychlost. Nebyly ovšem pozorovány vedlejší efekty jako satelitní kapka, či ocas.



Obrázek 28 Snímky zachycující generování kapek inkoustu č.1, A – při použití výchozí waveformy, B – při použití waveformy s dílčími úpravami

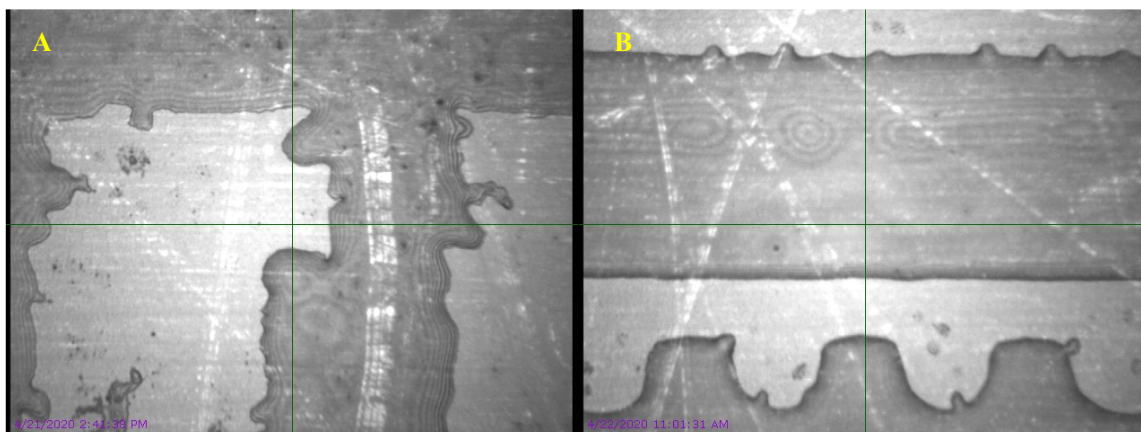
U inkoustu č. 2 bylo využito již modifikované waveformy. Nicméně vzhledem k odlišným vlastnostem inkoustu (vyšší viskozita) bylo dále nutné waveformu upravit, neboť tvorba kapiček nebyla bezvadná viz Obrázek 29. Tryskání probíhalo s tvorbou ocasu. To ve výsledku může vést a) k jeho oddělení a vytvoření parazitní kapky, nebo b) k vychýlení požadované kapky z dráhy letu. Po úpravě waveformy, nastavení optimálního napětí a

teploty na tryskách se kapičky začaly formovat opět bez postranních nežádoucích efektů jako např. satelitní kapka (Obrázek 29 B). Zvýšení teploty na tryskách bylo nezbytné vzhledem k vyšší viskozitě inkoust č. 2, jelikož při nižších teplotách se kapky formovaly špatně (s ocasem, satelitní kapky) nebo vůbec. Teplota musel být nastavena až na 60 °C.



Obrázek 29 Snímky zachycující generování kapek inkoustu č.2, A – při použití waveformy pro inkoust č.1, B – při použití waveformy s dílčími úpravami

Na Obrázcích 30 A a B jsou zachyceny části motivů (mřížky), jež byly natištěny připravenými inkousty. Z obrázků je možno vidět, že při stejném nastavení rozlišení je kvalitnější tisk u viskóznějšího inkoustu. To je samozřejmě otázka analýzy, jak vypadá kapka po dopadu na substrát, jaké má rozměry a jak se na substrátu rozprostře a zcela jistě lze docílit kvalitního tisku s oběma inkousty po provedení takové analýzy. Nicméně toto nebylo primárním cílem, neboť hlavním úkolem bylo připravit inkousty a charakterizovat je. Navíc bylo i prokázáno, že připravené inkousty jsou tisknutelné a lze s nimi natisknout motivy s přijatelným rozlišením.



Obrázek 30 Fragmenty motivu natištěného pomocí připravených inkoustů. A – inkoust č. 1, B – inkoust č. 2

ZÁVĚR

V teoretické části byla vypracována literární rešerše na téma materiálového tisku a přípravy inkoustů pro materiálový tisk. Byly uvedeny a popsány základní tiskařské metody, které se kromě tradičního inkoustového tisku dají použít i pro tisk materiálový. Pozornost byla věnována zejména ink-jetovému tisku. Inkousty vhodné pro ink-jetový byly rozděleny do jednotlivých skupin podle složení a popsány svými obecnými vlastnostmi. Dále byly popsány možné aplikace, kde se materiálový tisk jeví jako velice slibná technologie, a pak také byly popsány materiály vhodné pro použití jako aktivní materiál senzorů.

V praktické části této práce bylo dosaženo několik významných výsledků, a to jak v rovině věcné, tak v rovině znalostní.

V rovině věcné byly připraveny inkousty na bázi nanočástic WO_3 a vodného nosného média s obsahem aditiv, zajišťujícím optimální parametry pro tisk. Oxid wolframový je považován za vhodného kandidáta pro výrobu senzorů, neboť má zajímavé polovodivé vlastnosti a dobře reaguje na své okolí změnou rezistivity a kapacity, proto byl zvolen jako aktivní část připravených inkoustů. Tyto inkousty byly charakterizovány pomocí metody měření povrchového napětí a viskozity a dále pak byl proveden zkušební tisk pomocí materiálové tiskárny Fujifilm Dimatix DMP 2800. Dále, z dosažených výsledků lze konstatovat, že je možné připravit inkoust na bázi vody a nanočástic oxidu wolframového a použít ho pro materiálový tisk.

V rovině znalostní bylo zjištěno, že nelze připravit inkoust na vodné bázi pouze přidáním WO_3 do vody nebo do vody ve směsi s alkoholem, ale je nutné dále povrchové napětí a viskozitu modifikovat přidávkou surfaktantu. Navíc je také nutné pro dobrou dispergaci a stálou homogenitu inkoustu přidat dispergátor a stabilizátor nanočástic.

Získanými výsledky bylo dosaženo naplnění stanovených cílů práce. Nicméně, v dané tematice lze dále pokračovat a problematiku přípravy inkoustů a jejich použití pro pokročilé aplikace rozpracovat ve směru samotné přípravy senzorů a měření jejich odezvy na různé typy látek (alkoholy, páry organických rozpouštědel, plyny), modifikaci aktivního materiálu pro senzory, nebo přípravu flexibilního senzoru pomocí tisku na flexibilní substráty.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAGDASSI, Shlomo. *The chemistry of inkjet inks* [online]. Hackensack, NJ: World Scientific, 2010 [cit. 2020-01-03]. ISBN 978-981-281-821-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCII00002/chemistry-inkjet-inks/chemistry-inkjet-inks>
- [2] IZDEBSKA, Joanna a Sabu THOMAS. *Printing on polymers: fundamentals and applications* [online]. Boston: Elsevier/WA, William Andrew is an imprint of Elsevier, 2016 [cit. 2020-01-03]. PDL handbook series. ISBN 03-233-7468-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPPFA0001/printing-polymers-fundamentals/printing-polymers-fundamentals>
- [3] UJIIE, Hitoshi. Design and Workflow in Digital Inkjet Printing page. *Digital Printing of Textiles* [online]. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2006, s. 338-355 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-1-84-569158-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003W4AP4/digital-printing-textiles/design-workflow-in-digital>
- [4] SCHROETER, Klaus. Printed sensors: enabling new applications. *Sensor Review* [online]. 2008, 28(1), 6-11 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1108/02602280810849956. ISSN 0260-2288. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02602280810849956/full/html>
- [5] ANTOHE, Bogdan et al. *Inkjet Technology and its Application in Biomedical Coating. Medical Coatings and Deposition Technologies* [online]. New Jersey: John Wiley, 2016, s. 248-255 [cit. 2020-01-03]. ISBN 978-1-5231-1465-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011HGKD1/medical-coatings-deposition>
- [6] RICKERBY, David a Andrew MATTHEWS. Surface profiles. *Materials and design: the art and science of material selection in product design* [online]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, c2010, s. 300-323 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-1-85617-497-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMDTASMS2/materials-design-art/materials-design-art>

- [7] LANCEROS-MÉNDEZ, Senentxu a Carlos Miguel COSTA. *Printed batteries: materials, technologies and applications* [online]. Hoboken, NJ: John Wiley, 2018 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-1-5231-2374-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPBMTA001/printed-batteries-materials/printed-batteries-materials>
- [8] MONROY, Karla et al. Inkjet-and Extrusion-Based Technologies. *Biomedical devices: design, prototyping, and manufacturing* [online]. Hoboken, New Jersey: John Wiley, [2017], s. 121-160 [cit. 2020-02-12]. ISBN 978-1-118-47892-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBDDPM001/biomedical-devices-design/biomedical-devices-design>
- [9] WILSON, Derek E., J. P. HAXELL a Jan BARES. Hot-melt ink-jet inks: some new problems needing novel solutions [online]. 1992-5-1, 213-216 [cit. 2020-02-12]. DOI: 10.1117/12.59688. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=988194>
- [10] HOAT, Stephen D. *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets* [online]. 1. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2015 [cit. 2020-02-13]. ISBN 978-3-527-33785-9. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527684724>
- [11] WEIN, Ondřej. *Úvod do reologie*. Brno: Malé centrum, 1996. ISBN 8023809288.
- [12] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0038-1.
- [13] KIM, Eunjeong a Jehyun BAEK. Numerical study on the effects of non-dimensional parameters on drop-on-demand droplet formation dynamics and printability range in the up-scaled model. *Physics of Fluids* [online]. 2012, 24(8) [cit. 2020-02-13]. DOI: 10.1063/1.4742913. ISSN 1070-6631. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4742913>
- [14] MCKINLEY, Gareth H. a Michael RENARDY. Wolfgang von Ohnesorge. *Physics of Fluids* [online]. 2011, 23(12) [cit. 2020-04-29]. DOI: 10.1063/1.3663616. ISSN 1070-6631. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3663616>

- [15] KENNY, Tom. Sensor Fundamentals. WILSON, Jon. *Sensor technology handbook* [online]. 1. Boston: Elsevier, c2005, s. 1-20 [cit. 2020-03-30]. ISBN 0750677295. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSTH0000A/sensor-technology-handbook/sensor-technology-handbook>
- [16] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 4th. New York, NY: Springer New York, 2010. ISBN 978-144-1964-656.
- [17] JANATA, Jiří. *Principles of chemical sensors*. Second edition. Dordrecht: Springer, [2009]. ISBN 978-038-7699-301.
- [18] [KHAN, Saleem, Leandro LORENZELLI a Ravinder S. DAHIYA. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2015, **15**(6), 3164-3185 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2375203. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6974982/>
- [19] KRČMÁŘ, Petr. *Fully inkjet printed gas and humidity CuO sensor on flexible polymer substrate*. Zlín, 2019. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická.
- [20] SOUSA, Ricardo E., Carlos M. COSTA a Senentxu LANCEROS-MÉNDEZ. Advances and Future Challenges in Printed Batteries. *ChemSusChem* [online]. 2015, **8**(21), 3539-3555 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1002/cssc.201500657. ISSN 18645631. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cssc.201500657>
- [21] GAIKWAD, Abhinav M., Ana Claudia ARIAS a Daniel A. STEINGART. Recent Progress on Printed Flexible Batteries: Mechanical Challenges, Printing Technologies, and Future Prospects. *Energy Technology* [online]. 2015, **3**(4), 305-328 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1002/ente.201402182. ISSN 21944288. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ente.201402182>
- [22] CORKISH, Richard. Solar Cells. *Encyclopedia of Energy* [online]. 1. Boston: Elsevier, 2004, s. 545-557 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-0-12-176480-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEEV00001/encyclopedia-energy-volumes/encyclopedia-energy-volumes>

- [23] KOVALENKO, Alexander a Michal HRABAL. Printable solar cells. *Printable solar cells* [online]. Hoboken, NJ: John Wiley, 2017, s. 163-200 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-1-5231-1504-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011HULC4/printable-solar-cells/printable--solar-cells>
- [24] KAMADA, Rui, Takeshi YAGIOKA, Shunsuke ADACHI, Atsushi HANDA, Kong Fai TAI, Takuya KATO a Hiroki SUGIMOTO. New world record Cu(In, Ga)(Se, S) film solar cell efficiency beyond 22%. *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 1287-1291 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749822. ISBN 978-1-5090-2724-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7749822/>
- [25] KISHORE, Ravi Anant. Photovoltaic energy harvesting. *Energy Harvesting: Materials, Physics, and System Design with Practical Examples* [online]. Lancaster: DEStech Publications, 2019, s. 196-200 [cit. 2020-03-30]. ISBN 978-1-5231-2484-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEHMPSP4/energy-harvesting-materials/energy-harvesting-materials>
- [26] IDA, Nathan. Chemical Sensors and Actuators. *Sensors, actuators, and their interfaces: a multidisciplinary introduction* [online]. Edison, NJ: SciTech Publishing, [2014], s. 403-456 [cit. 2020-03-07]. ISBN 1613530064. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSATIAMI2/sensors-actuators-their/sensors-actuators-their>
- [27] DONG, Chengjun et al. A review on WO₃ based gas sensors: Morphology control and enhanced sensing properties. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2020, **820** [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153194. ISSN 09258388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838819344408>
- [28] ZHENG, Haidong et al. Nanostructured Tungsten Oxide-Properties, Synthesis, and Applications. *Advanced Functional Materials* [online]. 2011, **21**(12), 2175-2196 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1002/adfm.201002477. ISSN 1616301X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.201002477>

- [29] WANG, Fenggong, Cristiana DI VALENTIN a Gianfranco PACCHIONI. Electronic and Structural Properties of WO₃: A Systematic Hybrid DFT Study. *The Journal of Physical Chemistry C* [online]. 2011, **115**(16), 8345-8353 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1021/jp201057m. ISSN 1932-7447. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp201057m>
- [30] VASEEM, Mohammed et al. ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Application. *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications* [online]. Kalifornie: American Scientific Publishers, 2009, s. 1-36 [cit. 2020-03-31]. ISBN 1-58883-170-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225076578_ZnO_Nanoparticles_Growth_Properties_and_Applications/download
- [31] SHANG, Huamei a Guozhong CAO. Nanostructured ZnO Gas Sensors. *Environmental Applications of Nanomaterials: Synthesis, Sorbents and Sensors* [online]. Singapur: World Scientific, 2007, s. 314-351 [cit. 2020-03-31]. ISBN 978-1-86094-662-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008K4FK3/environmental-applications/nanostructured-introduction>
- [32] 5000 M Instruction Manual and Safety Information. *Anton Paar* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/cz-cs/servis-podpora/vyhledavac-dokumentu/hustomer-dmatm-5000-m/>
- [33] *Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series: User manual* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.fujifilmusa.com/support/ServiceSupportProduct.do?prodcatt=879589>
- [34] WOJCIK, Pawel Jerzy et al. Tailoring nanoscale properties of tungsten oxide for inkjet printed electrochromic devices. *Nanoscale* [online]. 2015, **7**(5), 1696-1708 [cit. 2020-05-11]. DOI: 10.1039/C4NR05765A. ISSN 2040-3364. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4NR05765A>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	milimetr
μm	mikrometr
τ	tečné napětí
η	dynamická viskozita
$\frac{du}{dy}$	gradient rychlosti
P	Poise
cP	centipoise
Pa	Pascal
mPa	milipascal
kg	kilogram
s	sekunda
SI	mezinárodní systém jednotek
ν	kinematická viskozita
ρ	hustota
σ	povrchové napětí
F	síla
l	délka
mN	milinewton
m	metr
Re	Reynoldsovo kritérium
We	Weberovo kritérium
Ca	kapilární číslo
Oh	Ohnesorgovo kritérium
Z	obrácená hodnota Ohnesorgova čísla
v	rychlost kapky inkoustu po vytrysknutí z tiskové hlavy

A	charakteristická délka související s rozměry tiskové hlavy
°C	stupeň Celsia
CIGS	solární článek obsahující měď, indium, galium a selen
PSC	perovskitové solární články
OPV	organické solární články
CdS	sulfid kademnatý
ZnO	oxid zinečnatý
ABX ₃	obecný vzorec halogenidových perovskitů
Cs ⁺	kationt césný
CH ₃ NH ₃ ⁺	kationt metylamonný
Pb ²⁺	kationt olovnatý
Sn ²⁺	kationt cínatý
I ⁻	aniont jodidový
Br ⁻	aniont bromidový
Cl ⁻	aniont chloridový
SnO ₂	oxid cínatý
V ₂ O ₅	oxid vanadičný
WO ₃	oxid wolframový
eV	elektronvolt
H ₂	molekula vodíku
NO ₂	oxid dusičitý
CO ₂	oxid uhličitý
H ₂ S	sulfan
NH ₃	amoniak
CS ₂	sirouhlík
CO	oxid uhelnatý

w_{hm} hmotnostní zlomek

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma kontinuálního ink-jetového tisku, dle [5]	13
Obrázek 2 Schéma drop-on-demand ink-jetového tisku, dle [5]	14
Obrázek 3 Schéma sítotisku, dle [2]	14
Obrázek 4 Schéma tamponového tisku, dle [6]	15
Obrázek 5 Schéma offsetového tisku, dle [2]	16
Obrázek 6 Schéma gravírování, dle [7]	16
Obrázek 7 Závislost Oh na Re znázorňující oblast tisku, dle [14].....	21
Obrázek 8 Jednoduché znázornění interdigitů, dle [19]	23
Obrázek 9 Schéma vybíjení a nabíjení baterie, dle [20]	24
Obrázek 10 a) sendvičová architektura tištěných baterií, b) Paralelní architektura tištěných baterií, dle [21].....	25
Obrázek 11 Nákres solárního článku zapojeného do elektrického obvodu, dle [22]	26
Obrázek 12 Krystalová struktura sloučeniny CIGS (červená barva – atomy mědi; modrá barva – atomy india a galia; žlutá barva – atomy selenu), dle [23]	26
Obrázek 13 Struktura solárního panelu CIGS, dle [23].....	27
Obrázek 14 Nákres struktury perovskitového solárního článku, dle [25]	28
Obrázek 15 Monoklinická krystalová struktura oxidu wolframového, dle [29].....	29
Obrázek 16 Hexagonální wurtzitová krystalová struktura oxidu zinečnatého, dle [30].....	30
Obrázek 17 Snímek nanočástic pořízený na elektronovém mikroskopu.....	33
Obrázek 18 Hustoměr DMA 5000 M, převzato z [32]	34
Obrázek 19 Tenziometr Krüss K100	35
Obrázek 20 Křivky závislosti povrchového napětí na čase jako výsledek měření pomocí Tenziometru Krüss K100, A – inkoust č. 1, B – inkoust č. 2	35
Obrázek 21 Rotační reometr Bohlin CVOR 150	36
Obrázek 22 Naměřená závislost dynamické viskozity připravených inkoustů na smykové rychlosti	36
Obrázek 23 Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix DMP-2800, převzato z [33]	37
Obrázek 24 Složená a naplněná cartridge.....	37
Obrázek 25 Diagram Oh versus Re se znázorněnými porovnávanými vzorky	40
Obrázek 26 Grafické znázornění waveformy, dle [33].....	41
Obrázek 27 A – výchozí waveforma pro inkoust podobný připraveným inkoustům, B – waveforma pro inkoust č. 1, C – waveforma pro inkoust č. 2	41
Obrázek 28 Snímky zachycující generování kapek inkoustu č.1, A – při použití výchozí waveformy, B – při použití waveformy s dílčími úpravami.....	42
Obrázek 29 Snímky zachycující generování kapek inkoustu č.2, A – při použití waveformy pro inkoust č.1, B – při použití waveformy s dílčími úpravami	43

Obrázek 30 Fragmenty motivu natištěného pomocí připravenými inkousty. A – inkoust č. 1, B – inkoust č. 243

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Obecné složení inkoustu na bázi vody, dle [2]	17
Tabulka 2 Složení připravených inkoustů	34
Tabulka 3 Vlastnosti připravených inkoustů a referenčních vzorků při teplotě 25 °C	39
Tabulka 4 Bezrozměrná kritéria připravených inkoustů a referenčních vzorků při rychlosti 6 m.s ⁻¹ a teplotě 25°C.....	39