

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA POLYGRAFIE A FOTOFYZIKY

Tisk tenkovrstvých flexibilních baterií

Petr Kozel

Bakalářská práce

2023

UNIVERSITY OF PARDUBICE
FACULTY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF GRAFIC ARTS AND
FOTOPHYSICS

Printing thin film flexible batteries

Petr Kozel

Bachelor's thesis

2023

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr Kozel**
Osobní číslo: **C20166**
Studijní program: **B0531A130014 Polygrafie**
Téma práce: **Tisk tenkovrstvých flexibilních baterií**
Zadávací katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši v patentové, vědecké a firemní literatuře na téma tištěných primárních článků.
2. Z literatury získané informace přehledně zpracujte a utřídte dle použitých elektrodoových materiálů, kolektorů, aj.
3. Uveďte dosažené parametry pro dané typy článků.
4. Na základě informací z relevantních informačních zdrojů diskutujte směr vývoje při-pravy primárních článků tiskovými technikami a trendy v aplikacích využití článků.]

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.**
Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30. června 2023**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Tisk tenkovrstvých flexibilních baterií jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice

V Pardubicích dne 30. 6. 2023

Petr Kozel

Poděkování

Rád bych poděkoval hlavnímu vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Tomášovi Syrovému, Ph.D. za jeho ochotu, čas, trpělivost, cenné rady a odbornou pomoc při zpracování této práce.

Bakalářská práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na tisk tenkovrstvých flexibilních baterií se Zn anodou a MnO₂ katodou. Teoretická část se zabývá základními vlastnostmi baterií, složením flexibilních baterií a technikami tisku, které se pro tisk baterií využívají. Dále jsou zde uvedeny materiály, které lze použít jako substráty pro flexibilní aplikace. Experimentální část je zaměřena na tisk baterií na sítotiskové tiskovém stroji a následném měření vybíjecí kapacity článků.

Klíčová slova

Tištěná elektronika, tenkovrstvé flexibilní baterie, Zn anoda

Title

Printing thin film flexible batteries

Abstract

This bachelor thesis focuses on the printing of thin-film flexible batteries with Zn anode and MnO₂ cathode. The theoretical part focuses on the basic characteristics of the batteries, the structure of flexible batteries and the printing techniques used for printing the batteries. Furthermore, materials that can be used as substrates for flexible applications are presented. The experimental part focuses on printing batteries on a screen printing press and then measuring the discharge capacity of the cells.

Key words

Printed electronics, thin film flexible batteries, Zn anode

Obsah

Úvod	11
1. Základní vlastnosti	12
1.1 Rozdělení elektrochemických článků	12
1.1.1 Primární články	12
1.1.2 Sekundární články	12
1.2 Elektrochemický děj	13
1.3 Konstrukce elektrochemických článků	14
1.3.1 Stohová/sendvičová architektura	14
1.3.2 Koplanární/paralelní architektura	15
1.4 Měřené vlastnosti	16
1.4.1 Napětí	16
1.4.2 Kapacita	16
1.4.3 Vybíjecí křivka	17
1.4.4 Hustota energie	17
1.4.5 Specifická hustota energie	17
1.4.6 Teplotní závislost	18
2. Složení tištěných flexibilních baterií	19
2.1 Substrát	19
2.2 Kolektor	19
2.3 Elektrolyt	19
2.4 Anoda	20
2.5 Katoda	20
2.6 Separátor	20
3. Techniky používané pro tisk flexibilních baterií	21
3.1 Konvenční techniky	21
3.1.1 Sítotisk	21
3.1.1.1 Plochý sítotisk	22
3.1.1.2 Rotační sítotisk	22
3.2 Bezkontaktní techniky	23
3.2.1 Aerosolový tryskový tisk	23
3.2.2 Ink-jet	24

4. Materiály používané jako substráty pro flexibilní baterie	25
4.1 PET	25
4.2 PEN	25
4.3 PC	26
4.4 PES	27
4.5 PI	27
5. Experimentální část	28
5.1 Design baterií	28
5.2 Příprava tiskových forem	29
5.3 Tisk	31
5.4 Měření tloušťky	32
5.5 Měření vybíjecí kapacity	34
5.5.1 Teoretická kapacita	35
5.5.2 Stanovení optimálních podmínek měření.....	36
5.5.3 Měření jednoho zapojeného článku	37
5.5.4 Měření dvou zapojených článků	38
5.5.5 Měření tří zapojených článků.....	39
5.5.6 Měření čtyř zapojených článků	40
5.5.7 Měření šesti zapojených článků	41
6. Závěr	42
7. Použitá literatura	43

Úvod

Tištěná elektronika je nový způsob provedení elektronických zařízení, která jsou tenká, lehká, ohebná i odolná a lze je vyrábět s nízkými náklady. Základními komponentami při výrobě tištěné elektroniky jsou vodivé, polovodivé nebo dielektrické inkousty a pasty, které lze tiskem nanášet jak na velkoplošné fólie z polyesteru nebo na fólie z jiných plastů, tak také na papír, sklo nebo textilie. Při výrobě se používají běžné tiskové techniky od flexotisku přes hlubotisk až po sítotisk. Tištěná elektronika představuje perspektivní odvětví s velkými možnostmi růstu [1].

Jednou z těchto oblastí materiálového tisku jsou i tištěné baterie. V rostoucí oblasti aplikací, včetně radiofrekvenčního snímání, interaktivních obalů, lékařských přístrojů, senzorů a souvisejícího spotřebního zboží, jsou tištěné baterie vhodnou náhradou běžných baterií. Tyto baterie jsou výsledkem spojení technologie tisku a chemické podstaty běžných baterií. Tištěné baterie jsou rovněž stále více zkoumány pro systémy skladování energie, což umožňuje lepší integraci zařízení a nové oblasti použití [2].

Součástí oboru tištěné elektroniky jsou i nositelná zařízení, která jsou fenoménem současné doby. Snahou je zapojit nejmodernější techniku do každodenního života lidí, přičemž elektronických zařízení, která nosí při sobě, rapidně přibývá. Ve světě je nositelná technika nezadržitelně na vzestupu, ať již typicky v podobě chytrých mobilních telefonů, chytrých hodinek, elektronických náramků a bezdrátových sluchátek, či jako chytré textilie a oděvy, které sledují různé tělesné funkce [1].

1. Základní vlastnosti baterií

Baterie je zařízení, které využívá elektrochemickou oxidačně-redukční (redox) reakci k přímé přeměně chemické energie, obsažené v aktivních složkách, na energii elektrickou. V dobíjecím systému se k dobíjení baterie používá opačná metoda. Při tomto druhu reakce se elektrony přesouvají z jednoho materiálu do druhého, prostřednictvím elektrického obvodu. Neelektrochemický redoxní proces, jako je rezavění nebo hoření, zahrnuje pouze teplo a přímý přenos elektronů. Na rozdíl od spalovacích nebo tepelných motorů, baterie elektrochemicky přeměňují chemickou energii na elektrickou, a proto nejsou omezeny omezeními druhého termodynamického zákona pro Carnotův cyklus. Díky tomu mohou baterie dosahovat vyšších rychlostí přeměny energie [3].

Základní elektrochemickou jednotkou je "článek", přestože se často používá termín "baterie". V závislosti na požadovaném výstupním napětí a kapacitě může být jeden nebo více těchto článků zapojeno sériově, paralelně nebo mohou být využity oba způsoby zapojení [3].

1.1 Rozdělení elektrochemických článků

1.1.1 Primární články

Články s omezeným počtem reaktantů, které nelze nabíjením (externím přívodem proudu) přeměnit zpět na reaktanty, se vybíjejí na produkty, které nelze přeměnit zpět na reaktanty. Tyto články jsou *baterie*, tedy články na jedno vybití [4].

1.1.2 Sekundární články

Ačkoli jsou reaktanty v člancích podobně omezené, mohou se vnějším proudem přeměnit zpět na původní aktivní reaktanty, což umožňuje článek dobíjet a uchovávat elektrickou energii. Jedná se o zařízení, která uchovávají elektrickou energii, tedy *akumulátory*. Většina baterií je schopna vydržet stovky nebo dokonce tisíce nabití a vybití. Jednou z klíčových charakteristik, které definují baterii, je počet cyklů (nabíjení a vybíjení) [4].

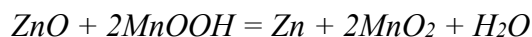
1.2 Elektrochemický děj

Elektrody jsou vodiče, které se používají k přivádění proudu do kapaliny nebo k jeho odvádění. Nejčastěji jsou vyrobeny z kovů, například z uhlíku. Roztok elektrolytu je kapalina, kterou proud prochází. V ní jsou rozpuštěny soli, kyseliny nebo zásady (elektrolyty), které se v roztoku rozkládají na ionty a způsobují jeho vodivost.

K elektrodám je připojen elektrický zdroj stejnosměrného proudu. Katoda (na které probíhá redukce, elektrony vstupují do roztoku) je připojena k zápornému pólu a kladný pól je připojen k anodě (elektrodě, na které dochází k oxidaci). Na elektrodách probíhají při elektrolýze oxidačně-redukční reakce, které způsobují látkové změny.

Galvanické články jsou zařízení, která produkují elektrické napětí a proud, v důsledku redoxních procesů, které v nich probíhají [5].

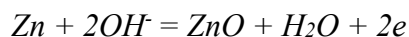
Elektrina vzniká v alkalické baterii, když se zinková anoda oxiduje a katoda s oxidem manganičitým redukuje. Následuje rovnice pro jednoduchou reakci alkalického článku:



Při tomto procesu se spotřebovává voda (H_2O) a na katodě MnO_2 vznikají hydroxylové ionty (OH^-) při následující reakci:



Na anodě se současně vytváří voda a spotřebovávají hydroxylové ionty:



Zařízení jsou napájena elektrony (e), které při tomto procesu vznikají. Kvalita výchozích složek a dostupnost vody a hydroxylových iontů během reakce ovlivňují její rychlost [6].

1.3 Konstrukce elektrochemických článků

V zásadě existují čtyři hlavní konstrukce běžných baterií: mincovní, prizmatické, spirálové a válcové. Všechny jsou tuhé a objemné, což je činí nevhodnými pro flexibilní elektronická zařízení.

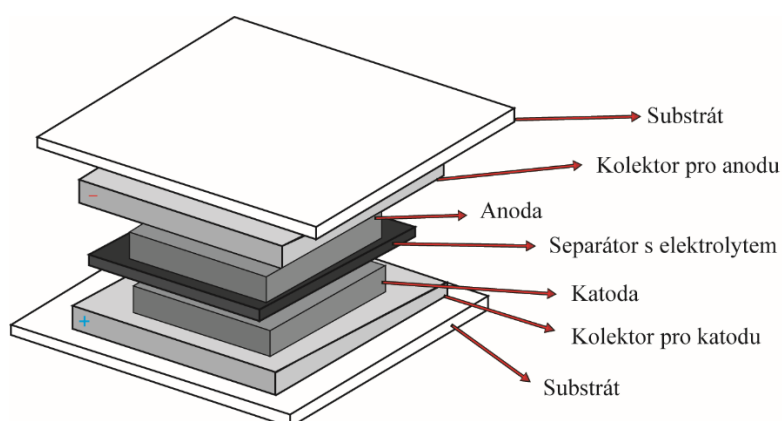
Jednou z výhod tiskových technologií při výrobě baterií je možnost vytvořit jednu nebo více vrstev se specifickým vzorem nebo designem. To je důležité zejména proto, že geometrie a design baterie mají kromě vlastností použitých materiálů při její konstrukci významný vliv na její výkon.

Dvěma základními typy tištěných baterií jsou stohová neboli sendvičová architektura a koplánární neboli paralelní architektura [2].

1.3.1 Stohová/sendvičová architektura

Stohová nebo sendvičová architektura tištěné baterie je znázorněna na *Obrázku 1* a skládá se z anody, proudového kolektoru pro anodu, separátoru s elektrolytem, katody a proudového kolektoru pro katodu, které jsou uloženy v pružném substrátu o celkové tloušťce 0,5 mm.

Protože se ionty pohybují mezi anodou a katodou na krátké vzdálenosti, podobně jako u běžných baterií, má tato konstrukce za následek nízký vnitřní odpor a krátkou dobu nabíjení [2].

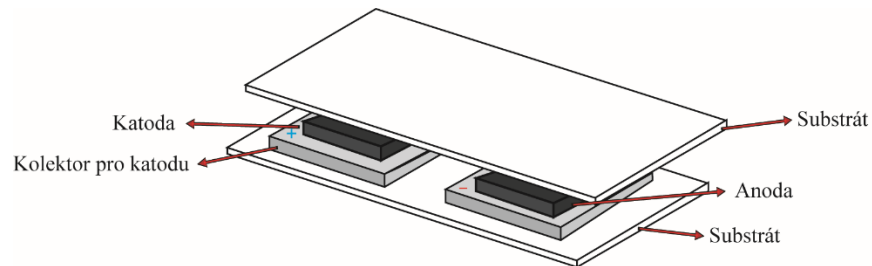


Obr. 1: Schéma stohové/sendvičové architektury

1.3.2 Koplanární/paralelní architektura

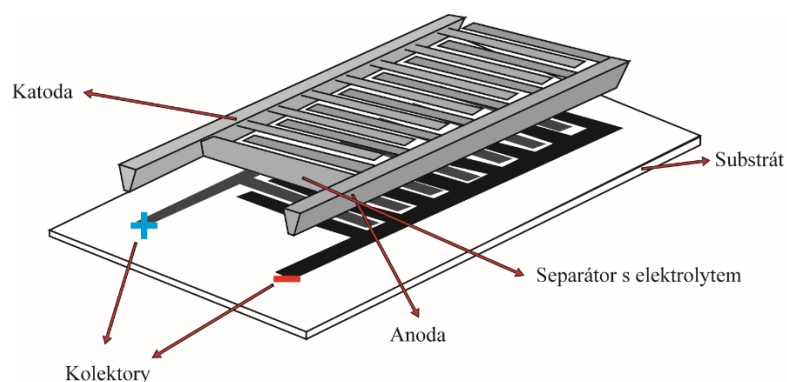
Koplanární nebo paralelní architektura tištěných baterií, která umísťuje anodu a katodu vedle sebe, je znázorněna na *Obrázku 2*. Tato architektura se nejčastěji využívá pro pružné baterie. Separátor se v tomto článku nepoužívá.

Při tomto uspořádání je velmi malá pravděpodobnost zkratu při mechanickém natahování baterie.



Obr. 2: Schéma koplanární/paralelní architektury

Vývoj prokládaných konstrukcí, jako je ta na *Obrázku 3*, zvýšil ukládání energie v rámci paralelní architektury. Povrch elektrody se zvětšuje díky interdigitálním strukturám, které jsou zvětšují rozhraní mezi katodou a anodou. Elektrické odpory napříč baterií se v této konfiguraci snižují díky kratším transportním cestám iontů. Navíc tenčí vrstva elektrolytu/separátoru u interdigitální architektury vede k nižšímu vnitřnímu odporu článku, což zvyšuje výkon [2].



Obr. 3: Schéma prokládané konstrukce

1.4 Měřené vlastnosti

1.4.1 Napětí

Teoretické standardní napětí článku lze určit z elektrochemické řady pomocí hodnot E_0 :

$$E_0 (\text{katodická}) - E_0 (\text{anodická}) = E_0 (\text{článek})$$

T_0 je standardní teoretické napětí. Nernstova rovnice upravuje teoretické napětí článku tak, aby zohledňovalo nestandardní stav reagující složky. V důsledku používání nebo samovybíjení se Nernstův potenciál v průběhu času mění, což ovlivňuje aktivitu (nebo koncentraci) elektroaktivní složky v článku. Proto chemické složení článku v daném okamžiku určuje jmenovité napětí.

V důsledku polarizačních a odporových ztrát (IR ztrát) v baterii, které jsou ovlivněny zatěžovacím proudem a vnitřní impedancí článku, bude skutečné napětí vždy nižší než teoretické napětí. Vzhledem k závislosti těchto veličin na elektrodové kinetice se mění s teplotou, stavem nabití a stářím článku. Skutečné napětí na svorkách musí být skutečně dostatečné pro zamýšlený účel [7].

1.4.2 Kapacita

Teoretická kapacita baterie je množství elektrické energie, které se zapojí do elektrochemické reakce. Označuje se Q a je dána vztahem:

$$Q = xnF$$

kde x = počet molů reakce, n = počet elektronů přenesených na mol reakce a F = Faradayova konstanta.

Kapacita se obvykle udává v hmotnostních jednotkách, nikoli v počtu molů:

$$Q = \frac{nF}{M_r}$$

kde M_r = molekulová hmotnost. To udává kapacitu v jednotkách ampérhodin na gram (Ah/g).

Protože nereaktivní části, jako jsou pojiva a vodivé částice, separátory a elektrolyty, sběrače proudu a substráty, stejně jako obal, značně zvyšují hmotnost baterie, není možné v praxi dosáhnout plné kapacity akumulátoru [7].

1.4.3 Vybíjecí křivka

Napětí v závislosti na procentuálním vybití kapacity se vynese do grafu, který se nazývá vybíjecí křivka. Žádoucí je plochá vybíjecí křivka, protože to znamená, že napětí zůstává při vybíjení baterie konstantní [7].

1.4.4 Objemová hustota energie

Objemová hustota energie je energie, kterou lze získat z jednotky objemu hmotnosti článku [7].

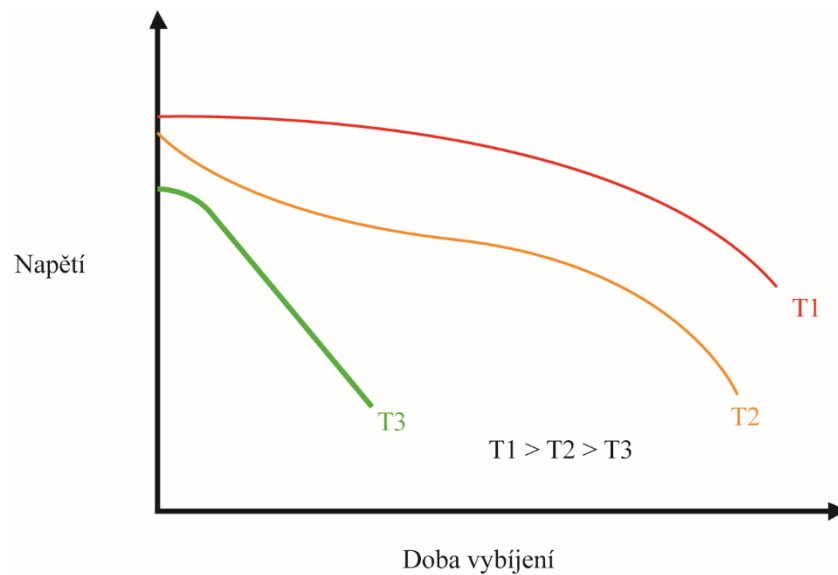
1.4.5 Specifická hustota energie

Množství energie, které lze získat na jednotku hmotnosti článku, se nazývá specifická hustota energie (nebo někdy na jednotku hmotnosti aktivního materiálu elektrody). Je to výsledek provozního napětí a měrné kapacity v průběhu jednoho úplného vybíjecího cyklu. Protože se proud i napětí mohou během vybíjecího cyklu měnit, měrná energie se určuje integrací součinu proudu a napětí v čase. Maximální a minimální prahové hodnoty napětí a dostupnost aktivních materiálů, jakož i to, zda je baterie nevratně vybitá, určují dobu vybíjení [7].

1.4.6 Teplotní závislost

Teplota má vliv i na vnitřní odpor, který je při nízkých teplotách obecně vyšší. Elektrolyt by mohl i v ojedinělých případech při velmi nízkých teplotách zmrznout, což by mělo za následek nižší napětí, protože by byl omezen transport iontů. Při velmi vysokých teplotách se mohou chemické látky rozkládat nebo nemusí být dostatek energie k vyvolání nežádoucích vratných reakcí, což by snížilo kapacitu.

Při nižších teplotách bude také nižší kapacita a vyšší rychlost poklesu napětí při vybíjení. To dokládá následující obrázek: [7]



Obrázek 4: Zobrazení teplotní závislosti vybíjecí charakteristiky na teplotě

2. Složení tištěných flexibilních baterií

2.1 Substrát

Substrát se ve flexibilních bateriích využívá zároveň jako obal, který má za úkol chránit baterii. Tím tak zvyšuje výdržnost článku.

Flexibilní substráty musí splňovat řadu požadavků na optické vlastnosti, drsnost povrchu, tepelné a termomechanické vlastnosti, chemické vlastnosti, mechanické vlastnosti a elektrické a magnetické vlastnosti, aby mohly nahradit skleněné substráty.

Kovy, organické polymery (plasty) a ohebné sklo jsou tři typy substrátů, které jsou dostupné pro ohebné aplikace [8].

2.2 Kolektor

V baterii slouží jako sběrač nábojů z elektrod.

Rychlé a spolehlivé elektrochemické reakce v bateriových elektrodách závisí na sběračích proudu a elektrochemicky aktivních materiálech. Fólie, sítě nebo pěny používané jako proudové kolektory fungují jako elektricky vodivá podpora a vytvářejí svody pro účinný transport elektronů z/do elektrochemicky aktivních vrstev. Aby byla zachována strukturální integrita elektrod, musí být proudové kolektory chemicky kompatibilní a dobře přilnout k elektrochemicky aktivním vrstvám [2].

2.3 Elektrolyt

Prostředí pro přenos náboje, například iontů uvnitř článku mezi anodou a katodou, zajišťuje elektrolyt, který je iontovým vodičem. Elektrolytem je často kapalina s rozpuštěnými solemi, kyselinami nebo zásadami, které přenášejí ionty. Například voda nebo jiná rozpouštědla. Některé baterie používají pevné elektrolyty, které fungují jako iontové vodiče při provozní teplotě článku [8].

2.4 Anoda

Anoda nebo záporná elektroda – redukční nebo palivová elektroda – je taková, která uvolňuje elektrony do vnějšího okruhu a během elektrochemické reakce se oxiduje [8].

2.5 Katoda

Katoda nebo kladná elektroda — oxidační elektroda — je taková, která přijímá elektrony z vnější obvod a během elektrochemické reakce se redukuje [8].

2.6 Separátor

Všechny současné baterie a akumulátory jsou do značné míry závislé na separátorech. Ty musí umožňovat pohyb nosičů náboje – iontů přítomných v elektrolytu, které jsou potřebné k uzavření obvodu při průchodu proudu elektrochemickým článkem, a kromě toho plní svou primární povinnost zabránit zkratu mezi kladnou a zápornou elektrodou. Separátory pro by měly mít velmi dobré izolační vlastnosti a dobře vést ionty. Přestože se separátory neúčastní žádných elektrochemických reakcí v baterii, jejich vlastnosti mají vliv na energetickou hustotu, životnost a bezpečnost baterie. Chemické složení baterie a způsob použití určují, jaký materiál separátoru se použije.

Sekundární baterie musí splňovat přísnější kritéria než primární baterie, pokud jde o chemickou a elektrochemickou stabilitu, životnost, mechanickou odolnost a prevenci prorůstání dendritům. Pro delší skladování by měl separátor rovněž bránit samovybíjení. Separátor by měl být tenký, vysoce porézní a měl by být schopen odolávat vyšším teplotám pro dosažení vysoké energetické hustoty a výkonu [8].

3. Techniky používané pro tisk flexibilních baterií

3.1 Konvenční techniky

3.1.1 Sítotisk

Pro tuto metodu tisku se často používal termín " hedvábný sítotisk", protože původně se hedvábí používalo na tiskařské síto. Výhodou této technologie tisku je, že dokáže zpracovávat velké, hrubé částice o velikosti až několika desítek mikrometrů. Rovněž tloušťka nanesených vrstev se může během jediné fáze tisku pohybovat od méně než jednoho mikrometru do více než 100 mikrometrů. Rozsah viskozity barev, které lze zpracovávat, je 100 mPas až 100 000 mPas.

V polygrafii se sítotisk používá k tisku na textil, reklamní panely, a dokonce i na skleněná okna. Materiály mohou být trojrozměrné (například lahve a obaly) nebo ploché (plasty, materiály na bázi vláken, jako je papír, textil, nebo kov) [2].

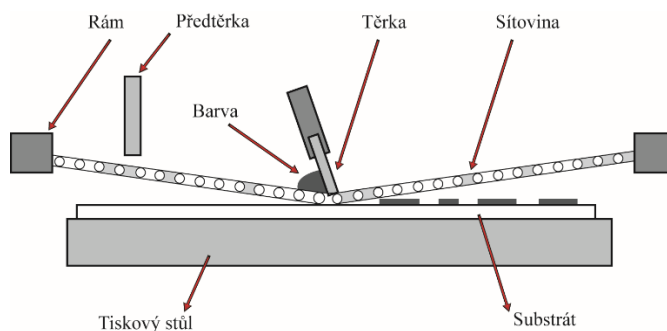
Nejdříve se používal šablonový tisk. Při šablonovém tisku je šablona upevněna na materiál, na který se bude tisk provádět. Následně se pomocí štětce nebo třerky nanese barva, která zaplní otevřený prostor šablony. Hlavní nevýhoda šablonového tisku je, že všechny části šablony musí být spojeny do jednoho celku.

Technika sítotisku se vyvinula tak, že zahrnuje podpurnou mřížku pro šablonovou vrstvu, která pokrývá i izolované úseky, zejména u textilních materiálů. Jako nosný materiál pro šablonované úseky sloužilo při vývoji hedvábí. V dnešní době se místo hedvábí používají polymerní nebo kovové sítovinu. Tloušťka vysušených sítotiskových vrstev se může pohybovat od 20 nm do 200 μm .

Sítotiskové stroje je možno dělit podle stupně mechanizace (na ruční, poloautomaty, tříčtvrtěautomaty a automaty) anebo podle konstrukce. A právě pro tisk baterií se využívají dva hlavní typy sítotiskových strojů, a to jsou ploché a rotační [2].

3.1.1.1 Ploché sítotisk

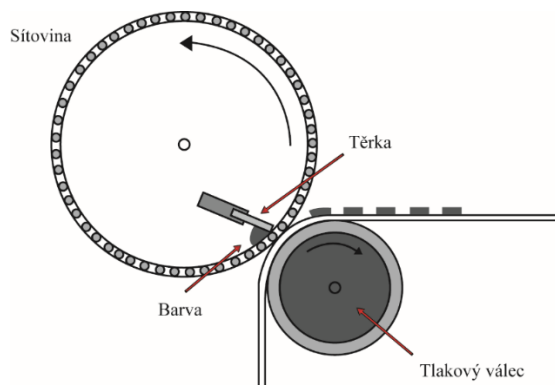
Technologie sítotisku je založena na protlačování tiskové barvy skrze síto na potiskovaný materiál. Při plochem sítotisku je potiskovaný materiál pevně přichycen na stole sítotiskového stroje a tisková barva je protlačována třerkou přes síto se šablonou.



Obr. 5: Schéma plochého sítotisku

3.1.1.2 Rotační sítotisk

Základní princip plochého sítotisku byl upraven pro průmyslové výroby tak, že rotační sítotiskové stroje jsou konstruovány s šablonou zhotovenou jako nekonečný formový válec, proti kterému se otáčí tlakový válec a mezi těmito válci je veden pás potiskovaného materiálu. Těrka s barvou jsou při této technologii umístěny uvnitř formového válce.



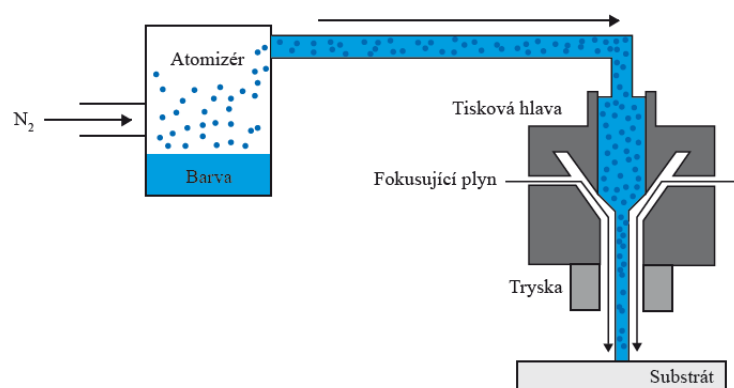
Obr. 6: Schéma rotačního sítotisku

3.2 Bezkontaktní techniky

3.2.1 Aerosolový tryskový tisk

Dalším přístupem k nanášení materiálů pro tištěnou elektroniku, který vytvořila společnost Optomec, je aerosolový tryskový tisk. V závislosti na viskozitě barvy se barva (roztoky a suspenze nanočástic na bázi kovů, slitin, keramiky, polymerů, lepidel nebo biomateriálů) nalije do atomizéru, kde se rozprašuje ve formě kapalných částic o průměru 20 nm až 5 μm. Poté je proudem vzduchu nebo dusíku přenesena do tiskové hlavy, kde se aerosol soustředí proudem fokusujícího plynu na substrát. Aerosolový tryskový tisk lze použít na širokou škálu materiálů a substrátů, protože se jedná o bezkontaktní metodu tisku.

Metodu lze také škálovat, aby splňovala požadavky na velké výrobní objemy. Lze tisknout složité konstrukce (například obrazovky, tenkovrstvé tranzistory, TFT a solární články) a je ideální pro neplanární možnosti. Možnost měnit polohu tiskové hlavy nad substrátem ve směru umožňuje vytvářet složité konformní povrchy (3D tištěná elektronika). Tato metoda ale naráží na několik problémů. Jedním z nich je, že nanášený aerosol se rozptyluje kolem tiskové plochy, což vytváří práškovou mlhu. Dále, je potřeba vybrat metodu tvorby aerosolu (ultrazvukový, nebo pneumatický), tvorbu aerosolu optimalizovat, což je pro některé typy inkoustů, viskozity náročný proces [9].



Obr. 7: Schéma aerosolového tryskového tisku

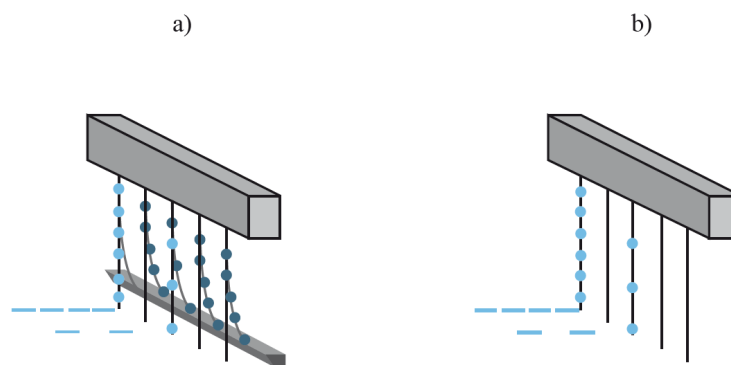
3.2.2 Ink-jet

Inkjetové techniky lze rozdělit do dvou skupin, a to na technologii kontinuálního tisku a technologii "drop-on-demand".

U kontinuálního tisku vzniká nepřetržitý proud kapiček, který je přenášen mezi nabíjecími deskami, kde nabírá elektrický náboj. V případě potřeby, když má být kapička tisknuta, je elektrickým polem usměřována na podklad. Protože produkce kapiček probíhá nepřetržitě, je třeba se vypořádat s nepotřebnými (netisknutelnými) kapičkami. Za tímto účelem se neusměrněné kapičky zachycují ve žlábků a poté se vrací zpět do zásobníku.

Technologie tisku na vyžádání (Drop-on-demand, DOD) získala svůj název podle toho, že kapky jsou vytvářeny pouze v případě potřeby, což umožňuje efektivnější tiskový proces. [10]

Kromě tisku flexibilních baterií je technologie Ink-jetu využívána k vývoji dalších produktů tištěné elektroniky, jako například: Aktivní a pasivní zařízení, jako jsou kondenzátory, tenkovrstvé tranzistory, rezistory, indukční, antény atd.; organické fotovoltaické články a další zajímavé oblasti použití. [2]



Obr. 8: Schéma inkjetového tisku – a) Kontinuální tisk, b) Drop-on-demand

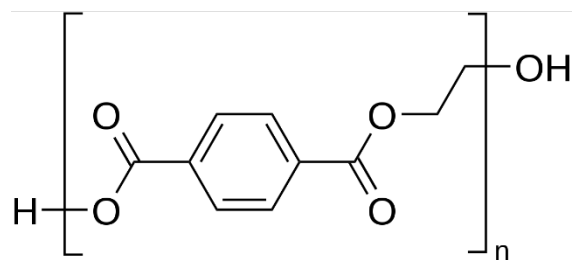
4. Materiály používané jako substráty pro flexibilní baterie

Jako náhradu deskového skla lze využít polymerní fólie. To je levné řešení, které díky své flexibilitě umožňuje zpracování z role do role. Tyto fólie jsou však méně tepelně a rozměrově stabilní než substráty skleněné. Mezi vhodné materiály se řadí: polyethyltereftalát (PET) a polyethylen naftalát (PEN); polykarbonát (PC) a polyethersulfon (PES); a materiály s vysokou teplotou skelného přechodu, jako jsou například polyimidy (PI) [11].

4.1 PET

Polykondenzací kyseliny tereftalové a ethylenglykolu vzniká polyesterová pryskyřice polyethyltereftalát. Co se týče tepelné odolnosti (T_g : 80 °C), je PET méně tepelně odolný než polyimid. Přesto se PET používá v některých deskách s plošnými spoji pro velké obvody, které nevyžadují pájení, protože je cenově dostupný.

Kromě toho se PET používá v různých aplikacích, včetně obrazovek a solárních článků, a má obecně vyvážené mechanické a fyzikální vlastnosti. PET fólie, které mají na sobě povlak ITO (oxid indium a cín), se prodávají komerčně a často se používají jako substráty pro různá zařízení. PET fólie a další krystalické polymerní fólie si po výrobě zachovávají své mechanické a fyzikální vlastnosti na základě dvouosého protahování a tepelné fixace [12].



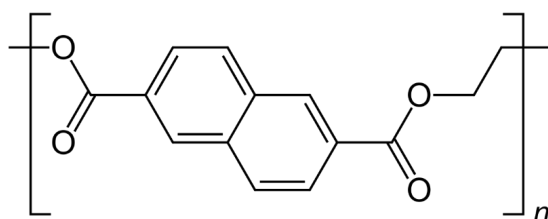
Obr. 9: Vzorec PET

4.2 PEN

Polyethylen naftalát je svou strukturou podobný PET. Je tvořen naftalenem, zatímco PET je tvořen benzenem. Dimethyl-2,6-naftalen dikarboxylát a ethylenglykol jsou základní suroviny používané k výrobě polyesterové pryskyřice známé jako PEN.

PEN sice vykazuje stejný stupeň průhlednosti jako PET, ale překonává PET z hlediska tepelné odolnosti (T_g : 118 °C), chemické odolnosti a rozměrové stability; proto se uvažuje o jeho použití například v organických podkladech pro EL panely. Pro substráty potřebné k výrobě TFT-LCD je T_g PEN stále nedostatečná.

Polyethylen naftalát je vhodný pro vyfukování a vstřikování a lze jej využít pro různé typy lisovaných předmětů. PEN vydrží i v létě použití uvnitř vozidel, protože jeho T_g je přibližně o 40 °C vyšší než u PET [12].

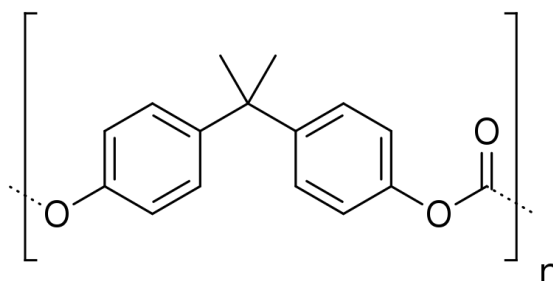


Obr. 10: Vzorec PEN

4.3 PC

Polykarbonát, amorfní polymer vyráběný polykondenzací z bisfenolu A a fosgenu, má teplotu tání přibližně 225 °C a teplotu skelného přechodu 150 °C.

Ačkoli jsou odolnost proti nárazu a elektrické izolační vlastnosti polykarbonátu vynikající, jeho chemická odolnost je nízká. PC se často používá v substrátech pro LCD displeje zejména proto, že má díky své amorfní struktuře lepší optické vlastnosti než krystalické polymery, jako je PET. Polykarbonát má však tendenci k nerovnoměrnému zkreslení v důsledku svého relativně vysokého koeficientu fotoelasticity [12].



Obr. 11: Vzorec PC

4.4 PES

Z nepolyimidových pryskyřic má PES nejvyšší tepelnou odolnost (T_g : 223 °C). Má mnoho vynikajících vlastností, zejména odolnost proti plamenu a dobrou rozměrovou stálost.

PES se využívá v náročných aplikacích. Spolu s PC se začleňuje do substrátů pro LCD displeje, protože je amorfní. PES však často vykazuje nerovnoměrné deformace kvůli svému poměrně vysokému koeficientu fotoelasticity. Kromě toho může kvůli vysoké viskozitě taveniny dojít k zabarvení nebo vypálení při lisování, což může mít za následek vznik černých skvrn [12].

4.5 PI

Kombinací diaminu a dianhydridu (často z aromatické skupiny) vzniká polymer polyimid. Úpravou poměru diaminu a dianhydridu nebo kopolymerací s dalšími složkami lze vytvořit polyimid s různými vlastnostmi. Na trhu jsou různé druhy výrobků.

Vynikající tepelná odolnost polyimidu je zdaleka jeho nejvýznamnější vlastností. Nejzákladnější polyimid na bázi ODA/PMDA (oxydianilin/pyromelitický dianhydrid), vrchol strukturního vzorce, má nejsilnější tepelnou odolnost ze všech polymerů a bod skelného přechodu 400 °C až 500 °C nebo vyšší. Kromě toho má dobré elektrické vlastnosti, tuhost a pružnost. Protože má však polyimid hnědý odstín, nelze jej použít pro transparentní aplikace, jako jsou displeje. Avšak nedávno vyvinuté polyimidy, které mají velkou propustnost světla, se využívají v optických vlnovodech.

V aplikacích s plošnými spoji, které nevyžadují průhlednost, ale vyžadují vysokou tepelnou odolnost, je polyimid hlavním materiálem již od doby, kdy byly plošné spoje poprvé uvedeny na trh v 70. letech 20. století. Jedním z typických produktů používaných v těchto aplikacích je polyimid na bázi ODA/PMDA. Tento výrobek má sice nejlepší tepelnou odolnost, ale má také velké problémy, a proto jsou prováděny různé typy vylepšení složení polyimidu.

Za největší problémy lze považovat absorpci vody, vysokou míru roztažnosti při absorpci vody a jeho odolnost vůči alkáliím [12].

5. Experimentální část

V této práci byly připraveny baterie, které se skládaly z Zn anody a MnO₂ katody. Baterie byly tištěny na materiál Coveme Kemafoil TS HSPL 80 HT pomocí sítotiskového stroje EverBright 3200 HF Jako elektrolyt se použil vodový ZnCl₂/NH₄Cl. Vytiskované baterie byly následně měřeny na strojích Biologic BCS-805 a Neware 4000 5V 50 MA.

Tiskové materiály

Elektrolyt – viskózní elektrolyt založený na koncentrovaném roztoku solí ZnCl₂/NH₄Cl (šarže 2023_06_01_1 Syrový)

Tisková pasta Ag – Rozpouštědlová tisková formulace s Ag částicemi (šarže 2023_05_29_6 Syrový)

Tisková pasta C – Rozpouštědlová tisková formulace s C částicemi (šarže 2023_05_24_5)

Tisková pasta MnO₂ – Rozpouštědlová tisková formulace s vysokým obsahem (> 50 hm. %) MnO₂ (šarže 2023_05_29_2 Syrový)

Tisková pasta Zn – Rozpouštědlová tisková formulace s vysokým obsahem (> 50 hm. %) Zn (šarže 2023_05_29_1 Syrový)

Pomůcky a zařízení

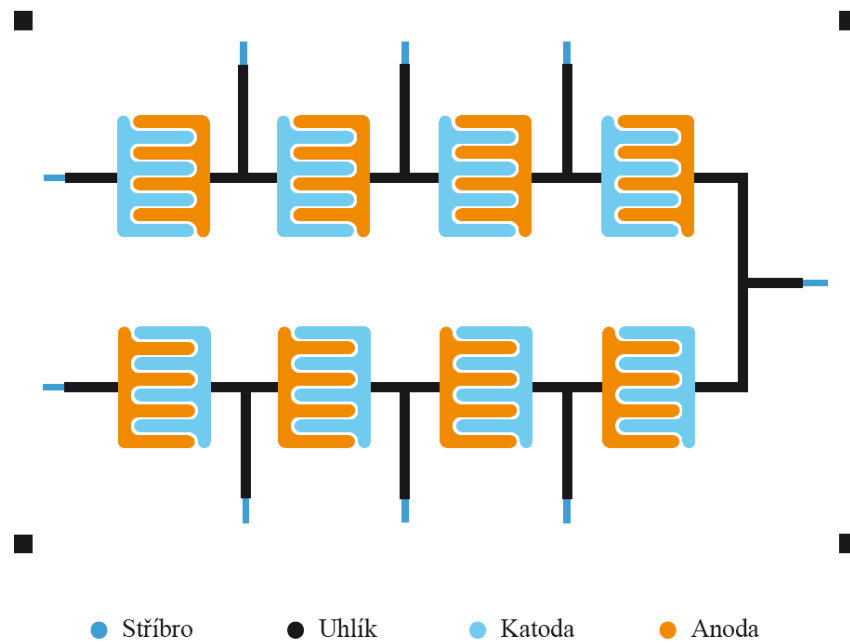
Laserová osvitová jednotka CDI Spark 2120, vakuový kopírovací rám s UV zdrojem, sítotiskový stroj EverBright 3200 HF, Mimaki CFL-60RT, tloušťkoměr Mitutoyo 543-390BS, měřicí přístroje Biologic BCS-805 a Neware 4000 5V 50 MA, programy pro vyhodnocování – BTSDA a BT-Lab

Roztok pro odmaštění sítovin, roztok pro odvrstvení sítovin, světlocitlivá emulze Derasol 915, elektrolyt ZnCl₂/NH₄Cl

Tlaková vodní pistole, fén – pro rychlejší usušení sítovin, ovrstvovací korýtko, ablační film, sítotiskové rámy s napnutou sítovinou s danými hustotami sítě, kartáč, lepenka v rozměru baterie, maska

5.1 Design baterií

Baterie byly koncipovány s koplanární architekturou a byly navrženy v programu Affinity Designer. Samotné schéma baterií je znázorněno na obrázku:



Obr. 12: Schéma baterií

Takto vytištěná baterie umožňovala měřit různé kombinace zapojení článků. Rozvržení jednotlivých částí baterií muselo dodržovat jednotnou mezeru, a to 0,5 mm aby nedošlo ke zkratování. Šířka stříbrných drah byla 0,5 mm, uhlíkových drah 1 mm a drah katody s anodou 1,5 mm.

5.2 Příprava tiskových forem

Cílem bylo připravit tři tiskové formy pro sítotiskový stroj. Pro tisk pasty na bázi stříbra se použilo síto s hustotou sítě 120 vláken/cm. Pro pastu na bázi uhlíku bylo využito síto s hustotou sítě 77 vláken/cm. A pro katodu s anodou síto se 43 vláknů/cm.

Zhotovená tisková předloha se odeslala do počítače u laserové osvitové jednotky CDI Spark 2120. Abláčnický film byl upevněn podle instrukcí obsluhy do osvitové jednotky. Následně se nastavily potřebné parametry pro osvit a posléze se spustil samotný osvit. Po vypálení se film z jednotky vyjmul a neosvícená místa se vymyla hadříkem namočeným v lihu.

Tiskové rámy se sítovinou bylo potřeba nejprve odvrstvit od minulého tisku. Na síto se tedy naněs odvrstvovací roztok a krouživými pohyby kartáčem se roztok aplikoval na celou plochu sítovinu a nechal se krátkou dobu působit. Poté se světlocitlivá vrstva vystříkala vodou s pomocí tlakové pistole. Vymytá síta se nechala oschnout za pomoci fěnu. Takto zpracovaná síta se odmastila roztokem pro odmaštění, opláchla a nechala znovu oschnout.

Po úplném uschnutí sítovinu se pomocí korýtka ovrstvila sítovinu v temné místnosti světlocitlivou emulzí. Ovrstvení bylo provedeno pro síta různě. Pro síta s hustotou sítě 120 a 77 vláken/cm se vrstvila z tiskové strany třikrát a z těrkové strany také třikrát. Pro síto s hustotou sítě 43 vláken/cm se z tiskové strany vrstvila pětkrát a z těrkové strany třikrát. A to z důvodu zlepšení struktury povrchu sítovinu a tím i zlepšení kvality hran tištěného motivu. Rám se sušil ve vodorovné poloze při teplotě 40 °C. Poté se na odkryté kraje síta, kam se ovrstvovací korýtko nedostalo, pomocí štětce naněsla ovrstvovací emulze. Rám se znovu nechal oschnout.

Následně se na sítotiskový rám se suchou světlocitlivou vrstvou přiložila čitelná tisková předloha černou ablačnickou vrstvou na světlocitlivou vrstvu šablony (rámu) na tiskovou stranu. Sítotiskový rám s předlohou se vložil do vakuového rámu, který se zavřel. Z rámu byl odčerpán vzduch a gumová membrána dokonale obemkla sítotiskový rám. Provedla se expozice UV zdrojem. Doba osvitu byla následující:

Pro síto s hustotou sítě: 43 vláken/cm = 370 s; 77 vláken/cm = 150 s a pro síto s hustotou sítě 120 vláken/cm = 90 s

Po expozici se šablona vymyla proudem vody z tlakové pistole. Po vymytí se tisková šablona nechala usušit. Takto usušená tisková forma byla připravena na tisk.

5.3 Tisk

Před samotným tiskem byl precizně nařezán materiál na rozměr A6 (148 × 105 mm) a připravila se tisková náložka, která se následně upevnila na tiskový stůl sítotiskového stroje. Náložka měla rozměry 150 × 107 mm. Takto umístěná náložka zajistila dobrý soutisk všech nanášených past.

Jako první vrstva se tiskla pasta na bázi stříbra šarže 2023_05_29_6 přes síto s hustotou sítě 120 vláken/cm. Po vytištění se vzorky vložily do sušárny vyhřáté na 120 °C na 10 minut. Po vysušení se na vytištěnou vrstvu stříbra tiskla vrstva druhá. A to pasta na bázi uhlíku šarže 2023_05_24_5 přes síto s hustotou sítě 77 vláken/cm. Po tisku se vzorky znova nechaly vysušit v sušárně vyhřáté na 120 °C na 10 minut.

Následně se vzorky zvážily na analytických vahách na pět desetinných míst. Po zvážení se tiskla vrstva pasty Zn šarže 2023_05_29_1 přes síto s hustotou sítě 43 vláken/cm. Vzorky se nechaly znovu vysušit při 120 °C a znovu se zvážily. Na závěr se vytiskla vrstva MnO₂ šarže 2023_05_29_2 přes síto s hustotou vláken 43 vláken/cm. Vzorky se nechaly naposled usušit při 120 °C a opět se zvážily.

5.4 Měření tloušťky

Po vytištění byly změřeny tloušťky všech vrstev na substrátu pomocí tloušťkoměru. Měření bylo provedeno na vzorcích, u kterých nebylo dosaženo dobrého soutisku.

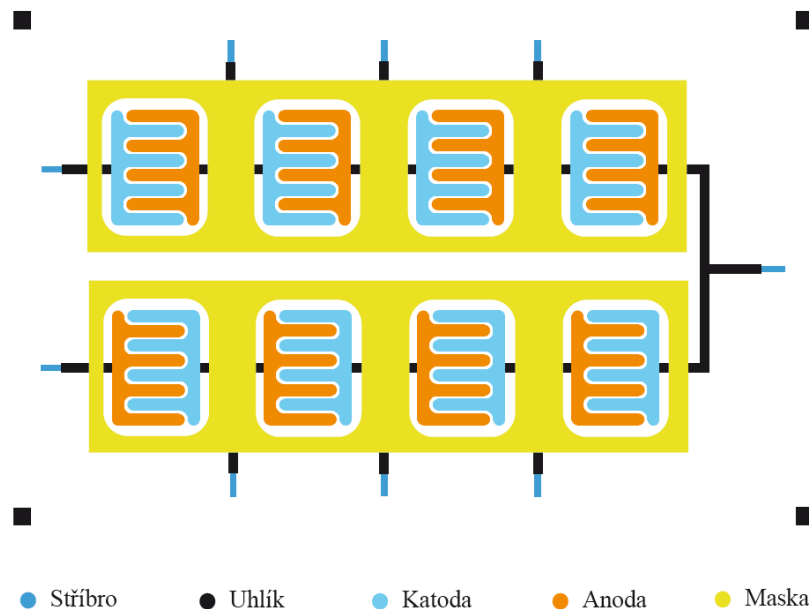
Na každém vzorku byla změřena tloušťka všech vytištěných funkčních vrstev (stříbra, uhlíku, Zn a MnO₂) a samotného substrátu na tři desetinná místa. Měření proběhlo celkem na čtyřech nepoužitých vzorcích, a to z důvodu možného poškození spojů tloušťkoměrem při měření. Samotné měření bylo provedeno na pěti různých místech každé vytištěné vrstvy.

Tabulka 1: Měření tloušťky jednotlivých vrstev v mm

	Substrát	Stříbro	Uhlík	Zn	MnO ₂
Vzorek 1	0,131	0,004	0,008	0,034	0,044
	0,133	0,002	0,008	0,039	0,048
	0,133	0,005	0,002	0,044	0,053
	0,131	0,004	0,010	0,035	0,049
	0,133	0,005	0,004	0,041	0,043
Vzorek 2	0,130	0,007	0,006	0,036	0,047
	0,130	0,005	0,008	0,041	0,045
	0,129	0,007	0,005	0,042	0,056
	0,131	0,008	0,006	0,042	0,044
	0,131	0,004	0,005	0,042	0,054
Vzorek 3	0,134	0,003	0,008	0,029	0,040
	0,132	0,004	0,015	0,032	0,033
	0,130	0,004	0,014	0,031	0,051
	0,132	0,010	0,004	0,029	0,052
	0,130	0,010	0,002	0,040	0,045
Vzorek 4	0,139	0,002	0,002	0,038	0,042
	0,139	0,002	0,005	0,032	0,045
	0,135	0,005	0,003	0,040	0,051
	0,138	0,001	0,001	0,037	0,045
	0,134	0,008	0,002	0,037	0,046
Průměr	0,133	0,005	0,007	0,037	0,047
Směrodatná odchylka	0,0029	0,0025	0,0038	0,0045	0,0052

5.5 Měření vybíjecí kapacity

Před měřením bylo potřeba nanést elektrolyt pouze na články. Proto byla ze substrátu a oboustranně lepící pásky vyřezána na storji Mimaki CFL-60RT maska, která se lepila okolo článků.



Obr. 13: Schéma baterií s maskou

Na každý měřený vzorek byla nalepena maska. Po nalepení masky bylo vždy nadávkováno 0,104 g elektrolytu na článek. Elektrolyt se následně zalepil materiálem Coveme Kemafoil TS HSPL 80 HT aby vytvořil rovnoměrnou vrstvu na článku.

Měření jednoho, dvou a tří zapojených článků proběhlo na měřícím stroji Neware 4000 5V 50 MA a bylo vyhodnoceno v programu BTSDA. Avšak měření čtyř a sedmi zapojených článků muselo proběhnout na měřícím stroji Biologic BCS-805, protože měřicí stroj Neware nedokázal měřit články s tak velkým napětím.

Pro měření se musela vypočítat hmotnost aktivní vrstvy MnO_2 , a to proto, aby bylo možné vzorky porovnat. Pro výpočet byla použita data z vážení každé vrstvy na pět desetinných míst. Dále musela být spočtena teoretická kapacita článku.

5.5.1 Teoretická kapacita

Ta byla spočítána pomocí Faradayova zákona: $Q_{teoretická} = \frac{nF}{3600 \times M_w}$

n = látkové množství, F = Faradayova konstanta, M_w = molekulová hmotnost

$$M_w = 86,937 \text{ g/mol}$$

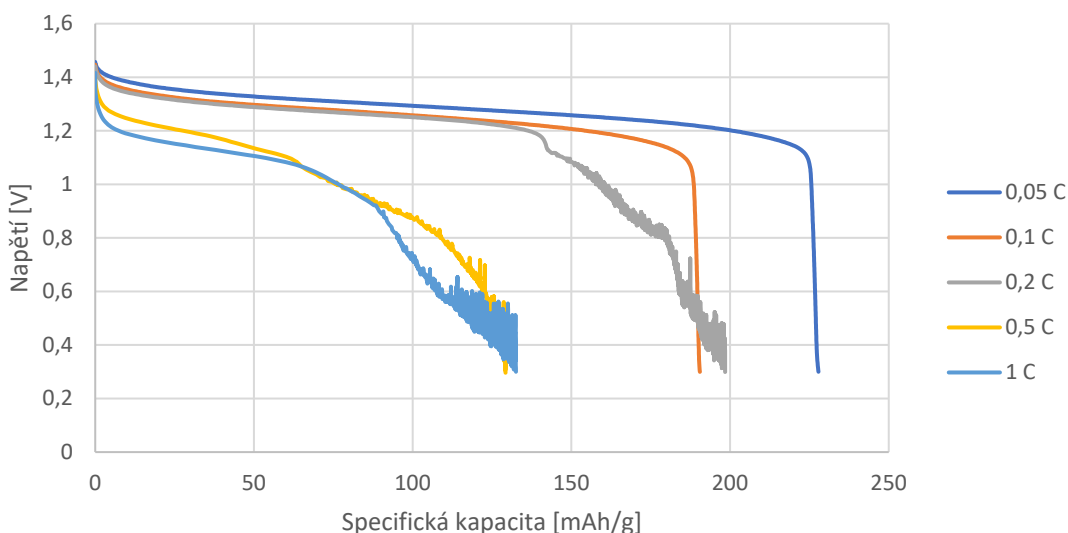
$$n = 1 \text{ mol}$$

$$F = 96\,485,3329 \text{ sA mol}^{-1}$$

Po dosazení všech příslušných veličin byla stanovena teoretická kapacita na 308 mAh/g. Na pokyn vedoucího práce byla použita kapacita 190 mAh/g, která odpovídá prakticky dosažitelným kapacitám pro daný katodový materiál při proudové zátěži 0,1 C.

5.5.2 Stanovení optimálních podmínek měření

Pro stanovení optimálních podmínek bylo využito měření při různé proudové zátěži na jednom zapojeném článku. Díky tomuto měření bylo možné změřit limit proudové zátěže, při které dojde k poklesu napětí a tím i k menší kapacitě. Měření probíhalo při proudových zátěžích: 0,05 C; 0,1 C; 0,2 C; 0,5 C; 1 C. Při zátěži 0,05 C se článek vybil za 20 hodin, při 0,1 C za 10 hodin, při 0,2 za 5 hodin, při 0,5 C za 2 hodiny a při rychlosti 1 C za 1 hodinu.



Obrázek 14: Měření optimálních podmínek

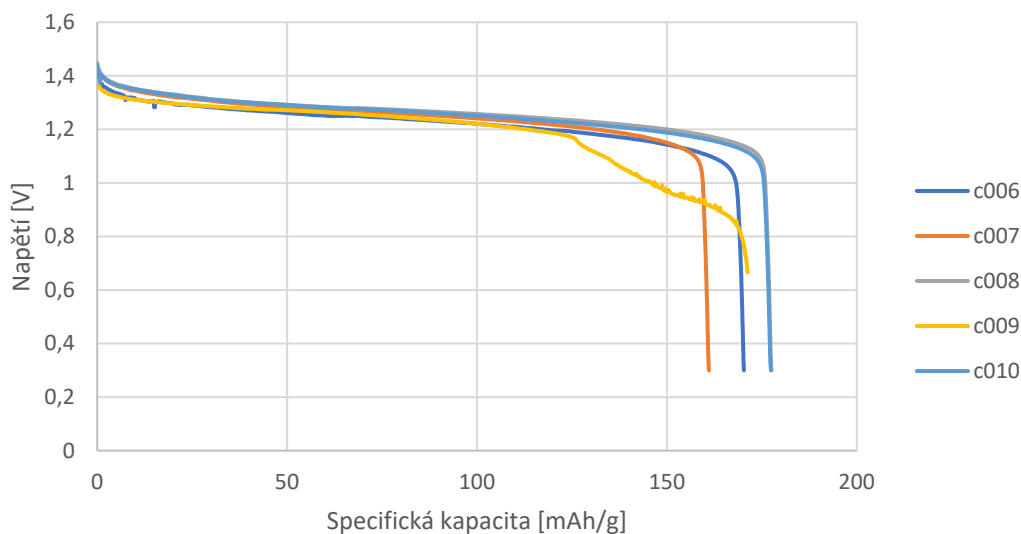
Tabulka 2: Naměřené hodnoty při měření optimálních podmínek

Proudová zátěž [C]	0,05	0,1	0,2	0,5	1
Specifická kapacita [mAh/g]	227	190	198	129	132

Na *Obrázku 14* je možné pozorovat, jaký je vybíjecí průběh jednoho článku při různé proudové zátěži. Z měření vyplynulo, že při velké proudové zátěži (0,2; 0,5 a 1 C) dochází k rapidnímu poklesu napětí a menší kapacitě, kterou může článek předat. Limitem je vnitřní odpor článku, který je dán laterární strukturou. Další faktor, který mohl mít vliv na měření, byla vodivost použitého elektrolytu.

Po analýze tohoto měření bylo rozhodnuto, že pro měření vybíjecí kapacity pro následující vzorky bude použita proudová zátěž 0,1 C. Při této zátěži článek dosáhl teoretické kapacity 190 mAh/g, vztaženo na katodový materiál článku.

5.5.3 Měření jednoho zapojeného článku – 1,5 V



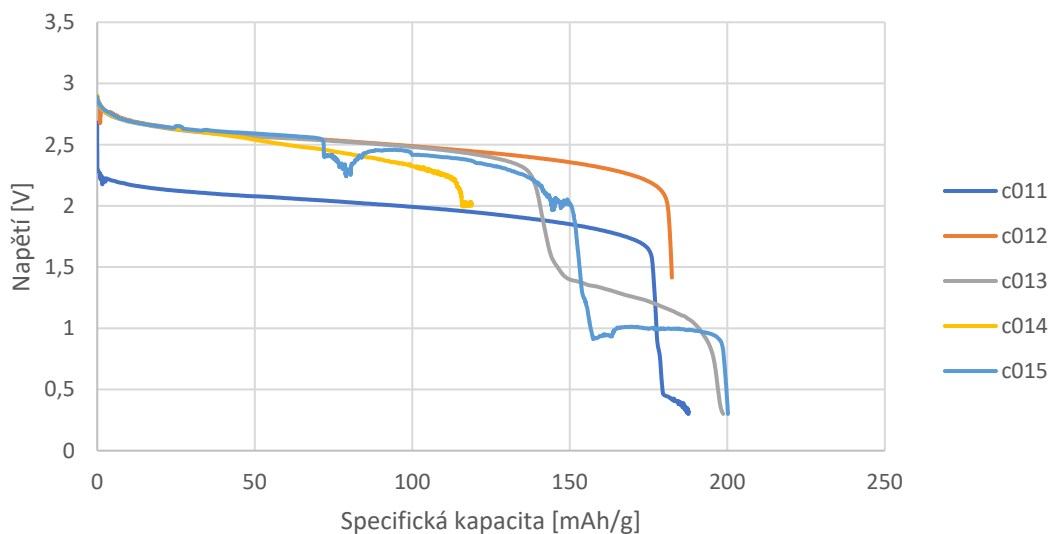
Obrázek 15: Měření jednoho zapojeného článku

Tabulka 3: Naměřené hodnoty při měření jednoho zapojeného článku

Vzorky	Hmotnost aktivní hmoty [mg]	Dosažená kapacita [mAh]	Specifická kapacita [mAh/g]	Napětí před měřením [V]
c006	5,98	0,963	170	1,407
c007	5,98	0,901	161	1,445
c008	6,06	1,076	177	1,448
c009	5,08	1,018	172	1,388
c010	6,06	1,046	177	1,443
Průměrná specifická kapacita a směrodatná odchylka [mAh/g]			171 (6)	

Na *Obrázku 15* byla analyzována závislost napětí na specifické kapacitě jednoho zapojeného článku. Výchozí napětí odpovídalo skoro ve všech případech 1,44 V. Z grafu je vidět, že největší specifickou kapacitu při vybíjecím cyklu dosáhl článek s označením c008 a c010, a to 177 mAh/g. Nejmenší specifická kapacita (161 mAh/g) byla naměřena u článku s označením c007. U článku c009 při měření došlo k rozpojení kontaktu, a tak se článek měřil nejkratší dobu.

5.5.4 Měření dvou zapojených článků – 3 V



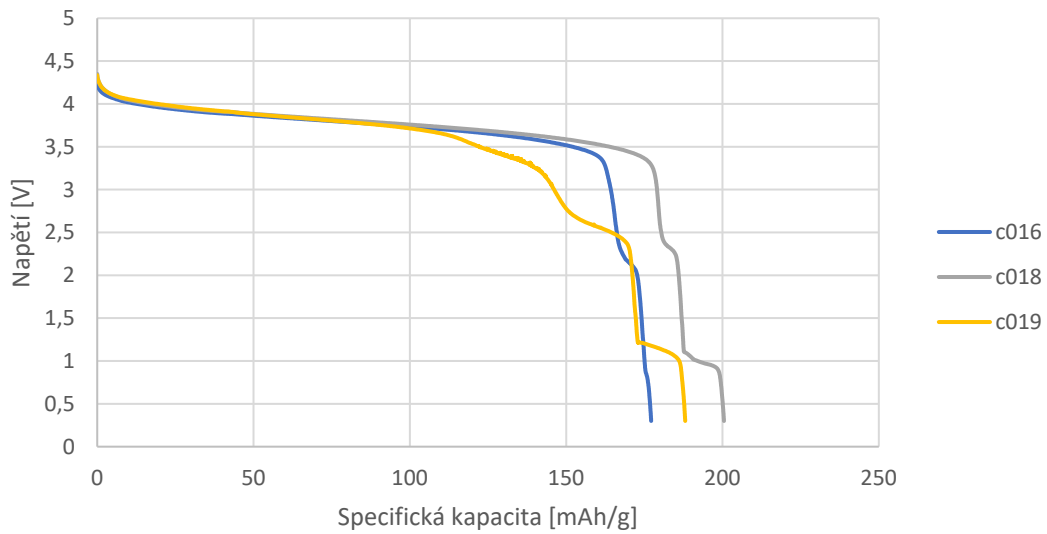
Obrázek 16: Měření dvou zapojených článků

Tabulka 4: Naměřené hodnoty při měření dvou zapojených článků

Vzorky	Hmotnost aktivní hmoty [mg]	Dosažená kapacita [mAh]	Specifická kapacita [mAh/g]	Napětí před měřením [V]
c011	6,28	1,156	187	2,680
c012	6,28	0,908	184	2,901
c013	6,04	1,179	198	2,877
c014	5,88	0,872	148	2,899
c015	5,88	1,177	200	2,889
Průměrná specifická kapacita a směrodatná odchylka [mAh/g]			192 (7)	

Na *Obrázku 16* byla analyzována závislost napětí na specifické kapacitě dvou zapojených článků. Výchozí napětí odpovídalo průměrně 2,88 V. Z grafu je možné vyčíst, že největší specifické kapacity dosáhly články s označením c013 a c015, a to 198 a 200 mAh/g. Lze si také povšimnout, že u těchto článků docházelo při měření k náhlým poklesům napětí. To je možné zdůvodnit tím, že na člancích nebylo dosaženo řádného pokrytí elektrolytem. U článků c012 a c014 nebyly naměřeny validní data, protože při měření došlo k rozpojení kontaktu, a tak nebyla započítána do průměru.

5.5.5 Měření tří zapojených článků – 4,5 V



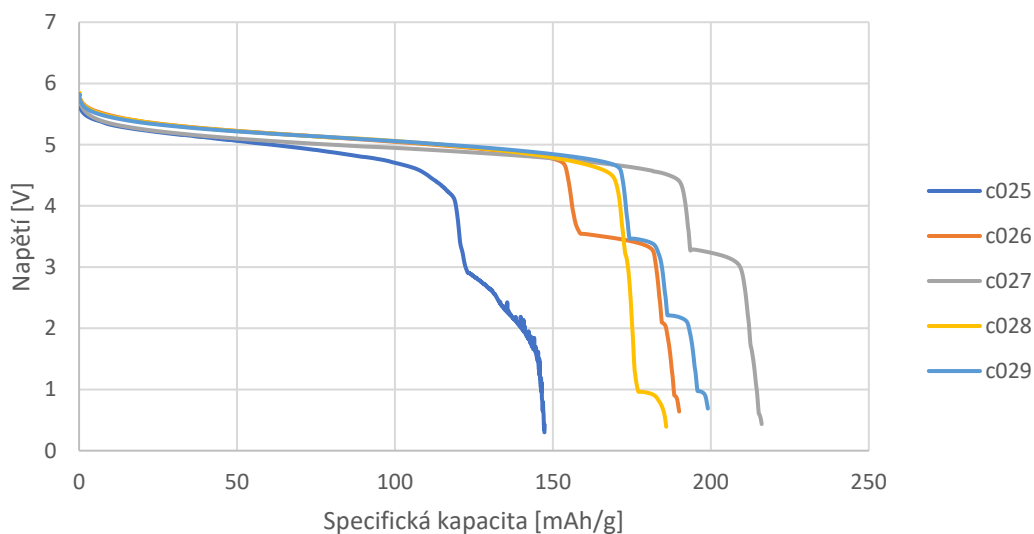
Obrázek 17: Měření tří zapojených článků

Tabulka 5: Naměřené hodnoty při měření tří zapojených článků

Vzorky	Hmotnost aktivní hmoty [mg]	Dosažená kapacita [mAh]	Specifická kapacita [mAh/g]	Napětí před měřením [V]
c016	6,43	1,139	177	4,253
c018	6,06	1,215	200	4,351
c019	5,08	0,959	188	4,335
Průměrná specifická kapacita a směrodatná odchylka [mAh/g]			188 (9)	

Na *Obrázku 19* byla analyzována závislost napětí na specifické kapacitě tří zapojených článků. Výchozí napětí odpovídalo průměrně 4,34 V. Z grafu je vidět, že největší specifickou kapacitu při vybíjecím cyklu dosáhl článek s označením c018, a to 200 mAh/g. Nejmenší specifická kapacita (177 mAh/g) byla naměřena u článku s označením c016.

5.5.6 Měření čtyř zapojených článků – 6 V



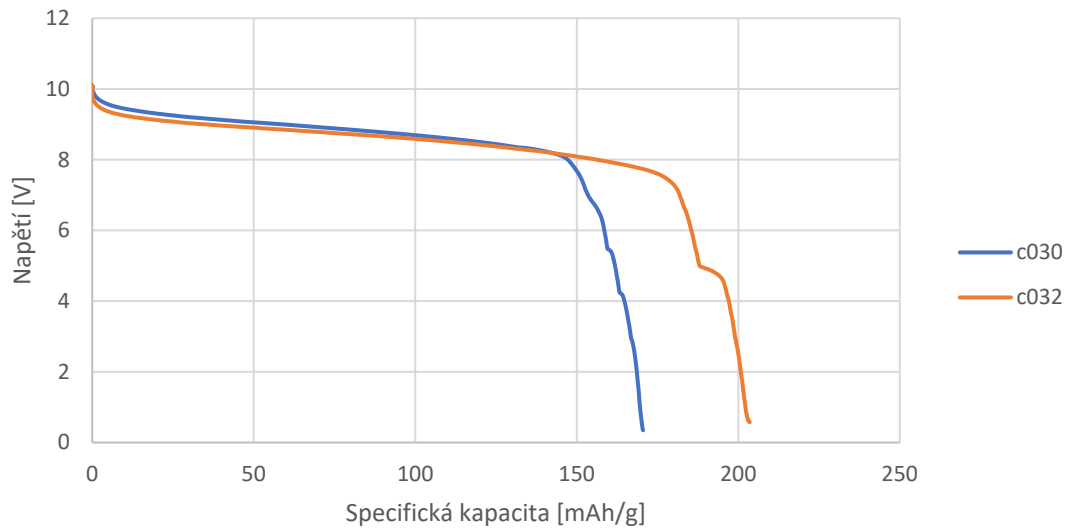
Obrázek 18: Měření čtyř zapojených článků

Tabulka 6: Naměřené hodnoty při měření čtyř zapojených článků

Vzorky	Hmotnost aktivní hmoty [mg]	Dosažená kapacita [mAh]	Specifická kapacita [mAh/g]	Napětí před měřením [V]
c025	6,08	0,896	147	5,716
c026	6,08	1,155	190	5,840
c027	6,37	1,176	216	5,785
c028	5,87	1,195	186	5,842
c029	5,10	1,015	199	5,817
Průměrná specifická kapacita a směrodatná odchylka [mAh/g]			198 (12)	

Na *Obrázku 18* byla analyzovaná závislost napětí na specifické kapacitě čtyř zapojených článků. Pro toto měření byla zvolena proudová zátěž 0,05 C. Výchozí napětí odpovídalo průměrně 5,80 V. Z grafu je možné vyčíst, že největší specifické kapacity dosáhl článek s označením c027, a to 216 mAh/g. Nejmenší specifická kapacita byla naměřena u článku c025 – 147 mAh/g (tento článek nebyl započítán do průměru). U všech měřených článků docházelo při měření k náhlým poklesům napětí, pravděpodobně z důvodu nedostatečně řádného pokrytí článku elektrolytem.

5.5.7 Měření sedmi zapojených článků – 10,5 V



Obrázek 19: Měření sedmi zapojených článků

Tabulka 7: Naměřené hodnoty při měření sedmi zapojených článků

Vzorky	Hmotnost aktivní hmoty [mg]	Dosažená kapacita [mAh]	Specifická kapacita [mAh/g]	Napětí před měřením [V]
c030	5,55	0,947	171	10,082
c032	6,20	1,267	204	10,069

Na *Obrázku 19* byla analyzována závislost napětí na specifické kapacitě sedmi zapojených článků. Pro toto měření byla zvolena proudová zátěž 0,05 C. Výchozí napětí odpovídalo průměrně 10,075 V. Je vidět, že článek s označením c032 dosáhl větší specifické kapacity (204 mAh/g) než článek c030 (171 mAh/g).

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s tiskem tenkovrstvých flexibilních baterií na bázi Zn anody a MnO₂ katody. Experimentální část se skládala z tisku jednotlivých baterií na sítotiskovém stroji, měření tloušťky jednotlivých funkčních vrstev a vyhodnocení vybíjecích charakteristik různých kombinací zapojení článků.

Z měření tloušťky funkčních vrstev vyšlo, že průměrná tloušťka vrstvy stříbra byla 0,005 mm, průměrná tloušťka vrstvy uhlíku byla 0,007 mm, průměrná tloušťka vrstvy zinku byla 0,037 mm a průměrná tloušťka vrstvy oxidu manganičitého byla 0,047 mm. Průměrná tloušťka použitého substrátu Coveme Kemafoil TS HSPL 80 HT byla 0,133 mm.

Z měření vybíjecí kapacity bylo možné vyhodnotit, že z jednoho zapojeného článku je možné získat napětí o průměrné hodnotě 1,44 V. Dále je možné z měření jednoho článku vyvodit, že zvolená laterální IDE struktura baterií nelimituje vybíjecí proud při proudové zátěži 0,05 C, protože byly naměřeny podobné kapacity i pro více sériově zapojených článků. Sériovým zapojením až 7 článků bylo možné získat flexibilní baterii s napětím 10,075 V.

7. Použitá literatura

- [1] KABEŠ, K. *Význam tištěné elektroniky stále roste*. Časopis automa, č. 10 [online]. 2019 [cit. 2023–02–15]. Dostupné z: <https://automa.cz/cz/vyhledavani/vyhledavani-V%3%bdznam%20ti%5%a1t%4%9bn%3%a9%20elektroniky%20st%3%a1le%20roste/>
- [2] OLIVEIRA, Juliana, Carlos Miguel COSTA a Senentxu LANCEROS-MÉNDEZ. Printed Batteries: An Overview. In: LANCEROS-MÉNDEZ, Senentxu a Carlos Miguel COSTA. *Printed Batteries: Materials, Technologies and Applications*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-28789-6.
- [3] REDDY, Thomas a LINDEN, David, *Linden's Handbook of Batteries* [S. l.] 2010. ISBN 978-1-282-91428-5
- [4] *Co je to elektrochemický zdroj* – Časopis Elektro – Odborné časopisy. [online]. 2014 [cit.2023–02–21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/co-je-to-elektrochemicky-zdroj—12911>
- [5] GÄRTNER, Harald. *Kompendium chemie*. Vyd. 2. Praha: Knižní klub, 2013. Universum (Knižní klub). ISBN 978-80-242-3993-4.
- [6] *Alkaline Manganese Dioxide: Handbook and Application Manual*. Energizer Brands, LLC. [online]. [cit. 2023–03–08]. Dostupné z: https://data.energizer.com/pdfs/alkaline_appman.pdf
- [7] *Battery characteristics* [online]. University of Cambridge Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS) [cit. 2023–03–05]. Dostupné z: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery_characteristics.php

[8] PLÉHA, D., P. DVOŘÁK, M. KUNOVJÁNEK, M. MUSIL a O. ČECH. *Separátory pro alkalické akumulátory*. Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, 2012 (1).

[9] CRUZ, Sílvia Manuela Ferreira; ROCHA, Luís A. a VIANA, Júlio C. *Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics*. In *Flexible Electronics*, RACKAUSKAS, Simas (ed.); 2018 [cit. 2023–04–22]. ISBN 978-1-78923-457-2

[10] BEEDASY, Vimanyu a Patrick J. SMITH. *Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing* [online]. 2020 [cit. 2023–03–23]. Dostupné z: DOI:10.3390/ma13030704

[11] CHENG, I. C.; WAGNER, S. *Overview of Flexible Electronics Technology*. In *Flexible Electronics: Materials and Applications*; Salleo, A.; Wong, W. S., Eds.; Springer: Boston, 2009. ISBN 978-0-387-74362-2

[12] *Printing technology for Flexible Substrates* [online]. InterLingua Publishing, 2006 [cit. 2023–03–28]. ISBN 1-884730-46-9. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=MOBBP6tGd8EC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=true>