

**UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA POLYGRAFIE A FOTOFYZIKY**

**Tisk a charakterizace vodivých funkčních struktur na
3D objektech**

Autor: Bc. Štěpánka Kosová

Vedoucí práce: Doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.

Diplomová práce

2019

**UNIVERSITY OF PARDUBICE
FACULTY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF GRAPHIC ARTS AND PHOTOPHYSICS**

**Printing and characterization of conductive paths on
3D shaped objects and surfaces**

Author: Bc. Štěpánka Kosová

Supervisor: Assoc. Prof. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.

Master thesis

2019

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpánka Kosová**
Osobní číslo: **C17470**
Studijní program: **N3441 Polygrafie**
Studijní obor: **Polygrafie**
Název tématu: **Tisk a charakterizace vodivých funkčních struktur na 3D objektech**
Zadávací katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

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

1. Proveďte rešerši v patentové, vědecké a firemní literatuře na téma tisku vodivých struktur na 3D objektech a površích s 3D strukturou. Zhodnoťte výhody i nevýhody vybraných tiskových technik pro danou aplikační oblast.
2. Za použití vhodných tiskových materiálů, tiskových substrátů a především technologie mikrodispenzing připravte vodivé struktury jak na 2D substrátech, tak na 3D objektech.
3. Proveďte důkladnou charakterizaci vzorků vytištěných danou tiskovou technikou a komentujte vliv volených parametrů tisku, tiskových substrátů na dosažené parametry funkčních struktur.
4. Z provedených analýz vyvoďte závěry a doporučení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání diplomové práce: **27. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2019**

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 27. února 2019

Prohlášení

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 5. 2019

Štěpánka Kosová

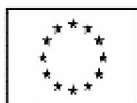
Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Tomáši Syrovému, Ph.D. za veškerou pomoc, odborné vedení, trpělivost a čas, který mi v průběhu této práce věnoval. Ze srdce děkuji své rodině a snoubenci za podporu ve studiu, ale i v životě.

Tato práce vznikla za podpory projektu “Baterie na bázi organických redoxních látek pro energetiku tradičních i obnovitelných zdrojů (ORGBAT)“, registrační číslo: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007445, financovaného z EFRR.

Tato práce vznikla za podpory projektu “ „SMARTFIELD – Automatický systém sběru a zpracování teplotních a vlhkostních parametrů mikroklimatu a půdy pro podmínky precizního zemědělství v ČR na principu Internetu věcí (IoT), registrační číslo: QK1810010, financovaného z aplikovaného výzkumu Ministerstva zemědělství na období 2017-2025 ZEMĚ.

Diplomová 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



MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ,
MĚLČENÍ A TĚLUVÝCHOVY

Anotace

Diplomová práce se zabývá tiskem na strukturované povrchy a 3D objekty pomocí digitální technologie přímého zápisu – mikrodispensingu. Teoretická část popisuje konvenční a digitální tiskové technologie, kterými lze aplikovat vodivé struktury na neplanární povrchy. V každé kapitole zabývající se tiskovými technologiemi je popsán jejich princip, výhody, nevýhody a aplikační možnosti v oblasti tištěné elektroniky. Experimentální část se zabývá aplikací vodivých struktur technologií mikrodispensingu na strukturované a 3D povrchy. Této části předcházela charakterizace využitých tiskových formulací, přenosové charakteristiky a reprodukovatelnost vodivých linek mikrodispensigem. V závěru práce jsou provedeny analýzy vytištěných struktur a jejich vyhodnocení pomocí optické mikroskopie, profilometrie a měřením elektrických vlastností.

Klíčová slova

mikrodispensing (mikrodávkování), tištěná elektronika, vodivé inkousty, tisk na 3D objekty, tisk na strukturované povrchy

Annotation

The master thesis deals with printing on structured surfaces and 3D objects using digital direct write technology - microdispensing. The theoretical part describes conventional and digital printing technologies, which allow application of conductive traces to non-planar surfaces. Each chapter dealing with printing technologies describes their principle, advantages, disadvantages and possible applications in the field of printed electronics. The experimental part is focused on the application of conductive structures of microdispensing technology to structured and 3D surfaces. This part is preceded by characterization of used print formulations, transmission characteristics and reproducibility of conductive lines by microdispensing. Finally, the analysis of printed structures is performed by means of optical microscopy, profilometry and measurement of electrical properties.

Key words

mikrodispensing, printed electronics, conductive inks, print on 3D objects, print on 3D surfaces

Obsah

Úvod.....	16
1. Teoretická část.....	17
1.1. Konvenční tiskové technologie	17
1.1.1. Tamponový tisk	17
1.1.1.1. Princip tamponového tisku	17
1.1.1.2. Tisková forma	18
1.1.1.3. Výhody a nevýhody tamponového tisku	19
1.1.1.4. Vodivé struktury tištěné tamponovým tiskem	20
1.1.2. Tisková technologie Soft blanket gravure.....	21
1.1.2.1. Princip Soft blanket gravure.....	22
1.1.2.2. Výhody a nevýhody Soft blanket gravure.....	23
1.1.2.3. Vodivé struktury tištěné Soft blanket gravure	23
1.2. Digitální tiskové technologie	26
1.2.1. Aerosol Jet	26
1.2.1.1. Princip technologie Aerosol Jet	27
1.2.1.2. Výhody a nevýhody technologie Aerosol Jet	27
1.2.1.3. Vodivé struktury tištěné Aerosol Jetem.....	28
1.2.2. Mikrodispensing.....	30
1.2.2.1. Technologie Mikrodispensingu.....	30
1.2.2.2. Výhody a nevýhody Mikrodispensingu.....	34
1.2.2.3. Vodivé struktury tištěné Mikrodispensingem	35
2. Experimentální část.....	40
2.1. Přístroje a zařízení.....	40
2.1.1. Mikrodispensingová tiskárna.....	40
2.1.2. Stereolitografická tiskárna Formlabs Form 2.....	41
2.1.3. Korona Lab Treator typ ASL-400-TUM.....	41
2.2. Využití materiály	42

2.3.	Využitý software.....	42
2.3.1.	CNC USB Controller.....	43
2.4.	Experimentální postupy a hodnocení výsledků	43
2.4.1.	Viskozitní křivky tiskových formulací	43
2.4.2.	Materiálový tisk	46
2.4.2.1.	Hodnocení reprodukovatelnosti mikrodispensingu.....	46
2.4.2.2.	Stanovení kvality vytištěných vodivých linek	48
2.4.2.2.1.	Tisk na podložní sklo – hodnocení kvality tisku	49
2.4.2.2.2.	Tisk na strukturovaný povrch Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra	53
2.4.2.2.3.	Tisk na válcový 3D objekt.....	54
2.4.2.2.4.	Tisk na vlastní vymodelovaný 3D objekt.....	59
2.4.3.	Analýza obrazu	62
2.4.3.1.	Vizuální hodnocení strukturovaných substrátů a 3D objektů.....	62
2.4.3.2.	Optická mikroskopie.....	67
2.4.3.2.1.	Tisk na podložní sklo – hodnocení kvality tisku	68
2.4.3.2.2.	Tkanina Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra	78
2.4.3.2.3.	Válcový 3D povrch	85
2.4.3.2.4.	Pozitivní/negativní 3D objekty	87
2.4.3.3.	Profilometrie	88
2.4.3.4.	Elektrický odpor na potištěných tkaninách	91
3.	Závěr.....	94
	Citovaná literatura.....	96
	Seznam zkratk	102
	Přílohy.....	103

Úvod

Vývoj a vědecká činnost zaměřená na materiálový tisk jej často zkoumá z pohledu konvenčních tiskových technologií, kterými jsou nejčastěji hlubotisk, flexotisk a sítotisk. Mezi digitálními technologiemi dominuje inkjet. Všechny jmenované technologie jsou však zaměřeny především na potisk planárních povrchů.

Naproti tomu existují technologie, kterými lze tisknout přímo na 3D povrchy. Z řad konvenčních technologií zaměřených na potisk trojrozměrných předmětů lze jmenovat tampónový tisk a novější technologii soft blanket gravure. U digitálních technologií, jde především o aditivní systémy přímého zápisu, kam jsou řazeny také jednotlivé metody kapalinového mikrodispensingu. Tyto systémy využívají pro dávkování kapalin injekční stříkačky opatřené tenkou jehlou, či speciální keramické trysky. Depozice kapaliny je provedena na základě digitálních dat ve třech souřadnicích, které nejsou závislé na tvaru či rozměrech objektu, proto je možné tisknout na různorodé substráty a 3D tvary. Výzkumy zaměřené na využití mikrodispensingu v tištěné elektronice většinou využívají dispensing pájecích past v kombinaci s povrchovou montáží elektronických součástek. V současnosti se jen malá část výzkumů zabývá využitím mikrodispensingu v oblasti tištěné elektroniky přímo na 3D povrchy či strukturované substráty a právě proto je na tuto oblast zaměřena tato diplomová práce.

Tisk mikrodispensingovým zařízením vyžaduje kontrolu několika tiskových parametrů, kterými jsou rychlost tisku, vzdálenost trysky od substrátu, nastavení tiskového tlaku nebo výběr vhodného průměru trysky, které se vztahují k požadovanému rozlišení, viskozitě kapaliny a výše zmíněným tiskovým parametrům. V této diplomové práci je demonstrován tisk na strukturované substráty a 3D objekty a zároveň je sledován vliv jednotlivých procesních parametrů na dosaženou kvalitu vodivých struktur. V rámci této studie jsou klíčovými parametry rychlost tisku a nastavený tlak. Velmi důležitým parametrem pro dosažení vysoké kvality tisku je také vzdálenost trysky od substrátu.

1. Teoretická část

1.1. Konvenční tiskové technologie

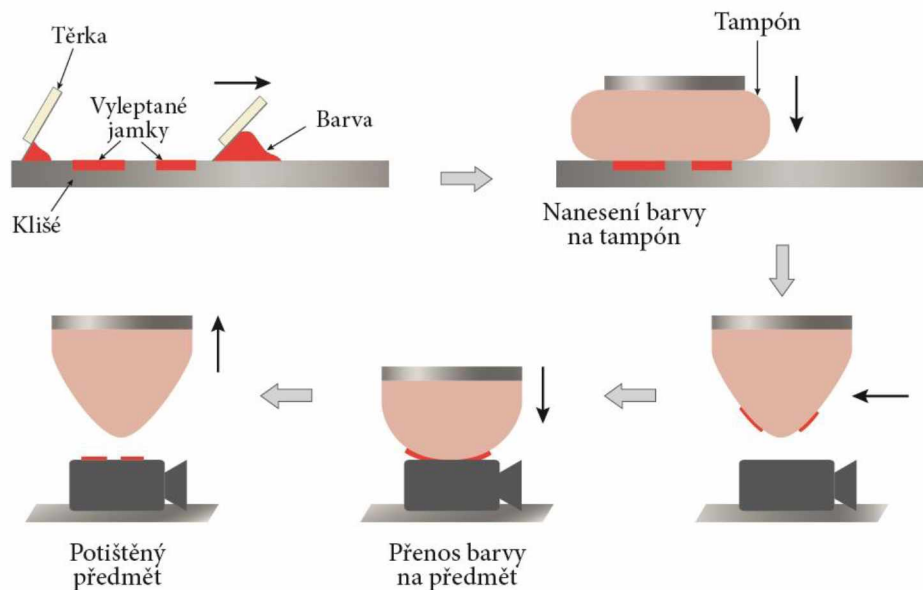
Tiskové techniky je možné klasifikovat podle tiskové formy na *konvenční* a *digitální*. Techniky, které pro reprodukci obrazu využívají fyzickou tiskovou formu, jsou nazývány konvenčními. Do této kategorie lze zařadit v praxi běžně využívané technologie jako tamponový tisk, flexotisk, hlubotisk, ofset, sítotisk nebo například méně známou techniku soft blanket gravure. V následujících kapitolách jsou popsány technologie využívané pro tisk na 3D objekty a strukturované povrchy, tedy tamponový tisk a soft blanket gravure.

1.1.1. Tamponový tisk

Tamponový tisk je jedna z mladších konvenčních technologií patřící do kategorie nepřímého tisku z hloubky. Tato technologie tisku je běžně využívána pro potisk trojrozměrných a planárních předmětů. Původně pochází ze Švýcarska, kde byla zprvu využívána v hodinářském a keramickém průmyslu. Dnes nabízí uplatnění především v reklamním odvětví k potisku menších předmětů. Využívaná je také v automobilovém a lékárenském průmyslu. S rozvojem vodivých past nachází využití také při tisku elektroniky. V závislosti na aplikaci jsou využívány tiskové formy a tampony různých rozměrů, tvarů a materiálů [1].

1.1.1.1. Princip tamponového tisku

Tiskové stroje mohou mít otevřenou nebo uzavřenou konstrukci barevníku. V obou uvedených případech je nejdříve tisková forma (nazývaná klišé nebo štoček) zaplněna barvou a v dalším kroku je nadbytek barvy odstraněn, buď stěrkou anebo hranou uzavřeného barevníku. Po tomto kroku barva zůstane pouze v zahluběných místech formy. Nepřímost tisku pak spočívá v primárním nanesení barvy na pružný tampon a následném přenosu barvy na substrát. Popsaný princip je tedy cyklicky opakující se proces, který znázorňuje obrázek 1 [2]. Kromě uvedeného konstrukčního uspořádání barevníku se tiskové stroje dále odlišují stupněm automatizace, kde se dělí na ruční a poloautomatická zařízení anebo plně automatické linky.



Obrázek 1 Schématické znázornění principu tampónového tisku. Adaptováno z [3].

1.1.1.2. Tisková forma

Úkolem tiskové formy je přenášet tiskovou barvu na tampon. Pro tampónový tisk je možné využívat třech druhů tiskových forem – fotopolymerní, keramické a ocelové. Kromě materiálu je možné zvolit tiskovou formu plochou nebo válcovou. Uvedené tiskové formy se liší náročností výroby a výdržností. *Fotopolymerní* klišé tvoří nosná kovová destička o tloušťce 0,3–0,4 mm s rovnoměrně nanesenou vrstvou fotorezistu. Výdržnost tohoto typu klišé se pohybuje okolo 30 tisíc výtisků a vzhledem ke snadné produkci a cenové dostupnosti je nejpoužívanější tiskovou formou. *Ocelová* klišé, též planžety, tvoří ocelové destičky o tloušťce 0,5 mm nebo 10 mm. Tiskové prvky jsou vytvářeny dvěma způsoby – leptáním za použití fotocitlivé vrstvy, anebo laserovým vypalováním do speciální povrchové vrstvy. Rozdíl uvedených tloušťek je ve výdržnosti forem. Zatímco forma tvořená tenčí destičkou je schopna reprodukovat 200–500 tisíc výtisků, forma tvořená tlustší destičkou je v závěru výroby kalená, což navýší počet výtisků až k 1 milionu [2]. Hloubka leptaného reliéfu se různí, je ale možné říci, že se obvykle pohybuje v rozmezí 15–30 μm [4]. Posledním typem je *keramické* klišé, do kterého je reliéf vypalovaný laserem. Vzhledem k životnosti formy, která se blíží dvěma milionům výtisků, je tento typ klišé využíván pro velkonákladové produkce [2]

1.1.1.3. Výhody a nevýhody tamponového tisku

Hlavní výhoda tamponového tisku spočívá v možnosti tisku na zakřivené předměty a různé textury, což je umožněno tvarováním poddajného přenosového tampónu okolo nerovnoměrného substrátu. Využití tampónu představuje další výhodu, například při tisku křehkých produktů je kontakt měkkého tamponu přívětivější oproti síle aplikované úzkou čepelí v sítotisku [5].

Důležitý faktor kvality tisku představují tampony, které jsou vyráběny odléváním silikonového kaučuku do negativní formy, ve které probíhá následná vulkanizace. Použitý tvar, tvrdost či velikost tamponu závisí především na velikosti tištěného motivu a charakteru potiskovaných předmětů. Právě tvrdost, která se pohybuje v rozmezí 2–20 Shore A, případně pro speciální aplikace až do 40 Shore A, je podstatná vzhledem k potiskovanému materiálu nebo tvaru předmětu [2]. Pro tisk na ploché předměty jsou vhodnější tvrdší tampony, kterými je možné dosáhnout poměrně vysokého rozlišení a brilantnosti [2] [6]. Naopak pro strukturované a vícerozměrné předměty jsou doporučeny tampony měkkí [2].

Ačkoliv se životnost klišé blíží ke zmíněným dvěma milionům, životnost tamponu se pohybuje pouze v rozmezí 20–500 tisíc výtisků, což by se mohlo zdát problémové, nicméně jednoduchá konstrukce stroje umožňuje snadnou a rychlou výměnu jak klišé, tak tamponu [1]. K nevýhodám by mohlo patřit zkreslení přeneseného vzoru vlivem povrchu potiskovaného objektu. Problému je však možné předejít prostudováním deformace vzoru, které poskytne informace pro korekce, které je nutné zahrnout do předtiskové přípravy a výrobního procesu tiskové desky [3]. Volba vhodného tamponu je rovněž určující pro správnou reprodukci, vzhledem k vysokému tiskovému tlaku. Tampóny mohou ovlivnit zejména přesnost tisku a nárůst tónové hodnoty. Rovněž stabilní povrchové napětí tamponu hraje důležitou roli vzhledem k nánosu barvy na tampon a následnému přenosu tiskové barvy na substrát [7]. Barva musí být navíc chemicky kompatibilní s povrchem tamponu v tom smyslu, že jej nesmí poškodit a zároveň musí správně přilnout. Výběr tiskových barev závisí především na potiskovaném materiálu. Používají se nejčastěji rozpouštědlové jednosložkové barvy vhodné pro tisk na termoplasty a papír, dvousložkové barvy na nesavé povrchy a na produkty, kde je zapotřebí mechanická či chemická odolnost. Dále jsou využívány barvy na keramiku, UV tvrditelné barvy anebo speciální druhy barev jako tepelně nebo elektricky vodivé pasty [2] [8].

Problémy mohou nastávat u nárůstu tónové hodnoty. Studie A. Willharta [9] se zabývala optimalizací a tiskem jemných struktur na PET fólie. Během tisku vodivými inkousty docházelo k nárůstu pozitivních linek o 10–20 %, což může být problém, protože rozměry linek ovlivňují elektrické vlastnosti tištěné elektroniky. Zároveň s vodivými inkousty na bázi uhlíku a stříbra

A. Willhart vytiskl tytéž struktury běžnými barvami pro tamponový tisk. Bylo zjištěno, že výsledné struktury tištěné vodivými inkousty, dosahují horší kvality než jemné linky tištěné běžnými barvami pro tamponový tisk. Tato nedokonalost byla způsobena reologickými vlastnostmi vodivých barev, velikostí uhlíkových a stříbrných částic a jejich vyšší koncentrací. S ohledem na všechny proměnné byly v uvedené studii vytištěny širší linky v rozmezí od 20 μm do 30 μm . Jelikož Giovanni Nisato *et al.* [10] uvádějí, že je možné tamponovým tiskem dosáhnout širší linek až 20 μm , považují výše zmíněný výsledek za velmi dobrý.

1.1.1.4. Vodivé struktury tištěné tamponovým tiskem

Tamponový tisk se stává v tištěné elektronice poměrně rozšířenou technikou. Úspěšně byl aplikován při tisku ultra vysokofrekvenčních RFID štítků na rovný a konvexní povrch [11]. Vytištěny byly také polovodičové plynové sensory [12], aktivní vrstva polymerního solárního článku [13] nebo tenkovrstvý elektroluminiscenční displej [14].

Už v roce 1998 byly vytištěny jemné struktury solárního článku, modifikovanými sítotiskovými pastami na bázi stříbra [5]. Hanne *et al.* [5] si kladli za cíl vytisknout pomocí tamponového tisku solární články, které byly jinak tištěné sítotiskem. Hlavní problém řešený během výzkumu se týkal především reologie tiskových inkoustů. Na tuto problematiku se proto podrobněji zaměřili v pozdějším výzkumu [6], ve kterém vyvíjeli vhodnou tiskovou formulaci pro potřeby tamponového tisku. Modifikace se týkala výběru vhodného těkavějšího rozpouštědla, snížení viskozity a upravení lepivosti pojiva.

Práce Taik-Min Lee *et al.* [14] se zabývá tiskem elektroluminiscenčního displeje (EL) na zakřivené povrchy. Pro tisk displejů jsou využívány také další konvenční tiskové techniky jako sítotisk, flexotisk nebo hlubotisk, nicméně ani jedna ze zmíněných technologií nedokáže aplikovat motiv přímo na méně či více zakřivený povrch [14]. Cílem této práce [14] bylo ověřit, zda je tamponový tisk vhodnou a dostatečně přesnou technikou pro mikrokontaktní tisk. Zároveň byla zkoumána deformace vzoru při tisku. Na základě experimentů nejprve stanovili nejmenší tištěnou linii, která byla 35 μm široká a 2,4 μm vysoká (tloušťka). Zkreslení linek bylo prakticky demonstrováno na rovné podložce, na které byly linky vlivem deformace tamponu rozšířeny o méně než 5 μm . Předpokládaná deformace tamponu v konvexním tvaru nádoby s poloměrem zakřivení 80 mm byla simulována numerickou metodou konečných prvků (anglicky Fine Element Method – FEM). Zkreslení tištěného vzoru u zakřivených předmětů závisí vždy na jejich geometrii. Při praktické zkoušce se deformace vzoru v zakřivené ploše nádoby lišila vzhledem k tomu, zda se jednalo o střed (menší zkreslení) nebo okraj tamponu, kde se projevilo větší zkreslení tištěného vzoru. Vytištěný displej uvedený na obrázku 2 se skládá z pěti vrstev: spodní

elektrody, dielektrika, vrstvy fosforu, transparentní elektrody, přenosové elektrody. Při napájení 200V napětím, 1 kHz, vykazoval luminanci 180 cd/m². Funkčnost vytištěného displeje demonstruje obrázek 3.



Obrázek 2 Schématické znázornění vrstev elektrochemického displeje, tištěného do nádoby níže zobrazené [14].



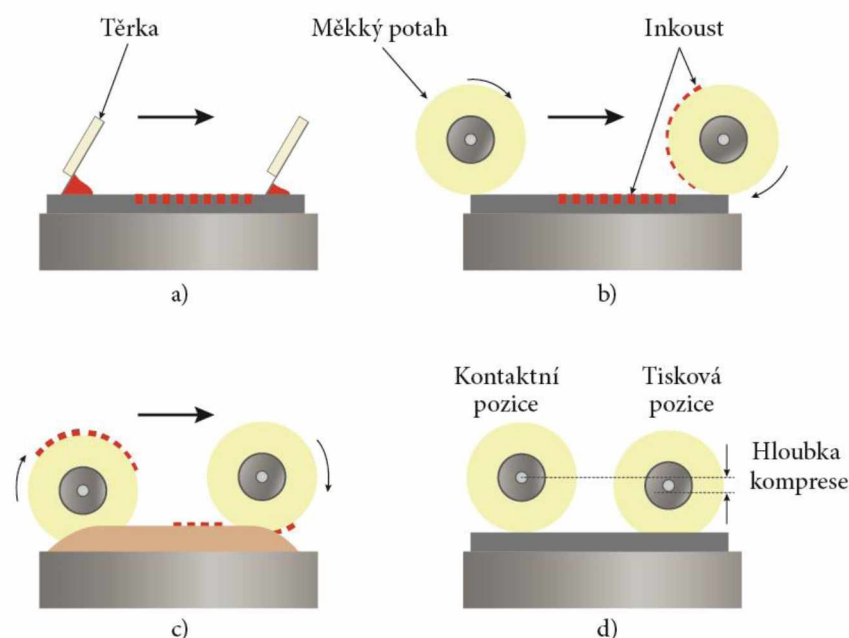
Obrázek 3 Elektroluminiscenční displej tištěný tamponovým tiskem na nádobu s poloměrem zakřivení 80 mm při 200 V, 1 kHz s luminancí 180 cd/m² [14].

1.1.2. Tisková technologie Soft blanket gravure

Soft blanket gravure (SBG) je novější perspektivní technologie vynalezená pro potřeby tisku jemných vodivých struktur na nerovnoměrné nebo 3D objekty. Základní princip a výhody v podobě vysokého rozlišení a produktivity vycházejí z nepřímého hlubotisku. Hlavní diferencovanost těchto dvou příbuzných technik spočívá v tom, že nepřímý hlubotisk využívá tenký a zároveň tvrdý ofsetový potah, zatímco SBG má ofsetový potah velmi měkký [15].

1.1.2.1. Princip Soft blanket gravure

Základní tříkrokový princip tisku popisuje obrázek 4. V prvním kroku (obr. 4a) je tisková forma zcela zaplněna barvou a veškerá přebytečná barva je setřena planžetou. Druhým krokem (obr. 4b) je takzvaný „přijímací proces“. Měkký ofsetový válec je odvalován na tiskové formě a přijímá inkoust z hlubotiskových jamek. Právě ofsetový potah je velmi důležitou částí SBG metody. Jeho vysoká míra kompresibility umožňuje přizpůsobení zakřivenému povrchu. Porovnání parametrů měkkého ofsetového potahu vzhledem ke konvenčnímu jsou popsány v tabulce 1. Ve třetím, posledním kroku (obr. 4c) dochází k přenosu barvy z přenosového válce na potiskovaný materiál. Tisková forma a potiskovaný předmět jsou fixovány, zatímco měkký ofsetový válec rotuje v důsledku třecí síly mezi ním a tiskovou deskou nebo potiskovaným předmětem [15].



Obrázek 4 Schéma tiskového procesu soft blanket gravure, a) nanášecí proces, b) přijímací proces ve kterém měkký ofsetový válec přijímá barvu z hlubotiskové tiskové desky, c) přenos barvy na nerovnoměrný povrch, d) znázornění hloubky komprese. Adaptováno z [15].

Tabulka 1 Porovnání využitého potahu v konvenčním reverzním a SBG hlubotisku [16].

	Měkký potah SBG	Konvenční potah
Materiál	poly(dimethylsiloxan) (PDMS)	poly(dimethylsiloxan) (PDMS)
Způsob aplikace potahu	Vytvarováno (molded) na kovovém válci	Upnutí (wrapped) na kovový válec
Průměr potahu	100 mm	100 mm
Délka potahu	150 mm	150 mm
Tloušťka PDMS	15 mm	0,45 mm
Tvrdość PDMS (ISO 7619)	>1	45
Míra komprese PDMS při tisku	2,5 mm	0,11 mm

1.1.2.2. Výhody a nevýhody Soft blanket gravure

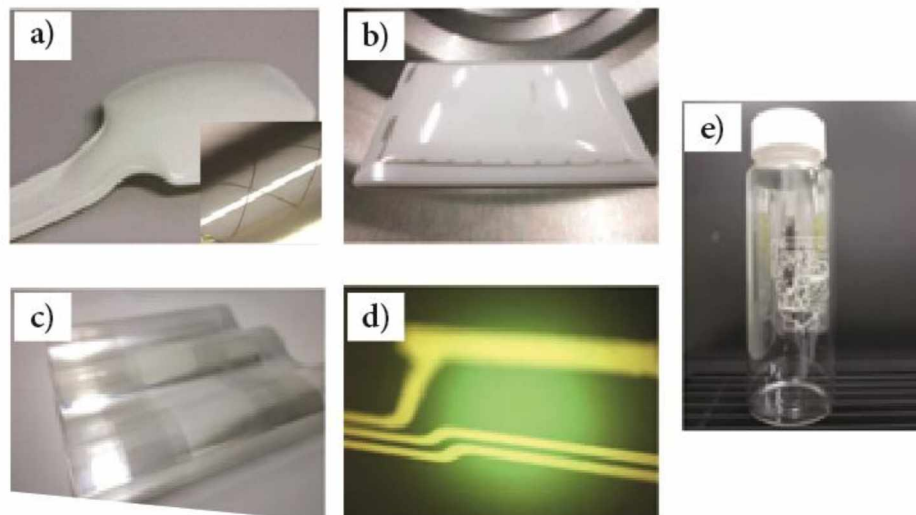
Výhodou SBG technologie je efektivita tiskového procesu v tom smyslu, že je barva lépe přenášena z tiskové formy na potiskovaný substrát v důsledku lepšího přijímání rozpouštědel obsažených ve vodivých inkoustech. Absorpci rozpouštědel do PDMS potahu je možné ovlivnit tloušťkou potahu nebo jeho stupněm sesíťování. Výsledkem je nános vyšší tloušťky vodivé formulace na substrát než poskytuje příbuzná technologie nepřímého hlubotisku. Jelikož je SBG konvenční technologie, která kromě konstrukčního uspořádání deska-deska nabízí také kotoučovou variantu, je možné dosáhnout vyšších objemů vytištěné produkce. Další výhodou, která byla experimentálně prokázána je schopnost měkkého potahu přijmout vodivé formulace i z hlubších hlubotiskových jamek a to mnohem lépe než umožňuje nepřímý hlubotisk. Výsledné vodivé struktury byly rovnější a dosahovaly vyššího nánosu tiskové formulace. V poslední řadě SBG technologie je schopná tisknout vodivé struktury zředěnými stříbrnými formulacemi o něco lépe než nepřímá hlubotisková technologie [16].

Jako nevýhoda by se dalo považovat složitější optimalizace tiskových podmínek, kdy při špatně zvolené rychlosti tisku anebo tlaku dochází k deformaci ofsetového potahu v přijímacím procesu a tím jsou deformovány také vytištěné vodivé struktury [15].

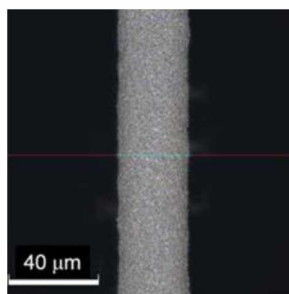
1.1.2.3. Vodivé struktury tištěné Soft blanket gravure

Izumi, Yoshida a Tokito ve svém výzkumu [15] poprvé představili techniku soft blanket gravure a v závěru prezentovali výtisky jemných vodivých struktur na 3D objektu. Přestože je tato technologie podobná hlubotisku, vyžadovala optimalizaci tiskových podmínek, zejména tlaku a rychlosti tisku. Ve své studii využili měkký ofsetový válec s tvrdostí 1° (ISO 7619) o tloušťce 15 mm. Tlak tisku je úměrný kompresibilitě měkké vrstvy ofsetového potahu obdobně jako u nepřímého hlubotisku [15]. Izumi se svým týmem museli provést řadu experimentů, aby objasnili, jaký podíl má na výsledné tisky komprese měkké vrstvy. Optimalizace probíhala nejprve tiskem na rovný povrch. Míra komprese měkké vrstvy válce byla zkoumána pomocí Yonekura Mfg CARY-M2KN zařízení měřící napětí. Měření probíhalo za zvyšujícího se tlaku, který odpovídal deformaci vzorku od 0–33% při rychlosti deformace 10 mm/min. Napětí v měkké ofsetové vrstvě se zvýšilo jen mírně a výsledky ukázaly, že míra komprese měkkého ofsetového válce je úměrná tiskovému tlaku. Dále se zabývali závislostí rychlosti tisku (5, 10, 30 a 50 mm/min) na šířce jemných linek, které byly tištěny v šíři 50 μm při kompresibilitě potahu 2,5 mm stříbrným inkoustem DIC GOAGT-93C s 75–85 % pevných částic stříbra. Pokud byl nastaven příliš nízký tlak nebo vysoká rychlost, linky byly vytištěny přerušovaně, tedy v nevhovující kvalitě. Naopak vysoký tlak nebo nízká rychlost přijímacího procesu zapříčinily smrštění a zúžení linek. Tento jev je typický pro SBG metodu a vzniká v důsledku natlačení měkkého

ofsetového potahu do jamek hlubotiskové formy, čímž dochází k deformaci motivu už před tiskem, přímo na ofsetovém potahu. Po optimalizaci tisku na planární povrch byly vodivé struktury vytištěny na trojrozměrné předměty (obr. 5) a taktéž byl pořízen mikroskopický snímek vytištěné vodivé linky s šířkou 30 μm (obr. 6) [15].



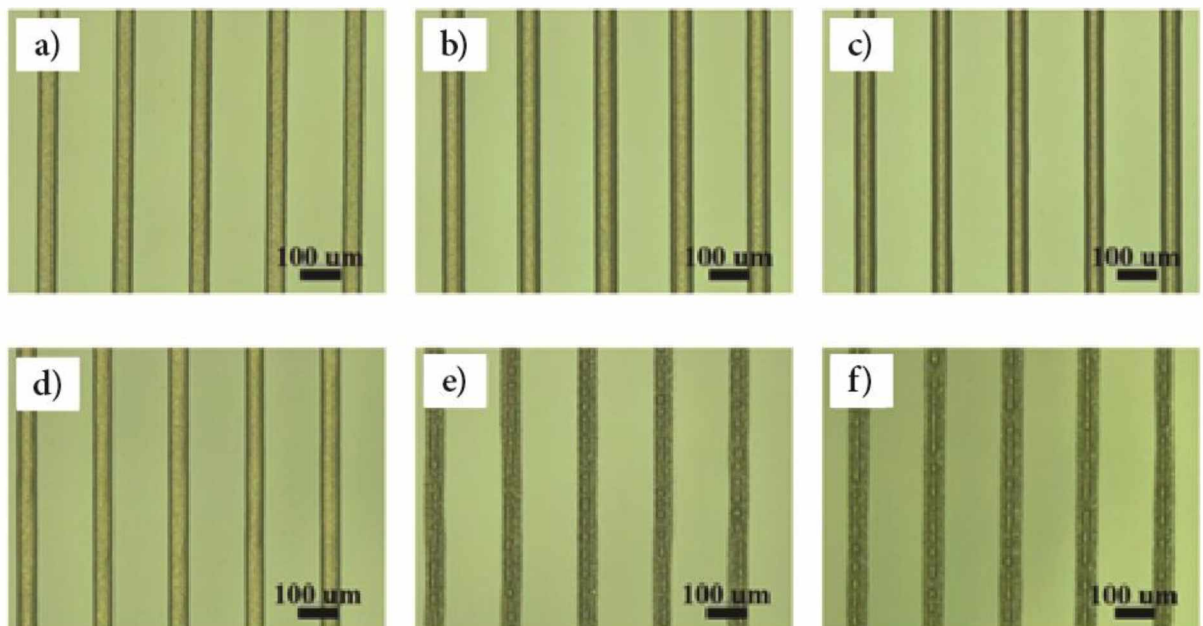
Obrázek 5 Ukázky aplikace vodivých struktur po optimalizaci tiskového procesu na zakřivené povrchy: a) vzor jemné vodivé sítě na lžici, b) tisk vodivých linek na dotykový sensor, c) tisk na vlnitý povrch, d) přibližná aplikace obrázku b, e) tisk elektrického obvodu na lahev [15].



Obrázek 6 Mikroskopický snímek tištěné linky. Šíře linky je 30 μm a tloušťkou nánosu 4 μm [15].

V následujícím experimentu [16] zkoumali Izumi, Yoshida a Tokito přenos inkoustu na sklo (obr. 7). Pro výzkum využili tři tiskové formy s rozlišením 50 μm linka/150 μm mezera s hloubkami jamek 10, 20 a 30 μm , vodivý inkoust DIC GOATG-93C na bázi stříbra se 75–85 % pevných částic stříbra. Vzorky byly tištěny SBG metodou a porovnávány se vzorky tištěnými konvenčním nepřímým hlubotiskem. Výsledky ukázaly, že SBG tiskárna přenáší vyšší nános inkoustu, přičemž šířka linek (50 μm) byla u obou technik zachována. Dále bylo experimentálně zjištěno, že nepřímá hlubotisková metoda vykazuje problémy s přenosem linek z intaglio jamek o hloubce 20 a 30 μm . Vytištěné linie byly nerovnoměrné a místy přerušované, což je vyobrazeno na mikroskopickém snímku 7 e) a f). Je tedy možné vyvodit závěr, že SBG metoda

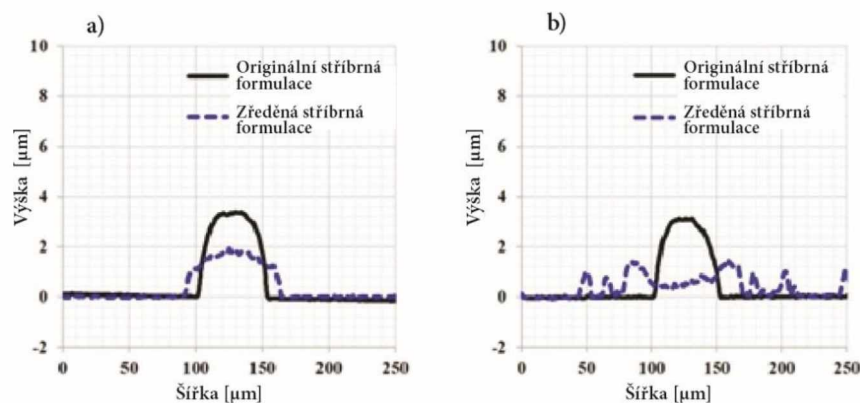
v porovnání s nepřímým hlubotiskem dokáže vytisknout tlustší (vyšší) linky při zachování jejich kvality.



Obrázek 7 Mikroskopický snímek vodivých linek tištěných SBG metodou při různé hloubce intaglio jamek: a) 10 μm , b) 20 μm , c) 30 μm a konvenčním nepřímým hlubotiskem d) 10 μm , e) 20 μm , f) 30 μm [16].

V dalším experimentu Izumi, Yoshida a Tokito [16] zkoumali přenos téhož inkoustu avšak se sníženou viskozitou naředěním izoforonem na desetinu původní viskozity. Na základě předchozího experimentu byla využita hloubka tiskových jamek 10 μm a opět byla srovnávána metoda SBG s nepřímým hlubotiskem. Studium této problematiky prokázalo, že SBG metoda dokáže tisknout tenké vodivé linky nízkoviskózním inkoustem s vyšším obsahem rozpouštědla, zatímco nepřímý hlubotisk, jak je vidět z grafu 1 toto nedokáže.

Hlavní pointa právě uvedeného a výše představeného experimentu byla poukázat na fakt, že měkký ofsetový potah využitý v SBG metodě dosahuje efektivnějšího přijímacího procesu. V důsledku nižší hustoty zesíťování PDMS absorbuje měkký ofsetový potah více rozpouštědla, čímž zvyšuje kohezní síly vodivého inkoustu v hlubotiskových jamkách, a tím dochází k většímu nánosu inkoustu na měkký ofsetový potah v přijímacím procesu [16]. Další vědecká činnost v oblasti tištěné elektroniky SBG metodou by mohla vést k využití potenciálu a širšímu uplatnění při potisku 3D předmětů materiálovým tiskem.



Graf 1 Profil průřezu vytištěné linky SBG metodou (a) a nepřímým hlubotiskem (b) původním inkoustem na bázi stříbra (černá plná čára) a zředěným inkoustem (modrá přerušovaná čára) [16].

1.2. Digitální tiskové technologie

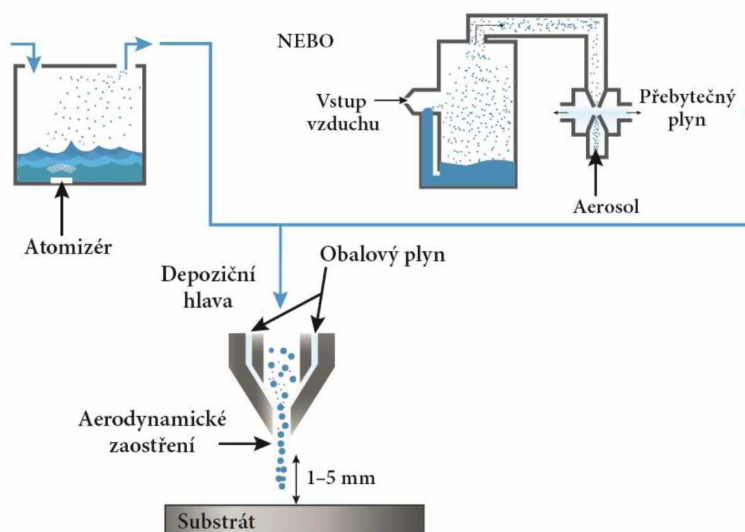
Součástí množiny aditivních technologií jsou technologie přímého zápisu (z anglického Direct Write, dále jen DW). Oblast tištěné elektroniky se neustále vyvíjí, proto je potenciál digitálních technologií viděn nejen v efektivnějším vývoji, ale i v produkci menších sérií výrobků [17]. V tištěné elektronice jsou využívány různé technologie přímého zápisu, které se liší rozlišením, způsobem nebo rychlostí tisku. V následujících kapitolách jsou konkrétněji popsány Aerosol Jet a technologie mikrodispensingu.

1.2.1. Aerosol Jet

V posledních letech byla velká pozornost věnována rozvoji nových metod pro rychlou a levnou výrobu tištěné elektroniky [18]. Jednou z nich je aditivní technologie zvaná Aerosol Jet (AJP), řazená k DW metodám. Aerosol Jet byl vyvinut a patentován v roce 2007 [19] industriální společností Optomec, která je v současnosti předním výrobcem těchto tiskáren [20]. AJP dokáže vytvářet velmi jemné linky s rozlišením od 5 μm s nánosem vrstvy v rozmezí 10 nm až 10 μm [3], což umožňuje tisk vysoce výkonných aktivních i pasivních mikro součástek od odporů, mikroantén, mikrobaterií přes snímače, kondenzátory nebo tenkovrstvé tranzistory [21]. Tato průlomová technologie je vhodná jak pro rychlou výrobu prototypů, tak pro malosériovou výrobu nebo pro výzkumné činnosti [22]. Díky podpoře širšího rozsahu viskozit počínaje 0,7 mPa·s až do 2500 mPa·s mohou být využity různé tiskové materiály, kterými jsou nanočásticové uhlíkové inkousty, sítotiskové pasty, vodivé polymery, lepidla nebo dokonce biomateriály [21] [3]. Inkousty mohou obsahovat pevné částice v průměru do 500 nm [23].

1.2.1.1. Princip technologie Aerosol Jet

Základní princip zobrazený níže na obrázku 8 spočívá v aerodynamickém usměrňování funkčních inkoustů ve formě aerosolu. Proces začíná vytvořením tiskových dat v Computer Aided Design/Manufacturing (CAD/CAM) softwarech, která jsou převedena na vektorovou cestu a uložena ve standardním souboru dxf (Drawing Exchange format). Výstupem je tedy soubor poskytující informace řídicímu systému tiskárny. V prvním kroku tiskového procesu je inkoust umístěn buď v pneumatickém nebo ultrazvukovém atomizéru, který generuje aerosol s průměrem kapek od 1 do 5 μm [21]. Následně je aerosol přiváděn do depoziční hlavy. Na vstupu depoziční hlavy dochází prostřednictvím speciální profilované trysky k interakci aerosolu s nosným plynem, kterým je buď stlačený vzduch, nebo dusík. Na výstupu je takto obklopený aerosol urychlen tryskou a soustředěn do úzkého paprsku [24]. Rozlišovací schopnost je úzce spjata s průměrem trysek, která se pohybuje v rozmezí od 50 do 300 μm a zároveň s poměrem průtoku [18] [20]. Na substrát dopadá aerosolový paprsek ze vzdálenosti 2–5 μm s rychlostí až 100 m/s, představuje výhodu při aplikaci inkoustu na nerovnoměrné povrchy a 3D objekty [18].



Obrázek 8 Schéma Aerosol Jet tiskového procesu s využitím ultrazvukového a pneumatického atomizéru. Adaptováno z [3].

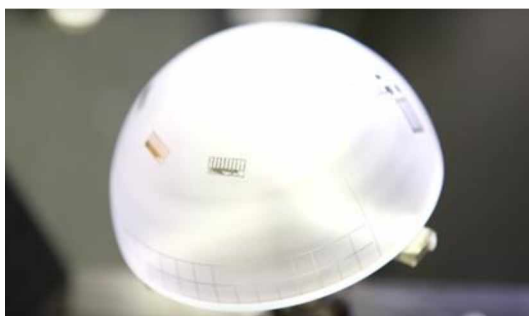
1.2.1.2. Výhody a nevýhody technologie Aerosol Jet

Aerosol Jetu nabízí řadu výhod mezi které patří mimo jiné vysoké rozlišení vytištěných struktur a možnost potisku trojrozměrných objektů a strukturovaných substrátů. Aerosol Jet je technologie vhodná také pro nános vyšších nánosů inkoustu, kdy tloušťka dosahuje až 10 μm . Podstatnou výhodou je rozmezí viskozit 0,7–2500 mPa·s, které je ve srovnání s inkjetem

(10–14 mPa·s) mnohem větší. Uvedené viskozity je možné tisknout díky široké trysce s průměrem 200 μm , která navíc lépe odolává ucpávání částicemi obsaženými v barvě. Rozdíl mezi inkjetem a Aerosol Jetem lze nalézt také v procesu tisku linií, při kterém Aerosol Jet tiskne struktury ve formě kontinuálních linek, zatímco inkjet ve formě mikrokapek. Rozdíl mezi oběma digitálními technologiemi je také v objemu vytvářené kapky. Inkjet tvoří kapky široké v rozmezí 20–50 μm , zatímco Aerosol Jet kolem 1–5 μm [3]. Navzdory všem výhodám má Aerosol Jet podstatnou nevýhodu stojící na proudění vzduchu, které musí být stabilní po celou dobu tisku. Pokud jsou v průběhu změněny tiskové parametry, musí dojít i ke změně proudění vzduchu, které až do ustálení mění zaostření paprsku aerosolu. V důsledku toho dochází k rozprášení kapiček inkoustu a méně brilantnímu tisku [3], proto je stanovení optimálních tiskových parametrů často zdlouhavým a citlivým procesem [25]. Kromě toho je v porovnání s inkjetem pořízení technologie Aerosol Jet mnohem dražší.

1.2.1.3. Vodivé struktury tištěné Aerosol Jetem

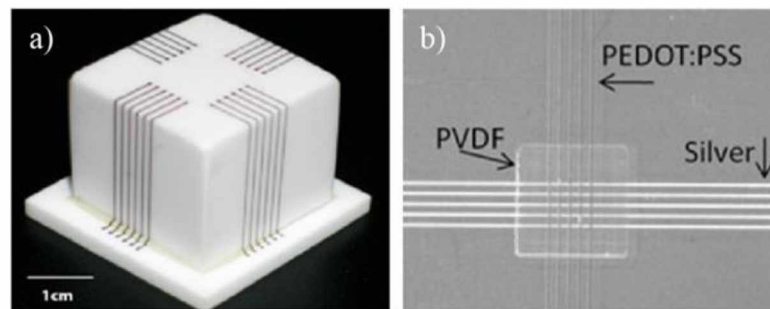
Z produktového portfolia společnosti Optomec je systém Aerosol 5X [22] ideálním zařízením pro tisk elektroniky na 3D povrchy. Tento systém dosahuje rozlišení v rozmezí od 10 μm do jednotek milimetrů. Výrobce uvádí uplatnění plně tištěných antén, sensorů, tranzistorů nebo při výrobě tzv. Molded Interconnect Devices (MID), což jsou prvky vyráběné technologií vstřikování plastů například s aplikovaným vodivým obvodem. Aplikace inkoustu ze vzdálenosti 1–5 μm je charakteristickým znakem pro AJP umožňující tisk na nerovnoměrné a 3D povrchy. Tisk na více zakřivené nebo kolmé hrany (obr. 9) je umožněn za využití pěti osového systému Aerosol 5X [22].



Obrázek 9 Tištěná elektronika na polokouli tiskárnou Aerosol Jet 5X [26].

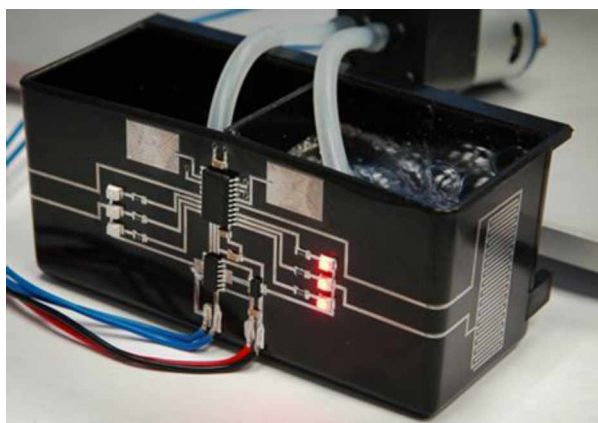
V oblasti tištěné elektroniky existuje řada studií využívající technologii Aerosol Jet, které se zabývají aplikačními možnostmi různých funkčních prvků a jejich optimalizací. Paulsen *et al.* popsali možnosti využití AJP pro tisk elektroniky na 3D povrchy. Jedním z experimentů byl tisk senzoru, antény a elektrického obvodu na model dronu. Za využití Fused Deposition Modelling

(FDM) 3D tiskárny vytiskli plastový dron, který byl opracován pískováním a ošetřen dielektrickým nátěrem pro vyhlazení nerovnoměrností na povrchu. Elektrický obvod, tištěný inkoustem s obsahem částic stříbra, rozváděl 10W výkon využitý k pohonu vrtule a rozsvícení ledek. Dále byla na křídla vytištěná 8,5 GHz anténa a sensor měřící napětí [23]. V dalším z experimentů byla věnována pozornost tisku na ortogonální povrch (obr. 10 a), kde byl využit tříosový systém Aerosol Jet 300, který umožňuje tisk i pod úhlem 45° [21]. Významnou přesností AJP je podpora více vstupních zařízení, které umožňují přepínání nebo míchání různých materiálů přímo v průběhu tisku [24]. Příkladem může být elektrický obvod (obr. 10 b), jehož primární vrstva, vytištěná inkoustem s obsahem částic nanostříbra, byla oddělena dielektrickou mezivrstvou PVDF (Polyvinylidenfluorid), na kterou byla následně přetištěná vodivá struktura formulací PEDOT:PSS. Elektrický odpor naměřený na obou vodivých materiálech odpovídal odporu udávanému výrobcem [23].



Obrázek 10 Využití technologie Aerosol Jet a) tisk 3D propojení vodivým inkoustem s nanočásticemi stříbra systémem Aerosol Jet 300 od společnosti Optomec [21], b) vícevrstvý tisk vodivých linek o šíři 20 μm (inkoust s částicemi stříbra a formulace PEDOT:PSS) s mezivrstvou dielektrika PVDF [23].

Za směrodatné považují zmínit také 3D MID sensor (obr. 11) vytvořený s využitím kombinace Aerosol Jetu a inkjetu. Pod projektem FKIA (Funkcionalisation of Plastics with Ink Jet and Aerosol Jet) byl vyrobený funkční snímač hladiny kapaliny. Obvody a kapacitní sensory umístěné po stranách nádoby byly vytištěné Aerosol Jetem, zatímco ostatní elektronické komponenty byly namontovány. Přívod vody je zaznamenáván snímači a ledky pak indikují výšku sloupce hladiny. Jakmile je nádrž plná, dochází k obrácení směru přívodu kapaliny [23].



Obrázek 11 3D MID sensor vytištěný za pomoci technologie Aerosol Jet [23].

1.2.2. Mikrodispensing

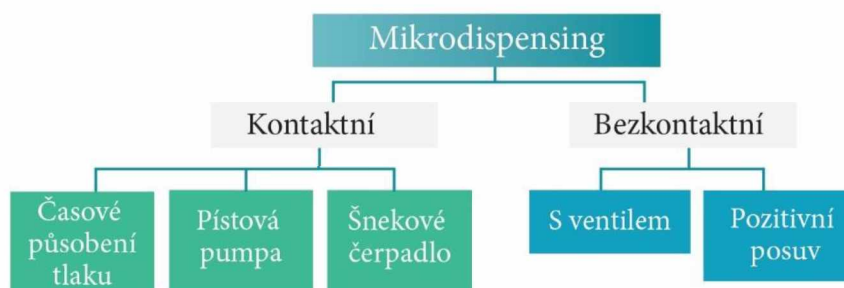
Technologie mikrodispensingu jsou využívány za účelem přesného dávkování kapaliny na komplexní tvary, anebo pro velmi specifické aplikace. Dávkování kapaliny nebo pasty v mikroměřítku vyžaduje digitálně řízené nanášení kapek s konstantním objemem, přičemž proces je většinou omezen úzkými tolerancemi [27]. Správné seřízení a nastavení stroje je stěžejní pro dosažení požadované kvality tisku. Nároky jsou kladeny zejména na seřízení pozice platformy, výběr vhodné tiskové hlavy, průměr dávkovací jehly anebo na výběr vhodného druhu čerpadla [28]. Tyto technologie nacházejí využití při tisku elektroniky, v automobilovém či leteckém průmyslu nebo ve zdravotnictví [27]. Jako konkrétní aplikace lze zmínit využití při tisku kondenzátorů, rezistorů, antén, baterií nebo vodivých obvodů [17].

1.2.2.1. Technologie Mikrodispensingu

Na základní úrovni je možné mikrodispensing klasifikovat jako kontaktní a bezkontaktní, které je podrobněji rozděleno na obrázku 12.

Kontaktní mikrodispensivový způsob aplikace vyžaduje styk trysky se substrátem, na který je materiál aplikován. Jednotlivé kontaktní technologie – systém s časovým působením tlaku (time pressure), systém s pístovou pumpou (piston displacement) a systém se šnekovým čerpadlem (rotary screw) se navzájem liší mechanismem vytlačování kapaliny (obr. 13), ale také precizností a opakovatelností tisku. U kontaktních mikrodispensivových technologií literatura uvádí schopnost tisknout struktury od 25 μm s tloušťkou vrstvy od 1,3 μm , avšak tyto hodnoty jsou do velké míry závislé nejen na daném materiálu, ale i na nastavení tiskového zařízení, kam lze zařadit vzdálenost trysky od platformy nebo tiskovou rychlost. Struktury mohou být

tištěné v podobě linek, teček anebo kombinací obou elementů [17]. Základní princip tisku zahrnuje pohyb trysky horizontálně v osách X, Y a vertikálně v ose Z. Právě v důsledku vertikálního pohybu je frekvence aplikace kapek nižší, než v případě bezkontaktní metody [27].



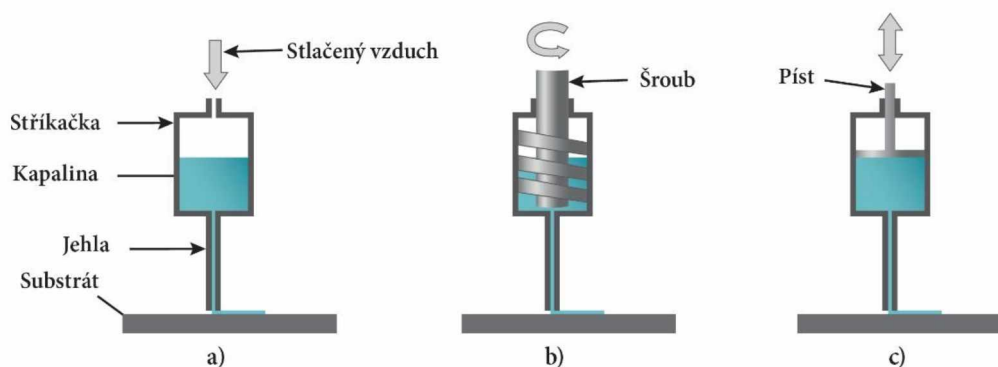
Obrázek 12 Rozdělení mikrodispensingových technologií. Adaptováno z [29].

Vzhledem ke svému univerzálnímu využití v širokém spektru aplikace je nejrozšířenější a zároveň nejstarší metodou systém časového působení tlaku (time pressure) [30]. Princip začíná přiváděním stlačeného vzduchu do injekční stříkačky naplněné kapalinou, na jejímž konci je tenká jehla [31]. Objem extrudované kapaliny závisí na několika faktorech. Prvním z nich je tlak vzduchu – objemový tok tryskou je vyšší, pokud je zvýšen tlak anebo jeho doba působení. Dalšími faktory jsou reologie kapaliny a průměr tiskové jehly [32]. Optimální viskozita kapaliny se pohybuje v rozmezí od 0,5–20 Pa·s. Pokud jde o rozlišení, je možné tisknout vzory o průměrech pod 350 μm s přesností $\pm 10\%$ [30]. Výběrem vhodné kombinace těchto faktorů je možné přímo ovlivnit průměr tečky nebo linie, stejně jako přesnost a opakovatelnost tisku [32].

Pro středně až více viskózní kapaliny jsou zvláště vhodné mechanismy s pístovou pumpou (piston displacement). Výrobci nabízejí tuto technologii mikrodispensingu se dvěma variantami pohonu. V základním principu je kapalina ze zásobníku přiváděna do čerpací komory, ve které je klíčovým prvkem píst poháněný buď motorem, anebo elektromagnetem. Vertikální pohyb pístu sehrává dva úkoly. Pokud je píst vytahován nahoru, umožní přívod kapaliny do čerpací komory. Jakmile začne píst sestupovat do čerpací komory, uzavře přívod a tlak způsobí extruzi materiálu z jehly. Elektromagnetický pohon je v porovnání s motorovým rychlejší a preciznější v dávkování menších objemů. Oba typy dávkovačů jsou obvykle využívány při aplikaci pájčích past nebo termálně vodivých materiálů při povrchové montáži součástek na povrchy plošných spojů [33]. Další modifikací této technologie je umožněn tisk dvěma různými kapalinami najednou. Obecně lze realizovat šíře linek dosahujících 25 μm s přesností $\pm 2\%$ [17].

Předchozí mikrodispensingové technologie – princip časového působení tlaku a systém s pístovou pumpou extrudují kapalinu z trysky pomocí tlaku vzduchu respektive pístu, zatímco

technologie se šnekovým čerpadlem (rotary screw/auger screw) využívá pro dávkování šnekový systém. V literatuře je tato metoda často nazývána „Archimedes screw“, nicméně označení je zavádějící. Celý princip nestojí pouze na Archimedově šroubu, nýbrž na kombinaci různých faktorů jako je jeho geometrie, pneumatický tlak působící na kapalinu, viskozita kapaliny či průměr dávkovací jehly. Jak už bylo zmíněno, extruze kapaliny je prováděna pomocí motorizovaného šnekového šroubu, jehož otáčení reguluje objem dávkované kapaliny. V porovnání s metodou časového působení tlaku je tento způsob méně náchylný na změny viskozity. Naopak obdobně jako metoda využívající pístovou pumpu je vhodná pro středně až více viskózní kapaliny. Šneková čerpadla jsou hojně využívána v oblasti elektroniky při výrobě plošných spojů [34]. Uvedený způsob extruze vyniká při využití částicových materiálů jako jsou právě pájecí pasty anebo vodivé formulace na bázi stříbra [35].



Obrázek 13 Schématické znázornění mikrodispensingových metod z pohledu způsobu vytlačování materiálu a) time pressure, b) rotary screw, c) positive displacement. Adaptováno z [36].

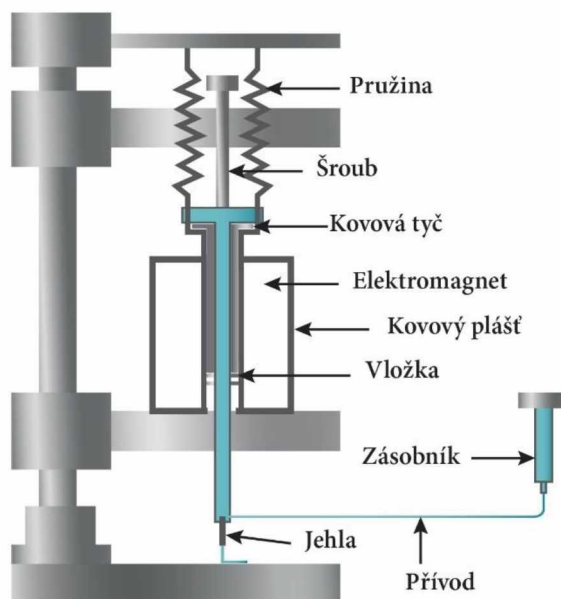
Bezkontaktní mikrodispensing (jet dispensing/jetting), je způsob dávkování kapaliny v mikro až nano objemu aniž by docházelo ke kontaktu trysky se substrátem. Obecně je kapka generována krátkým tlakovým pulzem, což má za následek překonání viskozity kapaliny a povrchového napětí, proto dochází k následnému uvolnění kapaliny z trysky. Množství vydané kapaliny závisí na způsobu, kterým je kapalina uvolněná. Bezkontaktní mikrodispensing využívá nejčastěji dva systémy uvolňující kapaliny z trysky – ventil (valve) anebo systém pozitivního posuvu (positive displacement) [29].

Dávkovací zařízení využívající ventil obsahuje zdroj tlaku, kterým může být buď čerpadlo membránové nebo peristaltické, injekční pumpa, anebo tlaková lahev s regulací tlaku. Elementární cyklus uvolnění kapaliny z trysky začíná nadzvednutím ventilu nad tryskou. Následně je ventil uzavřen až do té doby, než kapka dopadne na substrát. Objem uvolněné ka-

paliny závisí na době otevření ventilu, která se pohybuje okolo jedné milisekundy anebo způsobu, jakým je kapalina oddělená [29] [37]. Nejčastěji využívanými ventily jsou piezoelektrický a elektromagnetický [29]. Struktury tištěné uvedenými metodami dosahují šíře kapek v rozmezí 25–125 μm [38]. Využití membránového ventilu založené na jeho elektromechanickém zvedání a spouštění bylo patentováno v roce 2002 [39].

Druhá bezkontaktní technologie využívá *pozitivní posuv* – název technologie napovídá princip, kde dochází ke změně polohy určitého prvku, která vede k uvolnění kapaliny z trysky. Může jít například o přímý posuv pístu, peristaltické čerpadlo anebo pohyb membrány. Z podstaty principu dávkování tato technologie nepožaduje žádný zdroj tlaku, neboť samotný pohyb umožní vytlačení kapaliny [35].

K. Tan a S. Putra [38] přišli s vlastním bezkontaktním microdispensingovým systémem (obr. 14), který generuje mikrokapky o průměru 300–600 μm . Ve srovnání s kontinuálním inkjetem, (průměr mikrokapek 20–150 μm [40]) nebo drop-on-demand inkjetem (průměr mikrokapek 20–100 μm [41]), je technologie K. Tana a S. Putra vhodnější pro aplikace, které mají skromnější nároky na rozlišení tisku při aplikaci nízkoviskózních kapalin. Smyslem této microdispensingové technologie je využití setrvačnosti – předmět nemění svůj stav, pokud na něj nepůsobí vnější síla, anebo jsou působící síly v rovnováze. Tento fyzikální zákon je uplatňován na kapalinu, která je v klidu, pokud na ni nepůsobí vnější síla. Jakmile je ale na elektromagnetickou cívku přivedeno napětí, dochází prostřednictvím elektromagnetické síly k pohybu dvou tyčí (jedna z nich je z kovu), které způsobí pohyb kapaliny. Tyče jsou poté zastaveny kontaktem o vložku, nicméně kapalina zůstává v pohybu v důsledku setrvačnosti a tím dochází k vygenerování kapky. Pokud napětí přestane působit, vracejí se tyče zavěšené na pružině do původní polohy a celý proces je možné periodicky opakovat. Experiment prokazuje očekávané výsledky, tedy že průměr kapky je možné korigovat velikostí vstupního elektrického napětí, které ovlivňuje počáteční impuls síly a tím velikost generované kapky. Využívané napětí v rozmezí 40–45 V vyvolá tlak 90–490 Pa. Velký význam má opakovatelnost tisku, kterou zahrnují do výzkumu také K. Tan a S. Putra. Ve svém výzkumu zkoumali variabilitu velikosti kapky a získali pozitivní výsledky, kdy se variabilita pohybuje pod 7 % [38].



Obrázek 14 Schéma mikrodispensingové metody využívající setrvačnosti. Adaptováno z [38].

1.2.2.2. Výhody a nevýhody Mikrodispensingu

Ačkoli je metoda *time pressure* technologicky nenáročná, velkým problémem je variabilita dávkovaného objemu kapaliny. Zatímco v procesu tisku dochází ke spotřebě kapaliny ve stříkačce, objem vzduchu narůstá. Tím dochází ke zpožděnému dopadu vzduchu na kapalinu, jejímž důsledkem je menší objem vytlačené kapaliny [31] [32]. Na objem vytlačené kapaliny má vliv také viskozita, která může v průběhu tisku kolísat. Pokud se viskozita sníží, bude vytlačené kapaliny více i při neměnném nastavení tiskových podmínek. Opak je zvýšení viskozity formulace, která může nastat například v důsledku zasychání anebo vytvrzování [32].

Výhodou metody „*piston displacement*“ je rychlost dávkování, kterou určuje rychlost taktu pístu. Dávkovaný objem kapaliny je navíc velmi přesný, neboť je stanoven výší zdvihu pístu a průměrem trysky. V porovnání s metodou *time pressure* má změna viskozity zanedbatelný vliv na dávkovaný objem kapaliny. Existuje však podstatná nevýhoda této metody, a sice pokud píst neulehá správně nebo přesně na hlavici jehly, může dojít k úniku kapaliny kolem pístu. Důvodem je špatné nasazení jehly na trysku, anebo nedostatečný kontakt pístu s hlavicí jehly [42].

V případě šnekového systému se mohou při tisku vyskytovat problémy s odkapáváním. Důvodem bývá nejčastěji vzduch zaváděný do kapaliny v průběhu tisku. Dále nekonzistentní dávkování, které může mít více příčin najednou a sice špatně zvolenou vzdálenost trysky od platformy, kratší dobu setrvání trysky na platformě před jejím zdvihem anebo nesprávné skladovací podmínky, které mohou změnit fyzikální vlastnosti kapaliny [34]. Šneková komora musí být

pravidelně čištěna, aby nedocházelo k jejímu zanášení, což například metoda time-pressure nepotřebuje, protože využívá převážně jednorázové stříkačky. Naopak metodu time-pressure předčí v rychlosti tisku, ale vůbec nejrychlejší z kontaktních metod je systém využívající píst [35].

Výhodou bezkontaktního mikrodyspensingu je samotný způsob aplikace, který zabraňuje jakémukoli poškození substrátu a součástek, což je přímým opakem od kontaktních technologií, kde může navíc dojít k ohnutí trysky právě v důsledku kontaktu trysky se substrátem. Dále lze mezi výhody řadit rovnoměrný nános materiálu na nerovnoměrné a strukturované povrchy [43]. Kromě oblasti tištěné elektroniky nacházejí bezkontaktní technologie uplatnění v řadě biomedicínských aplikací. V této oblasti jsou bezkontaktní technologie upřednostňovány před kontaktními z důvodu předejití křížové kontaminace vzorků, která je pro biomateriály velmi kritická [29].

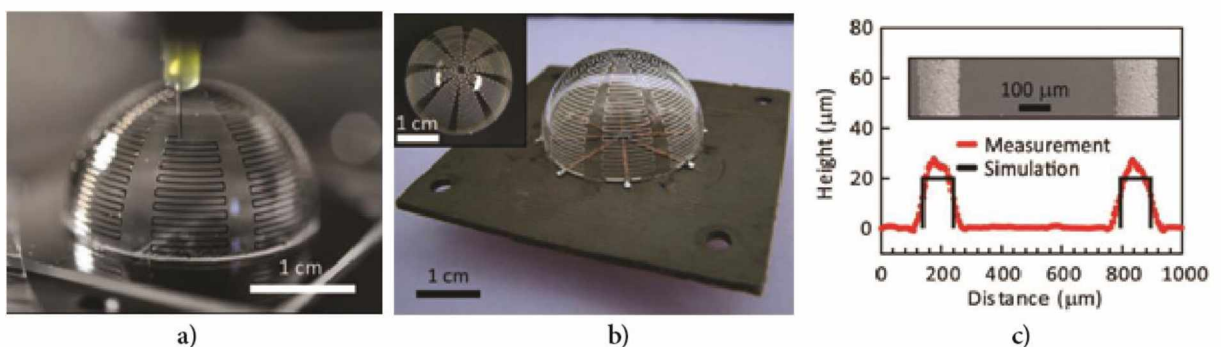
Výhody a nevýhody bezkontaktních technologií jdou částečně proti sobě. Z podstaty mechanismu dávkuje technologie využívající ventil vysokou rychlostí velmi malé objemy kapaliny. Co se týče reakce na změnu viskozity či teploty, technologie využívající ventil je na tyto změny velmi citlivá naopak technologii s pozitivním posuvem tyto změny příliš neovlivní. Obdobně je tomu u objemového průtoku, kdy technologie s ventilem nabízí vyšší objemový průtok, než technologie využívající pozitivního posuvu [29].

1.2.2.3. Vodivé struktury tištěné Mikrodyspensíngem

Zatímco sítotisk, inkjet či hlubotisk mají v tištěné elektronice na planární povrchy běžné zastoupení, mikrodyspensíngové technologie jsou poměrně novou záležitostí, proto je také méně zpráv a výzkumů zabývajících souvislostmi s tiskem jak na rovinné, tak na strukturované či 3D objekty.

Jacob J. Adams *et. al* [44] se ve svém výzkumu zabývali konformním tiskem elektricky malé antény (obr. 15 a, b) v podobě vodivých meandrových linek. Struktury byly tištěné nanočásticovým inkoustem s obsahem 72 wt% stříbra na konvexní i konkávní stranu skleněné polokoule. Při tisku na 3D povrchy je nutná výborná smáčivost povrchu inkoustem, což může usnadnit naklonění trysky pod úhlem 10–45°. Zároveň je důležitá vysoká přesnost celého procesu, počínaje posuvem systému, vycentrováním os X, Y, Z vůči předmětu a uchycení, předmětu na podložce. Experimentální vzorky byly tištěné na tříosovém zařízení ABL9000 od výrobce Aerotech, které disponuje posuvem polohovatelné platformy v nano rozlišení. Struktury byly tištěné tryskou s vnitřním průměrem 100 μm , rychlostí v rozmezí 0,1–1 mm/min. Vytíštěné struktury byly tepelně ošetřené horkým vzduchem při teplotě 550 °C po dobu 3 hodin. Výslednou anténu tvoří tištěné meandrové struktury napojené elektricky vodivým materiálem

na plošný spoj, který je na laminátové podložce. Skleněná polokoule je k podložce upevněná nevodivým epoxidovým materiálem. Na závěr byly meandrové struktury proměřené na optickém profilometru. Ze vyobrazeného grafu (obr. 15 c) lze odečíst šíři linek, která se pohybuje kolem 150 μm a tloušťka kolem 25 μm . Na finálním vzorku elektricky malé antény byl dosažen zisk (71 %) a frekvence 1,73 GHz. Jako důkaz opakovatelnosti prezentovaných výsledků byly vytištěné další antény se stejnými parametry, jejichž zisk spadl do rozmezí 69–72 % a frekvence mezi 1,69–1,74 GHz. Zisk je ovlivněn velikostí antény, ale také odporem na meandrových liniích. Jacob J. Adams *et. al* zmiňují, že vytištěním struktur materiálem s nižším odporem, konkrétně mědí, by vedlo k navýšení zisku antény o 5–10 %. Výzkum prokázal, že lze tyto antény vyrábět na mikrodensingovém zařízení s vysokým ziskem. Další výzkumy v této oblasti by mohly rozšířit působení této perspektivní technologie v oblasti tištěné elektroniky, senzorů a antén.



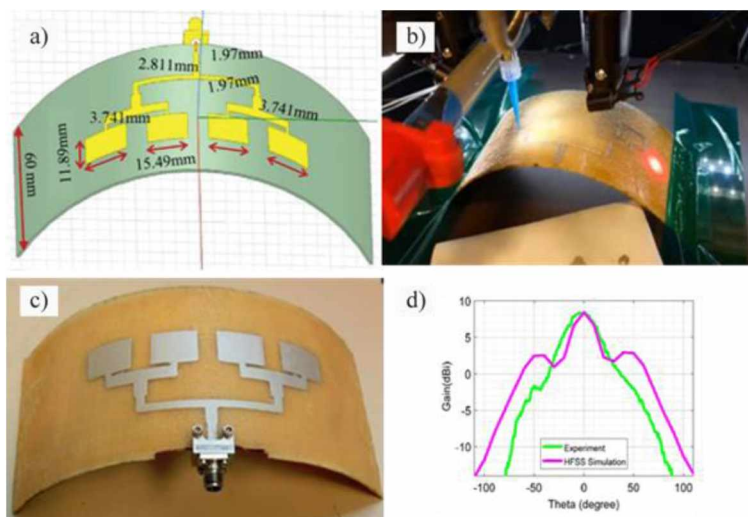
Obrázek 15 a) Obraz pořízený optickým přístrojem z průběhu tisku antény, b) znázornění výsledné antény c) graf s šíří a tloušťkou linek získaný optickým profilometrem a detail vytištěných vodivých linek pořízený rastrovacím elektronovým mikroskopem [44].

Praktickou aplikaci tištěné elektroniky znázorňuje obrázek 16. Protéza z termoplastického materiálu PLA (kyselina polylaktická) byla vytištěná na FDM 3D tiskárně. Dále byly do procesu zhotovení funkční protézy zařazeny dvě DW technologie – Aerosol Jet a mikrodensing. Povrchově integrovaný tenzometr byl na komplexní tvar protézy nanesen technologií Aerosol Jet, materiálem na bázi stříbra. Vodivé struktury a kontakty byly následně realizované mikrodensingem, epoxidem plněným stříbrem. Pro vytvrzení vodivých struktur je nutné respektovat nízkou tepelnou stabilitu PLA, proto byl epoxid vytvrzovaný při teplotě pod 100 °C. Dvě různé DW metody byly využity s ohledem na tiskové materiály a potřebu lépe kontrolovat komplexní tvar protézy [45].



Obrázek 16 Příklad využití technologie Aerosol Jet a mikrodispensing při tisku vodivých struktur (tenzometr) na neplanární povrch. Termoplastická protéza z materiálu PLA byla vytištěná na FDM 3D tiskárně [45].

A. Biswas [46] se ve svém experimentu zaměřil na metodiky elektromagnetického modelování a výrobu zátěžové antény na kompozitním válcovém povrchu pomocí AM technologií, kterým je řazený také mikrodispensing. Anténa skládající se ze čtyř dipólových polí (obr. 17 a) byla konstruovaná v programu Ansys-3D HFSS v16 pro 2D povrch a následně modifikovaná pro potřeby zakřiveného válcového povrchu s poloměrem 79,4 mm a délkou 60 mm. Válcový kompozit byl při výrobě opatřený prepregem a zpracovaný v autoklávu. Pro výzkum bylo použité mikrodispensingové zařízení 3Dn-300 od společnosti nScrypt Inc, které je navrženo pro přímý tisk jemných struktur na zakřivené povrchy (obr. 17 b, c). Výsledky experimentu ukázaly (obr. 17 d), že naměřený zisk dosahuje menší šířky pásma ve srovnání se simulovaným ziskem, což autor přisuzuje drobným nedostatkům na tištěných dipólových polích.



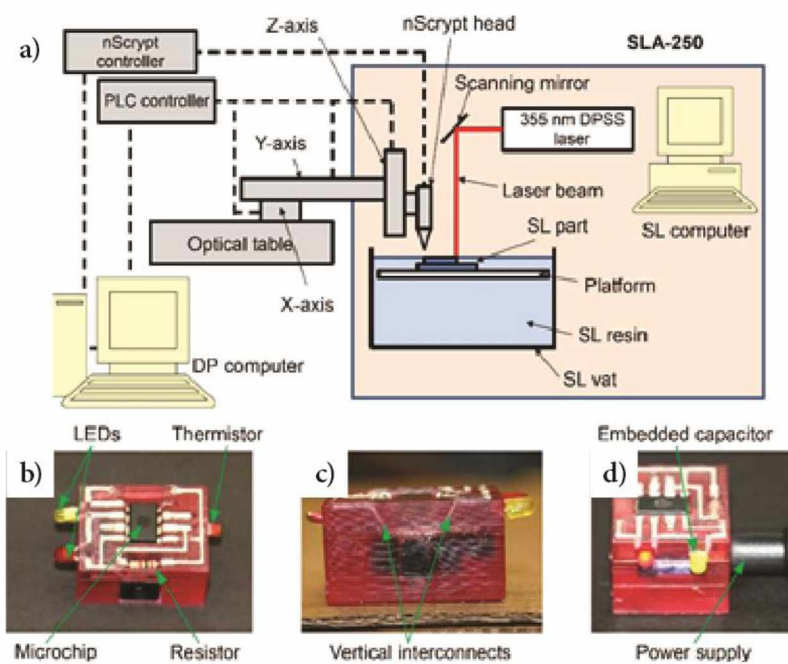
Obrázek 17 Aplikace antény na válcový kompozitní 3D povrch. a) návrh antény přizpůsobený poloměru křivosti daného cylindru, b) tisk antény mikrodispensingovým zařízením 3Dn-300 nScrypt, c) vytištěná anténa se čtyřmi dipólovými poli, d) porovnání simulovaného zisku (růžová křivka) s experimentálně získaným (zelená křivka) [46].

V oblasti tištěné elektroniky je společnost nScript významným výrobcem tiskových zařízení. Dostupné jsou stroje tisknouce vodivými materiály na rovné, strukturované a 3D povrchy. Příklad aplikace vodivých struktur na nerovný objekt demonstrovala společnost nScript tiskem tenzometru (obr. 18) na válec vyrobený z PAPC (polyamid, polyolefin a celulóza) [47].



Obrázek 18 Tenzometr konformně vytištěný na povrch PAPC válce [47].

Současná výzkumná činnost [48] v oblasti tištěné elektroniky často obrací svou pozornost k hybridním tiskovým technologiím. Projekty [48] si všeobecně kladly za cíl vytváření 3D objektů s integrovanými vodivými dráhami a zapuštěnými elektronickými komponenty tak, že je výsledný produkt monolitický. Výzkum A. Lopes *et. al* [49] představuje hybridní tiskový systém (obr. 19) pro výrobu trojrozměrné elektroniky se zabudovanými elektronickými obvody. Tento systém tvoří stereolitografická (SLA) 3D tiskárna (3D Systems 250/50) s integrovanou mikrodyspensingovou pumpou (Smart PumpTM 100 nScript), která umožňuje tisk jemných vodivých linek v šíři 25 μm . Existují různé principy 3D tisku například selektivní spékání prášku (SLS), vytlačování materiálu přes trysku (FDM) anebo spojování pásů materiálu (LOM), nicméně žádná z těchto metod nedosahuje potřebných kvalit SLA tiskáren, které svou podstatou (vytvřování fotonopolymeru laserem) poskytují klíčovou kombinaci parametrů – velmi dobrou rozměrovou stálost, přesnost tisku, rozlišení a hladkost povrchu. Objemová část vytvářené elektroniky byla tištěná vrstvami s tloušťkou 100 μm . Výroba monolitických objektů probíhá procesem zvaným „start a stop proces“, to znamená, že probíhající 3D tisk je v případě potřeby pozastaven a vyčištěn od nevytvřené fotonopolymeru kvůli vložení aktivních a pasivních elektronických součástí či integraci vodivých vrstev mikrodyspensingem, které jsou ihned vytvářeny laserem. Celý proces výroby probíhá přímo na jednom stroji bez nutnosti demontáže objektu, což je hlavní výhodou těchto hybridních systémů.



Obrázek 19 a) Schéma hybridního systému kombinující stereolitografii a mikrodyspensing, b-d) vyrobený 3D integrovaný obvod NE555 [49].

2. Experimentální část

Následující kapitoly se zabývají popisem experimentálního postupu a vyhodnocením získaných výsledků. Experimentální část je tvořena z několika kroků. V první části byla zjišťována viskozita využitých tiskových formulací. Další část je zaměřena na přenosové charakteristiky mikrodispensingového zařízení a kvalitu vytištěných vodivých linek. Před tiskovým procesem bylo nutné vytvořit digitální tisková data pro tisk jemných linek na využitě substráty a 3D objekty. Následně byl prověřen vliv rychlosti tisku v g-kódu na hmotnost dávkované barvy a šíři jemných vodivých linek. Získané informace byly brány do úvahy pro pozdější nastavení mikrodispensingového zařízení. Hlavní část experimentu je zaměřena na tisk stříbrnými a uhlíkovými vodivými formulacemi na strukturované a 3D povrchy pomocí mikrodispensingové metody fungující na principu časového působení tlaku. V závěrečné části byla provedena analýza vytištěných vodivých struktur vizuálně, měřením šíří linek pomocí optického mikroskopu, měřením plochy a tloušťky linek profilometrem a proměřením elektrického odporu na jednotlivých substrátech.

2.1. Přístroje a zařízení

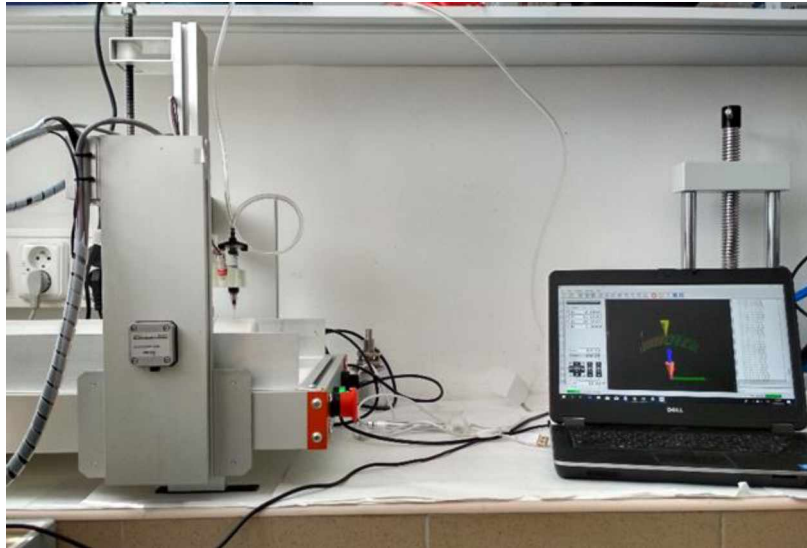
Následující subkapitoly uvádějí výčet využitých přístrojů a zařízení. Stěžejní zařízení jsou popsána zvlášť v samotné podkapitole.

Mikrodispensingová tiskárna; 3D tiskárna Formlabs Form 2; 3D tiskárna RepRap Rebel II; korona Lab Treatory typ ASL-400-TUM; analytické váhy Kern ALJ 220-4NM; dvoubodová měřicí sonda; sušárna; digitální posuvné měřidlo; UV vytvrzovací stůl Finish, ultrazvuková čistička Bandelin DT 31; rotační viskozimetr Brookfield DV-E; profilometr KLA Tencor P7; stolní multimetr Tektronix DMM4040; mikroskop Nikon Eclipse LV-DIA-N; stolní skener Canon Canoscan 5600F, digitální zrcadlovka Canon EOS 600D. Pro uschovávání a přenos vzorků byla pomocí řezacího plotteru Mimaki Cutter CFL 605 RT vytvořena krabička vybraná z katalogů v programu Artios Cad. Povrch krabičky byl polepen fólií potištěnou na tiskovém zařízení HP Latex 335.

2.1.1. Mikrodispensingová tiskárna

Využitým tiskovým zařízením byla mikrodispensingová tiskárna sestavená na katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice (obr. 20). Zařízení tiskne kontaktním způsobem na základě principu časového působení tlaku popsaném v teoretické části. Tiskárna je složená

z fixní platformy a pohyblivé konstrukce s pojezdy umožňující pohyb v osách XYZ. V pohyblivé části je systém pro uchycení stříkačky a kamery. Samotná tiskárna musí být pro svou funkčnost napojená na doplňující zařízení jako jsou kompresor s regulací tlaku a počítačem řízený software CNC USB Controller, kterým je tiskárna ovládaná.



Obrázek 20 Kontaktní mikrodispensingová tiskárna sestavená na katedře polygrafie a fotofyziky.

2.1.2. Stereolitografická tiskárna Formlabs Form 2

Pro tisk 3D předmětů byla využita stereolitografická tiskárna Form 2 od firmy Formlabs. Za účelem vytvrzování tenkých vrstev fotopolymeru je využíván laser s vlnovou délkou 405 nm o průměru 140 μm s výkonem 250 mW. Rozlišení tisku je možné zvolit v rozmezí od 25 μm do 300 μm . Maximální tiskové rozměry jsou 14,5 \times 14,5 \times 17,5 cm.

2.1.3. Korona Lab Treator typ ASL-400-TUM

Volná povrchová energie byla u vybraných substrátů upravována pomocí koronového výboje zařízením Lab Treator typ ASL-400-TUM firmy Ahlbrandt System GmbH. Zařízení má 1 výklopnou koronovací hlavu se dvěma keramickými elektrodami (rychlost pohybu koronovací hlavy je možné regulovat). Napětí na elektrodách lze měnit v intervalu 400–800 V s krokem 50 V.

2.2. Využité materiály

Mikroskopické podložní sklo Menzel-Gläser o velikosti 26 × 76 mm pro testování rychlosti tisku; textilní substrát Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra; tisk trojrozměrného objektu na 3D tiskárně fotopolymerní pryskyřici FLGPGR04 Formlabs; polypropylenová dóza s objemem 125 ml, na kterou byly tištěny vodivé struktury; dále tiskové formulace:

- UV tvrditelná sítotisková barva Process Blue
- C-FORM, šarže 2017-10-02-3 (Syrový) rozpouštědlová tisková formulace s vodivými částicemi na bázi grafitu (3–5 μm).
- AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Syrový) rozpouštědlová tisková formulace s vodivými částicemi na bázi stříbrných mikrovloček (10 μm) a polymerním pojivem s nízkou rozpustností v běžných rozpouštědlech pro přípravu vodivých vrstev se zvýšenou odolností vůči rozpouštědlům, vodným roztokům, kyselinám i zásadám,
- AG-ELAST-FORM, šarže 2018-06-26-5 (Syrový), rozpouštědlová tisková formulace s vodivými částicemi na bázi stříbrných mikrovloček (5–10 μm) a polymerním pojivem s vysokou elasticitou pro přípravu vysoce pružných vodivých vrstev na textiliích, aj.,
- AG-FLEX-FORM, šarže 2019-03-08-1 (Syrový), rozpouštědlová tisková formulace s vodivými částicemi na bázi stříbrných mikrovloček (5–10 μm) a polymerním pojivem na bázi PUR s vysokou pružností a ořezuvzdorností pro přípravu flexibilních vodivých vrstev,
- HERAEUS CLEVIOS™ S V3 – tisková formulace na bázi disperze vodivého polymeru PEDOT:PSS pro tisk vodivých transparentních vrstev.

2.3. Využitý software

Adobe Photoshop CS6; Adobe Illustrator CS6; Microsoft Office Word 2016; Microsoft Office Excel 2016, Profiler 8.1; NIS Elements; CNC USB Controller; PreForm; Repetier Host s integrovaným Slic3r; Thincad.

2.3.1. CNC USB Controller

Mikrodispensingová tiskárna byla ovládána pomocí CNC programu USB Controller. Jedná se o běžně dostupný program, který podporuje formát dxf¹ nebo g-kód² a po načtení vytvořeného kódu umožňuje živý náhled tištěné dráhy. Tento program umožňuje ovládání tiskárny a zahrnuje například příkazy k posuvu tiskové hlavy v osách XYZ, příkazy start, stop, „domů“ do výchozí pozice, povoluje přepsání rychlosti tisku, která je jinak obsažena v g-kódu. Program dále zprostředkovává nastavení kamery a poskytuje také možnost „klonování“ objektu, což je vlastně montáž objektu na dostupnou tiskovou plochu.

2.4. Experimentální postupy a hodnocení výsledků

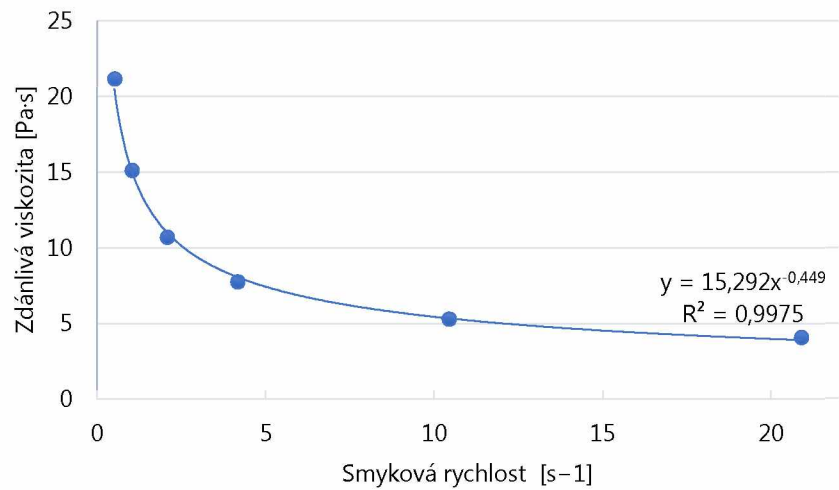
V následujících kapitolách jsou popsány pracovní postupy vykonané v průběhu tvorby diplomové práce, směřující k dosažení cíle, kterým je potisk 3D objektů a strukturovaných materiálů.

2.4.1. Viskozitní křivky tiskových formulací

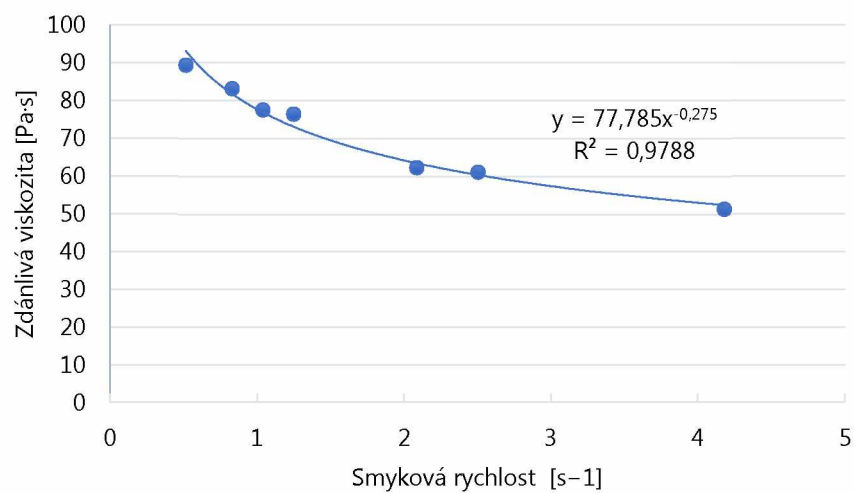
Pro měření viskozity tiskových formulací byl využitý digitální rotační viskozimetr Brookfield DV-E. K viskozimetru bylo našroubováno vřeteno LV-4 (64) a měření probíhalo za pokojové teploty (22 °C). Rychlost otáčení RPM [ot. /min.] byla zvyšována v rozmezí od 0,3 do 100. Hladina vzorku má dle návodu sahat po rysku vyznačující požadovaný ponor vřetena. Vzhledem k menším objemům využívaných kapalin bylo vřeteno vloženo do poloviny požadovaného ponoru a z toho důvodu byly zaznamenané hodnoty zdánlivé viskozity upravené korekčním faktorem (naměřená viskozita byla vynásobena dvěma). Měření probíhalo následujícím způsobem. Do vzorku bylo vloženo vřeteno, které se po zapnutí přístroje nechalo minimálně pětkrát otočit a z displeje byla odečtena hodnota zdánlivé viskozity [mPa·s]. Měření pokračovalo zvyšováním hodnoty RPM až do té doby, než byla dosažena maximální možná hodnota kroutícího momentu v dané kapalině. Po změření jednoho vzorku bylo vřeteno očištěno a následovalo měření dalšího vzorku. Vyhodnocení viskozity tiskových formulací bylo provedeno v programu Microsoft Excel 2016. Rychlost otáčení RPM byla přepočtena podle koeficientu ($0,209 \times \text{RPM}$) uvedeného výrobcem [50] u vřetena LV-4 (64) na rychlostní gradient s^{-1} . Z naměřených hodnot byly následně sestaveny viskozitní křivky (grafy 2–7).

¹ Drawing Exchange Format (.dxf) je formát vhodný pro přenášení informací mezi systémy typu CAD, modelovacími programy apod.

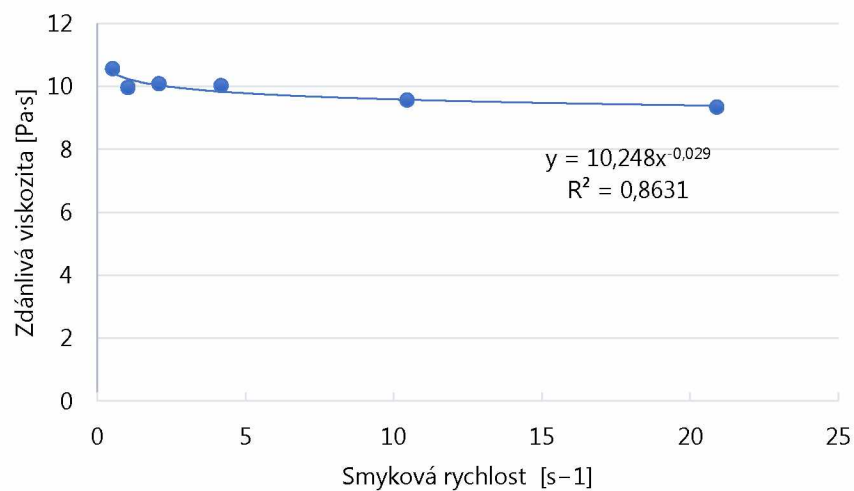
² g-kód (.gcode) je programovací jazyk, který obsahuje informace pro digitální řízení CNC strojů.



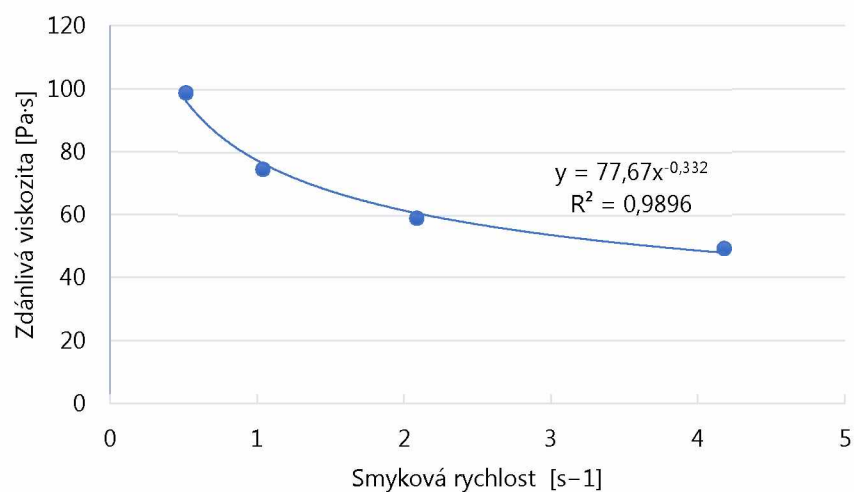
Graf 2 Viskozitní křivka pro formulaci C-FORM, šarže 2017-10-02-3 (Syrový), měřeno při teplotě 22 °C.



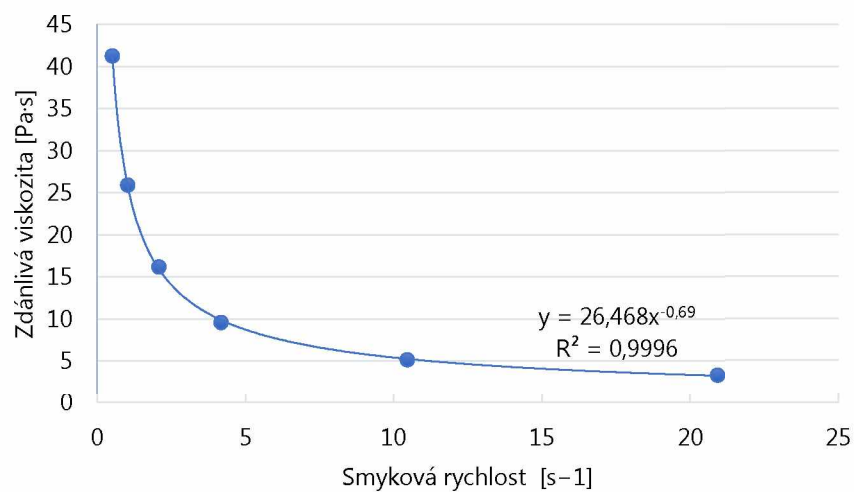
Graf 3 Viskozitní křivka pro formulaci AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Syrový), měřeno při teplotě 22 °C.



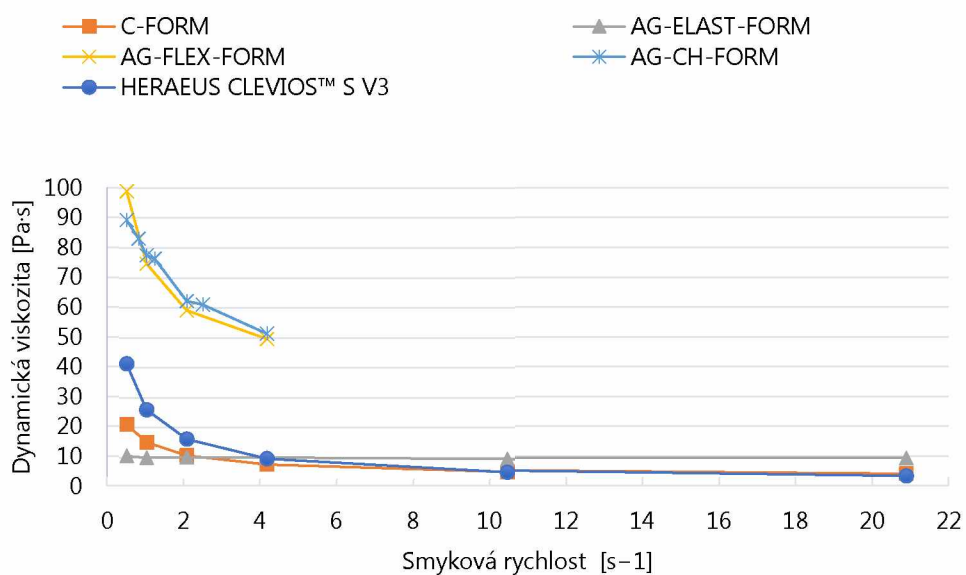
Graf 4 Viskozitní křivka pro formulaci AG-ELAST-FORM, šarže 2018-06-26-5 (Syrový), měřeno při teplotě 22 °C.



Graf 5 Viskozitní křivka pro formulaci AG-FLEX-FORM, šarže 2019-03-08-1 (Syrový), měřeno při teplotě 22 °C.



Graf 6 Viskozitní křivka pro formulaci HERAEUS CLEVIOS™ S V3, měřeno při teplotě 22 °C.



Graf 7 Porovnání viskozitních křivek využitých tiskových formulací. Měřeno při teplotě 22 °C.

Na základě grafického vyjádření (grafy 2, 3, 5 a 6) zdánlivé viskozity lze tedy konstatovat, že tiskové formulace vykazují pseudoplastické chování, které se vyznačuje poklesem zdánlivé viskozity, zatímco smyková rychlost stoupá. Mírný pokles viskozity (11,6 %), byl zaznamenán u tiskové formulace AG-ELAST-FORM (graf 4), který vypovídá o newtonovském chování této kapaliny. Graf 7 porovnává viskozitní chování všech využitých tiskových formulací. Tiskové formulace AG-FLEX-FORM a AG-CH-FORM mají velmi podobný průběh viskozitních křivek a dosahují vyšší zdánlivé viskozity, než zbylé tiskové formulace. Předpokladem vyšší viskozity může být menší obsah rozpouštědla v tiskových formulacích, typ použitého pojiva anebo vyšší molární hmotnost obsažených složek. Naopak nejnižší viskozitu ze všech vzorků vykazuje tisková formulace AG-ELAST-FORM, hned poté C-FORM a HERAEUS CLEVIOS™ S V3.

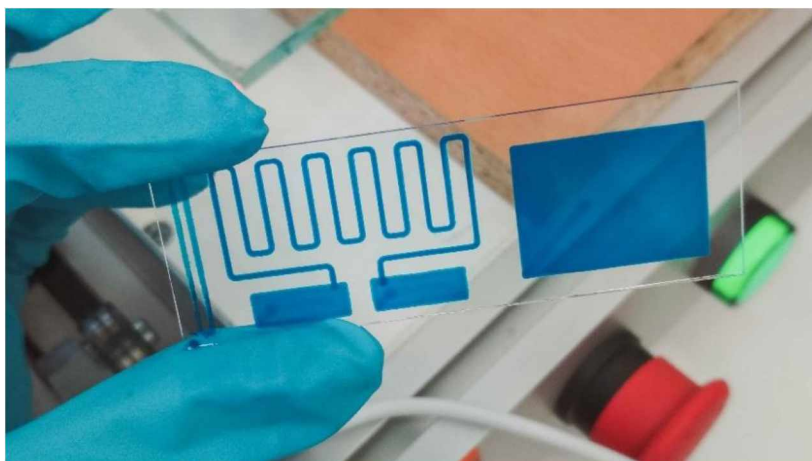
2.4.2. Materiálový tisk

2.4.2.1. Hodnocení reprodukovatelnosti mikrodispensingu

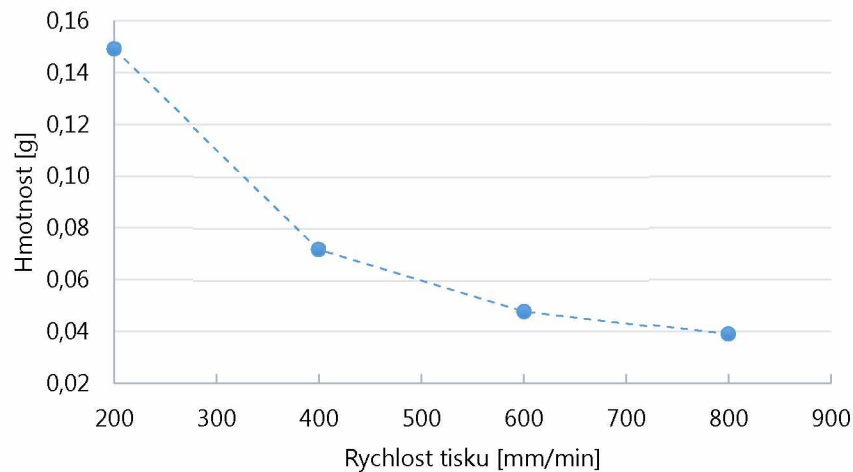
V první řadě bylo nutné experimentálně prověřit vlastnosti mikrodispensingové tiskárny. Za účelem zjištění reprodukovatelného nánosu kapaliny na substrát, byla zkoumána přenášená hmotnost kapaliny na podložní sklo v závislosti na změně rychlosti tisku a tiskového tlaku.

Před samotným tiskem bylo vždy nutné vyrovnat polohu platformy. Pomocí kamery a zrcátka byla sledována vzdálenost hrotu trysky od platformy ve čtyřech rozích a v případě nerovností byla výška upravena manuálně pomocí plochého klíče. Seřízení tiskárny je velmi důležitým krokem, neboť i menší nerovnost se projeví v podobě nerovnoměrných struktur vytištěných vzorků.

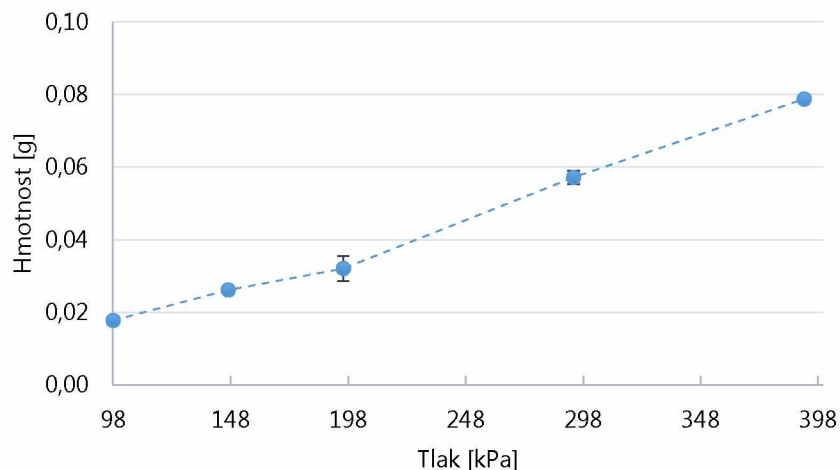
Navržené meandrové struktury (obr. 21, Syrový) byly tištěné na podložní sklíčko síto-tiskovou barvou Process Blue. Každé sklíčko bylo před tiskem očištěno acetonem a síto-tisková barva byla před natažením do stříkačky jemně promíchána tak, aby se v ní nevytvořily bubliny. Za účelem sledování vlivu rychlosti na přenesené množství kapaliny byla rychlost tisku zvyšována v řadě 200, 400, 600, a 800 mm/min. Struktury byly tištěné tryskou o průměru 160 μm , tlakem 294 kPa. Ve druhé části testu byl hodnocen vliv nastaveného tlaku na přenášené množství kapaliny. Tlak zvyšován v řadě 98; 147; 196; 294 a 392 kPa. Tyto vzorky byly tištěné rychlostí 400 mm/min. Celkově byly vytištěny tři vzorky pro každou nastavenou hodnotu a poté byly vždy zváženy na analytických vahách. Odečtené hodnoty byly následně aritmeticky zprůměrovány. Výsledky v grafech 8 a 9 dokazují, že se zvýšením rychlosti tisku se množství přenášené kapaliny na substrát snižuje. Naopak pokud je zvýšen tiskový tlak, dochází k přenosu většího množství kapaliny.



Obrázek 21 Vytištěné meandrové struktury za účelem zjištění reprodukovatelného nánosu kapaliny.



Graf 8 Množství nanesené sítotiskové barvy na podložní sklíčko v závislosti na rychlosti tisku. (Pozn. Spojnice nepředstavuje skutečnou závislost mezi experimentálními body, ale slouží pro lepší orientaci v trendu zobrazených experimentálních dat.)



Graf 9 Množství nanesené sítotiskové barvy na podložní sklíčko v závislosti na tlaku. (Pozn. Spojnice nepředstavuje skutečnou závislost mezi experimentálními body, ale slouží pro lepší orientaci v trendu zobrazených experimentálních dat.)

2.4.2.2. Stanovení kvality vytištěných vodivých linek

Hodnocení kvality vytištěných vodivých linek sestávalo ze čtyřech částí. První část byla věnována tisku na podložní sklo z důvodu zjištění chování tiskových formulací. Ve druhé části byla potištěná strukturovaná tkanina Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra. Jako zástupce 3D povrchu byla vybrána polypropylenová dóza. Závěrem byl vymodelovaný 3D předmět v programu ThinkerCad, který byl vytištěný na 3D tiskárně a potištěn vybranými tiskovými formulacemi.

2.4.2.2.1. Tisk na podložní sklo – hodnocení kvality tisku

Cílem této části experimentu je zhodnocení kvality tisku z hlediska dosažitelného rozlišení vodivých struktur. Parciálním cílem bylo vybrat, vzhledem k dosaženým výsledkům, vhodnou tiskovou formulaci pro následný tisk vodivých struktur na 3D předměty. Na základě získaných výsledků z grafu 8 a 9 bylo zjištěno, že rychlost tisku a nastavený tlak významně ovlivňují nanášené množství tiskové formulace, tedy že se zvyšující se rychlostí klesá přenášené množství a zároveň se zvyšujícím se tlakem ze přenášené množství zvyšuje. S ohledem na dosažené výsledky bylo předpokládáno, že rychlost tisku a tlak budou mít vliv rovněž na kvalitu vytištěné produkce.

Vzorky byly vytištěné na mikrodyspensingovém zařízení, sestaveném na katedře polygrafie Univerzity Pardubice. Kvalita vytištěných linek na podložním skle byla zkoumána u pěti tiskových formulacích: C-FORM, šarže 2017-10-02-3 (Syrový); AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Syrový); AG-ELAST-FORM, šarže 2018-06-26-5 (Syrový); AG-FLEX-FORM, šarže 2019-03-08-1 (Syrový) a HERAEUS CLEVIOS™ S V3. Podrobnější popis jednotlivých tiskových formulací je uveden v kapitole 2.2. pojednávající o využitých materiálech. Za účelem zhodnocení vytištěných linií byly vzorky snímány pomocí optického mikroskopu Nikon Eclipse LV-DIA-N. Snímání vzorků probíhalo při pětinasobném zvětšení. S využitím programu NIS-ELEMENTS byla na deseti místech proměřená šíře náhodně vybraných linek.

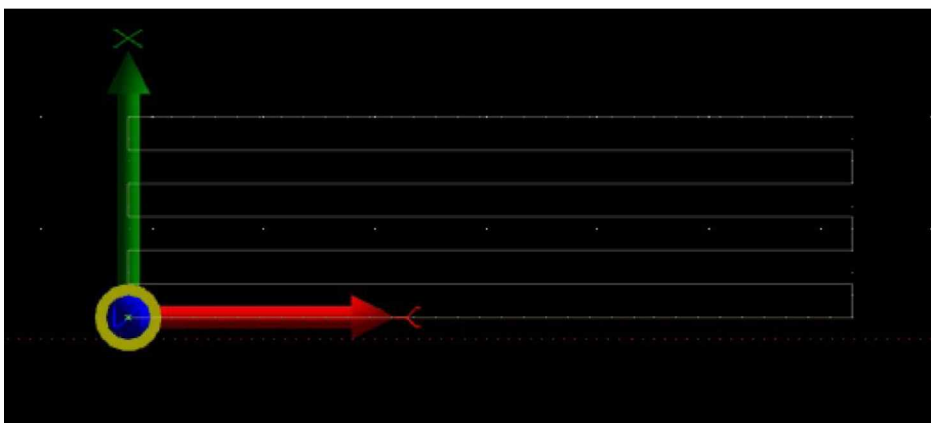
Vzorky tištěné formulacemi na bázi stříbra a polymeru PEDOT:PSS, byly vytištěné v jedné sérii za konstantního tlaku, zatímco vzorky tištěné formulací na bázi grafitu (C-FORM) byly vytištěné ve dvou sériích, které se navzájem lišily nastavením tlaku. Souhrn nastavených parametrů u jednotlivých tiskových formulací je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2 Nastavené parametry tisku u jednotlivých vodivých formulací.

Formulace	Tlak [kPa]	Vnitřní průměr trysky [μm]	Rychlost tisku [mm/min]
C-FORM	196	160	200-1800
	392	160	200-2200
AG-CH-FORM	392	160	200-1800
AG-ELAST-FORM	392	160	200-800
AG-FLEX-FORM	392	160	150-400
	392	330	200-1400
HERAEUS CLEVIOS™ S V3	196	160	200-1200

V předtiskové přípravě byla vytvořená digitální data tištěných linek. Testovací obrazec (obr. 22) byl vytvořen v kartézské soustavě souřadnic s využitím programu Microsoft Excel 2016. Výsledná data byla převedena do formátu g-kódu, který je podporován programem

CNC USB Controller. Vytvořený tiskový kód obsahoval data (G1) pro lineární pohyb v osách XY a Z pro odstavení trysky na konci tisku. Dále kód (F) pro nastavení rychlosti tisku. Výsledný kód tedy obsahoval sérii příkazů, které lze zapsat například jako G1 X9 Y20 Z15 F200. Číselné hodnoty vedle G1 jsou v milimetrech, rychlost F v mm/min. Vzdálenosti mezi jednotlivými liniemi byly vytvořeny s roztečí 3 mm a tisk probíhal jedním průchodem.



Obrázek 22 Obrazec využitý pro hodnocení kvality tisku.

Samotnému tisku vždy předcházelo manuální nastavení vzdálenosti trysky od podložního skla, zkušební výtisk a případná korekce vzdálenosti. Před tiskem bylo každé podložní sklo očištěno acetonem a uloženo na platformu mezi dvě náložky vždy do stejné výchozí pozice. Parametry rychlosti tisku začínaly na 200 mm/min a byly zvyšovány v intervalech po 100 mm/min až do té doby, než byly vytištěné linie přerušované nebo vizuálně nerovnoměrné. Po vytištění byly vzorky ihned vloženy do sušárny na 10 minut při 90 °C.

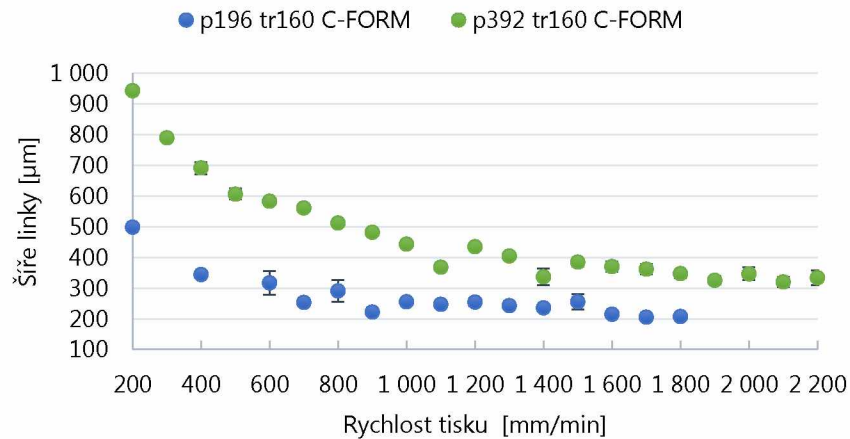
Z naměřených šířek vytištěných linií byly sestavené grafy 10–12, které jsou rozdělené podle složení využitých tiskových formulací (tisková formulace na bázi grafitu, tiskové formulace s obsahem mikročástic stříbra a formulace disperze vodivého polymeru PEDOT:PSS). Z grafického zobrazení vyplývá nepřímá závislost reprodukovatelné šíře linek na rychlosti tisku.

Dále výsledky prezentují vliv tiskového tlaku na vytištěnou šíři linek. Na základě výsledků z grafu 10 je zřejmé, že tiskový tlak přímo ovlivňuje šíři vytištěných linek. Větší difference vytištěných šíří linek jsou patrné u nižších rychlostí tisku, kde jsou šířky linek tištěné tlakem 392 kPa dvakrát větší, než linie tištěné tlakem 196 kPa. S nárůstem rychlosti tisku se vliv tlaku snižuje a rozdíl mezi šířemi je přibližně $\times 1,5$. Nastavení vyššího tlaku umožní dosažení vyšších tiskových rychlostí, při kterých jsou vytištěny reprodukovatelné testovací struktury, na druhou stranu vyšší tlak neumožní tisk tak jemných linek, jako v případě nižšího tlaku. Nejužší linka (205,4 μm) vytištěná formulací C-FORM byla získána s nastaveným tlakem 196 kPa a rychlostí 1 700 mm/min. Pro porovnání, nejužší linka vytištěná tlakem 392 kPa dosahovala šíře 320,2 μm při rychlosti tisku 2100 mm/min.

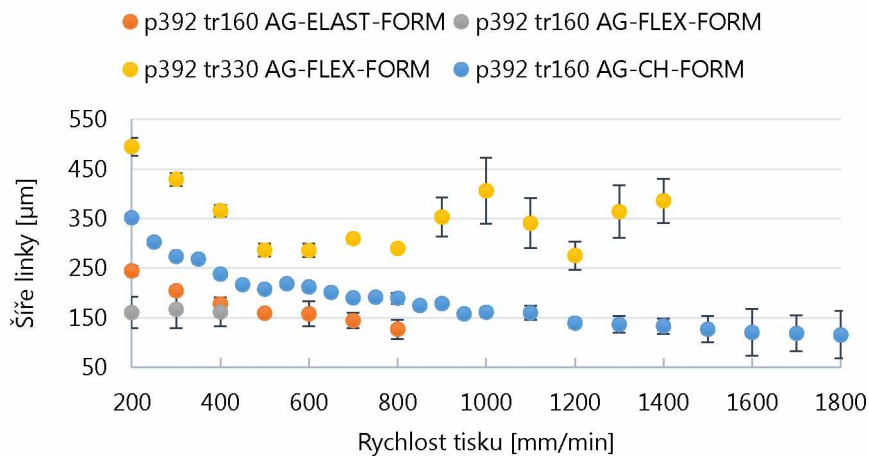
Šíře linek tištěné formulacemi s obsahem stříbrných mikročástic a disperzí polymeru PEDOT:PSS, potvrzují vliv rychlosti tisku na šíři reprodukováných linek. Graf 11 poskytuje výsledky vytištěných linek stříbrnými formulacemi. Pro všechny tiskové formulace byla zvolena tryska o vnitřním průměru 160 μm , nicméně po experimentálním prověření byl vybrán průměr pro formulaci AG-FLEX-FORM nevyhovující. Touto kombinací bylo dosaženo pouze rychlosti 400 mm/min a naměřené šíře linek vykazovaly maximální směrodatnou odchylku, která je v grafu zobrazena chybovými úsečkami. Pro další testovací výtisky formulací AG-FLEX-FORM byla vybrána tryska s větším průměrem, díky které byly uskutečněny výtisky až do rychlosti 1 400 mm/min, přesto naměřené šíře linek u takto vytištěných vzorků byly méně rovnoměrné, než linky tištěné ostatními stříbrnými formulacemi. Zlomové je rozmezí rychlostí 800–900 mm/min, kde se relativní odchylka naměřené šíře linek (289,6 μm resp. 352,6 μm) zvedá ze 2 % na 11 %.

Ačkoli byly viskozity tiskových formulací AG-CH-FORM a AG-ELAST-FORM téměř identické (kap. 2.4.1. graf 7), dosažené šíře linek a rychlosti tisku v grafu 11 jsou poměrně rozdílné. Formulace AG-ELAST-FORM sice poskytuje užší linie, nicméně už od rychlosti tisku 600 mm/min je relativní odchylka od průměru 16 % a linky mají nepravidelnou šířku. Nejvyšší kvalitu tisku ze stříbrných formulací poskytuje AG-CH-FORM. Přestože tato formulace nespadá do obecně doporučeného rozsahu viskozit (0,5–20 Pa·s), který byl uveden v kap 1.2.2.1, pracovalo se s touto formulací velmi dobře, neucpávala trysku a po naklonění podložního skla právě díky vysoké hodnotě viskozity nestékala. Nabízí také vysokou homogenitu šíří linek, neboť dosažená relativní směrodatná odchylka je v první polovině testovaných rychlostí tisku menší než 6 %. Nejuzší linka vytištěná stříbrnou formulací AG-CH-FORM dosahovala šíře 115 μm při rychlosti tisku 1 800 mm/min, nicméně je zatížena poměrně velkou relativní odchylkou 41,5 %. Pro formulaci AG-CH-FORM jsou vhodnější rychlosti tisku obsažené v první třetině testovaného rozsahu, kde chyba nepřesahovala zmíněných 6 %.

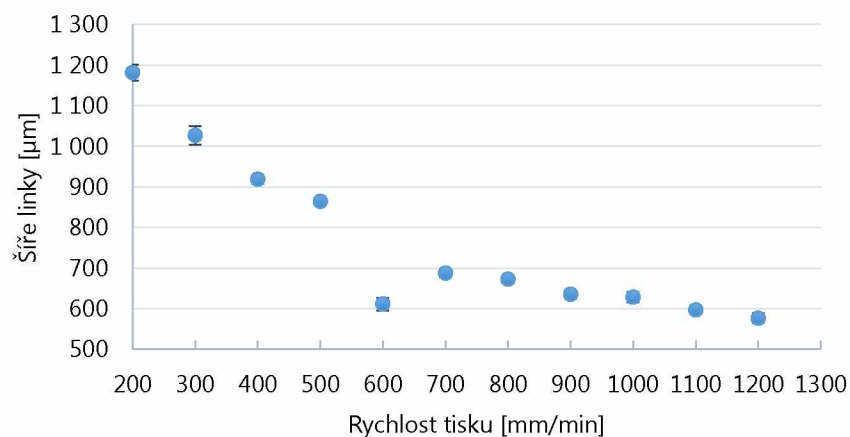
Tisková formulace na bázi disperze polymeru PEDOT:PSS rovněž poskytuje kvalitně vytištěné linie, což je potvrzeno grafem 12. Naměřené šíře linek vykazovaly jen mírnou relativní odchylku od průměru, která byla u každé tiskové rychlosti do 2,5 %.



Graf 10 Šířka vytištěných linek v závislosti na rychlosti tisku a nastaveném tlaku. Tištěno formulací C-FORM s vodivými částicemi na bázi grafitu.



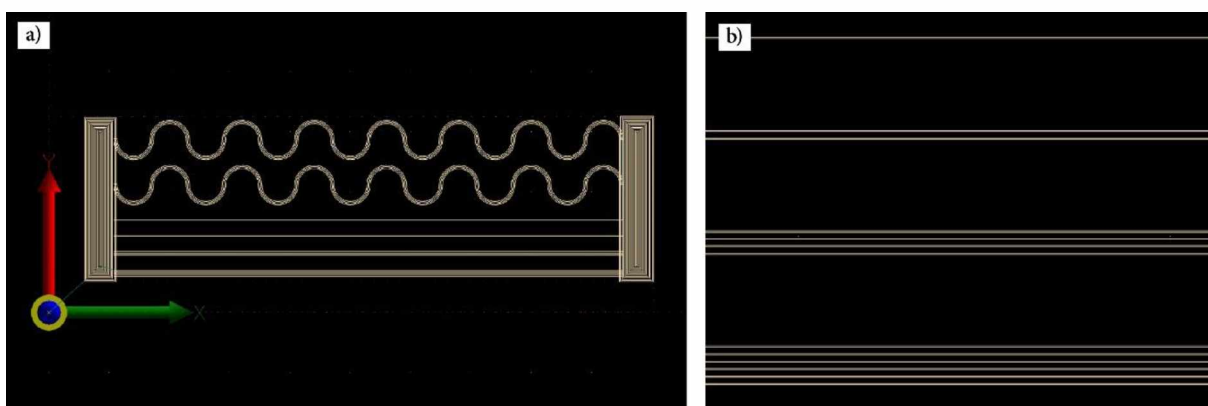
Graf 11 Šířka vytištěných linek v závislosti na rychlosti tisku při konstantním tlaku 392 kPa. Tištěno formulacemi na bázi stříbra.



Graf 12 Šířka vytištěných linek formulací HERAEUS CLEVIOS™ S V3 v závislosti na rychlosti tisku, za konstantního tlaku 196 kPa, tryskou s vnitřním průměrem 160 μm.

2.4.2.2.2. Tisk na strukturovaný povrch Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra

Pro demonstrování tisku na strukturované povrchy mikrodispensingovým zařízením byla zvolena tkanina s obchodním názvem Jersey Pu-membrane 96/4, Co/Lycra. Jako testovací obrazec byla zvolena meandrová struktura a rovné linie (obr. 23 a), odstupňované počty průchodů mikrodispensingové trysky (Srový). Jednotlivé linie se liší počtem průchodů tiskové trysky, což je zobrazeno v detailu obrázku 23 b). Nejširší linie byla tištěná šesti průchody, další čtyřmi, dvěma a nejtěsnější pouze jedním průchodem mikrodispensingové trysky. Oba meandry byly poté vytištěné na tři průchody.



Obrázek 23 Meandrové struktury (Srový) tištěné na materiálu Co/Lycra a polyuretanovou membránu 96/4, a) celý obrazec, b) detail struktury.

Dvě sady výtisků byly provedeny tiskovou formulací na bázi grafitu (C-FORM, šarže 2017-10-02-3 (Srový) a třemi elektricky vodivými formulacemi na bázi mikročástic stříbra [(AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Srový); AG-ELAST-FORM, šarže 2018-06-26-5 (Srový); AG-FLEX-FORM, šarže 2019-03-08-1 (Srový)]. První sada testovacích výtisků byla provedená na lícovou stranu strukturované tkaniny z materiálu Co/Lycra. Jedná se o směs syntetického polyuretanového vlákna, kolem nějž je ovinuto vlákno bavlny. Charakteristickým znakem tkaniny Lycra je její elasticita a pružnost. Druhá sada testovacích výtisků byla provedená na rubovou stranu tkaniny, která byla opatřena polyuretanovou (PU) membránou (obchodní název: PU membrane 96/4). V obou sadách byly pro každou tiskovou formulaci vytištěny vždy tři vzorky.

Konečným tiskovým parametrům uvedeným v tabulkách 3 a 4 předcházelo jejich experimentální stanovení. Uvedená kombinace parametrů tisku a výběru trysky byla optimalizována opakovanými potisky tkanin a jejich vizuálním hodnocením. Potištěné substráty byly sušeny po dobu 15 minut při nižší teplotě (50 °C), aby nedošlo k deformaci syntetických vláken a polyuretanové membrány.

Tabulka 3 Optimalizované parametry tisku na tkaninu Co/Lycra.

Formulace	Tlak [kPa]	Vnitřní průměr trysky [μm]	Rychlost tisku [mm/min]
C-FORM	392	160	200
AG-CH-FORM	147	330	400
AG-ELAST-FORM	294	330	400
AG-FLEX-FORM	392	330	200

Tabulka 4 Optimalizované parametry tisku na tkaninu s polyuretanovou membránou.

Formulace	Tlak [kPa]	Vnitřní průměr trysky [μm]	Rychlost tisku [mm/min]
C-FORM	196	160	300
AG-CH-FORM	98	330	400
AG-ELAST-FORM	196	330	400
AG-FLEX-FORM	293	330	200

2.4.2.2.3. Tisk na válcový 3D objekt

Pro demonstrování tisku na 3D válcový povrch mikrodispensingovým zařízením byla zvolena polypropylenová dóza zobrazenou na obrázku 24. Na základě experimentálních výsledků popsanych v kapitole 2.4.3.1. byly vytvořené struktury tištěné formulací na bázi mikrovlóček stříbra AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Syrový) a formulací na bázi disperze polymeru PEDOT:PSS (HERAEUS CLEVIOS™ S V3).



Obrázek 24 Dóza s objemem 125 ml využitá jako 3D objekt pro potisk mikrodispensingem, a) pohled shora, b) pohled zepředu c) realistické znázornění.

Samotnému tisku předcházelo navržení dvou tiskových trajektorií dle rozměrů vybraného objektu. První tiskový vzor je prezentován na obrázku 25. Navržená trajektorie měla provéřit tiskový proces především v horizontálním směru tisku. Na základě proměření dózy posuvným měřidlem (poloměr 26,4 mm, výška 67,2 mm) byly zvoleny posuvy pro osu X o 0,2 mm

a Y o ± 15 mm. Vertikální směr posuvu, tedy v ose Z , byl vypočítán podle obecné rovnice kružnice:

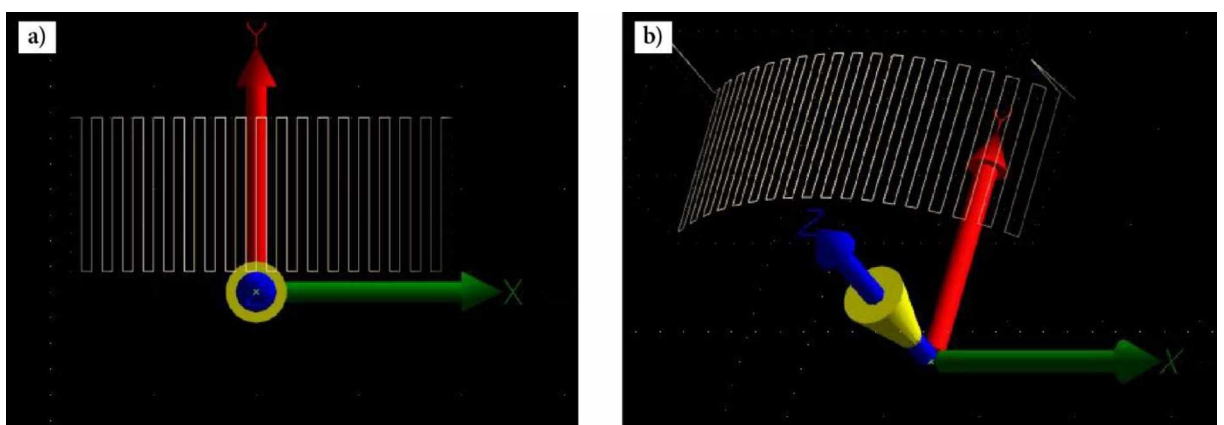
$$r^2 = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \quad (1)$$

po vyjádření byly získány hodnoty posuvu:

$$z = \sqrt{(r^2 - x^2)} \quad (2)$$

kde z je stoupání ve vertikálním směru osy Z , r je poloměr dózy, x je zvolený posuv ve směru osy X .

Tiskový proces sestával z následujících kroků: dóza byla před tiskem očištěna, vložena do pěnového polyuretanového podstavce a celý soubor byl přesně vyměřen na ploše platformy tak, aby nedocházelo k vyosení podstavce s dózou (obr. 26). Stříkačka naplněná tiskovou formulací a opatřená tryskou, byla zarovnána na krajní vrchol dózy. Jelikož využitě mikrodispensingové zařízení nedisponovalo optickým systémem vhodným pro tisk na 3D objekty, který by se dal využít pro přesné zarovnání konce trysky vůči předmětu, byla vzdálenost trysky nastavena manuálně na základě předchozích zkušeností s tiskem. Obecné doporučení pro nastavení vzdálenosti trysky od předmětu je 75 % průměru trysky. Jestliže byl tedy průměr trysky $160 \mu\text{m}$, vzdálenost jejího konce od předmětu byla přibližně $120 \mu\text{m}$. Jakmile byla nastavena výchozí pozice, pohyb trysky byl dále řízený na základě vytvořených tiskových dat, která jsou ve 3D pohledu zobrazena níže, na obrázku 25.

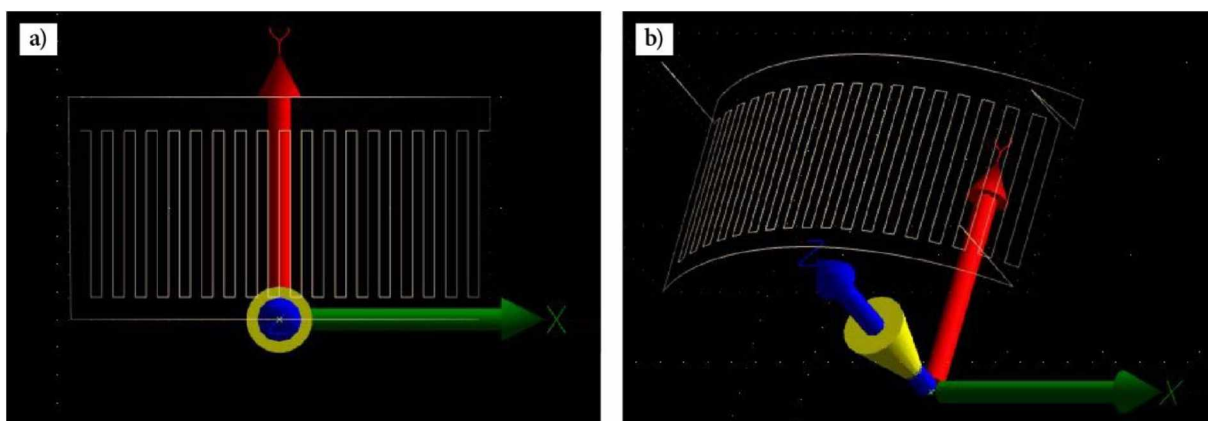


Obrázek 25 Navržený meandr pro potisk dózy v horizontálním směru a) pohled shora, b) perspektivní pohled.



Obrázek 26 Dóza upevněná v pěnovém polyuretanovém podstavci.

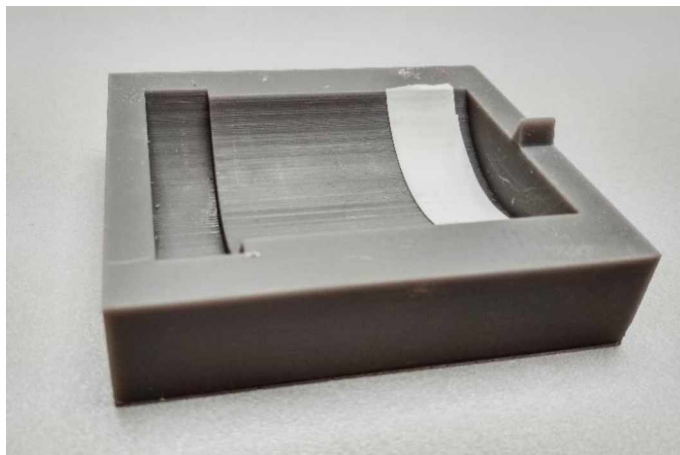
Po několika zkušebních výtiscích však bylo zjištěno, že je nutné dózu vyrovnat vůči trysce mnohem přesněji, ve všech směrech tisku. Proto byly později do vytvořeného systému souřadnic přidány vyrovnávací dráhy okolo vnitřního meandru (obr 27.) I v nynějším případě byla tryska manuálně posunuta na krajní vrchol dózy a dále byla tiskárna řízená pokyny obsaženými v kódu. Vyrovnávací dráhy poskytly lepší zarovnání dózy vůči trysce.



Obrázek 27 Meandrová struktura z obrázku 25, doplněná o vyrovnávací systém okolo vnitřního meandru.

Další překážkou bylo mírné vysouvání dózy z měkkého podstavce, což znemožnilo dosažení kvalitnějšího vyištění vodivých struktur, proto byl vytvořený pevný podstavec. S využitím CAD programu Thinkercad byl podstavec vymodelován podle rozměrů dózy s tolerancí 1 mm. Podstavec byl za 3 hodiny vyištěný na 3D tiskárně RepRap Rebel II pomocí programu Repetier Host, výškou vrstvy 0,25 mm, materiálem ABS (akrylonitril-butadien-styren). Přestože vyištěný podstavec na RepRap 3D tiskárně nedosahoval vysoké přesnosti, čímž se potenciál využití podstavce snižoval, byla s jeho využitím provedena další sada zkušebních výtisků meandrové struktury. Potvrdilo se, že FDM tiskárna RepRap Rebel II není vhodnou technologií pro tisk podstavce, jelikož kvalitu mikrodosingového tisku ovlivňují odchylky v mikrometrech. Třetí podstavec (obr. 28) byl proto vyištěný na SLA tiskárně Formlabs Form 2, s využitím

programu PreForm, výškou vrstvy 100 μm . Pro zvýšení přesnosti usazení dózy v podstavci byla poloha dózy korigována izolační páskou na pravé straně.



Obrázek 28 Vytištěný podstavec na stereolitografické tiskárně Formlabs Form 2 s rozlišením vrstev 100 μm .

Po vyladění tiskového procesu, zahrnujícího vycentrování dózy a podstavce vůči trysce, nalezení vhodné kombinace rychlosti tisku, tlaku a průměru trysky pro obě vybrané tiskové formulace, byla struktura uvedená na obrázku 27 vytištěna na dózu. Parametry tisku jsou uvedeny v tabulce 5.

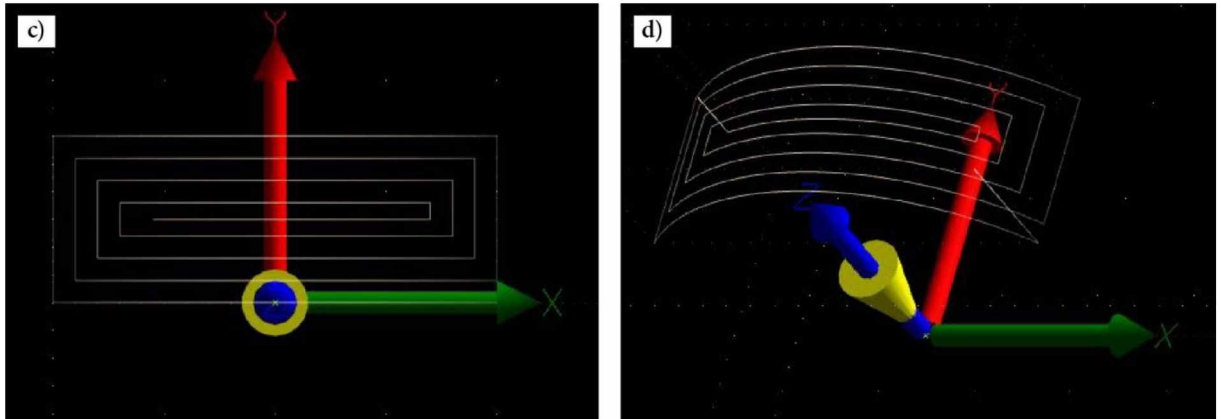
Tabulka 5 Nastavené procesní parametry pro tisk meandrové struktury (obr. 27) formulacemi AG-CH-FORM a HERAEUS CLEVIOS™ S V3.

Formulace	Tlak [kPa]	Vnitřní průměr trysky [μm]	Rychlost tisku [mm/min]
AG-CH-FORM	392	160	200
HERAEUS CLEVIOS™ S V3	196	100	150

Druhá tisková trajektorie (obr 29.) byla navržena tak, aby prověřila kvalitu tisku mikro-dispensingem ve vertikálním směru. Tisková data obsažená v g-kódu byla vytvořena obdobně jako u první trajektorie tisku. Na základě znalostí rozměrů dózy byla zvolena maximální šíře spirály v ose Y, která je 15 mm s 2 mm roztečí mezi jednotlivými trajektoriemi. Maximální délka obrazce v ose X je 40 mm s hodnotou posuvu o 0,2 mm a se zkracováním v horizontálním směru o 2 mm. Na základě výpočtu s využitím rovnice 1 byl dopočítán posuv v ose Z.

Taktéž jako v prvním případě, byl tisk proveden formulací AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Surový) a formulací na bázi disperze polymeru PEDOT:PSS (HERAEUS CLEVIOS™ S V3). Dóza byla před tiskem opět očištěna a vložena do podstavce (obr. 28). Tento systém byl poté umístěn mezi náložky a tryska manuálně vycentrována na

horní kraj dózy (osa Z). Dále bylo také potřeba vycentrovat dózu vůči trysce, proto byla zprvu tryska vedena přes povrch dózy bez tlaku.



Obrázek 29 Navržená spirála pro potisk dózy ve vertikálním směru a) pohled shora, b) perspektivní pohled.

Přestože g-kód obsahoval informace o požadované rychlosti tisku, mikrodispensingová tiskárna samovolně exponenciálně akcelerovala nastavenou rychlost. V důsledku urychlení tisku ze 100 mm/min až na hodnotu 1200 mm/min nezvládal krokový motor tak vysokou rychlost zpracovat především ve směru osy Z, čímž došlo k rozvibrování vodící tyče a k dezorientaci zařízení. Příčinou byl nedostatečný posuv ve směru osy Z, tryska byla ve skutečnosti níže a při zpětném tisku meandru došlo k ohnutí trysky o dózu. Zdroj tohoto problému byl nalezen v systémovém nastavení programu CNC USB Controller, které se pomocí vedoucího diplomové práce, Doc. Ing. Tomáše Srového Ph.D podařilo upravit. V případě vedení trajektorie tisku napříč objektem bylo experimentálně prověřeno, že spolehlivou rychlostí pro posuv ve směru osy Z je 200 mm/min. Při vyšších rychlostech než 300 mm/min docházelo k mírnému vibrování vodící tyče tiskárny a jejímu občasnému protáčení.

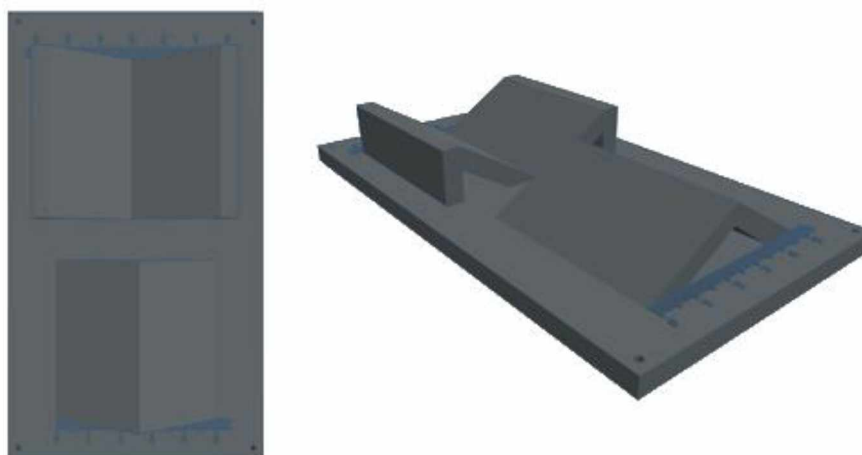
Finální vzorky byly tištěny procesními parametry uvedenými v tabulce 6. V tomto případě je potřeba připomenout výsledky z kapitoly 2.4.3.1., které ukázaly, že rychlost tisku a tlak ovlivňují šíře vytištěných linek, obdobně jako výběr vnitřního průměru trysky. Postup při hledání optimální kombinace tryska-tlak-rychlost pro konkrétní tiskovou formulaci začíná výběrem vhodného průměru trysky s ohledem na viskozitu tiskové formulace. K vybrané trysce jsou dále hledány neznámé parametry tiskového tlaku a rychlosti tisku s ohledem na tvar objektu nebo povrch substrátu. Důležité je také uvažovat, zda bude šíře linek regulovaná tiskovým tlakem nebo rychlostí tisku. V praxi by to mohlo vypadat následovně – tisk probíhá rychlostí 600 mm/min a cílem bude vytištění jemnější struktury. Vzhledem k vyšší rychlosti tisku by rozhodnutí směřovalo ke snížení tlaku, protože vyšší tiskové rychlosti by mohly způsobit nehomogenní okraje linie či dokonce její diskontinuitu.

Tabulka 6 Nastavené procesní parametry pro tisk spirálové struktury (obr. 29) formulacemi AG-CH-FORM a HERAEUS CLEVIOS™ S V3.

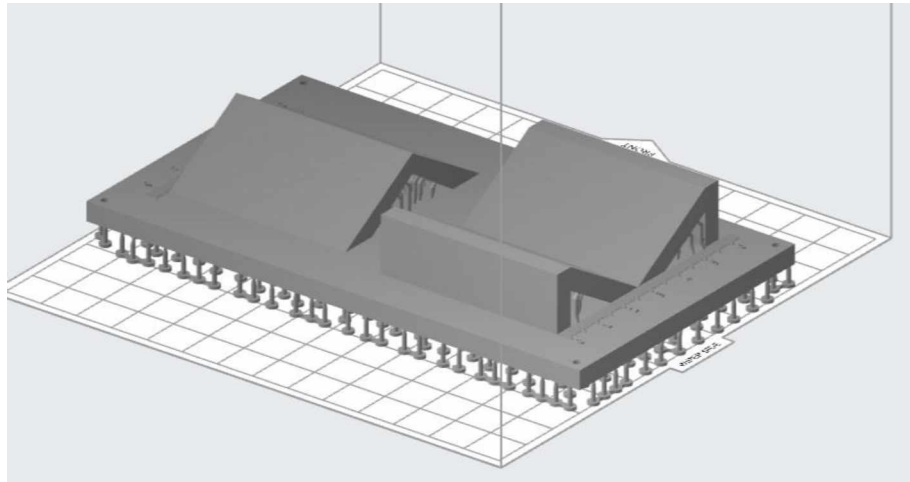
Formulace	Tlak [kPa]	Vnitřní průměr trysky [μm]	Rychlost tisku [mm/min]
AG-CH-FORM	392	160	200
HERAEUS CLEVIOS™ S V3	196	100	90

2.4.2.2.4. Tisk na vlastní vymodelovaný 3D objekt

Poslední tisková zkouška byla provedena na šikmé plochy 3D objektů (obr. 30). Objekty byly vytvořené v programu ThinkerCad tak, aby bylo možné prověřit tisk jak na pozitivní, tak i negativní tvar. Model byl konstruovaný s ohledem na doporučení výrobce [51] použité 3D tiskárny tak, aby byly všechny prvky obsažené v modelu vytištěny bez poruch. Pro zarovnání trysky vůči předmětu byla přidána milimetrová pravítka k oběma tvarům a čtyři registry po stranách. Pro získání přesného a rozměrově stabilního objektu, byl model vytištěný na SLA tiskárně Form 2, fotopolymerní pryskyřicí FLGPGR04, výškou vrstvy 50 μm . Kromě toho byly před tiskem na SLA přidány pomocné podpory (obr. 31), z důvodu snadnější separace objektu od kovového podstavce 3D tiskárny. Po vytištění byl objekt očištěn v lázni isopropylalkoholu a poté dotvrzen v příklopném UV zařízení po dobu 320 osvitových jednotek. Na závěr byly podpory odstraněny špachtlí a nerovnosti podstavy vyhlazeny brusným papírem hrubosti 100. Rovnoměrnost objektu pak byla zkontrolována pomocí vodováhy.



Obrázek 30 Vytvořený 3D objekt v programu Thinkercad za účelem potisku mikrodispensingem. Vlevo pohled shora, vpravo perspektivní pohled.



Obrázek 31 Perspektivní náhled modelu v programu PreForm 2 po přidání podpory objektu.

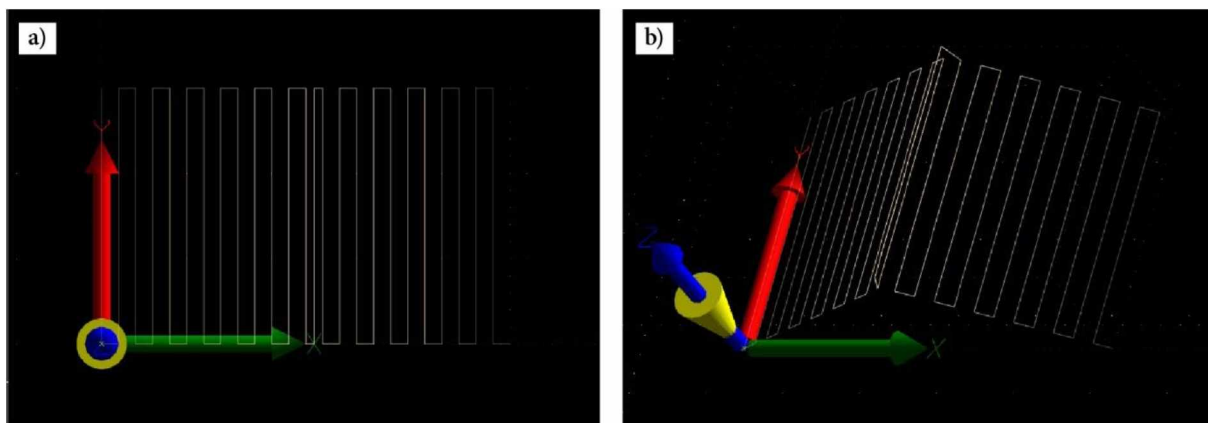
Následně byla vytvářena pozitivní i negativní tisková trajektorie a g-kód (obr. 32 a 33). Rozměry podstavy modelu pozitivního i negativního tvaru byly 50×50 mm s 15 mm výškou, respektive hloubkou. Na základě modelových rozměrů byly dopočítané úhly pomocí goniometrické funkce tangens:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{protilehlá odvěsna}}{\text{přilehlá odvěsna}} \quad (3)$$

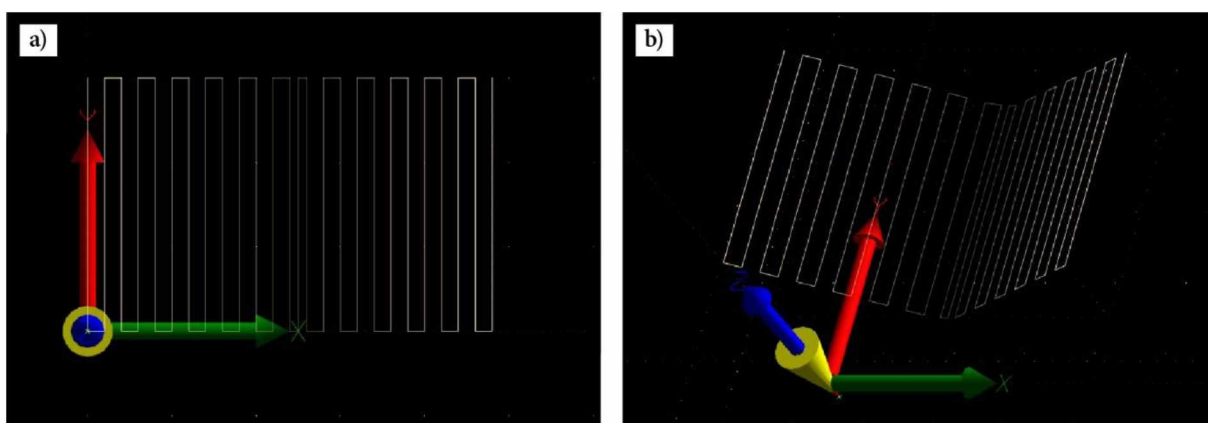
a posuv ve směru osy Z pomocí směrnice přímky:

$$\text{rostoucí } y = kx + q; \text{ klesající } y = -kx + q \quad (4)$$

kde k je směrnice přímky, y je výška objektu, x polovina délky objektu a q je koeficient průtnutí osy y přímkou.



Obrázek 32 Navržená trajektorie pro potisk pozitivního tvaru objektu a) pohled shora, b) perspektivní pohled.



Obrázek 33 Navržená trajektorie pro potisk negativního tvaru objektu a) pohled shora, b) perspektivní pohled.

Tisk vytvořeného modelu na 3D tiskárně se zvolenými parametry trval 6,5 hodiny. Z toho důvodu nebylo možné vytisknout pro každý potisk mikrodyspensingem individuální 3D objekt. Řešením byla aplikace průhledné lepicí pásky na oba tvary, před každým testovacím tiskem pro snadnější čištění objektu a zabránění jeho znehodnocení. Tiskový cyklus obsahoval tři fáze: za prvé vycentrování objektu vůči trysce, za druhé, provedení testovacích výtisků zvolenými procesními parametry a za třetí, korekce jak procesních parametrů, tak vypočtených dat obsažených v g-kódu.

Vycentrování objektu: vycentrování objektu probíhalo následujícím způsobem: objekt byl vložený mezi náložky a zarovnání v osách XY bylo ověřeno stranovými registry. Dále byla tryska korigována manuálně na horní hranu 3D předmětu a nastavená pozice byla ověřena prostřednictvím milimetrového pravítka. Další prověření celkového zarovnání trysky v osách XYZ bylo provedeno v programu CNC USB Controller, pomocí příkazu „go to selected line“. Jakmile byl tento proces dokončen, následoval vlastní tisk stříbrnou formulací AG-CH-FORM.

Tisk na pozitivní objekt: první testovací zkouška byla provedená na pozitivní tvar. V průběhu tisku stoupající strany jehlanu se ukázalo, že je tryska lehce vzdálená od šikmé plochy

jehlanu, proto musela být provedena korekce tiskových dat. *Korekce*: předmět potisku byl proměřen posuvným měřidlem, přičemž v ose Z byla naměřená negativní odchylka (-1,1 mm), na kterou bylo nutné adaptovat tisková data. Po korekci následovala výměna lepicí pásky a experimentální prověření provedené úpravy tiskových dat. Další tiskové zkoušky byly zaměřené na sestupnou stranu jehlanu, kde opět tryska nedoléhala těsně na předmět, a proto i na této straně bylo potřeba zasáhnout do tiskových dat. 3D objekt byl proto vyfocený a pomocí programu Photoshop bylo zjištěno, že jehlan není přesně rovnoramenný. Proběhla korekce úhlu a koeficientu „q“ z rovnice 4, což přispělo ke zdárnému potištění pozitivního 3D objektu.

Tisk na negativní objekt: tisk na negativní objekt probíhal obdobným způsobem. Do programu CNC USB Controller byla nahrána vytvořená tisková data (výše obr. 33). Následně byly provedeny testovací výtisky nejdříve na sestupující a poté na postupující šikminu. I v tomto případě byly nutné korekce kódu, které se týkaly zejména úhlů odvěsen, protože SLA 3D tiskárna nedokázala vytisknout ostrou hranu přechodu mezi odvěsnami. Tupý úhel v prohlubni však vedl k tomu, že trajektorie tisku byla přeprogramovaná pro souvislý tisk napříč celým negativním tvarem, který se takto podařilo potisknout.

Výsledné objekty, jak pozitivní, tak negativní byly tištěné formulací AG-CH-FORM, šarže 2018-04-20-3 (Syrový) při tlaku 392 kPa, rychlostí 200 mm/min, tryskou 160 μ m.

2.4.3. Analýza obrazu

2.4.3.1. Vizuální hodnocení strukturovaných substrátů a 3D objektů

Tisk na tkaninu Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra

Strukturované tkaniny byly naskenované stolním skenerem Canon Canoscan 5600F. Náhled vytištěných meandrů na tkaninu 96/4 Co/Lycra (dále jen COL) a povrch PU membrane 96/4 Co/Lycra (dále jen PUM) je na obrázku 34. Pro lepší posouzení bylo provedeno vyříznutí a zvětšení části vzorku (obr. 35).

Vzorky vytištěné formulací C-FORM na tkaninu COL nevykazují zřetelné deformace ve struktuře a vzhledem k nižší viskozitě barva do tkaniny dobře penetrovala. Pokud je však tkanina podrobena mechanickému namáhání v tahu či ohybu, dochází k mírnému popraskání tiskové formulace. V tomto případě množství přenesené barvy nemá souvislost s praskáním barvové vrstvy. Tentýž problém totiž nastal i u vzorku, na který bylo přeneseno menší množství tiskové formulace.

Z tiskových formulací na bázi mikročástic stříbra dosahuje nejlepších vizuálních výsledků na povrchu tkaniny COL formulace AG-FLEX-FORM (obr. 34 a 35). Potištěný povrch materiálu Co/Lycra je vizuálně nejhladší, nejsou vyzorována odstávající vlákna, a i v případě ohnutí či protažení tkaniny je barva flexibilní a nepraská. Obdobný výsledek poskytují na první pohled vzorky tištěné formulací AG-ELAST-FORM, nicméně po bližším prozkoumání si lze všimnout drsnější struktury na povrchu vláknité tkaniny, což je patrné na obrázku 35. Vzorky tištěné formulací AG-CH-FORM na tkaninu COL rovněž poskytují dostatečně kvalitní povrch, ale opět je zde patrnější drsnější struktura povrchu. Výtisku vzorků tiskovou formulací AG-CH-FORM předcházelo časově náročnější experimentální nalezení vhodných tiskových parametrů.

Na vzorcích tkaniny PUM, potištěných formulací C-FORM je povrch linií celistvý bez defektů, nicméně protažením či ohnutím vzorku barva praská a odlupuje se, což svědčí o nižší adhezi vytištěných linek. Z detailního náhledu vzorků (obr. 35) je zjevné, že vzorky tištěné chemicky odolnou formulací AG-CH-FORM poskytují velmi nekvalitní povrch. Složení této barvy není kompatibilní s potiskovaným pružným povrchem, kterým je polyuretanová membrána. Důsledkem je popraskaná struktura a odlupující se barva především v oblasti plných ploch. Nekvalitní tisk na PUM může být ovlivněn recepturou pojiva, které spolu s dalšími pomocnými prostředky ovlivňuje přilnavost a mechanickou odolnost tiskové formulace na daném substrátu. Porovnáním vzorků potištěných elastickou AG-ELAST-FORM s pružnou AG-FLEX-FORM stříbrnou formulací je zjevný rozdíl ve struktuře povrchu. Elastická tisková formulace se povrchu membrány lépe přizpůsobí, což umožňuje její nižší viskozita. Naopak u vzorků tištěných flexibilní tiskovou formulací je zvýrazněná struktura samotného materiálu. Na základě vizuálního posouzení lze říci, že pro potisk tkaniny s polyuretanovou membránou je vhodnější elastická tisková formulace.

Tisk na polypropylenovou dózu

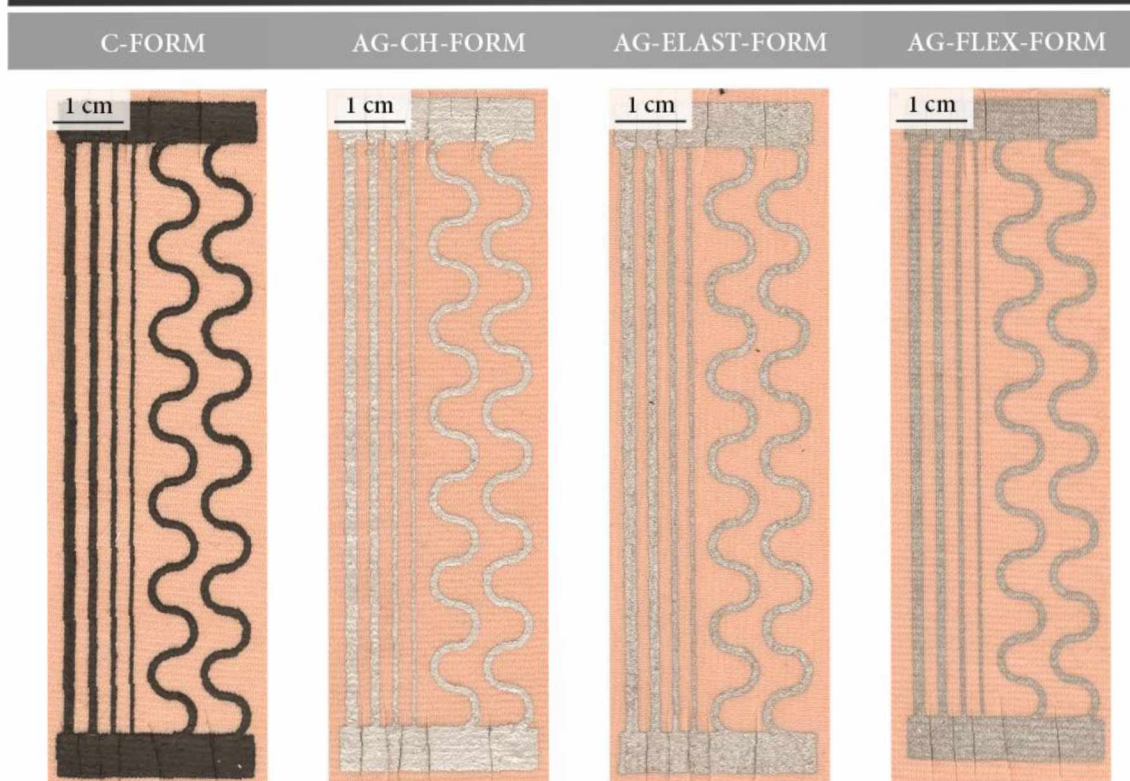
3D objekty (PP dóza, pozitivní a negativní objekty) byly vyfoceny v náhledové skříni pod denním světlem. Náhledy potištěných 3D objektů jsou zobrazeny na obrázcích 36 a 37. Navržené meandrové struktury natištěné na plastovou dózu formulacemi AG-CH-FORM a HERAEUS CLEVIOS™ S V3, jsou znázorněny na obrázku 36. Meandrové linky tištěné horizontálním směrem jsou vizuálně pravidelné v celém rozsahu a není pozorovaná významná závada. Po bližším prozkoumání je patrné pouze mírné zalití oblouků na meandrech, které způsobuje přechod pohybu trysky z osy X na osu Y. Struktura ve tvaru spirály tištěná vertikálním směrem je rovněž bez výrazných závad, nicméně mírné zesílení linek je možné pozorovat v částech, ve kterých byla struktura tištěná na povrchu dózy směrem dolů. Tento jev nastává z důvodu sunutí materiálu před tryskou. Zesílení linek v těchto částech by se dalo částečně redukovat přesnější vzdáleností trysky od potiskované substrátu, pro což by bylo nezbytné pokročilejší

vybavení mikrodispenseru, například kamera. Vzhledem k pozorovaným jevům lze říci, že kvalita vytištěných linií je ovlivněna směrem tisku. Lepší vizuální kvality dosahují vodivé linky tištěné v horizontálním směru, podél 3D předmětu. Linky tištěné ve vertikálním směru při pohybu trysky směrem dolů jsou mírně zesíleny vlivem sunutí materiálu před tryskou.

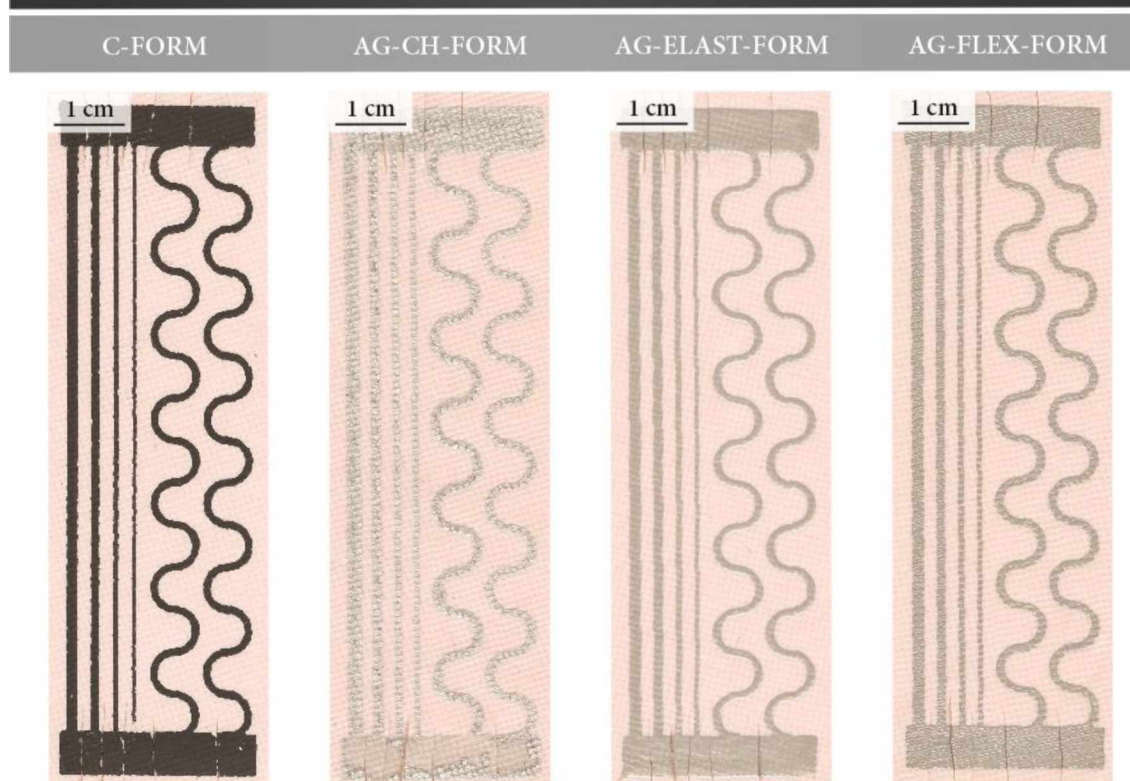
Tisk na pozitivní a negativní 3D objekt

Vodivé struktury tištěné na pozitivní a negativní 3D tvar byly tištěné formulací AG-CH-FORM (obr. 37). Na šikmých plochách, které byly tištěné pohybem trysky směrem nahoru lze pozorovat mírné zaoblení spíše na spodním ohybu meandrového oblouku, což bylo pozorováno také při tisku na dózu. Tento jev je způsoben změnou směru tisku mezi osami X a Y. Další nedostatek je pozorován mezi ohyby meandru. V této části je chod trysky naprogramován pro posuv do prostoru osy Z. V důsledku posuvu trysky směrem dolů opět dochází k sunutí materiálu okrajem trysky (obr 38 a, b). Tento jev se vyskytuje pouze na levé straně, což je patrné z obrázků 38 a) a b). Důvodem pro tento nedostatek je nižší posazení trysky nad předmětem. Levá strana 3D objektu je pravděpodobně nerovnoměrně vytištěná na 3D tiskárně anebo má méně zbrúšenou podstavu brusným papírem (obr. 38 c). Dále se na několika místech vytištěných linií projevuje jejich nerovnoměrnost (obr. 38 a, b). Tisková data vytvářená pomocí matematických rovnic a prvotně určená pozice trysky vedená na základě těchto vytvořených dat je přesně daná, a tak lze předpokládat že příčinou těchto nedostatků je nehomogenita 3D objektu.

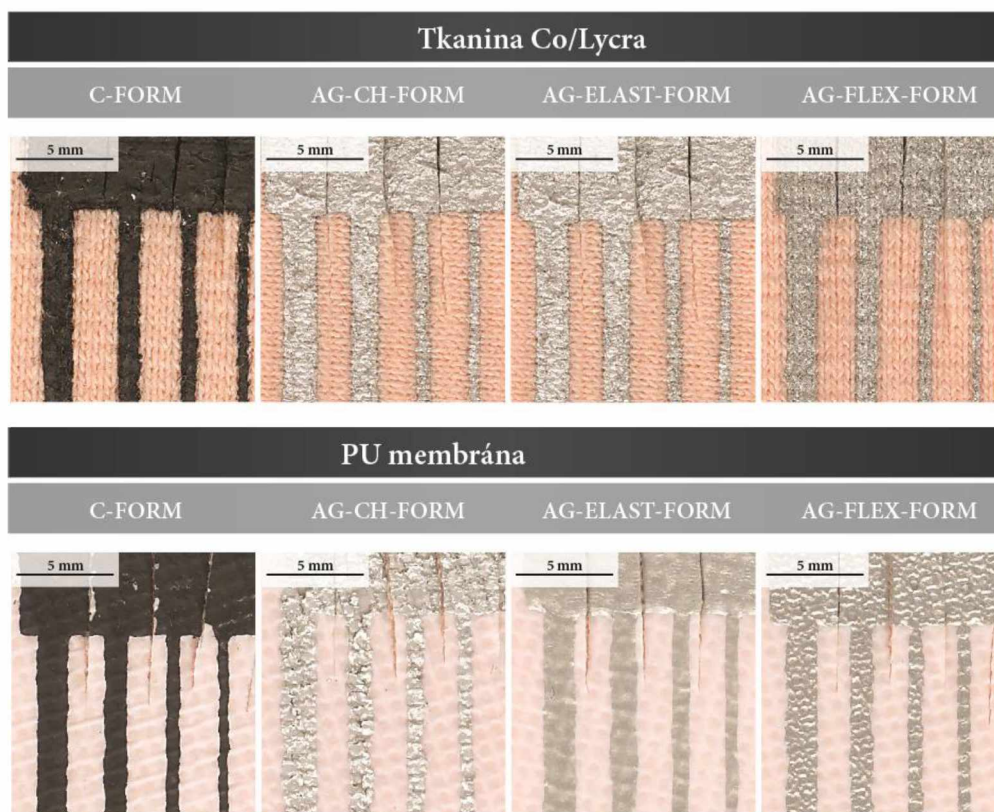
Tkanina Co/Lycra



PU membrána



Obrázek 34 Náhled vytištěného testovacího obrazce na tkaninu PU membrána 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra formulacemi na bázi mikročástic stříbra a grafitu. Délka obrazce je 94 mm a šířka 28 mm. Detail je zobrazen na obr. 35.

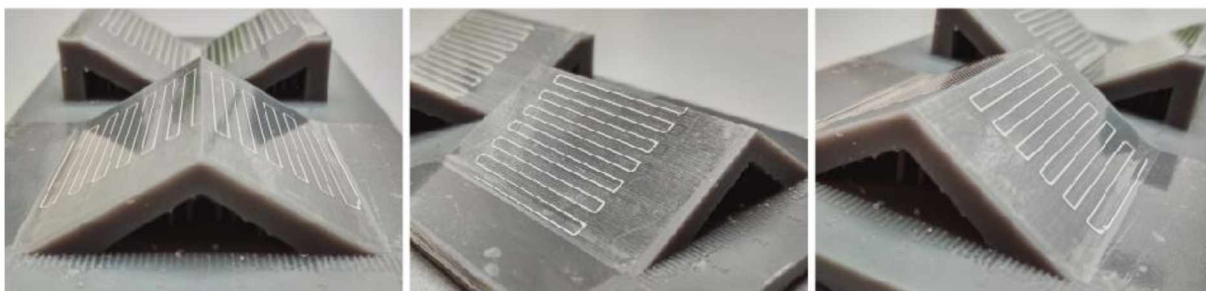


Obrázek 35 Detail části testovacího obrazce z obr. 34. Tisk na tkaninu PU membrána 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra formulacemi na bázi mikročástic stříbra a grafitu.

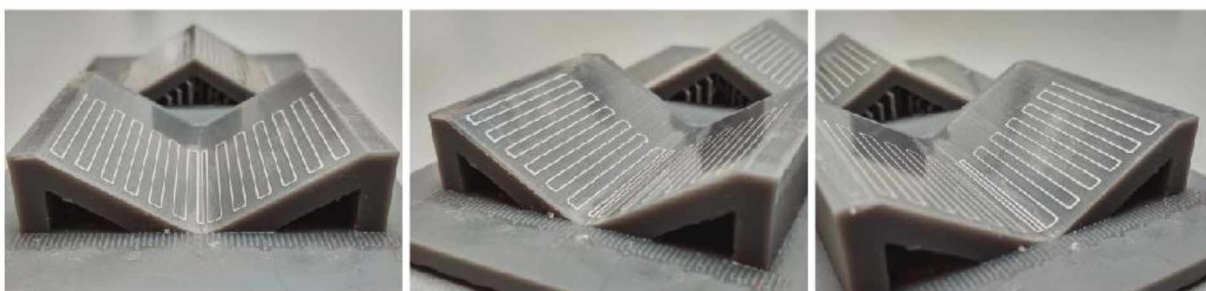


Obrázek 36 Náhled vytištěných meandrů na polypropylenovou dózu formulacemi na bázi mikročástic stříbra a disperze polymeru PEDOT:PSS. Výška dózy je 67,2 mm a průměr 52,8 mm.

Pozitivní tvar, AG-CH-FORM



Negativní tvar, AG-CH-FORM

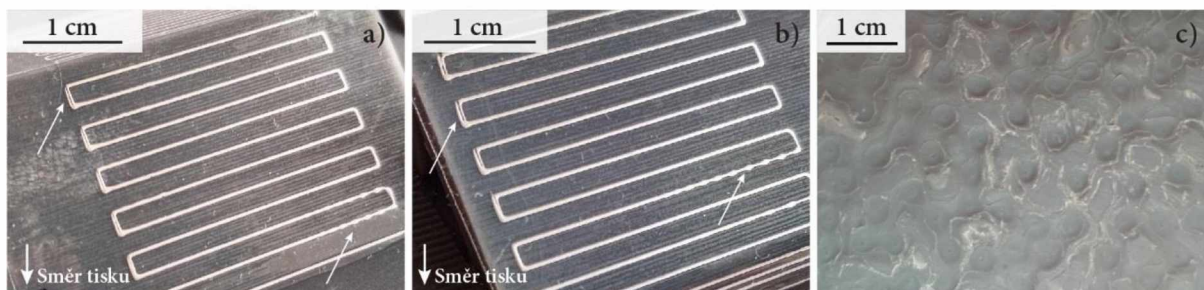


Obrázek 37 Náhled vytištěných meandrů na 3D pozitivní a negativní tvar. Oba prvky byly potištěné formulací AG-CH-FORM.

Pozitivní tvar

Negativní tvar

Struktura podstavy



Obrázek 38 Detail vytištěného obrazce na negativní a pozitivní 3D tvary, a) tisk na pozitivní tvar směrem dolů, b) tisk na negativní tvar směrem dolů, c) strukturovaná podstava 3D objektu způsobená přidáním podporami tisku.

2.4.3.2. Optická mikroskopie

Vytištěné struktury byly charakterizovány pomocí optického mikroskopu Nikon Eclipse LV-DIA-N a programu NIS Elements. Všechny struktury byly snímány objektivem CFI TU Plan FLUOR BD 5X. Mikroskopické snímky jsou okomentovány níže a prezentovány pomocí grafů, které znázorňují naměřené šíře linií s průměrnou standardní odchylkou.

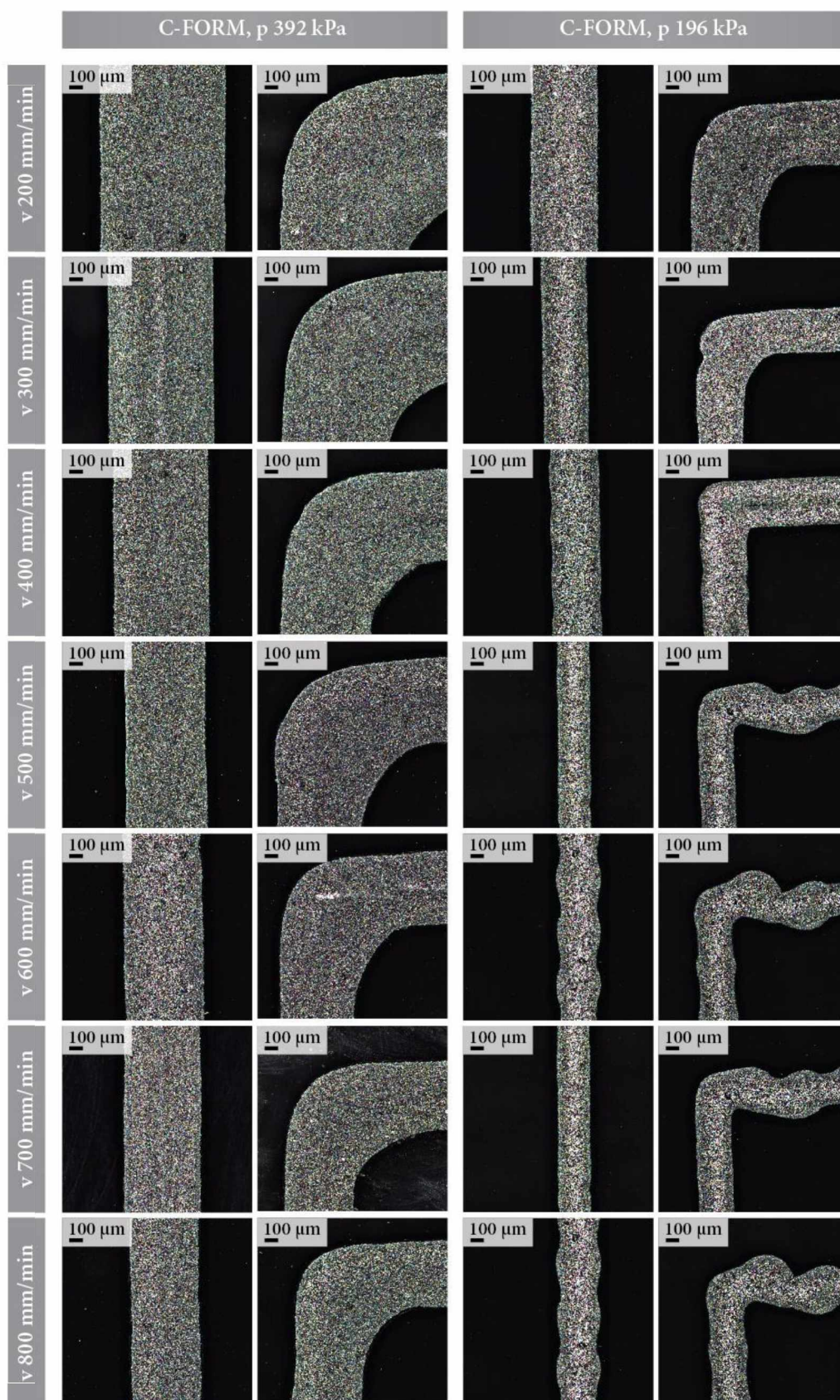
2.4.3.2.1. Tisk na podložní sklo – hodnocení kvality tisku

Na mikroskopickém náhledu (obr. 39–41) jsou znázorněny linie vytištěné formulací C-FORM, které byly vytištěné tiskovým tlakem 392 kPa a 196 kPa. Z mikroskopických snímků je zřejmé, že se šíře linky s rostoucí rychlostí tisku snižuje a taktéž, že užší šíře linek jsou dosaženy s využitím nižšího tlaku. Deformace v podobě nerovnoměrnosti je možné dříve pozorovat v rohových oblastech než na rovných liniích, z důvodu změny směru tisku (v tomto případě z osy X na osu Y). Při změně směru tisku totiž dochází ke krátké prodlevě aktuální tiskové rychlosti o čemž v průběhu tisku informuje i software CNC USB Controller. Po této prodlevě, která nastává při prudké změně směru, dochází opět k rozjezdu na původně nastavenou tiskovou rychlost. Přestože prodleva a opětovný rozjezd trvají velmi krátce (desetiny sekundy), způsobí rozkmitání trysky, což se výrazněji projeví u vyšších tiskových rychlostí. Díky mikroskopickému pozorování je možné na snímcích zhodnotit kontinuitu linek. Nekontinuální linky se dříve projevují při tisku s nižším tlakem od rychlosti 1700 mm/min. Rozdělení linek je způsobeno tím, že nastavený tiskový tlak již nevytváří dostatečný objemový průtok kapaliny pro danou rychlost tisku. U nižšího tlaku lze také dříve pozorovat variabilitu u zaoblených i rovných linek, které nastávají od rychlosti tisku 600 mm/min a 500 mm/min. Naopak linky tištěné dvojnásobně vyšším tlakem jsou všechny kontinuální. V tomto případě jsou první disproporce patrné na rohové lince tištěné rychlostí 1300 mm/min.

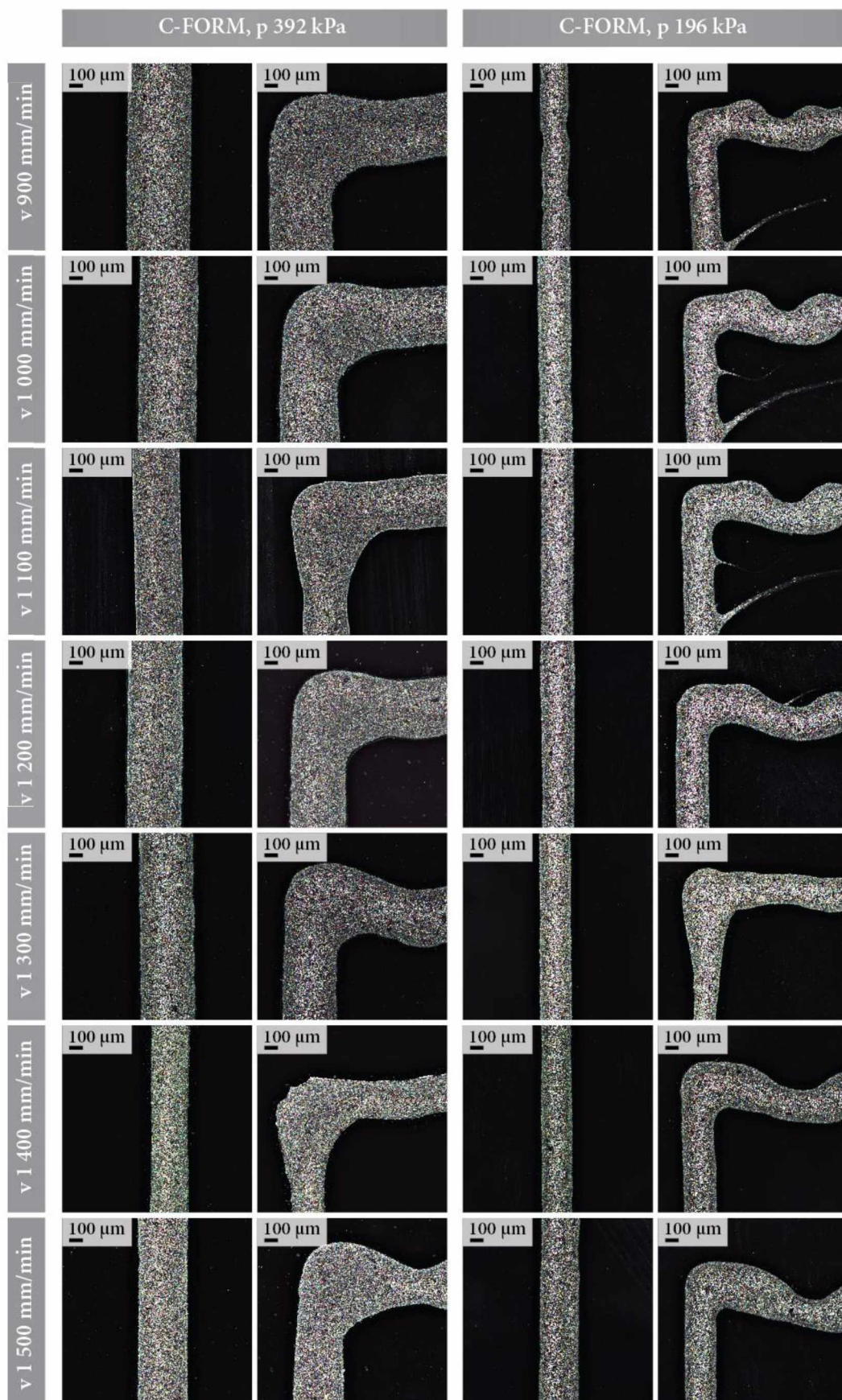
Výřezy mikroskopických snímků (obr. 42 a 43) porovnávají linky tištěné formulacemi AG-CH-FORM a AG-ELAST-FORM, které byly tištěné tlakem 392 kPa, s využitím trysky o vnitřním průměru 160 μm . Hlavním rozdílem mezi jednotlivými tiskovými formulacemi je v dosažitelné tiskové rychlosti. Linky tištěné chemicky odolnou formulací je možné tisknout téměř dvojnásobnými tiskovými rychlostmi. Důvodem je rozdílné chemické složení obou tiskových formulací, které má vliv na reologii tiskových formulací a ta na tiskové chování. U elastické tiskové formulace byla naměřena mnohem nižší viskozita než u chemicky odolné a celkově je optimalizována spíše pro tisk na textilie, jejichž charakteristikou je strukturovaný a pórovitý povrch. Vzhledem k jednotlivým výřezům vodivých linek lze říci, že linky tištěné formulací AG-CH-FORM jsou při dané rychlosti širší, než tiskovou formulací AG-ELAST-FORM, což potvrzují také naměřené průměry vytištěných linek, uvedené v grafu 11 (str. 50). Celkově bylo formulací AG-CH-FORM dosaženo nejlepší kontinuity, homogenity a brilantnosti v oblasti rovných linek i hran při tisku na sklo, což je možné vidět na jednotlivých mikroskopických snímcích. Struktura jednotlivých snímků se poté shoduje s naměřenými šířkami linek a jejich směrodatnými odchylkami (graf 11, str. 50). Na základě této znalosti byla později vybrána pro tisk na 3D povrchy.

Další sada snímků (obr. 44 a 45) znázorňuje mikroskopické snímky linek tištěné formulací AG-FLEX-FORM a tlakem 392 kPa s různými průměry trysek. S ohledem na vybrané procesní parametry a mikroskopické snímky vytištěných linek je možné říci, že výběr vnitřního průměru trysky přímo ovlivňuje dosažené rozlišení linek. V obou případech jsou však viditelné výraznější odchylky v homogenitě vytištěných linek, kdy v podstatě každá linka byla nekonzistentní z hlediska dosažení šíře linky. Jakost těchto linek je v porovnání s linkami tištěnými formulací AG-CH-FORM na výrazně nižší úrovni.

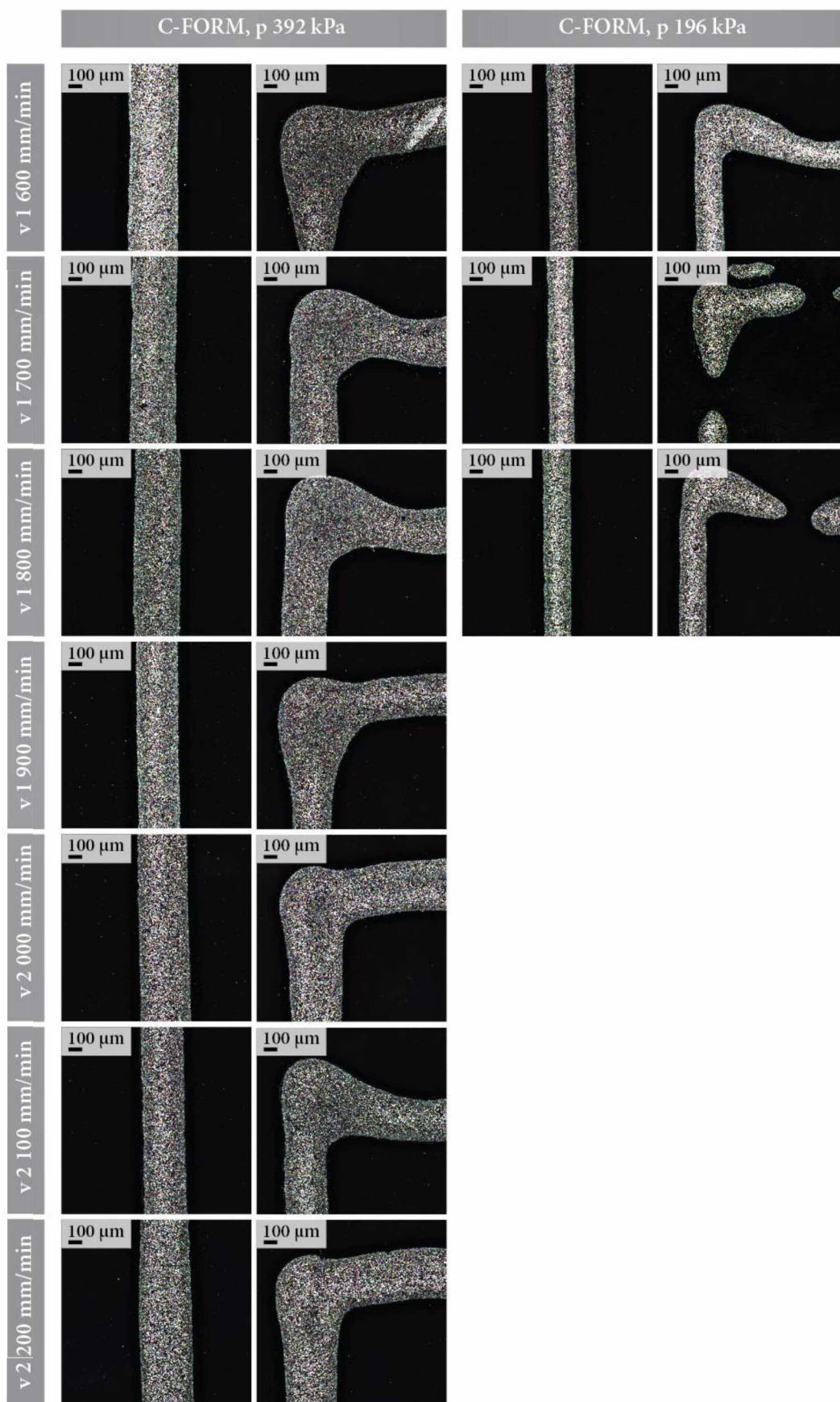
Struktury tištěné formulací HERAEUS CLEVIOS™ S V3 dosahují viditelně širších tiskových linek, což je způsobeno nižší viskozitou této formulace. Souvislosti mezi viskozitou a dosaženou šíří linek potvrzují také vzorky tištěné formulací C-FORM. Linie tištěné tlakem 392 kPa s tryskou 160 µm dosahují viditelně větší šíře, než linie tištěné víceviskózní formulací AG-CH-FORM, pro kterou byly nastaveny stejné procesní parametry. Tisková formulace HERAEUS CLEVIOS™ S V3 dobře smáčela potiskovaný materiál (sklo) a ve struktuře nejsou viditelné žádné defekty. Linky tištěné formulací na bázi disperze polymeru PEDOT:PSS dosahují vysoké kvality tisku z hlediska čistých a rovných okrajů linek, jejich homogenity a kontinuity. Zmíněné závěry plně korespondují s výsledky uvedenými v grafech 10–12 v kapitole 2.4.2.2.1. Z hlediska dosažené homogenity šíře linek lze pozorovat vývoj směrodatných odchylek pro jednotlivé nastavené parametry tisku.



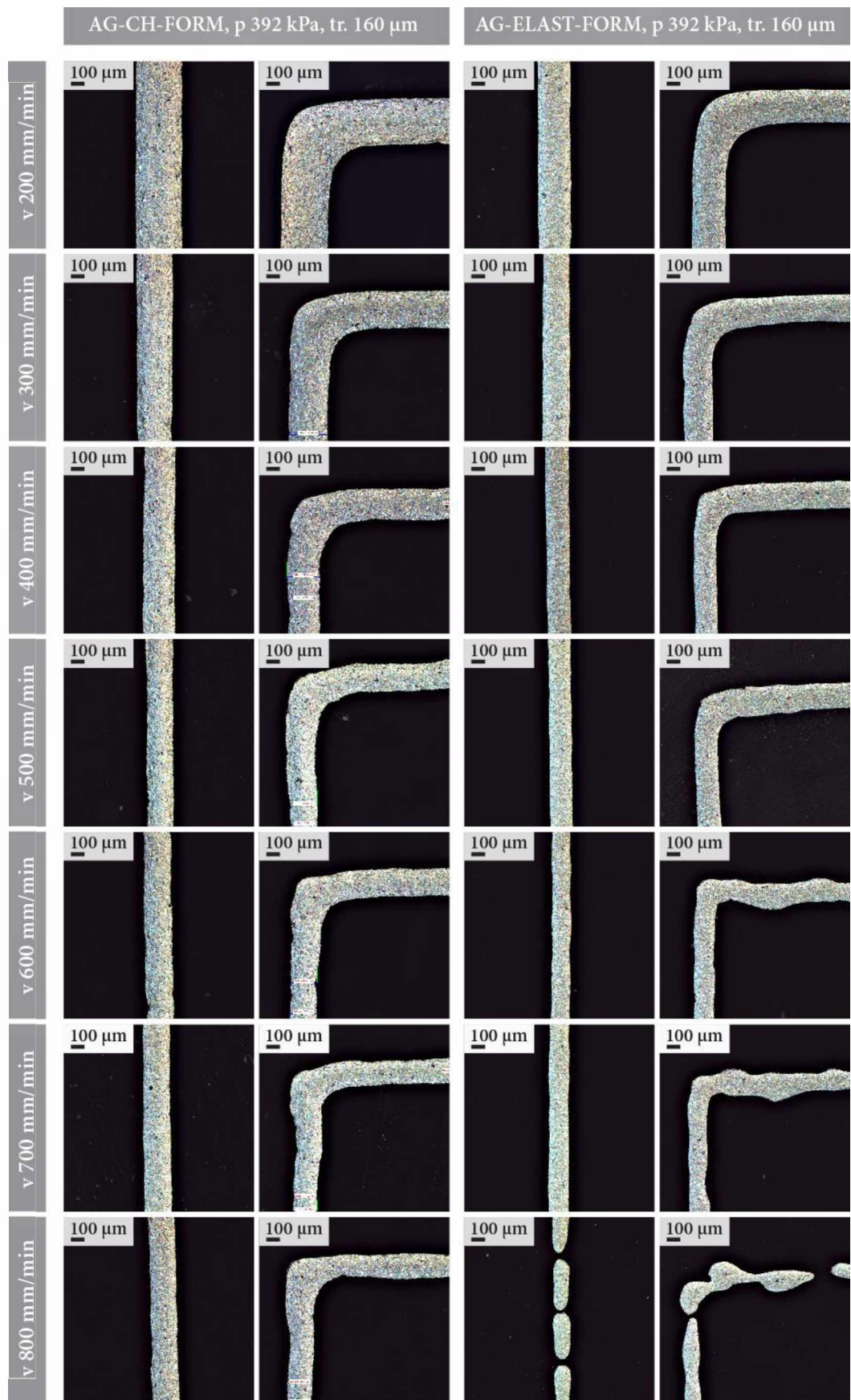
Obrázek 39 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací C-FORM na podložní sklo rychlostí 200–800 mm/min.



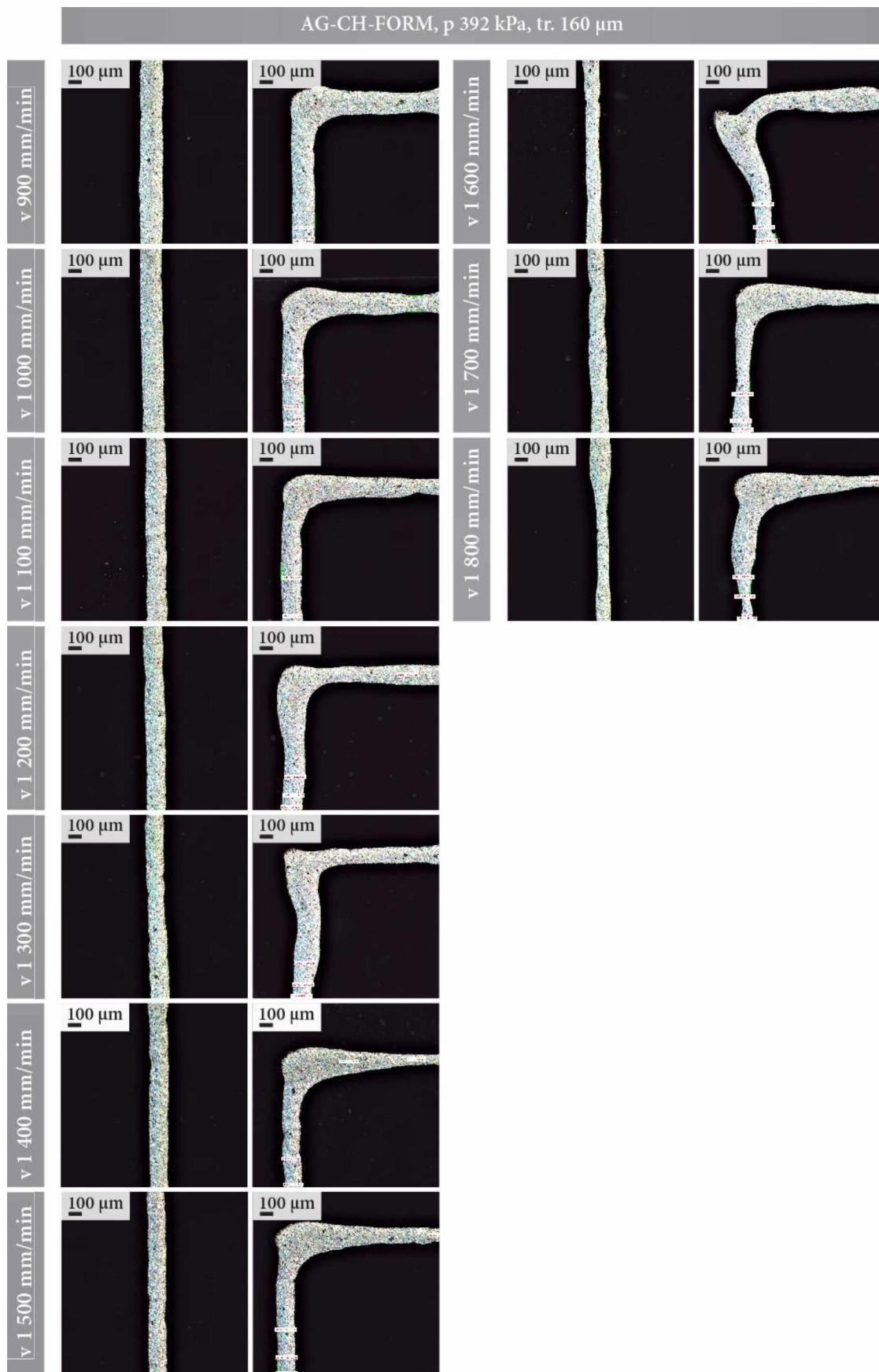
Obrázek 40 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací C-FORM na podložní sklo rychlostí 900–1500 mm/min.



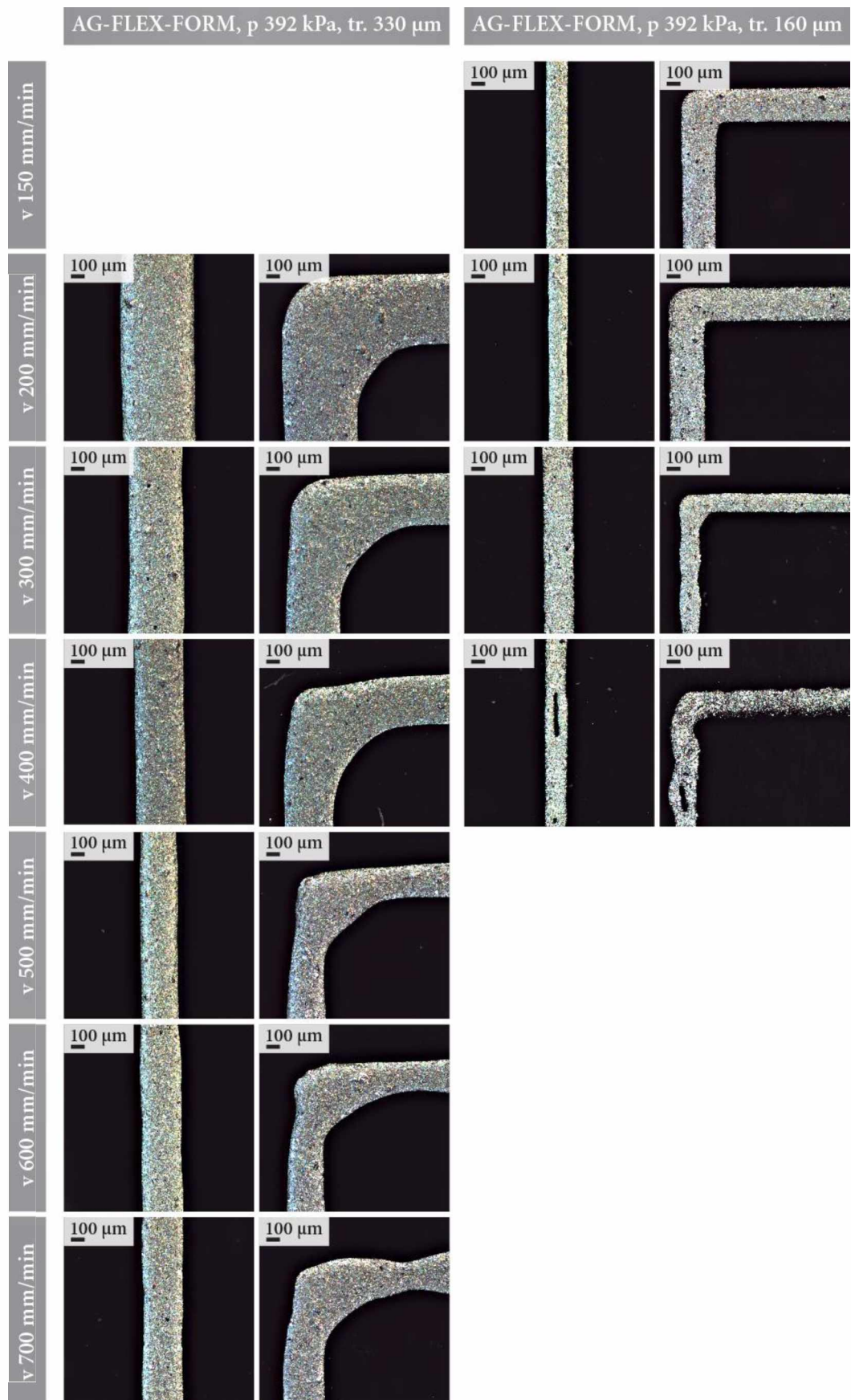
Obrázek 41 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací C-FORM na podložní sklo rychlostí 1600–2200 mm/min.



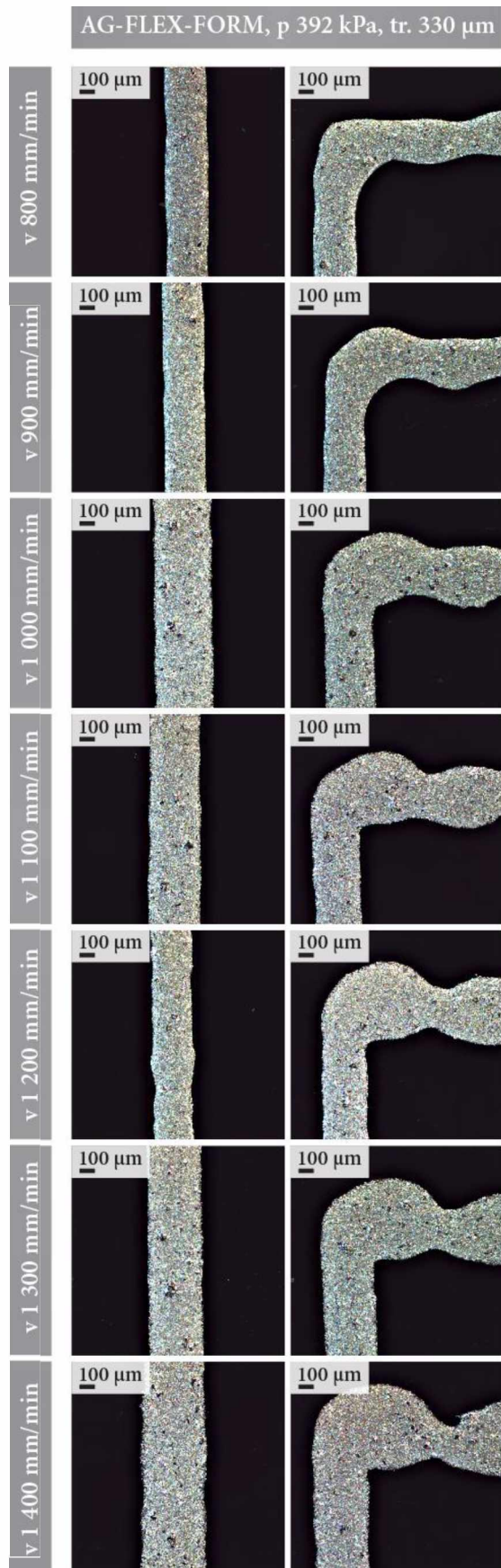
Obrázek 42 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací AG-CH-FORM a AG-ELAST-FORM na podložní sklo rychlostí 200–800 mm/min.



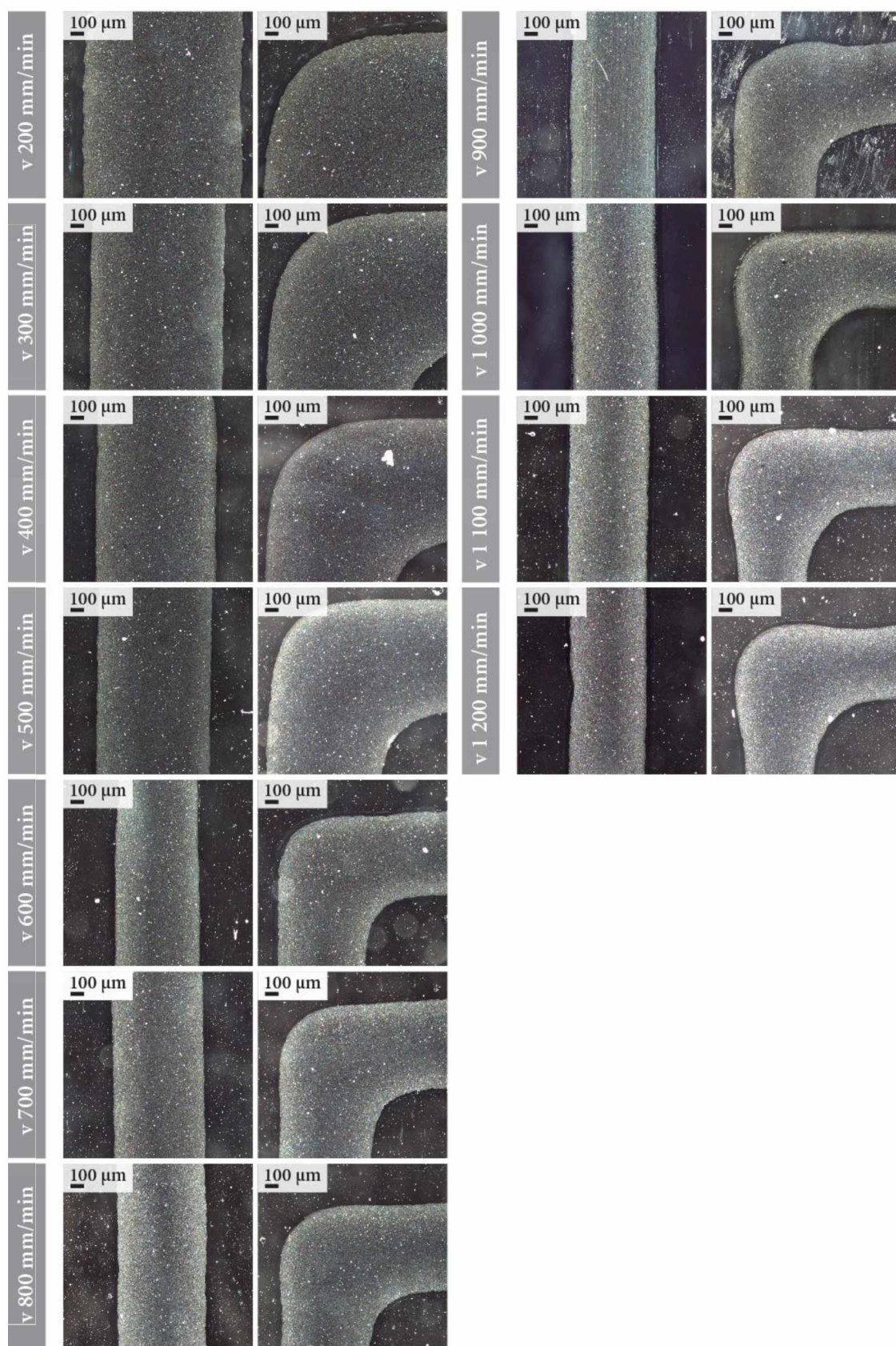
Obrázek 43 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací AG-CH-FORM na podložní sklo rychlostí 900–1 500 mm/min.



Obrázek 44 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací AG-FLEX-FORM s různými průměry trysky na podložní sklo rychlostí 150–700 mm/min.



Obrázek 45 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací AG-FLEX-FORM na podložní sklo rychlostí 800–1 400 mm/min.



Obrázek 46 Mikroskopické snímky testovacího obrazce tištěného formulací HERAEUS CLEVIOS™ S V3 na podložní sklo rychlostí 200–1 200 mm/min.

2.4.3.2.2. Tisk na strukturovaný povrch – tkaninu Jersey PU membrane 96/4 Co/Lycra

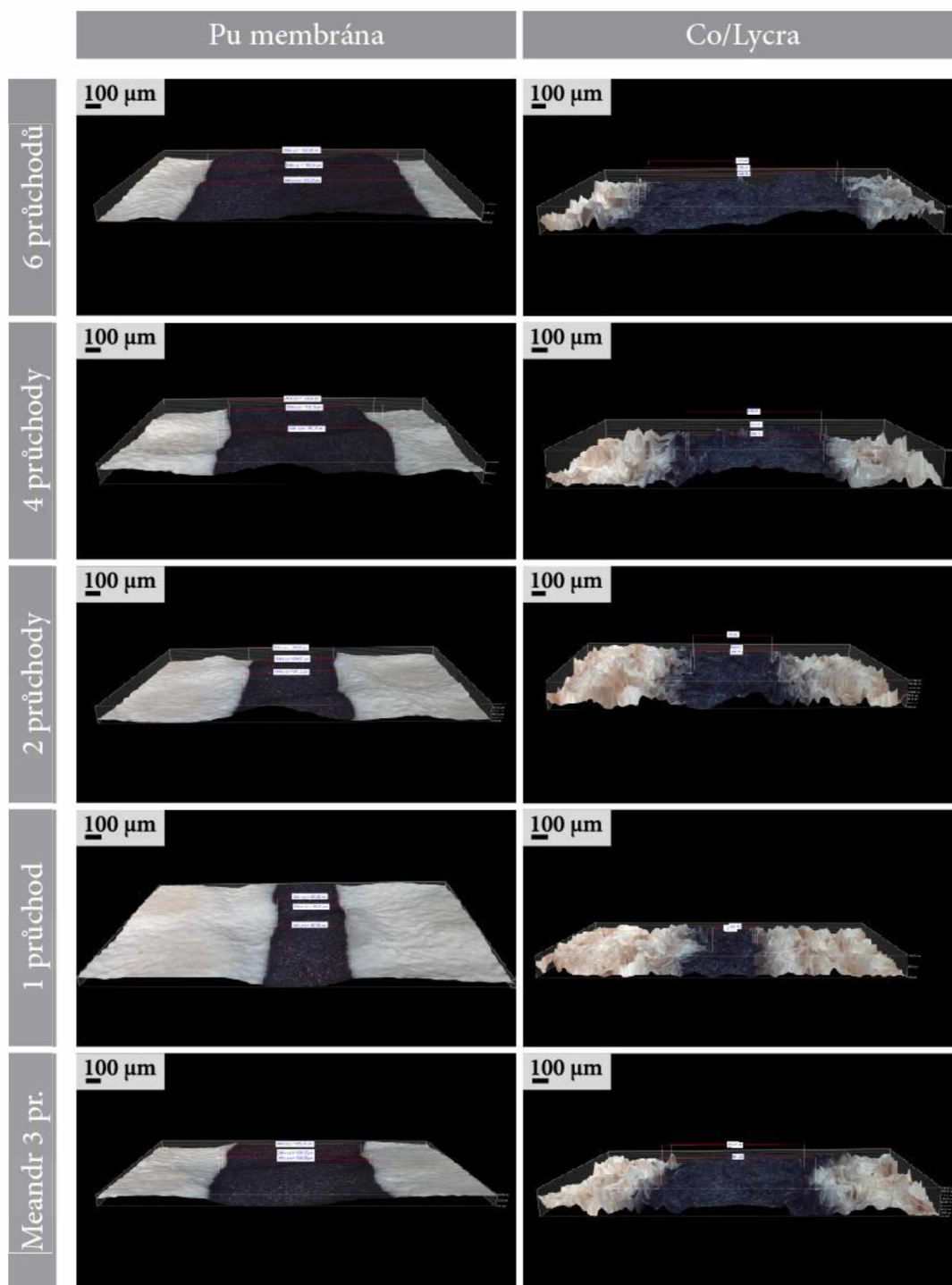
Kvalita vytištěných linek jednotlivými tiskovými formulacemi je posuzována vzhledem k získaným mikroskopickým snímkům a naměřeným šířkám linek. Šíře linek byla měřena na jednotlivých snímcích u každého vzorku vždy na třech místech. Průměrné hodnoty naměřených šířek jsou uvedeny v grafech 13 a 14. Nejširší trajektorie byla tištěná šesti průchody, další čtyřmi, dvěma a nejtenčí linka pouze jedním průchodem mikrodispensingové trysky. Meandr byl tištěný na tři průchody mikrodispensingové trysky.

Na rozdíl od vizuálního náhledu je možné díky mikroskopickým snímkům hodnotit kvalitu vytištěných hran. Na mikroskopických snímcích lépe vyniknou neostré hrany při tisku na tkaninu COL. Důvodem je penetrace tiskové formulace do vláknové struktury bavlny a materiálu lycra.

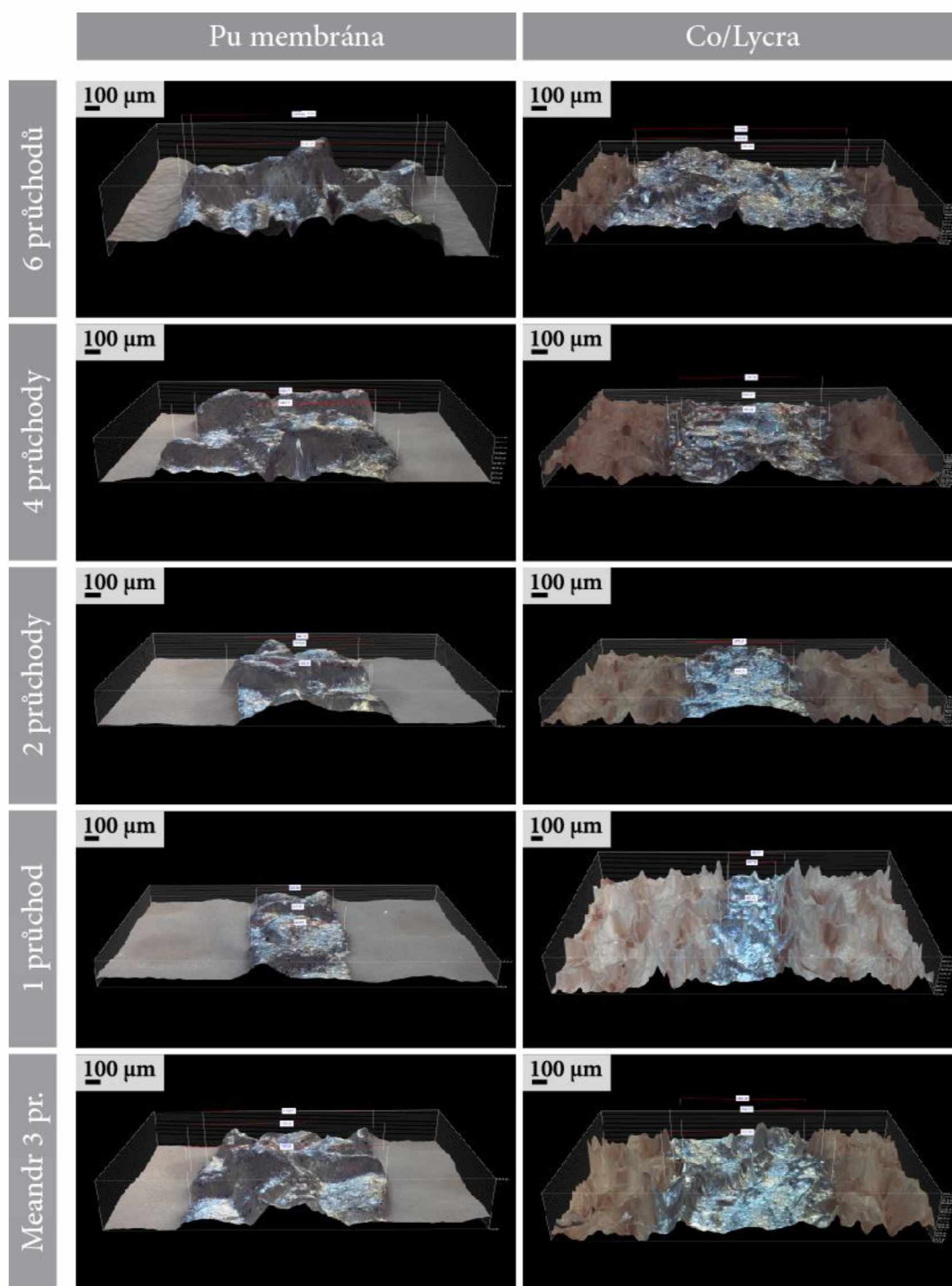
Na mikroskopickém náhledu (obr. 47) meandrů tištěných na tkaninu PUM a COL, formulací C-FORM, nejsou z topografického hlediska pozorovány žádné nedostatky. Všechny linky tištěné na PUM jsou celistvé s poměrně ostrými hranami. Touto tiskovou formulací bylo dosaženo celkově nejužších linek jak při tisku na membránu PUM, tak na vláknitou strukturu tkaniny COL.

Z mikroskopických snímků (obr. 48) obrazce tištěného chemicky odolnou formulací AG-CH-FORM na PUM je možné vidět výraznější reliéf vytištěných struktur. Nabobtnalé struktury později praskaly a z toho důvodu dochází ke snazšímu odlupování barvy ze substrátu. Detailní snímky potvrzují předpoklady, uvedené v předešlé části vizuálního hodnocení, tedy že tato formulace není vhodná pro potisk tkaniny. Obrázky 49 a 50 zobrazují mikroskopické struktury tištěné elastickou a flexibilní tiskovou formulací AG-ELAST-FORM a AG-FLEX-FORM, které byly předurčeny pro využití k potisku daných materiálů, což bylo i potvrzeno vizuálním hodnocením. Vzhledem k mikroskopickým náhledům je možné potvrdit závěry uvedené ve vizuálním hodnocení. Tisková formulace AG-ELAST-FORM poskytuje na PUM hladký povrch, který je zajištěn díky nižší viskozitě tiskové formulace. Nižší viskozita totiž umožní rozprostření tiskové formulace po povrchu nepropustné membrány. Tisková formulace AG-FLEX-FORM poskytuje na PUM strukturovanější vzhled. U této formulace byla naměřena vyšší viskozita, a proto nedochází k obdobnému rozprostření barvového filmu jako u formulace AG-ELAST-FORM. Na mikroskopických snímcích tkaniny COL je obtížné pozorovat rozdíly mezi linkami tištěnými formulacemi AG-ELAST-FORM a AG-FLEX-FORM. Rozdíly mezi výtisky lze lépe vyhodnotit prostřednictvím vizuálního hodnocení, které bylo provedeno v předchozí kapitole pomocí obrázků 34 a 35.

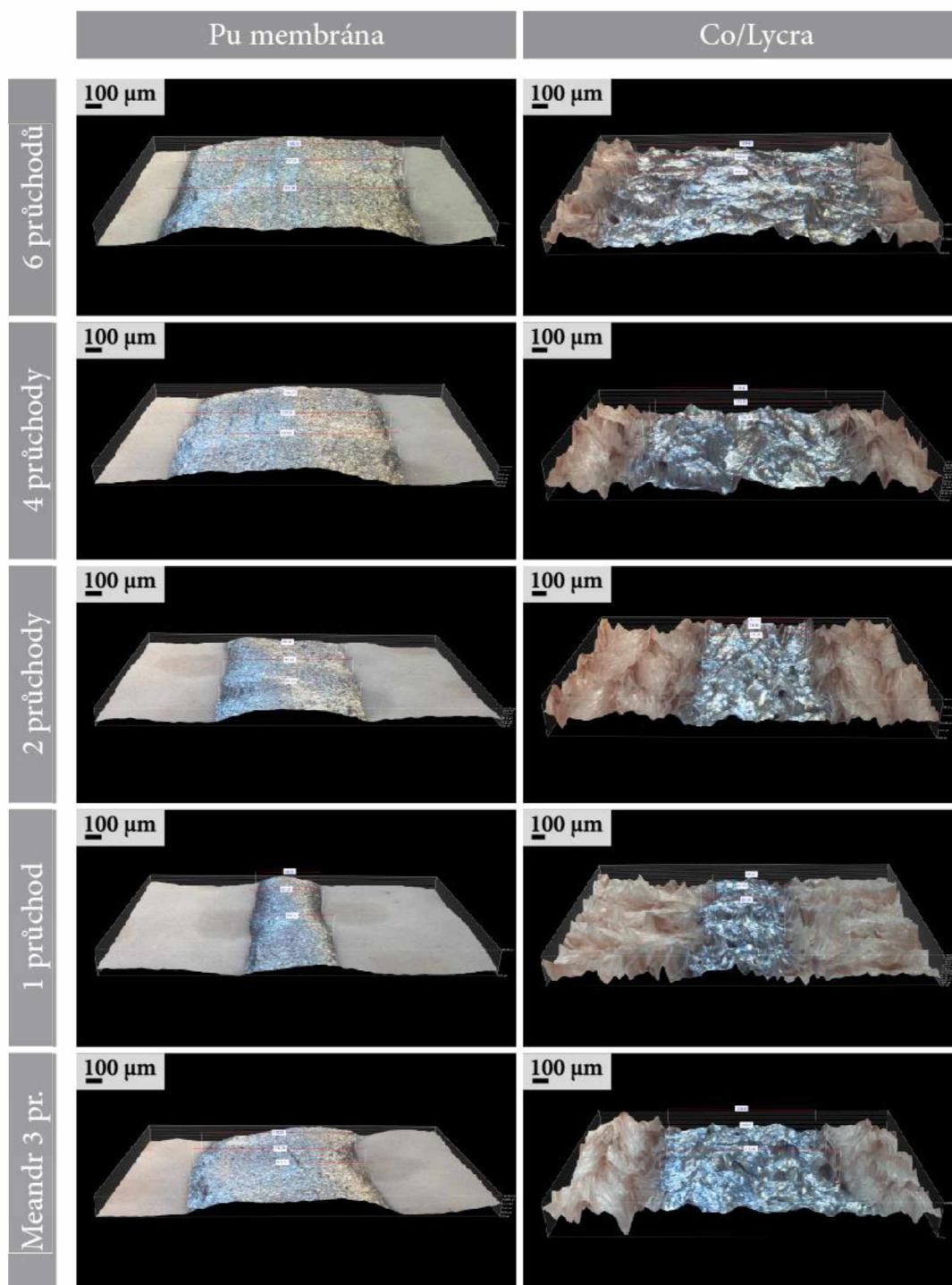
Tisk oběma formulacemi vyžadoval rozdílné nastavení vzhledem ke zjištěné viskozitě. Tiskové podmínky byly přizpůsobené charakteristikám tiskových formulací a potiskovanému substrátu. Vzhledem ke zjištěné viskozitě byl formulaci AG-ELAST-FORM nastaven nižší tiskový tlak a vyšší tiskový rychlost, což je pravým opakem od formulace AG-FLEX-FORM, která je viskóznější, proto vyžaduje naopak nastavení vyššího tlaku a nižší tiskové rychlosti. Obecně byl u všech formulací pro potisk PUM nastaven nižší tlak než pro potisk vláknité tkaniny, kde byla předpokládána vyšší spotřeba tiskové formulace pro dosažení homogenní linky. Obdobně byla přizpůsobená rychlost tisku, která je pro tisk na PUM stejná nebo vyšší. Vzhledem ke zjištěné závislosti šíře linky na rychlosti tisku a tlaku lze předpokládat, že struktury tištěné formulací AG-ELAST-FORM by při stejném nastavení procesních parametrů jako u AG-FLEX-FORM dosahovaly viditelně širších linek.



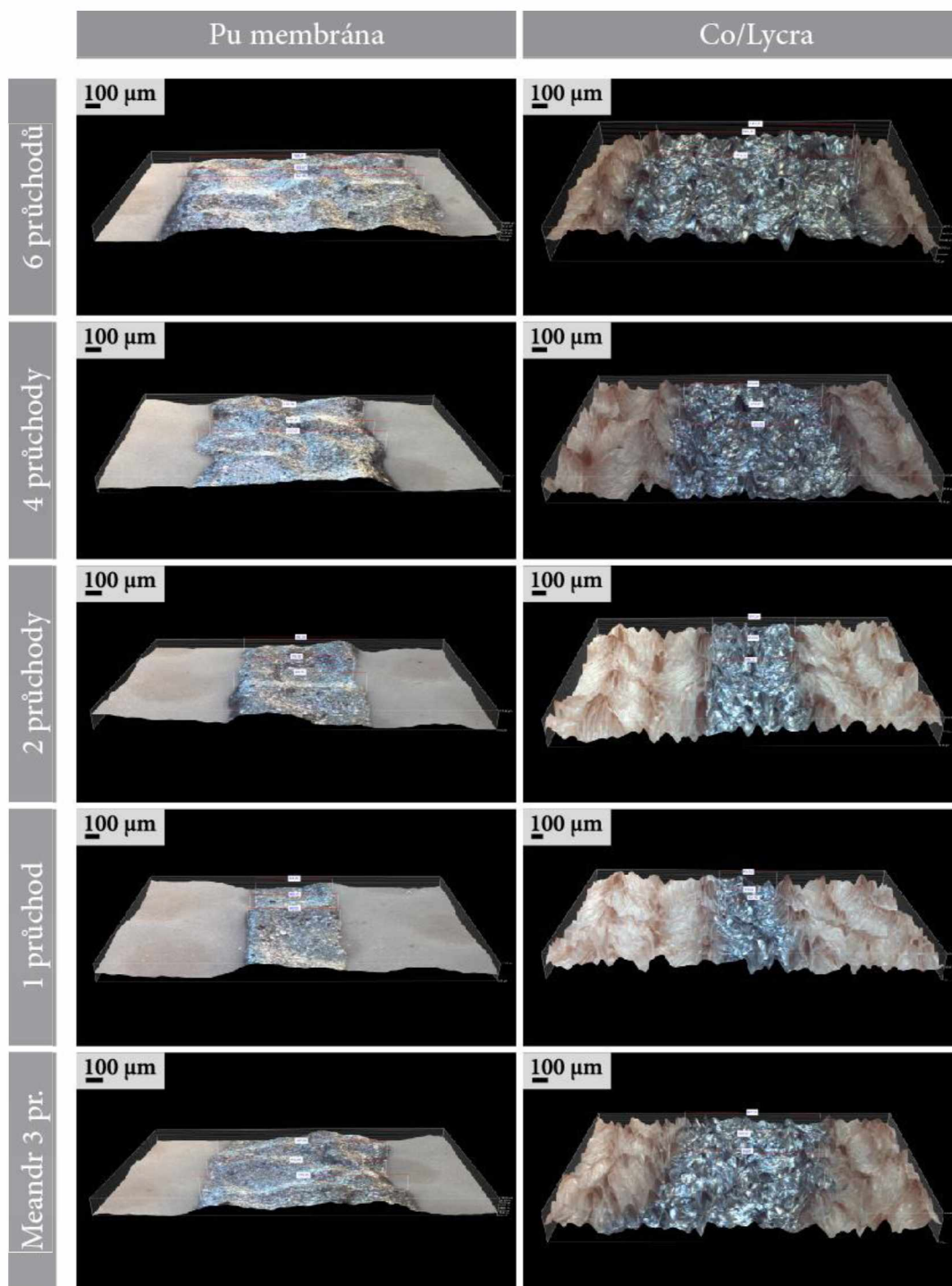
Obrázek 47 3D mikroskopické snímky meandrového obrazce tištěného formulací C-FORM na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra.



Obrázek 48 3D mikroskopické snímky meandrového obrazce tištěného formulací AG-CH-FORM na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra.



Obrázek 49 3D mikroskopické snímky meandrového obrazce tištěného formulací AG-ELAST-FORM na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra.

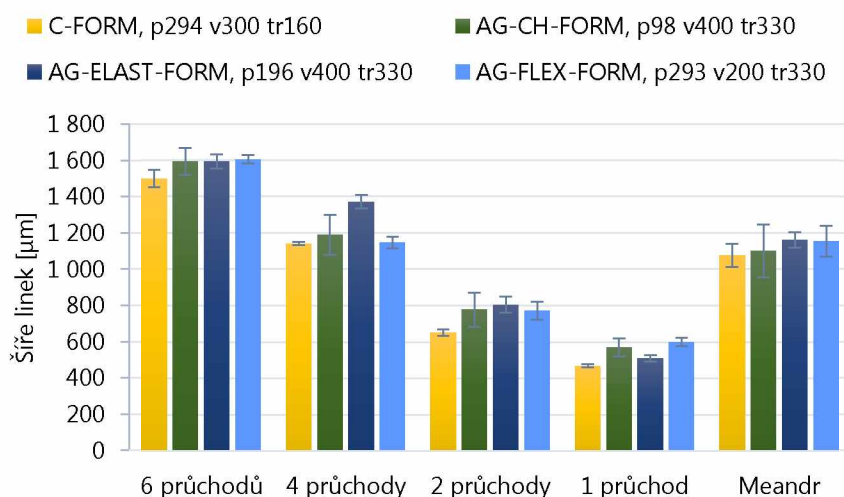


Obrázek 50 3D mikroskopické snímky meandrového obrazce tištěného formulací AG-FLEX-FORM na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra.

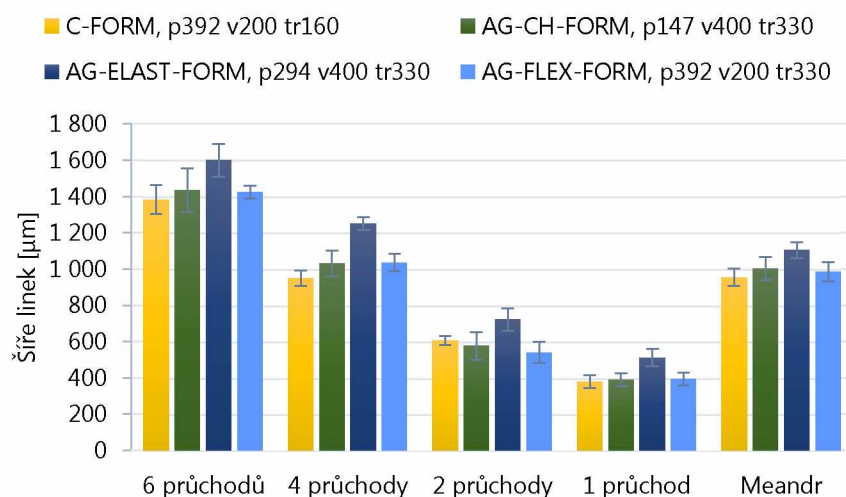
Naměřené hodnoty šíře linek v grafech 13 a 14 potvrzují, že šíře linek je ovlivněna počtem průchodů mikrodispensingové trysky. Nejužší linky tištěné jak na povrch PUM, tak na tkaninu COL byly vždy dosaženy formulací C-FORM. Tyto výsledky však do velké míry ovlivňuje vnitřní průměr trysky, který byl menší než v případě ostatních tiskových formulací.

Mezi formulacemi s obsahem mikročástic stříbra je nejužších linek většinou dosaženo formulací AG-CH-FORM. Výsledky jsou však ovlivněny velkými směrodatnými odchylkami, které potvrzují nehomogenost linek tištěné touto formulací. Formulace AG-ELAST-FORM a AG-FLEX-FORM dosahují v případě tisku na PUM velmi podobných závislostí. Na základě mikroskopických snímků a vizuálního posouzení topografie je pro tisk na PUM upřednostňována tisková formulace AG-ELAST-FORM. Na druhou stranu vzhledem k naměřeným šířkám linek obou tiskových formulací nejde jednoznačně určit, která tisková formulace poskytuje jemnější rozlišení. Obě formulace vykazují nízké směrodatné odchylky a výrazněji se liší pouze šířkami na linkách 2 a 4.

Výraznější rozdíly průměrných šířek mezi jednotlivými formulacemi lze pozorovat při tisku na tkaninu COL (graf 14). Nejmenších šířek bylo dosaženo opět formulacemi C-FORM a AG-CH-FORM. Porovnáním dosažených šířek linií elastické a flexibilní tiskové formulace poskytuje AG-FLEX-FORM celkově užší linky. Menší šíře linek může být vysvětlena vyšší viskozitou tiskové formulace, čímž dojde k eliminaci penetrace formulace do vláken a tím k rozšíření tiskových linek. Formulací AG-FLEX-FORM bylo dosaženo užších linek i přesto, že byl nastaven vyšší tiskový tlak a nižší rychlost tisku.



Graf 13 Naměřené šíře linek, tištěné vybranými formulacemi na tkaninu PUM.

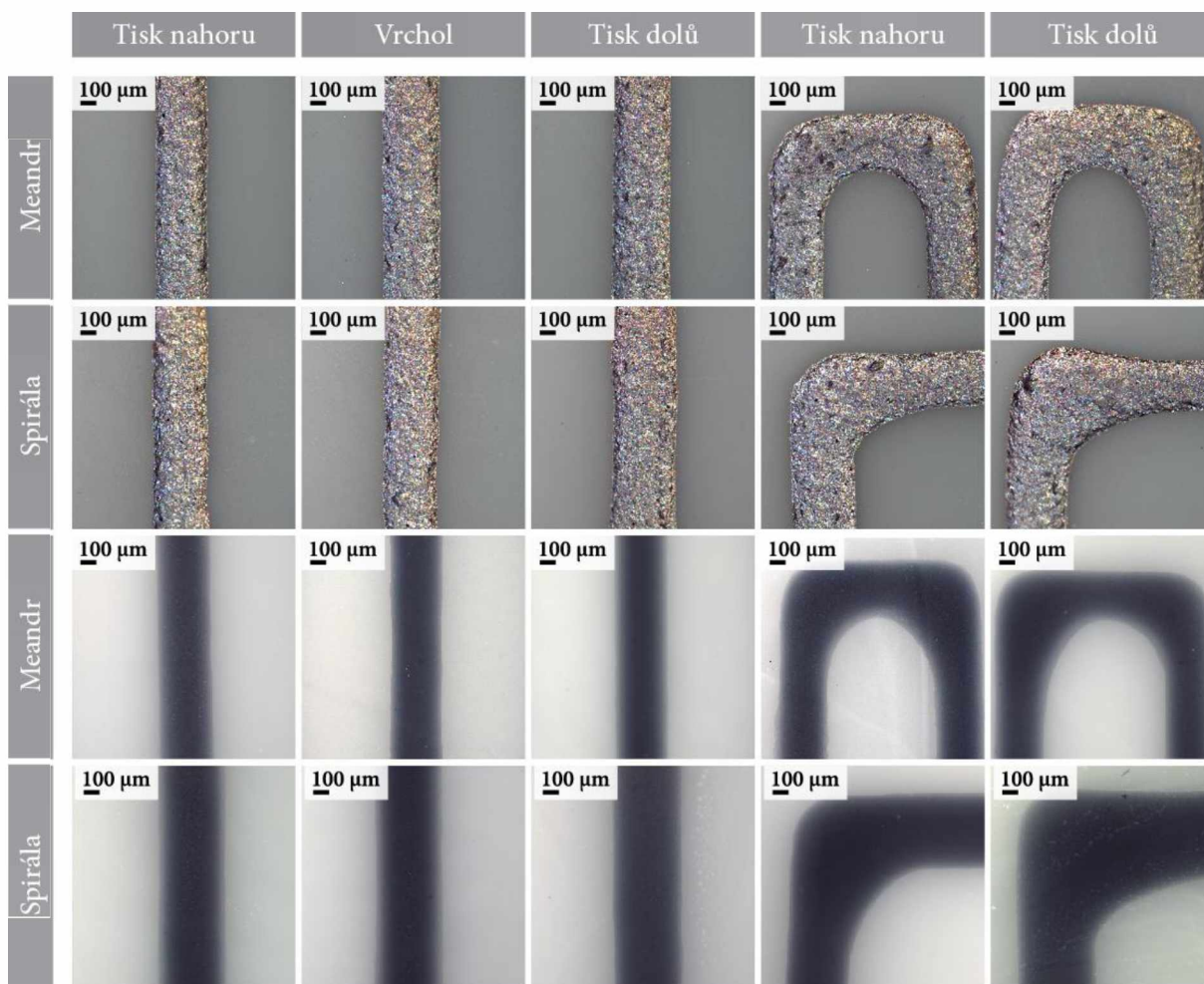


Graf 14 Naměřené šíře linek, tištěné vybranými formulacemi na tkaninu COL.

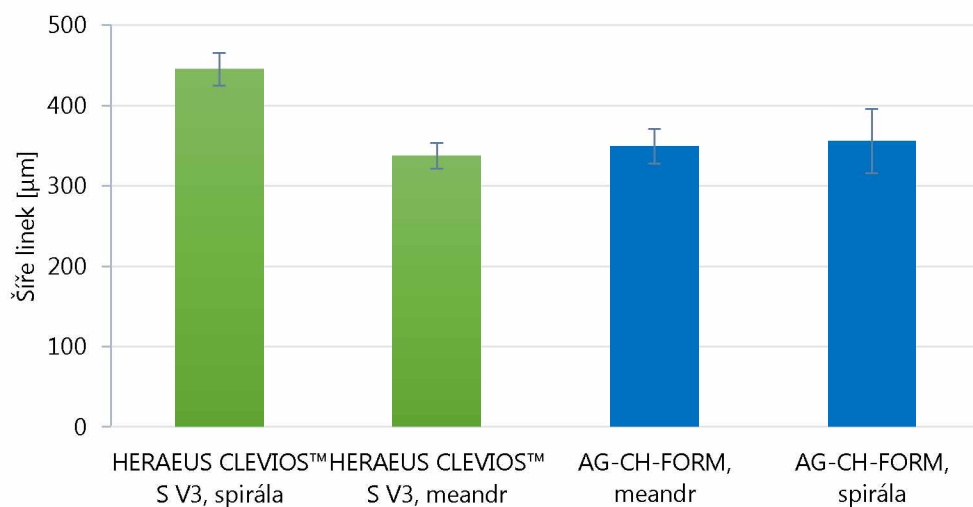
2.4.3.2.3. Tisk na válcový 3D povrch

Z náhledu mikroskopických snímků lze pozorovat anizotropní chování, které potvrzuje závěry z vizuálního hodnocení. Linie tištěné směrem nahoru v ose Z po povrchu kelímku jsou užší než linky tištěné směrem dolů, což je možné vidět na mikroskopických snímcích na obrázku 51, a to jak při tisku spirály, tak při tisku meandru. Na válcovém předmětu se tento jev projevuje také při tisku rohových linek, kde je opět vidět výraznější strukturu ve směru shora dolů po povrchu kelímku. Variace okrajů v případě tisku na dózu se nezdá být ovlivněna tím, zda se jedná o spodní nebo horní roh meandru. To však může být ovlivněno užší roztečí mezi meandry, protože při tisku na šikmou plochu, kde je rozteč mezi meandry širší je rozdíl mezi spodním a horním rohem zřetelný. Kvalita vytištěných rohů je proto závislá především na tom, zda se jedná o tisk směrem nahoru nebo dolů ve směru osy Z stejně jako jakost rovných linií. Z profilu nasnímaných struktur je rovněž patrné, že tvar 3D objektu nezpůsobuje stékání vybrané tiskové formulace.

Na získaných snímcích byly na jednotlivých linkách proměřeny šířky na deseti místech v celém rozsahu trajektorií. Naměřené hodnoty jsou v podobě aritmetického průměru vyneseny do grafu 15. Z grafické závislosti šířek je zřejmé, že struktury tištěné vertikálním směrem (spirála) dosahují větší průměrné šíře linek, než struktury tištěné horizontálně (meandr). Navíc struktury tištěné vertikálně vykazují větší směrodatnou odchylku. S ohledem na tiskovou formulaci a nastavené parametry tisku, bylo chemicky odolnou tiskovou formulací AG-CH-FORM dosaženo užších linek, než tiskovou formulací na bázi disperze vodivého polymeru PEDOT:PSS. Důvodem je rozdílná viskozita obou tiskových formulací.



Obrázek 51 Mikroskopické snímky meandrových linií, tištěných formulacemi AG-CH-FORM a HERAEUS CLEVIOS™ S V3 na válcovou dózu.

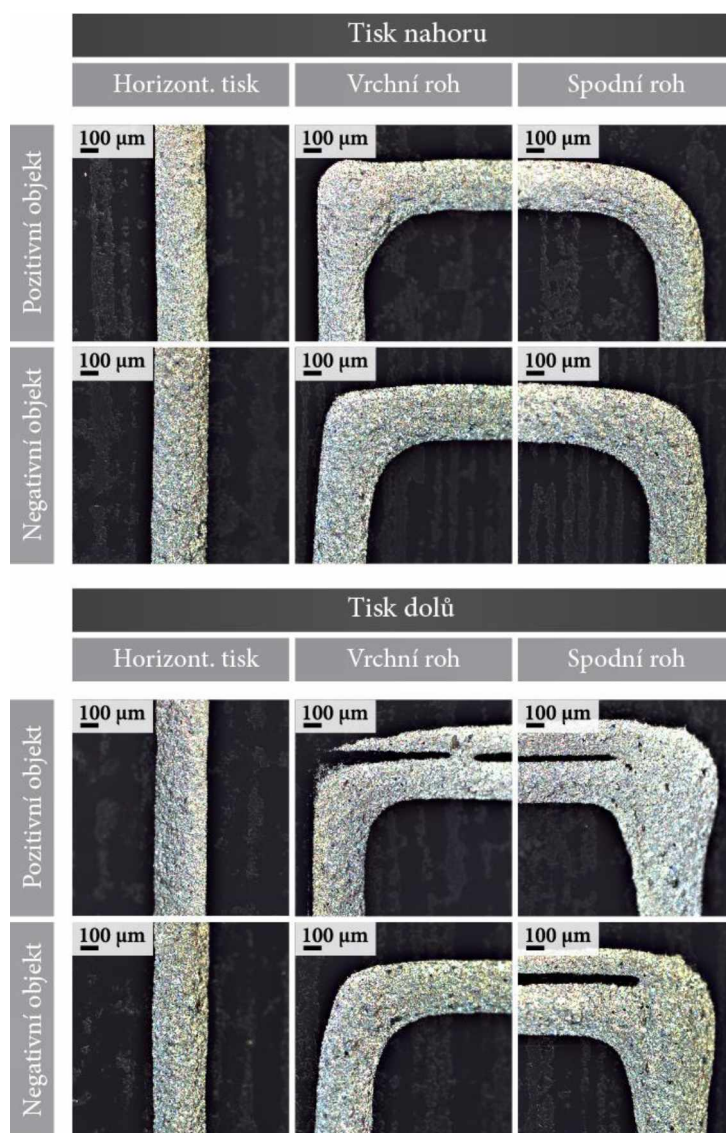


Graf 15 Naměřené šíře linek meandru a spirály na PP dóze, tištěné formulacemi HERAEUS CLEVIOS™ S V3 a AG-CH-FORM.

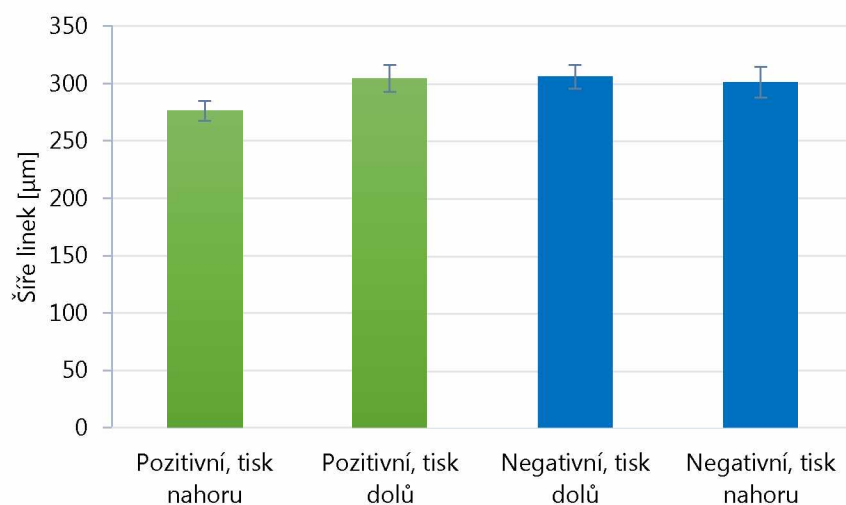
2.4.3.2.4. Tisk na pozitivní a negativní 3D objekty

Snímky tisku pořízené na pozitivním a negativním 3D objektu korelují se závěry ve vizuálním hodnocení. Zaoblení rohů je možné pozorovat spíše na spodních ohybech meandru. Výrazný nedostatek ve struktuře se vyskytuje na pozitivním i negativním objektu při tisku směrem dolů ve směru osy Z. V tomto případě došlo k přímému kontaktu trysky se substrátem, z důvodu nerovnoměrné struktury vytištěného 3D objektu.

Na pořízených snímcích vytištěných struktur byly rovněž změřeny šíře linií (graf 16). Grafická závislost ukázala, že dosažené šíře se v případě tisku na šikmé plochy příliš nemění, což poukazuje na dobrou reprodukovatelnost struktur mikrodispensingem na 3D povrchy. Relativní směrodatná odchylka se na všech vytištěných linkách nepřekročila 4,5 %. Nejlepší rozlišení (277 μm) bylo dosaženo při tisku na pozitivní objekt směrem nahoru.



Obrázek 52 Mikroskopické snímky meandrových linií, tištěných formulacemi AG-CH-FORM na pozitivní a negativní 3D povrch.



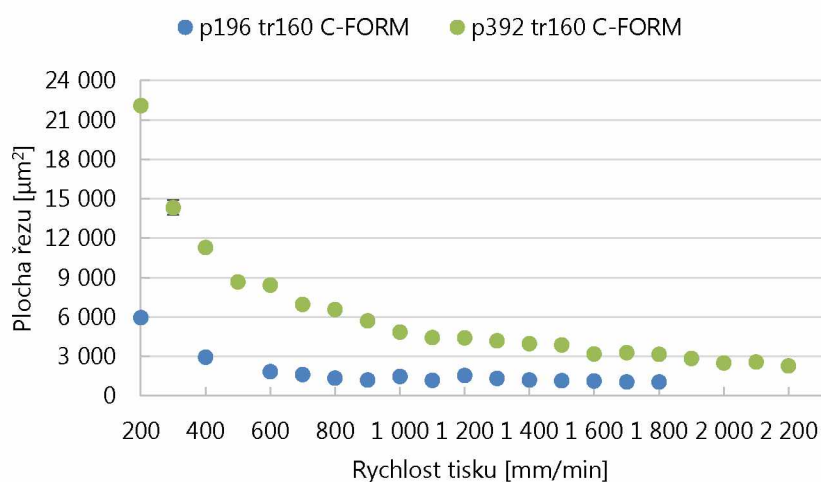
Graf 16 Naměřené šíře linek meandru, tištěné formulací AG-CH-FORM na pozitivní a negativní 3D objekt.

2.4.3.3. Profilometrie

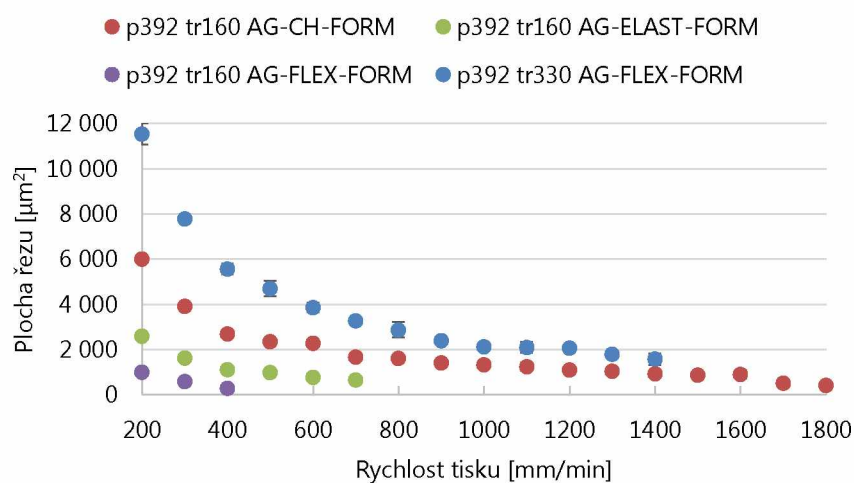
Vzorky tištěné na podložní sklo byly kvalifikovány pomocí profilometrie. Plocha řezu linky a tloušťka (max. výška) vytištěných vodivých linek byla měřena profilometrem KLA Tenacor P7 s využitím programu Profiler 8.1. Jednotlivé linky byly proměřeny vždy na třech místech vzorku skenovací rychlostí 20 μm/s, se zatížením 2 mg. Vzorkovací frekvence byla nastavená na 50 Hz. Získané hodnoty byly zprůměrovány a vyneseny do grafů v závislosti na rychlosti tisku.

Průměrné plochy řezu linek tištěných formulacemi na bázi grafitu, mikrovloček stříbra a disperze polymeru PEDOT:PSS jsou vyneseny do grafických závislostí (graf 17–19). Linky byly tištěné na podložní sklo, procesními parametry uvedenými v tabulce 2 (kap. 2.4.2.2.1.). Je obtížné porovnávat odlišné formulace na bázi uhlíku, stříbra a disperze polymeru PEDOT:PSS, protože každé formulaci byly nalezeny individuální optimální procesní parametry, reprodukovatelné i při vyšších rychlostech tisku. Ve všech případech je však z grafických prezentací zřejmé, že je plocha řezu linky přímo ovlivněná tiskovou rychlostí, tedy že celková plocha vytištěné linky klesá, se stoupající rychlostí tisku. Graf 17 vypovídá o faktu, že plocha řezu je ovlivnitelná nastavením tiskového tlaku. Čím větší tlak na kapalinu ve stříkačce působí, tím větší plochu řezu linky je schopné mikrodensingové zařízení reprodukovat, resp. nadávkovat tak větší objem. Graf 18 potvrzuje, že plochu řezu vytištěné linky ovlivňuje výběr tiskové trysky. I v tomto případě platí přímá úměra, tedy čím větší vnitřní průměr trysky je pro tisk použit, tím bude větší plocha řezu reprodukováných linií.

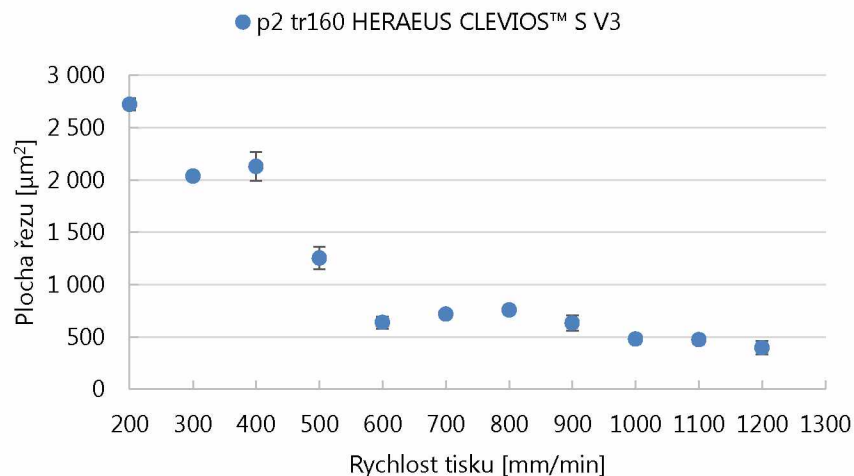
Dosaženou tloušťku (max. výšku) rovněž ovlivňuje nastavení tiskového tlaku (graf 20). Tlustší linky byly vytištěny formulací C-FORM s nastavením tlaku 392 kPa a trysky s vnitřním průměrem 160 μm . V rámci tiskových formulací s obsahem stříbra (graf 21) bylo dosaženo nejvyššího nánosu pomocí AG-FLEX-FORM s nastavením tlaku 392 kPa a tryskou 330 μm . Dosaženou tloušťku však ovlivnil výběr trysky. Na základě porovnání stříbrných formulací AG-CH-FORM a AG-ELAST-FORM je možné říci, že dosažená tloušťka může záviset na viskozitě tiskové formulace, což koresponduje také s naměřenou plochou řezu linek. Vytištěné linky tiskovou formulací s vyšší viskozitou (AG-CH-FORM), bylo dosaženo vyšších nánosů barvové vrstvy. Celkově nejnižších přenesených tlouštěk mikrodosingem (graf 22), bylo dosaženo tiskovou formulací na bázi disperze vodivého polymeru PEDOT:PSS, HERAEUS CLEVIOS™ S V3, která je primárně určená pro tisk vodivých transparentních vrstev.



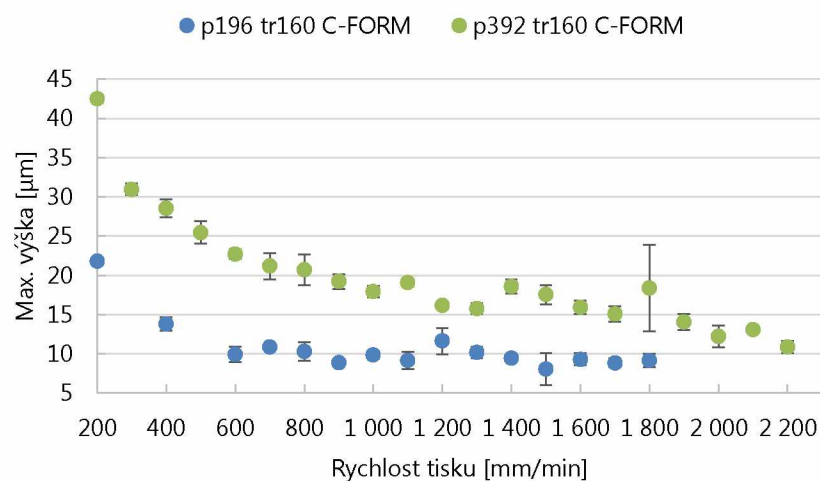
Graf 17 Změřená plocha řezu linek tištěných formulací C-FORM na podložní sklo.



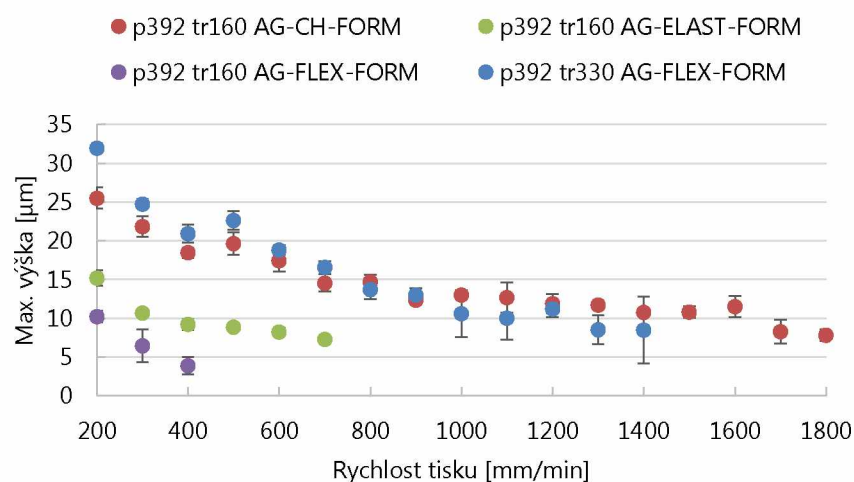
Graf 18 Změřená plocha řezu linek tištěných formulacemi na bázi mikrovloček stříbra na podložní sklo.



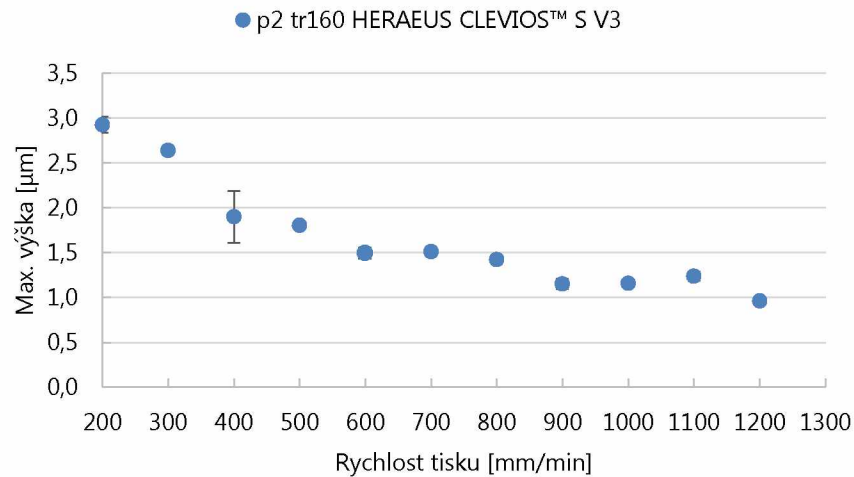
Graf 19 Změřená plocha řezu linek tištěných formulací HERAEUS CLEVIOS™ S V3 na podložní sklo.



Graf 20 Změřená maximální výška linek tištěných formulací C-FORM na podložní sklo.



Graf 21 Změřená maximální výška linek tištěných formulací C-FORM na podložní sklo



Graf 22 Změřená maximální výška linek tištěných formulací HERAEUS CLEVIOS™ S V3 na podložní sklo.

2.4.3.4. Elektrický odpor na potištěných tkaninách

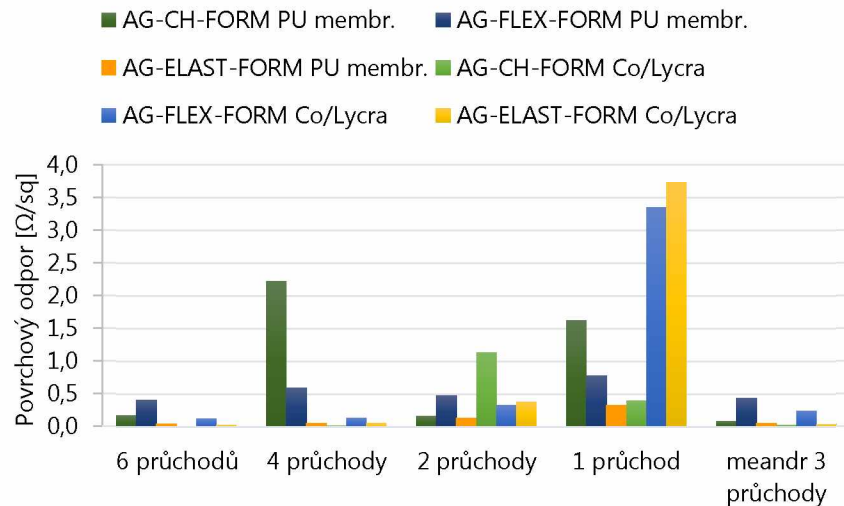
Na tkaninách potištěných stříbrnými tiskovými formulacemi a formulací na bázi grafitu byly proměřeny elektrické vlastnosti dvoubodovou metodou. Pro měření byl využit stolní multimetr Tektronix DMM4040. Elektrický odpor byl měřený na obou materiálech – tedy na potištěné tkanině COL i membráně PUM. Každou tiskovou formulací byly na oba substráty reprodukovány tři meandrové struktury (obr. 23), na nichž byl proměřen elektrický odpor. Na dvou vzorcích tištěných na PUM formulací AG-CH-FORM došlo k popraskání nejtenčích linií, proto bylo měření na těchto vzorcích znemožněno.

Naměřené hodnoty elektrického odporu byly zprůměrovány a použity do výpočtu povrchového odporu podle rovnice:

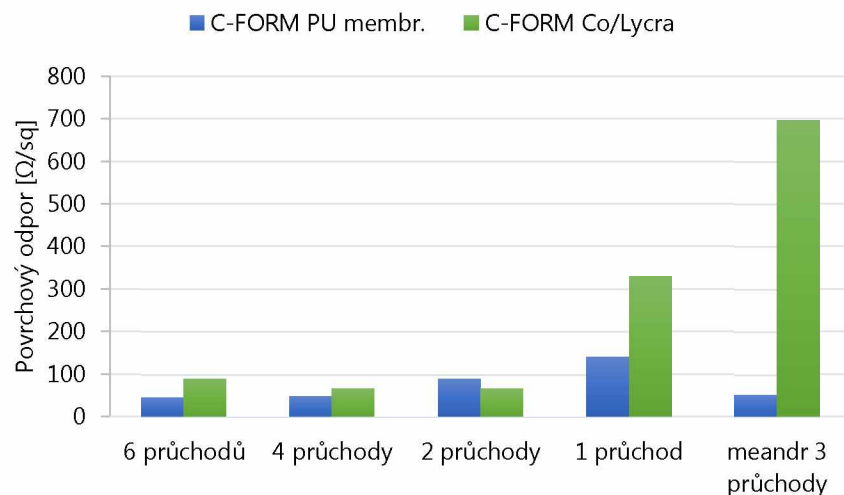
$$R_{sq} = \frac{\rho}{\text{počet čtverců}} \quad (5)$$

kde ρ je naměřený elektrický odpor a *počet čtverců* je počet z naměřené hodnoty šířky a délky vytištěných linek a meandru.

Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy 23–24, které jsou pro lepší orientaci rozděleny zvlášť dle typu tiskové formulace.



Graf 23 Povrchový odpor vytištěných linek na tkaninu PUM a COL formulacemi na bázi stříbra.



Graf 24 Povrchový odpor vytištěných linek na tkaninu PUM a COL formulací C-FORM.

Z grafické závislosti 23 je zřejmé, že vyšší hodnoty povrchového odporu většinou vykazují struktury tištěné na tkaninu COL. Vyšší povrchový odpor je možné odůvodnit vláknitou strukturou tkaniny, která umožní penetraci tiskové formulace hluboko do struktury a také do postranních vláken, čímž jsou od sebe delokalizovány vodivé částice, které tak nejsou v dobrém vzájemném kontaktu. Závislost odporu na počtu průchodů mikrodispensingové trysky také dokazuje, se snižujícím se počtem průchodů odpor stoupá, což souvisí s množstvím natištěného elektrovedivého materiálu.

Významný vliv topografie tkaniny potvrzuje také graf 24, ve kterém je zřetelná závislost přeneseného objemu tiskové formulace na dosaženém odporu. Povrchový odpor je na tkanině COL vyšší i přesto, že bylo nastavení tiskových parametrů korigováno tím způsobem, aby do-

cházelo k přenosu většího množství tiskové formulace. Pro upřesnění, struktura tištěná na materiál COL byla vytištěná tiskovým tlakem 392 kPa a rychlostí tisku 200 mm/min, zatímco struktura vytištěná na PUM tiskovým tlakem 196 kPa a rychlostí tisku 300 mm/min. Průměr vybrané trysky byl v obou případech totožný. Z grafu lze také vyzorovat přímý vliv počtu průchodů mikrodispensingové trysky, což je v souladu s výsledky uvedenými v předešlém odstavci.

3. Závěr

V rešeršní části práce byly představeny tiskové technologie vhodné k potisku strukturovaných substrátů a 3D objektů. U každé technologie byly popsány jejich výhody, nevýhody a zhodnoceny jejich aplikační možnosti v oblasti materiálového tisku.

V experimentální části práce bylo dosaženo potisku strukturovaných substrátů na neplanárních površích vodivými tiskovými formulacemi. Na vytištěných strukturách byl sledován vliv nastavených tiskových parametrů v souvislosti s topografií a vodivostí vytištěných struktur. Tisk byl proveden třemi formulacemi na bázi stříbra, tiskovou formulací na bázi grafitu a tiskovou formulací disperze polymeru PEDOT:PSS.

Před samotným tiskem byly vyhodnoceny viskozitní křivky využitých tiskových formulací, kdy bylo zjištěno, že všechny tiskové formulace vykazují pseudoplastické chování, kromě formulace AG-CH-FORM, která se chová spíše newtonovsky. Dále byla hodnocena reprodukovatelnost mikrodispensingové tiskárny. Výsledky ukázaly, rychlost tisku a tlak výrazně ovlivňují přenášené množství kapaliny. Zvýšením tiskové rychlosti se přenášené množství kapaliny na substrát snižuje, zatímco je zvýšen tiskový tlak, dochází k přenosu většího objemu materiálu.

V práci byla taktéž zkoumána závislost rychlosti tisku a tiskového tlaku na dosaženou šíři vytištěných linek, která byla dále hodnocena optickou mikroskopií i pomocí profilometru. Pro tiskovou rychlost byla zjištěná nepřímá úměra vzhledem k dosaženým šířím a plochám řezu vytištěných linek. Zvyšování tiskové rychlosti je však limitováno konstrukcí mikrodispensingové tiskárny a příliš vysoké tiskové rychlosti vedou k diskontinuitě vytištěných linií, protože je přenášeno menší množství kapaliny. Naopak příliš nízké tiskové rychlosti poskytují nadbytečné množství přenesené tiskové formulace. Naproti tomu nastavením nižšího tlaku je možné tisknout jemnější struktury. Přímý vliv na dosaženou šíři linek má také výběr vnitřního průměru trysky. Čím je průměr větší, tím širší a objemnější budou vytištěné linky. S využitím profilometru bylo také zjištěno, že dosažená tloušťka tiskové formulace závisí na její viskozitě. Méně viskozitní tiskové formulace poskytují menší tloušťky barvové vrstvy.

Při tisku na strukturovaný substrát, kterým byly polyuretanová membrána a tkanina Lycra s podílem bavlny bylo zjištěno, že pro tisk na tyto substráty jsou vhodnější elastické a flexibilní tiskové formulace před chemicky odolnými. Víceviskózní, chemicky odolné tiskové formulace jsou naopak vhodnější pro nepórovité substráty, kde poskytují lepší homogenitu vytištěných linek a hran. Po měření elektrického odporu na obou substrátech lze konstatovat, že s větším počtem průchodů mikrodispensingové trysky elektrický odpor klesá. Hodnoty odporu jsou také ovlivněny strukturou substrátu. Na vláknité tkanině Lycra bylo dosahováno větších hodnot povrchového odporu než na polyuretanové membráně.

Cíle této diplomové práce byly dále naplněny tiskem na 3D objekty. Na základě experimentálních výsledků byla pro tisk vybrána stříbrná formulace AG-CH-FORM a disperze polymeru PEDOT:PSS. Na všechny 3D objekty byly vytvořeny tiskové trajektorie ve formátu g-kódu. Dále byl promyšlen systém vycentrování objektu vůči trysce pomocí vytvořeného podstavce a vodičích drah na 3D objektech. Na základě mikroskopických snímků vytištěných struktur na dózu bylo zjištěno, že homogenita linek je na válcových předmětech ovlivněna směrem tisku. Tisk horizontálním směrem poskytuje jemnější rozlišení vytištěných linek, než linky tištěné vertikálním směrem. Pokud je objekt tištěný směrem dolů, tisková formulace je před tryskou sunuta a vytištěné linky tak nabývají větších šíří. Na dóze i na pozitivním a negativním 3D objektu byly nedostatky v homogenitě linek pozorovány dříve v oblasti vytištěných hran. Vytištěné hrany, ale i linie jsou anizotropní, lepší homogenity a menší šíře vytištěných linek je dosahováno tiskem směrem nahoru.

Vzhledem k experimentálním výsledkům bylo potvrzeno, že tiskové formulace na bázi stříbra jsou vhodnými materiály pro reprodukci vodivých struktur mikrodispensingem na neplanární povrchy. Při tisku na pozitivní a negativní 3D objekt byla relativní směrodatná odchylka na všech vytištěných linkách nižší než 4,5 %. Nejužší linky (277 μm) na 3D předmětech byly získány tiskem formulací AG-CH-FORM při tiskovém tlaku 392 kPa, tiskovou rychlostí 200 mm/min a tryskou o vnitřním průměru 160 μm .

Další výzkumy mikrodispensingu v oblasti materiálového tisku by mohly vést ke zvýšení homogenity a miniaturizaci tištěných struktur. Poznatky z této diplomové práce je možné dále využít při výzkumech využití mikrodispensingu v oblasti materiálového tisku na 3D povrchy a je vhodné zvážit následující doporučení: skenování 3D povrchu by vedlo ke zjištění jeho přesné topografie a následně efektivnější přípravě tiskových dat, optický naváděcí systém trysky by pomohl přesnějšímu vycentrování 3D objektu vůči trysce.

Citovaná literatura

- [1] I. DOLEŽAL. Reklamní produkce: Tamponový tisk principy a možnosti. *Svět tisku* [online]. 2004, (3), 11-13 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/docs/RP_2004_03.pdf
- [2] M. KAPLANOVÁ. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [3] Z. CUI. *Printed electronics: materials, technologies and applications*. Singapore: Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-92092-3.
- [4] Introduction to Pad Printing - Pad Printing 101. *DECO TECHNOLOGY Group Inc.* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.decotechgroup.com/library/pad-printing/tech-bulletin-pad-print-101/>
- [5] P. HAHNE, I. E. REIS, E. HIRTH, D. M. HULJIC a R. PREU. Pad printing - a novel thick-film technique of fine-line printing for solar cells. In: *2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*. 2. Vienna, 1998, s. 1646-1649. ISBN 92-828-5419-1.
- [6] P. HAHNE, E. HIRTH, I. REIS, K. SCHWICHTENBERG, W. RICHTERING, F. HORN a U EGGENWEILER. Progress in thick-film pad printing technique for solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001, 65(1-4), 399-407. DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00119-7. ISSN 09270248.
- [7] P. KIDDELL. Process Color Pad Printing. In: *Engineered printing solutions* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: https://www.epsvt.com/wp-content/uploads/2017/04/3.Articles_Process%20color%20pad%20printing.pdf
- [8] PAD PRINTING INKS, product range. In: *Meritage specialista na tampónový tisk* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: https://www.meritage.cz/wp-content/uploads/2018/11/Katalog-barev-2018_en.pdf

- [9] A. WILLHART. *Examination of the printability of microstructures by means of pad printing for the realization of minimal structures for the use of conductive inks on PET-Substrate* [online]. Chemnitz, 2007 [cit. 2019-02-24]. ISBN 978-3-89700-101-5.
- [10] G. NISATO, D. LUPO a S. GANZ. *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*. USA: Pan Stanford Publishing, 2016. ISBN 978-981-4669-75-7.
- [11] S. MERILAMPI, T. BJÖRNINEN, L. UKKONEN, P. RUUSKANEN a L. SYDÄNHEIM. Characterization of UHF RFID tags fabricated directly on convex surfaces by pad printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, 53(5-8), 577-591 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1007/s00170-010-2869-y. ISSN 0268-3768.
- [12] V. GOLOVANOV, J. L. SOLIS, V. LANTTO a S. LEPPÄVUORI. Different thick-film methods in printing of one-electrode semiconductor gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 1996, 34(1-3), 401-406 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1016/S0925-4005(97)80013-5. ISSN 09254005.
- [13] F. KREBS. Pad printing as a film forming technique for polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2009, 93(4), 484-490 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.09.003. ISSN 09270248.
- [14] T. LEE, S. HUR, J. KIM a H. CHOI. EL device pad-printed on a curved surface. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2010, 20(1) [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1088/0960-1317/20/1/015016. ISSN 0960-1317.
- [15] K. IZUMI, Y. YOSHIDA a S. TOKITO. Soft blanket gravure printing technology for finely patterned conductive layers on three-dimensional or curved surfaces. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 2017, 56(52) [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.7567/JJAP.56.05EA03. ISSN 0021-4922.
- [16] K. IZUMI, Y. YOSHIDA a S. TOKITO. Novel soft blanket gravure printing technology with an improved ink transfer process. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, 2(2) [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1088/2058-8585/aa6f56. ISSN 2058-8585.
- [17] A. PIQUÉ, a D. CHRISEY. *Direct-write technologies for rapid prototyping applications: sensors, electronics, and integrated power sources*. San Diego: Academic Press, 2002. ISBN 978-012-1742-317.

- [18] J. HOEY, A. LUTFURAKHMANOV, D. SCHULZ a I. AKHATOV. A Review on Aerosol-Based Direct-Write and Its Applications for Microelectronics. *Journal of Nanotechnology* [online]. 2012, 2012, 1-22 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1155/2012/324380. ISSN 1687-9503.
- [19] *Direct write™ system*. US 7,270,844 B2. Nové Mexiko. Uděleno 18. září 2007. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US7270844>
- [20] E. SECOR. Principles of aerosol jet printing. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2018, 3(3) [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1088/2058-8585/aace28. ISSN 2058-8585.
- [21] AEROSOL JET® printed electronics overview. *Optomec* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf
- [22] Aerosol Jet 5X Systems. *Optomec* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-5x-system/>
- [23] J. PAULSEN, M. RENN, K. CHRISTENSON a R. PLOURDE. Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology. *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings* [online]. IEEE, 2012, , 1-4 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.1109/FIIW.2012.6378343. ISBN 978-1-4673-2482-3.
- [24] The Technology Behind Aerosol Jet. *Optomec* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [25] A. MAHAJAN, C. D. FRISBIE a L. F. FRANCIS. *Optimization of Aerosol Jet Printing for High-Resolution, High-Aspect Ratio Silver Lines* [online]. In: . 2013, 5(11), s. 4856-4864 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1021/am400606y. ISSN 1944-8244.
- [26] S. GRUNEWALD. The Optomec Aerosol Jet 5X Five Axis Electronics 3D Printer is a Hit with the Internet of Things. *3Dprint.com* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/125166/optomec-aerosol-jet-5x/>
- [27] P. LANGER. Contact versus Non-Contact Dispensing. *NORDSON EFD* [online]. 2018 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.nordson.com/en/divisions/efd/blog/043018-contact-versus-non-contact-dispensing>

- [28] J. FUGERE. *Microdispensing Pastes and Adhesives: HDI The magazine of high-density interconnect* [online]. 4. 2001, 4(10) [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.dltechnology.com/uploads/hdi.pdf>
- [29] S. BAMMESBERGER, A. ERNST, N. LOSLEBEN, L. TANGUY, R. ZENGERLE a P. KOLTAY. Quantitative characterization of non-contact microdispensing technologies for the sub-microliter range. *Drug Discovery Today* [online]. 2013, 18(9-10), 435-446 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/j.drudis.2012.12.001. ISSN 13596446.
- [30] L. JIANPING. a D. GUILING. Technology development and basic theory study of fluid dispensing - a review. In: *Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP '04)* [online]. IEEE, 2004, s. 198-205 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.1109/HPD.2004.1346698. ISBN 0-7803-8620-5.
- [31] X. B. CHEN, G. SHOENAU a W. J. ZHANG. Modeling of time-pressure fluid dispensing processes. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online]. 2000, 23(4), s. 300-305 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1109/6104.895075. ISSN 1521-334X.
- [32] P. SWANSON. The “Endless Piston” Pump Technology for Precision Dispensing. In: *Intertronics* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.intertronics.co.uk/wp-content/uploads/2017/05/wp12-1The-Endless-Piston-Pump-Technology-for-Precision-Dispensing.pdf>
- [33] Matching Fluid Dispensers To Materials for Electronics Applications. *Creative Automation Company* [online]. 2003 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.creative dispensing.com/Articles%20Layout/MatchingMaterials.html>
- [34] A. LEWIS. *Formulation Considerations for Automated Dispensing of Lead Free Solder Paste* [online]. IPC/JEDEC 5 International Conference on Lead Free Electronics and Assemblies, 2004 [cit. 2019-03-24].
- [35] J. SPROVIERI. Dispensing Dots. *Assembly* [online]. 2002 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/83298-dispensing-dots>
- [36] X. B. CHEN, W. J. ZHANG, G. SCHOENAU a B. SURGENOR. Off-line control of time-pressure dispensing processes for electronics packaging. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online]. 2003, 26(4), s. 286-293 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1109/TEPM.2003.820824. ISSN 1521-334X.

- [37] Contact vs. Jet Dispensing: Choosing the Optimal Micro-Dispensing Method for Your Application. In: *Nordson EFD* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.nordsonefd.com/PDF/Nordson_EFD_Contact_vs_Jetting_White_Paper.pdf?utm_source=web&utm_medium=downloadbutton&utm_campaign=download_contactjetting_wp
- [38] T. K. KIONG a A. S. PUTRA. Microdispensing System for Industrial Applications. *2005 IEEE International Conference on Industrial Technology* [online]. IEEE, 2005, , 1186-1191 [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1109/ICIT.2005.1600815. ISBN 0-7803-9484-4.
- [39] *Microdispensing system for the open-jet dispensing of liquids*. US 006415995B1. Uděleno 9. července 2002. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US6415995B1/en>
- [40] J. KORVINK a P. SMITH. *Inkjet-based micromanufacturing*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 978-3-527-64711-8.
- [41] D. J. HAYES a V. SHAH. *Trimming and Printing of Embedded Resistors Using Demand-Mode Ink-Jet Technology and Conductive Polymer*. In: . IPC Printed Circuit Expo, 2002.
- [42] D. DIXON. *Positive Displacement Piston Pump* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://www3.uic.com/wcms/images2.nsf/\(GraphicLib\)/Positive_Piston_Displacement_Pump_technology.PDF/\\$File/Positive_Piston_Displacement_Pump_technology.PDF](https://www3.uic.com/wcms/images2.nsf/(GraphicLib)/Positive_Piston_Displacement_Pump_technology.PDF/$File/Positive_Piston_Displacement_Pump_technology.PDF)
- [43] *Micro Dispensing Techniques: Liquidyn dispensing system* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.fluidmetering.co.uk/liquidyn/liquidyn_techniques.htm
- [44] J. ADAMS, E. DUOSS, T. MALKOWSKI, M. MOTALA, B. AHN, R. NUZZO, J. BERNHARD a J. LEWIS. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces. *Advanced Materials* [online]. 2011, 23(11), 1335-1340 [cit. 2019-03-30]. DOI: 10.1002/adma.201003734. ISSN 09359648.
- [45] D. LEHMHUS, C. AUMUND-KOPP, F. PETZOLDT, D. GODLINSKI, A. HABERKORN, V. ZÖLLMER a M. BUSSE. Customized Smartness: A Survey on Links between Additive Manufacturing and Sensor Integration. *Procedia Technology* [online]. 2016, 26, 284-301 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.038. ISSN 22120173.
- [46] S. BISWAS. *Fabrication of Conformal Load Bearing Antenna using 3D Printing* [online]. IEEE, 2018, 235-236 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608257. ISBN 978-1-5386-7102-3.

- [47] M. MOLITCH-HOU. NScript Demonstrates Ability to 3D Print Embedded Sensors for Medical Devices. *Engineering.com* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16844/nScript-Demonstrates-Ability-to-3D-Print-Embedded-Sensors-for-Medical-Devices.aspx>
- [48] B. H. LU, H. B. LAN a H. Z. LIU. Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics. In: *Opto-Electronic Advances* [online]. 2018, 1(1), s. 17000401-17000410 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.29026/oea.2018.170004. ISSN 2096-4579.
- [49] A. J. LOPES, E. MACDONALD a R. WICKER. Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. In: *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2012, 18(2), s. 129-143 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1108/13552541211212113. ISSN 1355-2546
- [50] More solutions to sticky problems: Brookfield Viscometer & Rheometer. *Ametek Brookfield* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/tech%20sheets/more%20solutions%202017.pdf?la=en>
- [51] Formlabs Design Guide. *Formlabs* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://archive-media.formlabs.com/upload/formlabs-design-guide.pdf>

Seznam zkratek

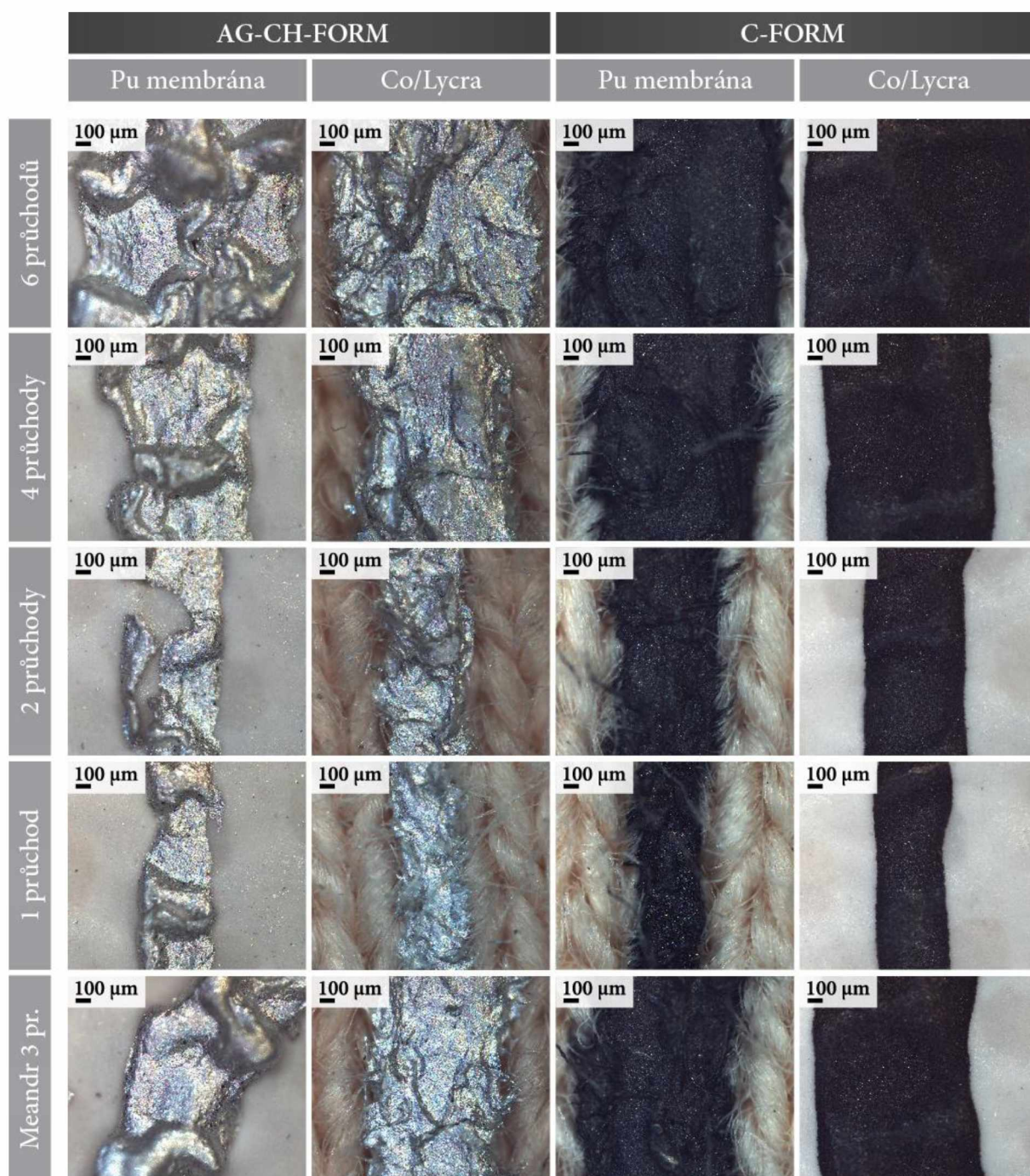
AJP	Aerosol Jet Printing
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
COL	96/4 Co/Lycra (tkanina lycra s obsahem bavlny)
DW	Direct Write
Dxf	Drawing Exchange Format
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Fine Element Method (metoda konečných prvků)
LOM	Laminated Object Manufacturing
MID	Molded Interconnect Devices
PAPC	Polyamid, Polyolefin, Celulóza
PDMS	Poly(dimethylsiloxane)
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrenesulfonic Acid)
PLA	Kyselina polylaktická
PVD	Polyvinylidenfluorid
PU	Polyuretan
PUM	polyuretanová membrána 96/4 Co/Lycra
RFID	Identifikace na radiové frekvenci
RPM	Rotation Per Minute
SBQ	Soft Blanket Gravure
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering

Přílohy

Příloha 1: Náhled části g-kódu vytvořeného pro tisk spirály na PP dózu

G1	X	-14	Y	2	Z	21.9089	F200
G1	X	-14.2	Y	2	Z	21.7798	F200
G1	X	-14.4	Y	2	Z	21.6481	F200
G1	X	-14.6	Y	2	Z	21.5137	F200
G1	X	-14.8	Y	2	Z	21.3766	F200
G1	X	-15	Y	2	Z	21.2368	F200
G1	X	-15.2	Y	2	Z	21.0941	F200
G1	X	-15.4	Y	2	Z	20.9485	F200
G1	X	-15.6	Y	2	Z	20.8000	F200
G1	X	-15.8	Y	2	Z	20.6485	F200
G1	X	-16	Y	2	Z	20.4939	F200
G1	X	-16.2	Y	2	Z	20.3362	F200
G1	X	-16.4	Y	2	Z	20.1752	F200
G1	X	-16.6	Y	2	Z	20.0110	F200
G1	X	-16.8	Y	2	Z	19.8434	F200
G1	X	-17	Y	2	Z	19.6723	F200
G1	X	-17.2	Y	2	Z	19.4977	F200
G1	X	-17.4	Y	2	Z	19.3194	F200
G1	X	-17.6	Y	2	Z	19.1374	F200
G1	X	-17.8	Y	2	Z	18.9515	F200
G1	X	-18	Y	2	Z	18.7617	F200
G1	X	-18	Y	13	Z	18.7617	F200
G1	X	-17.8	Y	13	Z	18.9515	F200
G1	X	-17.6	Y	13	Z	19.1374	F200
G1	X	-17.4	Y	13	Z	19.3194	F200
G1	X	-17.2	Y	13	Z	19.4977	F200
G1	X	-17	Y	13	Z	19.6723	F200
G1	X	-16.8	Y	13	Z	19.8434	F200
G1	X	-16.6	Y	13	Z	20.0110	F200
G1	X	-16.4	Y	13	Z	20.1752	F200
G1	X	-16.2	Y	13	Z	20.3362	F200
G1	X	-16	Y	13	Z	20.4939	F200
G1	X	-15.8	Y	13	Z	20.6485	F200
G1	X	-15.6	Y	13	Z	20.8000	F200
G1	X	-15.4	Y	13	Z	20.9485	F200
G1	X	-15.2	Y	13	Z	21.0941	F200
G1	X	-15	Y	13	Z	21.2368	F200

Příloha 2: Mikroskopické snímky topografie meandrového obrazce tištěného na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra tiskovými formulacemi AG-CH-FORM a C-FORM.



Příloha 3: Mikroskopické snímky topografie meandrového obrazce tištěného na tkaninu PU membrane 96/4 Co/Lycra a 96/4 Co/Lycra tiskovými formulacemi AG-ELAST-FORM a AG-FLEX-FORM.

