

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

UV vytvrzování sítotiskových past

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Martin ČÁCHA**
Osobní číslo: **E15B0112P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **UV vytvrzování sítotiskových past**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s technologií sítotisku
2. Nastudujte problematiku UV vytvrzování materiálů
3. Proveďte průzkum trhu v oblasti UV tvrditelných sítotiskových past
4. Uveďte vybrané dostupné systém vytvrzování pro dané pasty

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. SCHWAIM,R.:UV Coatings: Basics, Recent Developments and New Applications
2. Internetové databáze vědeckých článků

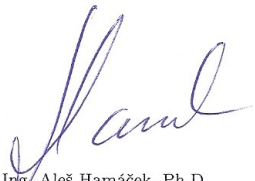
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Bystřický
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na technologii sítotisku, sítotiskové pasty a problematiku jejich UV vytvrzování. V práci je popsána technologie sítotisku, včetně jednotlivých konstrukčních částí sítotiskové jednotky, a princip UV vytvrzování materiálů. Hlavní část této práce je věnována průzkumu trhu v oblasti UV tvrditelných sítotiskových past a UV vytvrzovacích systémů, kde jsou popsány a shrnuty vlastnosti vybraných produktů.

Klíčová slova

Sítotisk, sítotisková pasta, UV záření, fotopolymerace, UV vytvrzování, UV vytvrzovací systémy.

Abstract

This bachelor thesis is focused on screen printing technology, screen printing pastes and UV curing of these pastes. The paper describes the technology of screen printing, including the individual components of the screen printing unit, and the principle of UV curing of materials. The main part of this work is devoted to market research in the field of UV screen printing pastes and UV curing systems where the properties of selected products are described and summarized.

Key words

Screen printing, screen printing paste, UV radiation, photopolymerization, UV curing, UV curing systems.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2018

Martin Čácha

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SÍTOTISK	11
1.1 HISTORIE SÍTOTISKU.....	11
1.2 PRINCIP SÍTOTISKU	12
1.3 SÍTO	12
1.3.1 Parametry síta	14
1.4 RÁM.....	16
1.4.1 Dřevěné rámy	16
1.4.2 Kovové rámy.....	17
1.5 TĚRKA.....	17
2 UV VYTVRZOVÁNÍ MATERIÁLŮ	20
2.1 UV ZÁŘENÍ.....	20
2.2 RADIOMETRICKÉ VELIČINY	21
2.3 FOTOPOLYMERACE.....	22
2.3.1 Radikálová fotopolymerace	22
2.3.2 Kationtová fotopolymerace	23
2.4 ZDROJE UV ZÁŘENÍ.....	23
2.4.1 UV LED.....	24
2.4.2 Rtuťové výbojky	26
3 UV TVRDITELNÉ SÍTOTISKOVÉ PASTY	29
3.1 VODIVÉ PASTY	29
3.2 ANIZOTROPNÍ VODIVÁ LEPIDLA.....	29
3.3 DIELEKTRICKÉ PASTY.....	30
3.3.1 Pasty od společnosti Henkel.....	30
3.3.2 Pasty od společnosti Creative materials	33
3.3.3 Pasty od společnosti Applied Ink Solutions.....	34
3.3.4 Pasty od společnosti Gwent Group	36
4 PŘEHLED UV VYTVRZOVACÍCH SYSTÉMŮ	38
4.1 UV VYTVRZOVACÍ BOXY.....	39
4.1.1 UV vytvrzovací systém od společnosti Dymax.....	39
4.1.2 UV vytvrzovací box od společnosti Uvitron	40
4.1.3 UV vytvrzovací box od společnosti Opsytec Dr. Gröbel	42
4.1.4 UV LED vytvrzovací box od společnosti Opsytec Dr. Gröbel.....	42
4.1.5 UV LED vytvrzovací box od společnosti Height-LED.....	43
4.2 PÁSOVÉ UV VYTVRZOVACÍ SYSTÉMY	43
4.3 BODOVÉ UV VYTVRZOVACÍ SYSTÉMY	44
4.3.1 Bodový vytvrzovací systém od společnosti Uvitron.....	44
4.3.2 Bodový UV vytvrzovací LED systém od společnosti Dymax	45

4.4	RUČNÍ PLOŠNÉ UV VYTVRZOVACÍ SYSTÉMY	46
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49

Seznam symbolů a zkratk

LED	světelná dioda
PA.....	polyamid
PE	polyester
PES	polyesterová stříž
UV	ultrafialové záření

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na technologii sítotisku, problematiku UV vytvrzování materiálů a UV tvrditelné sítotiskové pasty. Hlavním cílem práce je rešerše trhu v oblasti dostupných UV tvrditelných sítotiskových past a vytvrzovacích systémů pro uvedené pasty.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. První kapitola je zaměřena na technologii sítotisku. Je zde představen princip sítotisku, jeho historie a detailní popis jednotlivých částí sítotiskové jednotky, jako je například síto, třeka nebo síťový rám. Druhá část se zabývá UV zářením, principem UV vytvrzování materiálů a zdroji UV záření, které se používají ve vytvrzovacích systémech. Další kapitoly této práce jsou zaměřeny na již zmiňovanou rešerši trhu v oblasti UV tvrditelných sítotiskových past a dostupných systémů pro jejich vytvrzení.

1 Sítotisk

Sítotisk je jedna ze základních technologií, která slouží k výrobě plošných spojů a díky stálému zdokonalování si svou pozici v této oblasti drží i dnes. Tato technologie přináší jednoduchý a rychlý proces, který se dá přizpůsobit různým materiálům a požadavkům na výrobu. Dříve byl používán v oblasti elektrotechniky převážně k nanášení leptuvzdorných rezistů [1]. Nyní je však používán i pro aplikace jako je nanášení pájecí pasty, lepidel a fotorezistů. Jedná se tedy o aditivní proces v podobě nanášení různých médií na substrát. Existují dva různé druhy sítotisku [2–4]. Prvním z nich je konvenční sítotisk, kde místa pro tisk tvoří otvory v sítovině, kterými je protlačován potiskový materiál (médiu) mechanickým pohybem těrky [2–4]. Druhým způsobem je rotační sítotisk, kde je potiskový materiál nanášen pomocí rotačních válců [2–5]. Sítotisk je realizován pomocí ručních, poloautomatických a automatických zařízení [2, 4, 5].

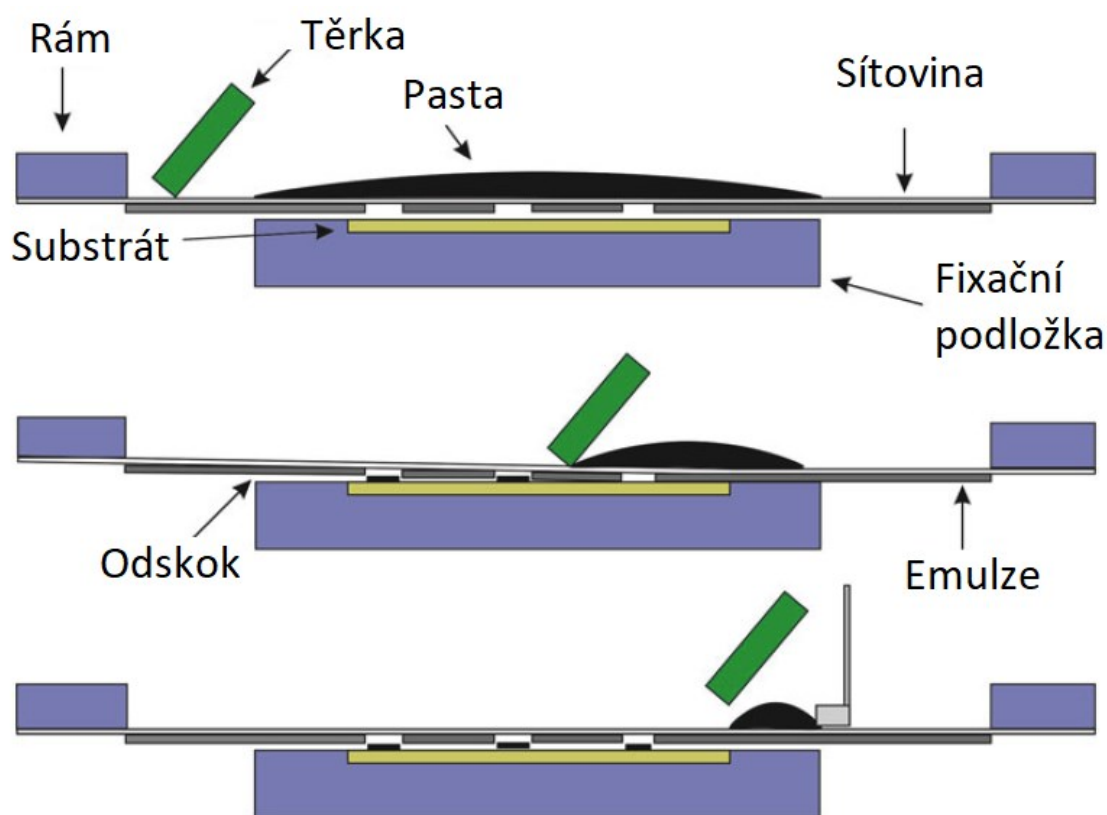
1.1 Historie sítotisku

Sítotisk je jednou z nejstarších tiskových technologií. Za jeho vynálezce se považují asijské země, především stará Čína a Japonsko [4]. Nejdříve se místo síta používaly šablony, které se ručně vyřezávaly do speciálních papírů [4, 5]. Na ty se barva nanášela skrz volné plochy převážně štětcem [4, 5]. Papírové šablony se kvůli své velice malé životnosti časem nahradily lidskými vlasy a později hedvábím [5, 6]. Na nich se vytvářely motivy z různých přírodních materiálů, jako byl například vosk [6]. Do Evropy se sítotisk dostal v pozdním 18. století, ale z počátku o tuto technologii nebyl velký zájem, dokud nebyla z východu dostupnější hedvábná síta [5].

Ve 20. století se začaly v Anglii používat vykrývací roztoky, které byly nanášeny na síto a nahradily tak papírové šablony [5]. Zásadní obrat ve vývoji sítotisku nastal v polovině 20. století, kdy díky velkému rozvoje v oblasti chemie vznikly světlocitlivé roztoky a začalo se využívat fotochemických procesů [5, 6]. V současné době se tato technologie používá napříč mnoha obory.

1.2 Princip sítotisku

Sítotisková pasta je protlačována skrz prostupná oka síta pohybem těrky [1, 2, 4, 5, 7]. Během tohoto procesu se síto přitlačuje na substrát a při vzdalování těrky se síto opět vrací do určité výšky nad substrát [8]. Tato výška je dána odskokem [8]. Na sítu je předem připraven požadovaný motiv, který se má protisknout na tiskovou plochu [1], [8]. Princip této technologie je znázorněn na Obr. 1, kde můžeme vidět jednotlivé dílčí komponenty používané při sítotisku.



Obr. 1 Princip technologie sítotisku (převzato a upraveno z [7]).

1.3 Síto

Sítové šablony jsou vyráběny napínáním síťového materiálu na pevný rám [1]. Materiály síťoviny jsou vybírány podle média, které bude aplikováno, a také podle požadované přesnosti nanášených motivů [1]. Vlákná síťoviny mohou být buď monofilní – jednovláknová, nebo multifilní - vícevláknová, kde je každé vlákno spleteno z několika tenčích [1, 3, 4]. Základní materiály, ze kterých se síta vyrábí podle podle [1], [3, 4, 7], jsou:

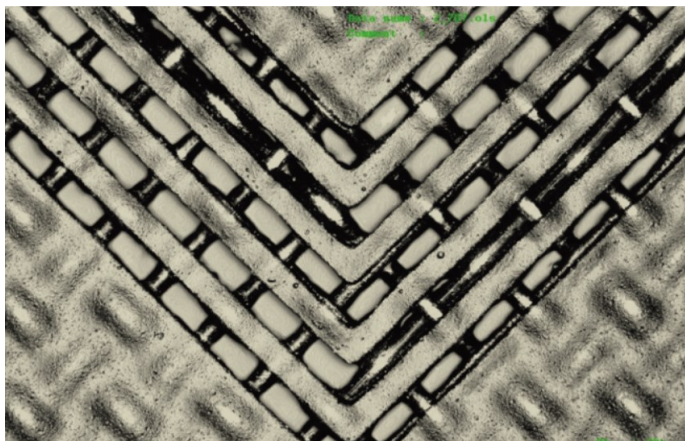
- přírodní:
 - hedvábí,
- syntetické:
 - monofilní polyesterová vlákna,
 - metalizovaná monofilní polyesterová tkanina,
 - monofilní nylonová tkanina,
- kovové.

Přírodní materiály jsou používány pro aplikace, kde není kladen velký důraz na tisk přesných motivů [3, 4]. Tyto materiály absorbují vlhkost a kvůli tomu nejsou rozměrově stálé. [3, 4]. Také se obtížně používají opakovaně, protože se těžko odvrstvují a myjí [3, 4, 9]. Dnes se kromě serigrafie téměř nepoužívají [4].

Syntetické materiály, jako je polyester (často označovaný zkratkou PE či PES), nylon (označovaný zkratkou PA) a pokovený (metalizovaný) polyester, jsou nejčastěji používaným materiálem ke zhotovení síťoviny [4]. Polyesterové tkaniny mají dobrou odolnost vůči oděru, velmi malou absorpci vlhkosti, odolnost vůči chemikáliím a jsou rozměrově stálé [1, 3, 4]. Nylonová tkanina je díky své velké elasticitě vhodná především k potisku na nepravidelně tvarované plochy [3, 4]. Metalizovaná vlákna jsou pokovena niklem pro větší odolnost a používají se především pro potisk materiálů s hrubším povrchem [1, 4].

Pro kovové síťoviny se obvykle používají ocelová vlákna, která mají velice malou pružnost, ale vysokou stabilitu [1, 3, 4]. Tato vlákna se obtížněji napínají, ale pokud jsou dobře napnutá, tak jsou velmi odolná vůči jakémukoliv poškození nebo opotřebením pohybem těrky [1, 4]. Malá pružnost těchto vláken samozřejmě ztěžuje správné nastavení odskoku síta od podložky a také je těžší zvolit správný přítlak těrky [1]. Kovová síta se využívají především k potisku keramiky [1, 4]. Nevýhodou kovových vláken může být jejich vyšší pořizovací cena [4].

Na Obr. 2 můžeme vidět napnuté síto s nanesenou fotocitlivou emulzí, která na jeho povrchu vytvoří požadovaný motiv pro tisk.

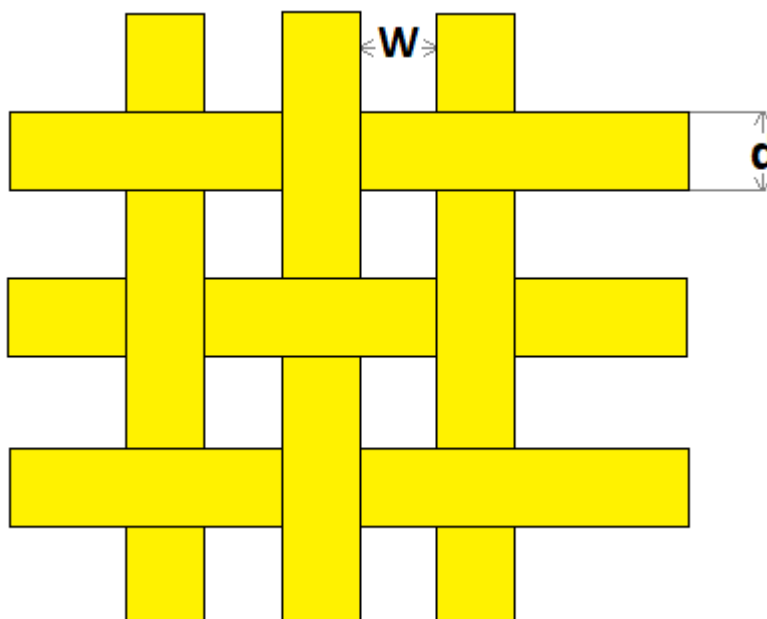


Obr. 2 Detailní záběr síta s nanesenou emulzí (převzato z [10]).

1.3.1 Parametry síta

Dalším důležitým kritériem v technologii síťotisku jsou podle [11–13] parametry a rozměry síta:

- tloušťka vlákna d [μm],
- velikost ok w [μm],
- tloušťka síťoviny D [μm],
- otevřená plocha síťoviny a_0 [%],
- hustota vláken na jeden centimetr délky síta n [n/cm],
- teoretický objem pasty V_{th} [cm^3/m^2].



Obr. 3 Znárodnění velikosti ok a tloušťky vlákna síta (překresleno podle [11, 14]).

Ze základních parametrů síta d a w , kdy předpokládáme, že jsou udané v μm , můžeme dopočítat otevřenou plochu síťoviny [7, 9, 11, 13, 15]. Ta udává procentuální poměr plochy, kterou zabírají na sítu volná oka [7, 9, 11, 13, 15]:

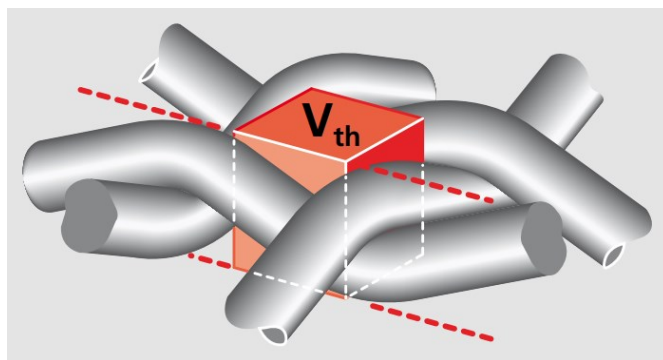
$$a_0 = \frac{w^2}{(w + d)^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.1)$$

Dále můžeme stanovit počet ok, která připadají na jeden centimetr délky síta [12, 13, 15]. Tato veličina se anglicky nazývá mesh a můžeme se setkat i s jednotkami n/inch , tedy počet vláken na délkovou jednotku palec.

$$n = \frac{10\,000}{w + d} \quad [n/\text{cm}] \quad (1.2)$$

Posledním a v praxi velice důležitým parametrem je teoretická spotřeba pasty na jednotku plochy [15], [12]:

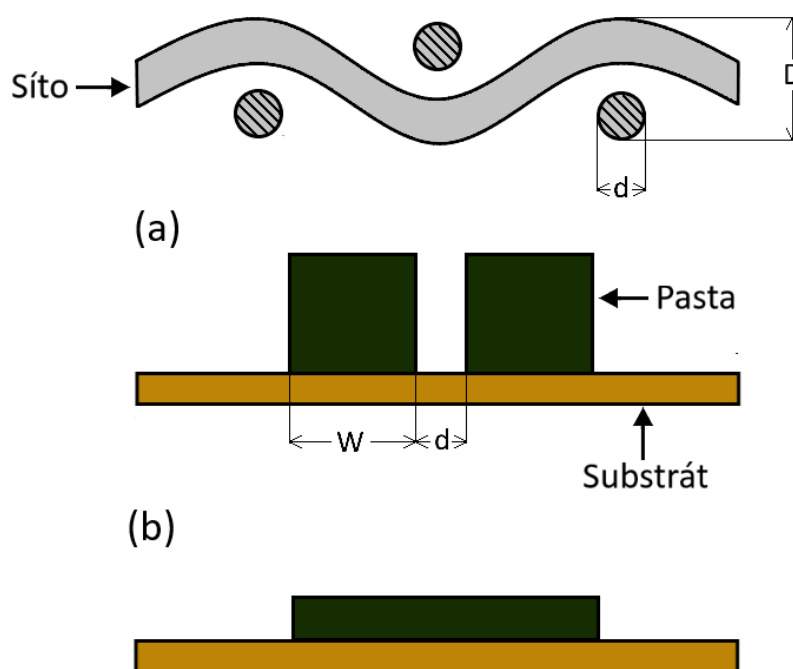
$$V_{th} = \frac{a_0 \cdot D}{100} [cm^3/m^2] \quad (1.3)$$



Obr. 4 Teoretický objem použité pasty V_{th} (převzato z [15]).

Všechny tyto parametry přímo ovlivňují kvalitu natištěného obrazce. Na Obr. 5 můžeme vidět vytvoření rovnoměrného filmu slítím pasty, která byla vtlačena sítem na jeho plochu. Jak může být patrné ze vzorce (1.3), tak spotřeba pasty přímo závisí na tloušťce síťoviny a na otevřené ploše síťoviny [1], [11]. Sítem lze tisknout i ultrajemné motivy, které se využívají především u speciálních plošných spojů, kdy se tloušťka

natištěných motivů může pohybovat i v desítkách μm [2]. Aby byl zajištěn dobrý průchod pasty sítím, tak by velikost ok w měla být 2,5 až 3 krát větší než velikost částic pasty [1].



Obr. 5 Detailní pohled na pastu protlačenou sítím na substrát (a) a slitou pastu na substrátu (b) (překresleno podle [13]).

1.4 Rám

Hlavním účelem sítotiskového rámu je uchování síta v napnutém stavu po celou dobu tisku a při zhotovování sítotiskových šablon [1, 3]. Proto se na materiál rámu klade velký důraz, aby vydržel velké mechanické namáhání [3]. Rám musí být odolný vůči chemikáliím a agresivním látkám, které se používají při nanášení matrice nebo při samotném tisku [3]. Rámy jsou obvykle vyráběny ze dřeva, kovového materiálu nebo plastu [1, 3].

1.4.1 Dřevěné rámy

Dřevěné materiály se používají hlavně díky své nízké pořizovací ceně, malé hmotnosti a relativně snadné výrobě [3, 4]. Nicméně mají také řadu nevýhod, jako je nasákavost, malá pevnost a nízká stabilita, kdy časem dochází ke změnám v materiálu [3, 4]. Dřevěné rámy se hodí pouze k tisku formátů, kde délka žádné ze čtyř stran nepřesahuje 50 cm, proto jsou rohy rámu obvykle spojeny šrouby nebo lepidlem, případně mohou být zpevněné kovovým materiálem [3, 4]. Je důležité, aby použitá lepidla byla odolná vůči vodě a

rozpouštědly [3]. Pokud jsou použity šrouby, tak musí být odolné proti korozi [3]. K ochraně proti vodě, UV záření a chemikáliím se na dřevo nanáší polyuretanový lak nebo šelak [3]. Dřevěné rámy mají uplatnění především v serigrafii a ručním sítotisku, v průmyslové výrobě se nepoužívají [4].

1.4.2 Kovové rámy

Kovové rámy jsou používány především v profesionálních aplikacích a sériové výrobě, protože mají mnohem lepší stabilitu než dřevěné rámy, což je velmi důležité pro tisk větších formátů [4]. Kovové materiály, které se pro výrobu rámu používají, jsou ocel a hliník [3]. Ke spojování jednotlivých trubek se využívá svařování [3]. Oba dva tyto materiály mají své výhody a nevýhody [3].

Ocelové materiály mají velkou tuhost, stabilitu, nízkou teplotní roztažnost a lépe se svařují [3]. Ocel má dvakrát menší koeficient teplotní roztažnosti než hliník, což může způsobit, že při změně teploty o 20 °C se délka oceli změní o 0,24 mm/m, zatímco u hliníku bude změna délky dvojnásobná, tedy 0,48 mm/m [3, 16]. Tento jev může způsobovat problémy hlavně u tisku velmi přesných motivů. Velká nevýhoda použití oceli, oproti hliníku, je její velká hmotnost, protože hliník je při stejných rozměrech téměř třikrát lehčí než ocel, díky své menší hustotě [3]. Ocel je naopak náchylnější na korozi, ale lépe odolává chemikáliím, které se používají při procesu sítotisku [3].

1.5 Těrka

Těrka je nástroj, kterým se roztírá médium po sítu a zároveň ho protlačuje skrz jeho volná oka [1, 3, 4, 7]. Skládá se z držáku a těrkového listu [3, 4, 17]. Držáky pro ruční sítotisk se vyrábí ze dřeva, kovu nebo plastu a jejich úkolem je umožnit snadné a pohodlné uchopení [3, 4, 17]. Držáky pro automatický sítotisk jsou přizpůsobeny upínacímu systému jednotlivých strojů a vyrábějí se z kovu [1, 4]. Těrkový list je materiál, který je pevně upevněn do těrkového držáku [3, 4]. Dříve se k jeho výrobě používal kaučuk, dnes se však vyrábí výhradně z polyuretanových elastomerů nebo kovu [1, 4, 7].

Těrka na výsledném motivu ovlivňuje především tloušťku a rovnoměrnost nanesené pasty, ostrost motivu a soutisk [4, 7]. Svým neustálým pohybem po sítu také výrazně ovlivňuje jeho životnost [4, 9]. Pro kvalitní tisk musí být těrkový list dostatečně ostrý a

jeho hrana musí být rovná a neporušená [4, 17]. Při nedodržení těchto podmínek, může být v určitých místech naneseo více nebo méně pasty, tím se poruší výsledný natisknutý motiv [1, 4]. Z tohoto důvodu se třerkové listy musí brousit [4, 17]. Těrka také musí být menší než šířka použitého rámu a neměla by zasahovat až do krajů sítovinu [4, 7].

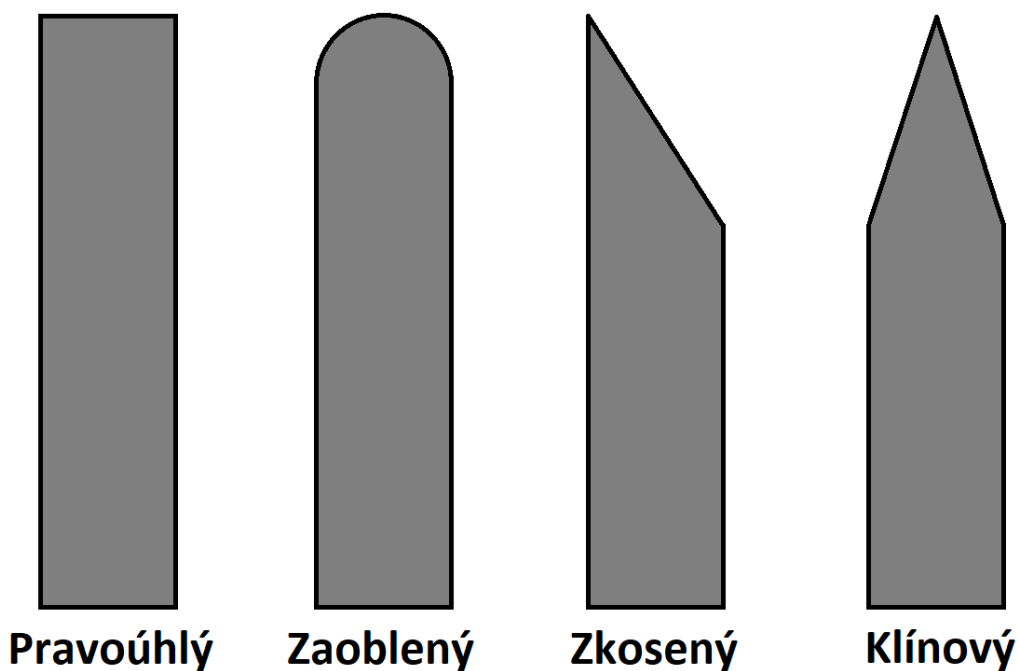
Důležité je také správné nastavení úhlu, který svírá třerkový držák s rovinou potiskovaného materiálu [4]. Obecně platí, že čím ostřejší tento úhel je, tak tím více pasty se na síto protlačí [4, 12]. Zvolení příliš ostrého úhlu vyvíjí relativně velký plnicí tlak a tím může vést k nánosům příliš velkého množství pasty, což většinou není záměrem [4, 7]. Úhel, kdy je nanesené množství pasty optimální, se pohybuje od 60° do 80° [4]. Aby nedocházelo k nadměrnému ohýbání třerkového listu, měl by být tlak působící na třerku co nejmenší [4]. Množství nanesené pasty se pak reguluje pouze nastavením úhlu mezi držákem a rovinou potiskovaného materiálu, tím dochází k menšímu opotřebení třerkového listu a síta [4]. Množství nanesené pasty lze také ovlivnit rychlostí pohybu třerky při nanášení [1, 4].

U ručního sítotisku se používá pouze jedna třerka, která slouží k tisku i nanášení pasty na síto [4, 17]. U automatického sítotisku se používají třerky dvě [4, 17]. První třerka protlačuje pastu skrz síto [4, 17]. Druhá, s názvem předtěrka, při zpětném pohybu nanáší pastu na síto [4, 17]. Při protlačování pasty sítem předtěrka nepracuje a naopak [4, 17].

Třerky se můžou dělit podle několika kritérií. Prvním z nich je podle [2, 4, 17] dělení na základě jejich profilu:

- pravoúhlý,
- zaoblený,
- klínový,
- zkosený.

Pravoúhlý profil je nejpoužívanějším profilem třerky [4]. Je univerzální a oboustranný [4, 17]. Čím jsou jeho hrany ostřejší, tím jsou ostřejší kontury tisku [4]. Zaoblený tvar se hodí pro větší nános pasty, kde nejsou velké požadavky na ostrost motivu [4, 17]. Klínové a zkosené třerky se používají pro potisk vícerozměrných předmětů a pro potisk malých potiskových ploch [4, 17].



Obr. 6 Různé profily těrek (překresleno podle [3, 17]).

Druhým způsobem, jak můžeme těrky podle [2] rozdělit je na:

- měkké,
- středně tvrdé,
- tvrdé.

Tvrдость měkkých těrek se pohybuje v rozmezí 55 až 65 Shore a hodí se pro běžný tisk [2]. Středně tvrdé těrky mají tvrdost v intervalu 65 až 85 Shore [2]. Tvrdé těrky mají tvrdost od 85 do 95 Shore [2]. Tyto těrky nanášejí menší množství pasty, mají větší jemnost motivů a používají se například pro tisk plošných spojů [2, 4]. Těrky s různou tvrdostí od sebe bývají barevně rozlišeny [2, 4, 17].

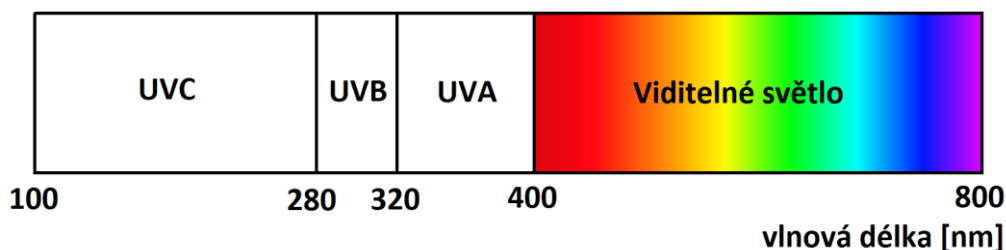
2 UV vytvrzování materiálů

UV vytvrzování materiálů bylo zavedeno jako alternativní vytvrzovací mechanismus k tepelnému vytvrzování [18]. Tato technologie zažila rychlý rozvoj díky ekonomickým, ekologickým a technologickým výhodám, které poskytuje [18, 19]. Mezi ekonomické výhody patří úspora energie, vysoká rychlost výroby a možnost okamžité manipulace s vytvrzeným výrobkem [18, 19]. K technologickým výhodám se řadí nízká teplota při UV vytvrzování a univerzálnost použitých aplikací [18].

UV vytvrzování využívá energii fotonů elektromagnetického spektra s krátkou vlnovou délkou, které iniciují polymeraci, během níž dojde k vytvrzení a změně vlastností vytvrzovaného materiálu [1]. Vytvrzování ultrafialovým zářením se využívá v široké oblasti průmyslových odvětvích, jako je polygrafie, automobilový průmysl, kosmetika, dezinfekce pitné vody, elektrotechnický průmysl, zubní technika a lékařství [18, 19].

2.1 UV záření

Ultrafialové záření je elektromagnetické záření s vlnovými délkami kratšími než viditelné světlo a delšími než rentgenové záření. Spektrum jeho vlnových délek je tedy 100 nm až 400 nm, jak můžeme vidět na Obr. 7 [18, 19]. Pro člověka je toto spektrum neviditelné, ale někteří živočichové ho mohou vnímat. Přírodním zdrojem tohoto záření je slunce, které ho vyzařuje společně se spektrem viditelného světla a infračerveného záření.



Obr. 7 Spektrum ultrafialového záření a viditelného světla (překresleno podle [18]).

UV záření můžeme podle jeho vlnových délek, biologických účinků a vlastností rozdělit podle [18, 19] do tří hlavních skupin:

- UV-A,
- UV-B,
- UV-C.

Tyto tři hlavní skupiny se liší podle spektra vlnových délek. UV-A záření má spektrum vlnových délek 315 nm až 380 nm, UV-B má spektrum vlnových délek 280 – 315 nm a UV-C má spektrum vlnových 100 nm až 280 nm [18, 19]. Fotony o vlnové délce menší než 242 nm (záření typu UV-C) mohou reagovat s dvouatomovými molekulami kyslíku [20]. Tímto jevem vzniká plyn ozon [20].

2.2 Radiometrické veličiny

První jednotkou, se kterou se můžeme v oblasti UV vytvrzování setkat, je zářivý tok. Tato veličina udává, jaká energie prošla (dopadla) za jednotku času plochou S . Je to tedy zářivý výkon prošlý plochou S [21, 22]:

$$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt} \quad [W] \quad (2.1)$$

Veličina W_e je zářivá energie udávána v jednotkách Joule [21, 22].

Aby bylo možné zhodnotit celkové vyzařování plošného zdroje o povrchu S do prostoru, zavádí se veličina intenzita vyzařování. Je to tedy zářivá energie vyzařována za jednotku času z jednotky povrchu plošného zdroje [21, 22]:

$$H_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.2)$$

Pro popis dopadu záření na skutečnou plochu, tedy například na pastu substrátu, se používá veličina intenzita ozáření [21, 22]:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.3)$$

Ze vzorce (2.3) je tedy patrné, že tato veličina vyjadřuje, jaký zářivý výkon dopadne na jednotku plochy [21, 22].

2.3 Fotopolymerace

Fotoinicovaná polymerace, neboli fotopolymerace, je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají makromolekuly polymeru. Při této reakci dochází ke vzniku aktivních center (radikálů, kationtů) fotochemickým dějem [23]. Nevznikají žádné vedlejší produkty, chemické složení polymeru je tedy stejné jako chemické složení monomeru [23]. Jednotlivé dílčí děje při fotopolymerizaci jsou iniciace, propagace a terminace [23–26].

Fotopolymerace je tedy založena na stejných principech jako běžná tepelná polymerace, má ale oproti ní řadu výhod [24]. Mezi tyto výhody se řadí především rychlý vznik aktivních center, vytvrzování při laboratorní teplotě (není nutné zahřívát celý systém) a široká nabídka dostupných materiálů (monomery, oligomery, fotoiniciátory), jejichž poměrem lze nastavit požadované vlastnosti vytvrzeného materiálu [24, 25].

Pro zahájení fotopolymeračního procesu je tedy nutné přivést určité množství aktivační energie ve formě elektromagnetického záření [23]. Při této reakci probíhá absorpce záření fotocitlivou složkou [24–26]. Podle druhu aktivních částic dělíme fotopolymerace na iontové a radikálové [23]. Iontové polymerace se dále dělí na kationtovou a aniontovou [23]. Aniontová polymerace není příliš rozšířená, proto v této práci nebude podrobněji popisována [24].

2.3.1 Radikálová fotopolymerace

Tato reakce vzniká procesem fotoiniciace, kdy absorpcí UV záření fotoiniciátorem dochází ke vzniku volných radikálů, které následně reagují s monomery [24–26]. Iniciace potřebuje velkou aktivační energii [23]. Polymerace je ukončena procesem terminace, kdy radikály ztrácí svou reaktivitu [23, 25]. Její výsledná rychlost a délka vzniklých řetězců závisí na koncentraci a reaktivitě volných radikálů [23]. Při výběru fotoiniciátoru musíme dodržet několik zásad. Absorbční spektrum fotoiniciátoru se musí co nejvíce překrývat s emisním spektrem zdroje záření [24, 25]. Dále by se absorbční spektrum fotoiniciátoru nemělo shodovat s absorbčním spektrem ostatních složek systému (pigmenty, plniva, aditiva) [24, 25]. Pokud se tomuto problému nedá vyhnout, dá se řešit pomocí větší intenzity záření nebo přidáním většího množství fotoiniciátorů [24].

Inhibice radikálové fotopolymerace kyslíkem je obecně známý problém, který ovlivňuje kvalitu a rychlost vytvrzení [18, 25, 26]. Přítomný kyslík způsobuje přenesení energie fotoiniciátoru na kyslík, což má za následek deaktivaci iniciátoru [25, 26]. Dále kyslík reaguje s volnými radikály, které následně neprodukují polymeraci a ani se na ní nepodílí [26]. Tomuto jevu se dá zabránit například umožněním průběhu polymerace v inertní atmosféře bez kyslíku nebo vytvářením nadbytku volných radikálů [25, 26].

2.3.2 Kationtová fotopolymerace

Druhým typem polymerace využívané pro UV vytvrzování materiálů je kationtová fotopolymerace [23–26]. Při procesu iniciace dochází vlivem UV ozáření fotoiniciátoru ke vzniku kationtů, které se chovají jako aktivní centra [24–26]. Iniciace je jako jediná závislá na UV záření [25, 26]. Fotopolymerace tedy probíhá i po skončení expozice na rozdíl od radikálové fotopolymerace [25]. Další kroky probíhají podobně jako u radikálové fotopolymerace. Při propagaci reagují aktivní kationtová centra s monomery a při terminaci aktivní centra zanikají chemickou reakcí [23–25].

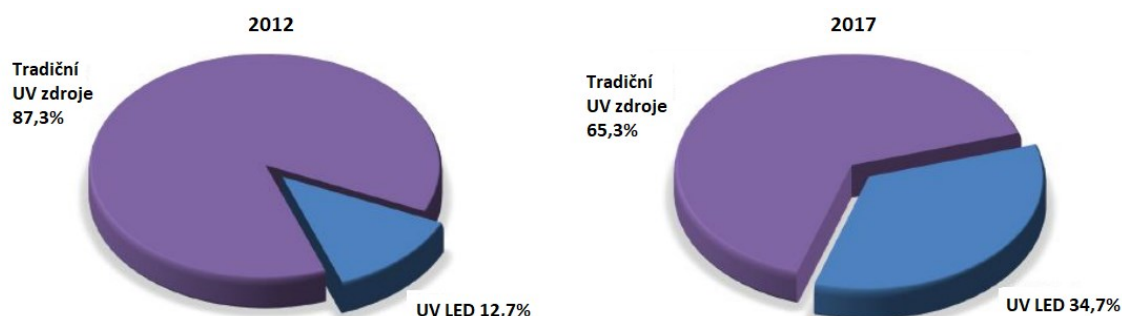
Kationtová fotopolymerace může být ovlivňována konkurenčními reakcemi kationtů nebo vzdušnou vlhkostí [24, 25].

2.4 Zdroje UV záření

Jak již bylo řečeno, tak přirozeným přírodním zdrojem UV záření je slunce. V praxi se používají různé typy zdrojů, které produkují UV záření. Do této kategorie patří halogenové lampy, plynové výbojky, UV světelné diody nebo UV lasery. Výběr správného zdroje UV záření záleží především na technických požadavcích a na finančních možnostech [27]. Prvním krokem je zvolit zdroj s vhodným spektrem vlnových délek pro zvolenou aplikaci. Absorbční spektrum fotoiniciátoru v pastě musí odpovídat emisnímu spektru vlnových délek, které je vyzařováno zdrojem UV záření, jinak k vytvrzení nedojde [27]. Absorbční spektrum vlnových délek jednotlivých past by měl výrobce vždy uvádět [27].

Za posledních několik let dochází především k rozvoji UV LED vytvrzovacích systémů [28]. Tato technologie se u svého vývoje potýkala s řadou technologických a ekonomických problémů [28]. Tyto problémy způsobovala zejména vysoká pořizovací cena a nízká efektivita, díky jejich překonání se v oblasti UV vytvrzování rozvíjí

především vytvrzování pomocí UV LED, které nahrazuje tradiční zdroje UV záření, jako jsou například rtuťové výbojky [28, 29].



Obr. 8 Zdroje UV záření na trhu v letech 2012 a 2017 (převzato a upraveno z [28]).

2.4.1 UV LED

Technologie UV LED je široce používána v celém odvětví UV vytvrzování materiálů a předpokládá se, že časem odsune konvenční osvětlovací prostředky do pozadí [29]. UV světelné diody poskytují při vytvrzování řadu výhod oproti ostatním používaným zdrojům. Těmito výhodami podle [30, 31] jsou:

- díky úzkému spektru vlnových délek nevzniká ozon,
- neobsahují těžké kovy,
- nevyzařují velké množství tepla,
- fungují na nízkém napětí,
- mají stabilní výstup UV záření po celou dobu životnosti,
- mají delší životnost ve srovnání s ostatními používanými zdroji,
- je možné okamžitého zapnutí a vypnutí.

Vyzařovací spektrum UV LED neklesá pod hodnotu 280 nm, tím nevzniká ozon a není potřeba odvětrávacích systémů, jako u některých typů konvenčních zdrojů [31, 32]. Další velkou výhodou těchto systémů je jejich nízká provozní teplota a tudíž není nutné používat výkonné chladičové systémy [31]. Chlazení se využívá zejména u UV LED systému s velkým počtem diod a u pásových vytvrzovacích linek [29, 32]. U tradičních UV lamp tato teplota dosahuje několikanásobně vyšších hodnot [19, 31]. Z toho plyne další výhoda UV LED systémů a tou je možnost okamžitého vytvrzování ihned po zapnutí systému [27, 31, 32]. Konvenční UV lampy potřebují dobu v řádech desítek minut pro zahřátí, aby dosáhly optimálních vlastností pro vytvrzování, a po vypnutí se musí ještě několik minut chladit,

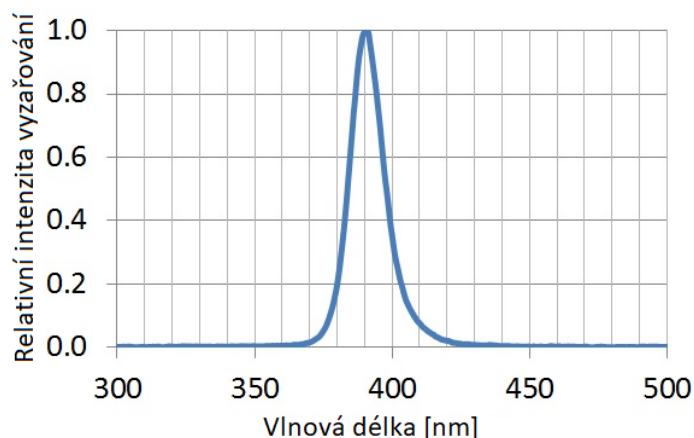
aby nedošlo k jejich zničení [31, 32]. UV LED systémy také dosahují mnohem delší životnosti až 20 000 provozních hodin a jejich vyzařovací intenzita s časem neklesá [27, 31, 32].

Naopak nevýhody podle [29–31] jsou:

- vyšší pořizovací cena,
- omezený výstup spektra vlnových délek,
- vyšší náklady na pastu kvůli speciálním fotoiniciátorům,
- vytvrzovaný prvek musí být umístěn v těsné blízkosti UV LED.

Společná nevýhoda všech UV LED vytvrzovacích systémů je dodržení malé vzdálenosti mezi tvrzeným médiem (například substrátem) a polem LED [29]. Tato vzdálenost by neměla překročit 5 až 6 cm kvůli chybějícímu zaostřování UV paprsků [29]. U konvenčních systémů je tato funkce zajištěna pomocí reflektorů, které jsou popsány níže [29].

Spektrum vlnových délek u UV LED je velmi úzké [27]. Většinou je udána výrobcem hodnota vlnové délky, při které je hodnota intenzity záření největší a nachází se v takzvaném píku [31]. Led dioda samozřejmě vyzařuje i jiné vlnové délky, které se liší od udané vlnové délky většinou maximálně o 40 nm a mají nižší intenzitu záření [27, 31]. Například dioda konstruovaná na 365 nm může vyzařovat vlnové délky od 350 nm do 390 nm, jak můžeme vidět na Obr. 9. Největší hodnoty (píku) intenzity záření dosahuje při vlnové délce 365 nm.



Obr. 9 Spektrum vlnových délek 390 nm LED (převzato a upraveno z [33]).

2.4.2 Rtuťové výbojky

Většina dostupných UV lamp na trhu obsahuje rtuť, pokud se nejedná o UV LED systémy [18]. Rtuť se v UV technologiích používá především díky tomu, že 35% vyzařovaného spektra je v rozsahu UV záření [18]. Výbojky fungují na principu elektrického výboje mezi katodami uvnitř křemenného nebo borosilikátového skla, které obsahuje plyn [34]. Do trubice zasahují z vnějšího prostředí wolframové elektrody, které umožňují přivedení elektrického proudu, díky němuž následně vzniká výboj [19]. Při výboji dochází vlivem elektrického pole k urychlení elektronů, kdy při kolizi s ostatními částicemi dochází k předání kinetické energie a tím dochází k excitaci částice na vyšší energetickou hladinu [34]. Některé z částic se pak navracejí na základní energetickou úroveň a uvolňují při tom elektromagnetické záření ve formě fotonu [34]. Pro zvýšení výkonu nebo pro změnu vlnové délky emisního spektra se do výbojek přidávají dopanty v podobě různých vzácných plynů [18, 19]. Podle tlaku v plynové výbojce je dělíme na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké [19, 34].

Nízkotlaké výbojky

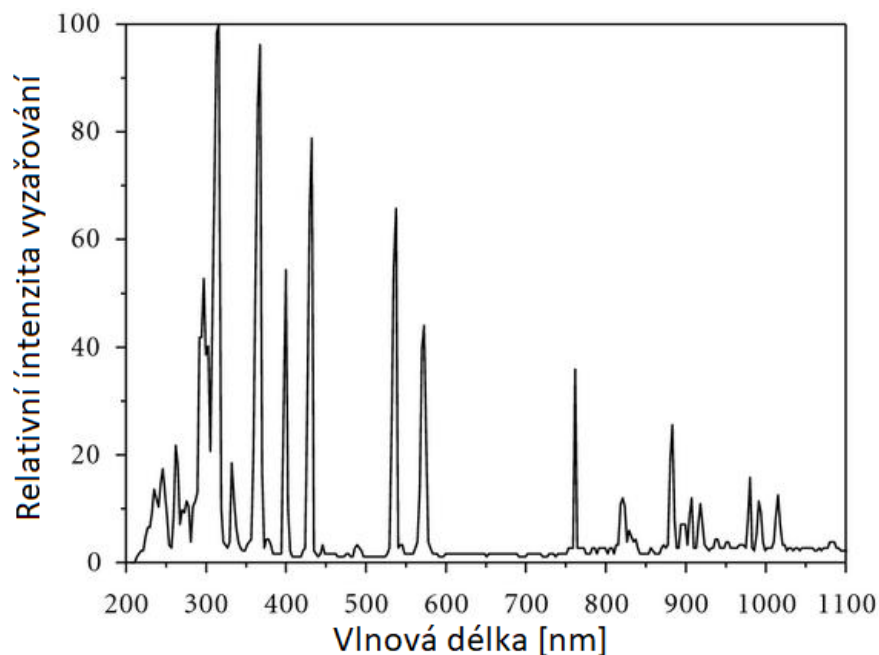
Rozdělení podle tlaku udává právě tlak rtuťových par ve výbojce. Nízkotlaké rtuťové výbojky pracují při provozním tlaku 1 Pa [19, 34]. Tyto lampy mají několik výhod jako nízká cena, nízká provozní teplota a dlouhá životnost, přesto se pro UV vytvrzování příliš nepoužívají [19]. Důvodem je jejich emisní spektrum krátkých vlnových délek, u kterých vzniká ozon [19]. Navíc díky jejich nízké intenzitě vyzařování je vytvrzování pomalé a záření nepronikne do tlustších vrstev [19].

Nízkotlaké rtuťové výbojky se využívají především pro dezinfekci pitné vody, protože jejich emisní spektrum se pohybuje v rozsahu od 240 do 280 nm, které vykazuje velký mikrobicidní účinek [35]. Déle se používají jako světelný zdroj, kde jsou pokryty luminoforem a vyzařují emisní spektrum viditelného světla a označují se jako zářivky.

Středotlaké výbojky

Středotlaké výbojky jsou nejpoužívanější výbojky pro UV vytvrzování v oblasti rtuťových výbojek [18]. U středotlakých výbojek se provozní tlak pohybuje v řádu

jednotek až desítek kilopascalů [18, 19]. Tyto lampy pracují při vysokých teplotách, které dosahují povrchové teploty okolo 700 °C [19]. Proto je nutné používat chladič systémy v podobě ventilátoru nebo vodní cirkulace [19]. Konvenční středotlaké výbojky potřebují k zahřátí 10 až 30 minut pro dosažení optimálních vlastností jejich provozu [19, 27]. Jejich životnost se stejně jako u vysokotlakých výbojek pohybuje od 1000 do 2000 provozních hodin, pak jejich intenzita vyzařování klesá [19, 27].



Obr. 10 Spektrum vlnových délek vysokotlaké rtuťové výbojky (převzato a upraveno z [36]).

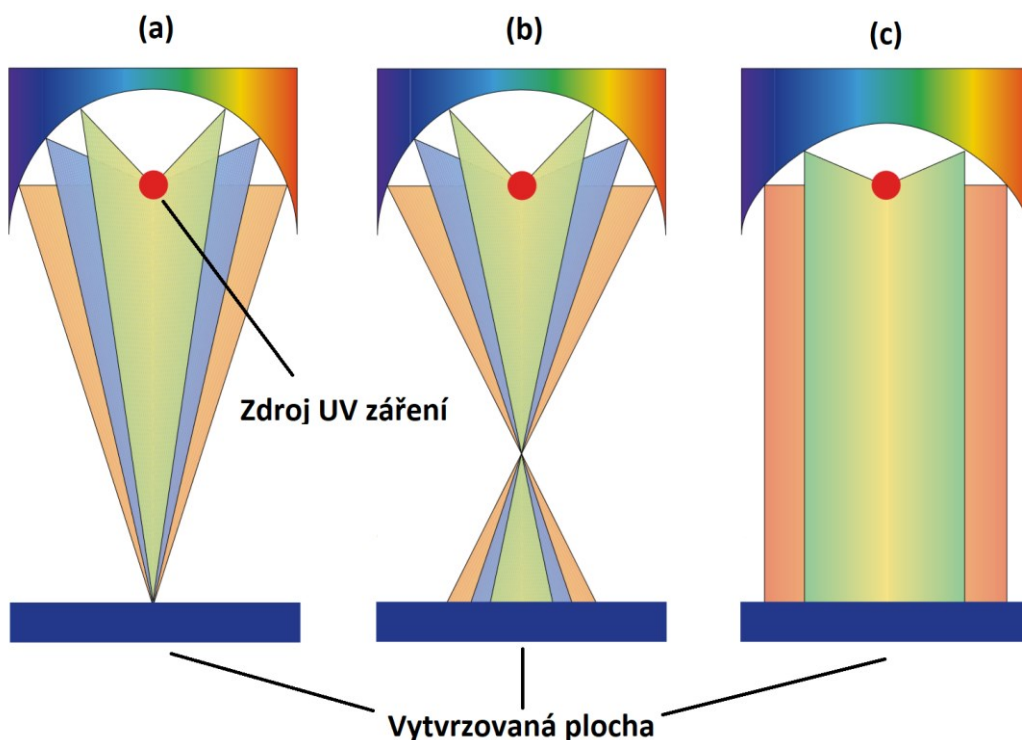
Vysokotlaké výbojky

Tyto výbojky pracují při parciálním tlaku, který převyšuje hodnotu 100 kPa [37]. Jejich životnost dosahuje vlivem vysokých provozních teplot 1000 až 2000 hodin, kdy samozřejmě záleží také na výrobci a hodnotě příkonu, který dosahuje až 10 kW [37]. Používají se především v oblasti fotolitografie nebo k bodovému vytvrzování, kde se přenášejí na malé oblasti [19]. S bodovým vytvrzováním se můžeme setkat například v lékařství, zubní technice nebo elektronických aplikacích [19].

Reflektor

Vzhledem k tomu, že lampy vyzařují UV záření do všech směrů, využívá se takzvaných reflektorů [18, 19, 27]. Ty umožňují soustředit záření na velmi malou plochu

nebo ho naopak rovnoměrně rozptylovat na větší plochy. Prvním typem jsou reflektory eliptické, které záření směřují na menší plochu [18, 27]. Tyto reflektory mohou být buď zaostřené, nebo nezaostřené [19, 27]. U zaostřených reflektorů se využívá maximální dopadající intenzity záření na substrát, ovšem nevýhodou tohoto systému může být extrémní zahřívání malé plochy, což může poškodit substrát [19, 27]. Alternativou je nezaostřený eliptický reflektor, který nabízí také poměrně vysokou intenzitu dopadajícího záření na malou plochu, ale substrát není tolik tepelně namáhán [19, 27]. Druhým typem je parabolický reflektor, který směřuje záření na celou plochu substrátu, kde ovšem záření nedosahuje tak vysokých intenzit, jako tomu bylo u systému eliptických [27]. Reflektory se většinou vyrábějí z hliníku [18]. Tyto základní druhy reflektorů jsou znázorněny na Obr. 11.



Obr. 11 Zaostřený eliptický reflektor (a), nezaostřený eliptický reflektor (b) a parabolický reflektor (c) (převzato a upraveno z [27]).

3 UV tvrditelné sítotiskové pasty

3.1 Vodivé pasty

UV tvrditelné vodivé pasty, které se dají nanášet metodou sítotisku, jsem po rešerši trhu našel pouze jednu od výrobce Polychem UV/EB International Corp.. Vodivých past je na trhu velké množství, ale pouze tepelně tvrditelných. Tepelně tvrditelné pasty poskytují například zahraniční firmy Henkel, Creative Materials, Applied Ink Solutions, Sun Chemical a Inkron. Z českých firem poskytuje tepelně tvrditelné vodivé pasty například firma Norte.

Produkt od výrobce Polychem UV/EB International Corp.s označením „FB2516-A“ je vysoce vodivá stříbrná pasta, kterou je možné nanášet metodou sítotisku [38]. Po vytvrzení má pasta hladký povrch a ostré okraje [38]. Kromě toho má pasta odolnost proti stárnutí při působení tepla až 125 °C a také vynikající flexibilitu [38]. Pasta je speciálně navržena pro tisk UHF RFID antén [38].

Tabulka 1 Parametry pasty FB2516-A od firmy Polychem UV/EB International Corp. [38].

Typ pasty	Stříbrná vodivá pasta
Plošná rezistivita	0,025 Ω/\square
Parametry síta	250-300 mesh
Vytvrzování	Rtuťová výbojka 800-1000 mJ/cm ² , následně 2 minuty při 120 až 150 °C

Tato pasta není vytvrzována pouze UV zářením, ale po osvitu probíhá ještě tepelné dotvrzení (viz Tabulka 1). Tato pasta tedy není tvrditelná pouze ultrafialovým zářením, nicméně je zde uvedena alespoň jako příklad, kdy se UV záření podílí na vytvrzení dané pasty.

3.2 Anizotropní vodivá lepidla

Prvním ze zástupců anizotropních vodivých past je produkt od firmy Applied Ink Solutions s označením „Z-904“ [39]. Tuto pastu je možno aplikovat metodou sítotisku s použitím kovových nebo monofilních polyesterových vláken [39]. Doporučuje se použít polyuretanovou těrku s tvrdostí 60 až 70 Shore [39]. Vytvrzení je možné provést

jakýmkoliv zdrojem UV záření, který vyzařuje vlnové délky nižší než 380 nm [39]. Nejvhodnější je ovšem použít středotlakou rtuťovou výbojku [39].

Tabulka 2 Parametry pasty Z-904 od firmy Applied Ink Solutions [39].

Dynamická viskozita	4 000 mPa·s (25 °C)
Barva	Tmavě modrá
Parametry síta	90-120 mesh
Provozní teplota	-50 až +150 °C
Vytvrzování	400-700 mJ/cm ²
Maximální doba skladování	6 měsíců při 25 °C v uzavřené nádobě

Dalším zástupcem je sítotisková pasta od společnosti Creative Materials s označením „124-24“ [40]. Toto vodivé anizotropní lepidlo je možné nanášet na polykarbonát, Kapton nebo polyetster [40]. K vytvrzení je doporučeno použít rtuťovou výbojku [40]. Dopad vytvrzení se může lišit v závislosti na výkonu výbojky a na vzdálenosti výbojky od substrátu [40]. Nicméně čas vytvrzení se obvykle pohybuje v řádu několika jednotek až desítek sekund, při vzdálenosti výbojky 15 až 25 centimetrů od substrátu [40].

Tabulka 3 Parametry pasty 124-24 od firmy Creative Materials [40].

Dynamická viskozita	Neuvedeno
Barva	Neuvedeno
Parametry síta	Neuvedeno
Provozní teplota	-55 až 140 °C
Vytvrzování	400-700 mJ/cm ²
Maximální doba skladování	3 měsíce v 25 °C, 6 měsíců v 5 °C

3.3 Dielektrické pasty

UV tvrditelných dielektrických past existuje na trhu celá řada. Těmito pastami se zabývá zejména firma Henkel, Creative Materials a Applied Ink Solutions. Používají se většinou k potisku flexibilních plošných spojů, kde ochraňují vodivé vrstvy. Mohou být použity také při tisku několikavrstvých flexibilních plošných spojů, kde od sebe oddělují jednotlivé vrstvy vodivého inkoustu.

3.3.1 Pasty od společnosti Henkel

První z řady výrobců, který se zabývá výrobou dielektrických inkoustů, je německá společnost Henkel. Tato společnost je jedním z předních světových výrobců lepidel, proto se s produkty této firmy můžeme setkat i ve všedním životě.

Prvním z dielektrických inkoustů od této společnosti je produkt s označím „LOCTITE EDAG 1020A E&C“, který slouží k izolaci elektrických flexibilních obvodů [41]. Má odolnost proti rozpouštědlům, vynikající flexibilitu a dobrou přilnavost polyesterovému filmu. Inkoust se doporučuje aplikovat polyesterovým sítem [41].

Tabulka 4 Parametry pasty LOCTITE EDAG 1020A E&C od firmy Henkel [41].

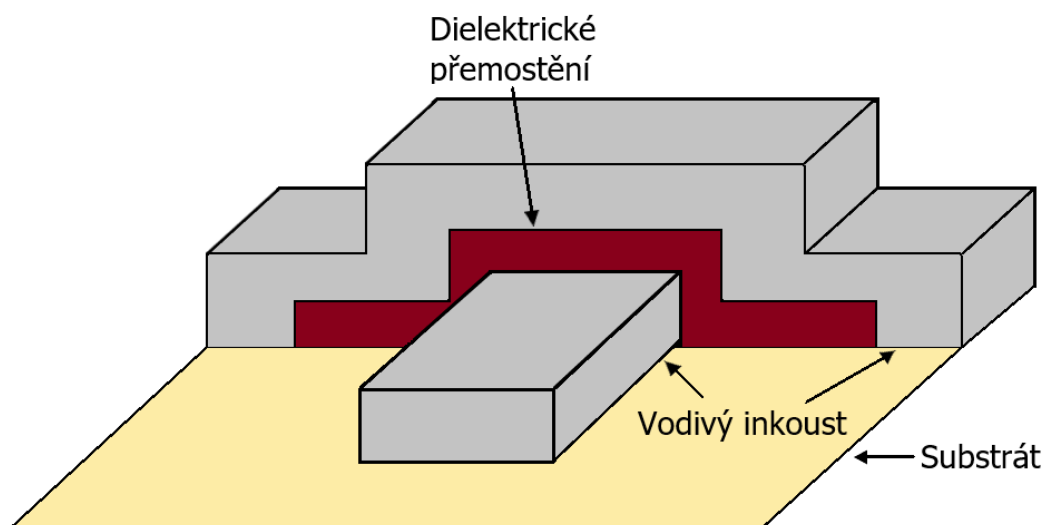
Dynamická viskozita	6 000 mPa·s (25 °C)
Barva	Průsvitná modrá
Parametry síta	160 až 280 mesh
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	2,6-3,2 J/cm ²
Elektrická pevnost	>40 V/μm
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	548 dní (5-25 °C) v uzavřené nádobě

Druhá pasta od této společnosti má označení „Electrodag PF-455B“ [42].

Tabulka 5 Parametry pasty Electrodag PF-455B od firmy Henkel [42].

Dynamická viskozita	13 500 mPa·s (25 °C)
Barva	Průsvitná zelená
Parametry síta	61-160 mesh podle typu síta
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	0,5 J/cm ²
Elektrická pevnost	>100 V/μm
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	>2,0·10 ⁹ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (5-25 °C) v uzavřené nádobě

Tato pasta je vhodná na tzv. dielektrické přemostění [42]. Tohoto principu se využívá u tištěné elektroniky, kde jsou dvě tenké vodivé vrstvy přemostěny v jednom místě dielektrikem a díky tomu se můžou tyto vodivé cesty překrývat, jak můžeme vidět na Obr. 12 [43].



Obr. 12 Dielektrické přemostění dvou vodivých cest (překresleno podle [43]).

Třetí dielektrická pasta od společnosti Henkel nese označení „LOCTITE EDAG 452SS E&C“ [44]. Tato pasta je vhodná k ochraně a izolaci při výrobě nízkonapěťových tištěných obvodů [44]. Pro tuto pastu je doporučeno monofilní síto s 61 až 120 vlákný na centimetr nebo kovové síto s 77 až 160 vlákný na centimetr [44].

Tabulka 6 Parametry pasty LOCTITE EDAG 452SS E&C od firmy Henkel [44].

Dynamická viskozita	17 500 mPa·s (25 °C)
Barva	Zelená
Parametry síta	61-160 mesh podle typu síta
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	0,5 J/cm ²
Elektrická pevnost	> 60 V/μm
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	> 2,0·10 ⁹ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (5-25 °C) v uzavřené nádobě

Další dielektrickou pastou, kterou nabízí společnost Henkel, je „Electrodag PD-038“ [45]. Pro aplikaci této pasty je doporučeno použít síto s polyesterovými vlákný s 32 až 80 vlákný na centimetr [45]. Pokud jde o těrku, je možné použít tvrdost 60 až 75 Shore [45].

Tabulka 7 Parametry pasty Electrodag PD-038 od firmy Henkel [45].

Dynamická viskozita	15 000-25 000 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá
Parametry síta	32-80 mesh
Provozní teplota	Maximálně 175 °C
Vytvrzování	0,3-0,6 J/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	>2,0·10 ⁹ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (max 60 °C) v uzavřené nádobě

3.3.2 Pasty od společnosti Creative materials

První ze dvou dielektrických past od společnosti Creative Materials je pasta s označením „125-17M“ [46]. Používá se k ochraně vodivých cest na flexibilních substrátech nebo jako dielektrické přemostění [46]. Tato pasta může být použita na substráty z Kaptonu, polykarbonátu, polyesteru a epoxidu [46]. Výrobce doporučuje použít polyesterové síto s 170 až 270 mesh nebo kovové síto s 200 až 400 mesh [46]. V datovém listu není uvedena energie pro vytvrzování, ale pouze to, že by se pro vytvrzování měla používat rtuťová výbojka vzdálená 15 až 25 centimetrů od substrátu [46]. Typická doba vytvrzení při dodržení těchto podmínek je řádek desítek sekund [46].

Tabulka 8 Parametry pasty 125-17M od firmy Creative Materials [46].

Dynamická viskozita	Neuvedeno
Barva	Čirá
Parametry síta	Neuvedeno
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	V textu
Elektrická pevnost	14 V/μm
Rezistivita	7,1·10 ¹⁵ Ω·cm
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	6 měsíců (25 °C) v uzavřené nádobě

Druhou pastou od tohoto výrobce je dielektrický inkoust „116-20“ [47]. Stejně jako předchozí inkoust se využívá jako izolační vrstva vodivých inkoustů u flexibilních substrátů [47]. Tak jako u první pasty od tohoto výrobce ani u této nebyla uvedena energie pro vytvrzování. Nicméně doporučený postup při vytvrzování této pasty je stejný jako v předchozím odstavci .

Tabulka 9 Parametry pasty 116-20 od firmy Creative Materials [47].

Dynamická viskozita	20 000 mPa·s
Barva	Čirá
Parametry síta	170-400 mesh podle typu síta
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	V textu
Elektrická pevnost	14 V/μm
Rezistivita	$7,1 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	6 měsíců (25 °C) v uzavřené nádobě

3.3.3 Pasty od společnosti Applied Ink Solutions

První z řady dielektrických past od firmy Applied Ink Solutions je produkt s označením „PE-UV3010“ [48]. Používá se k izolaci tištěných obvodů nebo k ochraně LED prvků u membránových spínačů [48]. Kromě sítotisku lze tuto pastu aplikovat všemi konvenčními metodami [48].

Tabulka 10 Parametry pasty PE-UV3010 od firmy Applied Ink Solutions [48].

Dynamická viskozita	13 000 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá
Parametry síta	Neuvedeno
Provozní teplota	-60 až +150 °C
Vytvrzování	Vlnové délky < 380 nm, 700-900 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	$3,6 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$
Plošná rezistivita	$3,8 \cdot 10^{14} \Omega/\square$
Maximální doba skladování	1 rok (25 °C) v uzavřené nádobě

Druhá dielektrická pasta od této společnosti má označení „PE-UV2530“ [49]. Tato pasta je navržena tak, aby měla dobrou přilnavost k polyesterovým fóliím, stříbrným a měděným vodivým inkoustům používaných u flexibilních obvodů [49].

Tabulka 11 Parametry pasty PE-UV2530 od firmy Applied Ink Solutions [49].

Dynamická viskozita	1 400-2 600 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá, zelená, modrá, černá
Parametry síta	305-390 mesh
Provozní teplota	-50 až +150 °C
Vytvrzování	vlnové délky < 380 nm, 400-700 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	1,2 · 10 ¹⁴ Ω·cm
Plošná rezistivita	5,0 · 10 ¹⁴ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (25 °C) v uzavřené nádobě

Další dielektrickou pastou je produkt s označením „PE-UV1006S“ [50]. Pro aplikaci sítotiskem je doporučeno použít polyuretanovou těrku s tvrdostí 60 až 70 Shore a síto s hustotou vláken 305 až 390 mesh [50].

Tabulka 12 Parametry pasty PE-UV1006S od firmy Applied Ink Solutions [50].

Dynamická viskozita	6 100 mPa·s (25 °C)
Barva	Žlutá
Parametry síta	305-390 mesh
Provozní teplota	-60 až +200 °C
Vytvrzování	vlnové délky < 350 nm, 600-900 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	3,3 · 10 ¹⁴ Ω·cm
Plošná rezistivita	2,9 · 10 ¹⁴ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (25 °C) v uzavřené nádobě

Poslední uvedenou pastou od tohoto výrobce je produkt s označením „PE-UV2531“ [51]. Má vynikající přilnavost k vodivým inkoustům, polyesterovým fóliím [51]. Proto se pasta dá použít k ochraně tištěných flexibilních obvodů nebo u membránových spínačů [51]. Tento materiál se po vytvrzení také vyznačuje vysokou pružností, pevností a odolností proti vlhkosti [51]. Může být jako většina zde uvedených dielektrických inkoustů vytvrzen během několika vteřin, což umožňuje jakoukoliv sériovou výrobu [51]. Při aplikaci sítotiskem je doporučeno použít kovové nebo monofilní polyesterové síto [51].

Tabulka 13 Parametry pasty PE-UV2531 od firmy Applied Ink Solutions [51].

Dynamická viskozita	7 460 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá, zelená, modrá, černá
Parametry síta	<190 mesh
Provozní teplota	-50 až +150 °C
Vytvrzování	Vlnové délky <380 nm, 400-700 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	1,2·10 ¹⁴ Ω·cm
Plošná rezistivita	5,0·10 ¹⁴ Ω/□
Maximální doba skladování	1 rok (25 °C) v uzavřené nádobě

3.3.4 Pasty od společnosti Gwent Group

Posledním výrobcem sítotiskových UV tvrditelných inkoustů uvedeným v této práci je společnost Gwent Group sídlící ve Velké Británii. Prvním produktem od této firmy je pasta s označením „D2150901D1“ [52].

Tabulka 14 Parametry pasty D2150901D1 od firmy Gwent Group [52].

Dynamická viskozita	1 500-2 500 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá, zelená
Parametry síta	150-180 mesh
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	450 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	Uvedena na výrobku

Druhým produktem je pasta s označením „D2151013D1“ [53]. Tato pasta je navržena pro sítotisk na polymerní substráty a ochranu vodivých cest tištěných obvodů [53].

Tabulka 15 Parametry pasty D2151013D1 od firmy Gwent Group [53].

Dynamická viskozita	1 500-2 500 mPa·s (25 °C)
Barva	Žlutá, červená, modrá, černá
Parametry síta	150-180 mesh
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	200-400 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	Uvedena na výrobku

Poslední uvedená pasta v této práci od společnosti Gwent group nese označení „D2150914D“ [54]. Tato dielektrická pasta je vhodná pro sítotisk, kdy výrobce doporučuje použít polyesterové síto s 150 až 180 vláken na centimetr (viz Tabulka 16) [54].

Tabulka 16 Parametry pasty D2150914D1 od firmy Gwent Group [54].

Dynamická viskozita	1 500-2 500 mPa·s (25 °C)
Barva	Čirá, matná
Parametry síta	150-180 mesh
Provozní teplota	Neuvedeno
Vytvrzování	200-400 mJ/cm ²
Elektrická pevnost	Neuvedeno
Rezistivita	Neuvedeno
Plošná rezistivita	Neuvedeno
Maximální doba skladování	Uvedena na výrobku

4 Přehled UV vytvrzovacích systémů

Na trhu se vyskytuje velké množství UV vytvrzovacích systémů v podobě vytvrzovacích boxů, ručních systémů nebo vytvrzovacích zařízení s pásovým dopravníkem. Těmto systémům se věnují například společnosti Uvitron, Dymax, Opsytec Dr. Gröbel, Henkel nebo Panasonic.

Vytvrzovací boxy mají většinou širší spektrum aplikací, pro které se dají využít. Těmito aplikacemi mohou být, samozřejmě kromě UV vytvrzování materiálů, například dezinfekce, vytvrzování lepidel nebo testování umělého stárnutí materiálů. U těchto boxů si většinou můžeme ručně nastavit například dobu expozice nebo intenzitu ozáření. Nastavením intenzity ozáření vytvrzovaného vzorku získáme celkovou energii, která dopadne na vytvrzovací plochu za jednotku času. Tyto systémy většinou využívají různé typy výbojek (rtuťové, halogenidové apod.) nebo diodová pole. Výbojky lze u vytvrzovacích boxů ručně vyměnit, po uplynutí doby doporučených provozních hodin uvedených výrobcem. U LED vytvrzovacích boxů lze většinou zvolit vlnovou délku použitých diod pro osvitové pole. Tyto vlnové délky jsou typicky 365 nm, 385 nm, 395 nm nebo 405 nm. Někteří výrobci uvádějí graf spektra vlnových délek použité výbojky či LED nebo graf degradace intenzity vyzařování použité výbojky v závislosti na čase.

UV vytvrzovací systémy mohou být vybaveny i dopravním pásem, který zajišťuje rovnoměrný pohyb vytvrzovaného vzorku pod vytvrzovací jednotkou. Tyto systémy se většinou používají pro sériovou výrobu v průmyslových provozech.

Ruční UV vytvrzovací systémy mohou být buď bodové, nebo plošné. Vyznačují se vysokou intenzitou ozáření, což ale samozřejmě závisí na vzdálenosti vytvrzovací hlavičky od vytvrzovaného vzorku. U těchto systémů výrobce většinou uvádí graf intenzity ozáření v závislosti na výšce vytvrzovací hlavičky nad vzorkem. Tato měření se provádějí radiometrem v určitém spektru vlnových délek. Výhodou těchto systémů je jejich malá hmotnost, díky které s nimi obsluha může jednoduše manipulovat nebo je přenášet.

Vzhledem k množství výrobců a jednotlivých systémů, které se na trhu vyskytují, je níže vždy uveden alespoň jeden zástupce od zmíněných kategorií. Většina systémů má

navíc několik verzí, které se liší například vytvrzovací plochou, výkonem nebo intenzitou ozáření vzorku a není možné je v této práci všechny uvést a popsat.

4.1 UV vytvrzovací boxy

4.1.1 UV vytvrzovací systém od společnosti Dymax

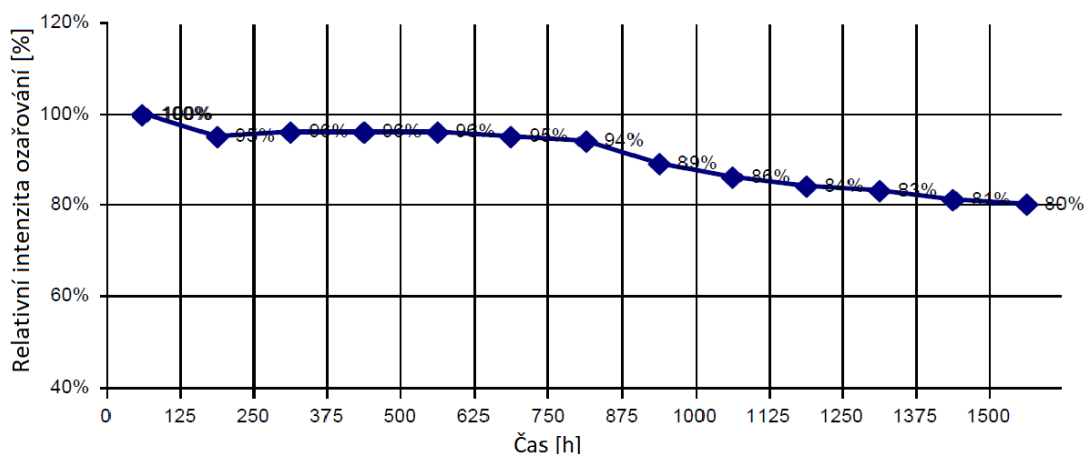
Vytvrzovací box od společnosti Dymax je dostupný ve dvou modelech, kterými jsou Dymax Flood 2000-EC a Dymax Flood 5000-EC, který můžeme vidět na Obr. 13 [55]. Model Dymax Flood 5000-EC disponuje vytvrzovací plochou 12,75 cm x 12,75 cm na kterou dopadá intenzita ozáření 225 mW/cm² [55]. Dopadající intenzita se měří radiometrem v části spektra UV-A (320 nm až 390 nm) ve výšce 7,5 cm od spodní hrany reflektoru [55]. Druhý model Dymax Flood 2000-EC má maximální vytvrzovací plochu 20,32 cm x 20,32 cm a dopadající intenzitu ozařování 75 mW/cm² [55]. K chlazení těchto systémů se používá vzduch [55]. Nákupní cena tohoto zařízení se pohybuje okolo \$5000.

K těmto dvěma modelům může být přidána tzv. světelná závěrka [55, 56]. Toto zařízení slouží k odstínění elektromagnetického záření od vytvrzovaného výrobku bez nutnosti vypínat výbojku [56]. Tím chráníme obsluhu před ozářením a také můžeme prodloužit životnost výbojky, protože opakované zapínání a vypínání jí škodí [56]. Světelnou závěrku lze ovládat ručně nebo pomocí časového spínače [56].



Obr. 13 UV vytvrzovací systém Dymax Flood 5000-EC (převzato z [57]).

Oba tyto systémy mohou využívat halogenidovou nebo rtuťovou výbojku [55]. Tyto výbojky jsou ručně vyměnitelné, proto si uživatel může nechat doporučit typ výbojky výrobcem podle potřebné aplikace UV tvrditelného systému [55]. Podle měření halogenidové výbojky výrobcem, která se v těchto systémech běžně používá, poklesne její intenzita ozařování o 20% po 1500 provozních hodinách, jak můžeme vidět na Obr. 14 [55].



Obr. 14 Pokles relativní intenzity ozařování halogenidové výbojky od společnosti Dymax v závislosti na čase (převzato a upraveno z [55]).

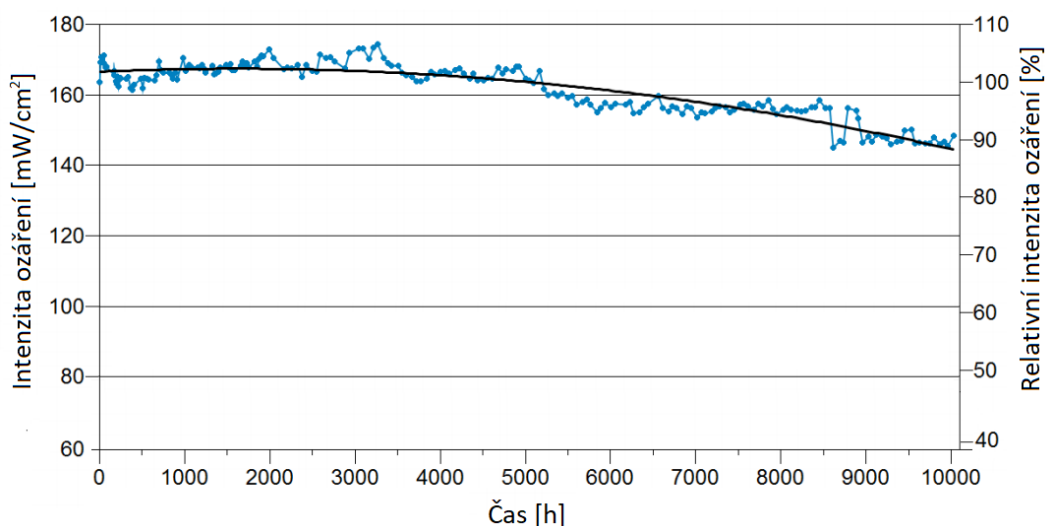
4.1.2 UV vytvrzovací box od společnosti Uvitron

Tento systém s označením „INTELLIRAY“, zobrazený na Obr. 15, poskytuje vytvrzovací plochu 20 cm x 15 cm [58]. Je vybaven halogenidovou výbojku o výkonu 400 W nebo 600 W a parabolickým reflektorem [58]. Na vytvrzovací plochu dopadá intenzita ozáření 115 mW/cm² při výkonu výbojky 400W nebo 175 mW/cm² při výkonu výbojky 600W v části spektra UV-A (320 nm až 390 nm) [58]. Vytvrzování je řízeno časovým spínačem a čas vytvrzování se zobrazuje na displeji [58]. Dále na displeji můžeme sledovat celkový provozní čas používané výbojky v hodinách [58]. U tohoto systému můžeme také ručně kontrolovat vyzařovací intenzitu výbojky a zvolit tak vhodnou intenzitu pro citlivější materiály [58]. I tento vytvrzovací box je vybaven světelnou závěrkou [58]. Při použití této závěrky vytvrzovací jednotka automaticky sníží výkon výbojky o polovina a tím snižuje vyzařené teplo [58]. Kromě klávesnice a displeje na zařízení, můžeme systém ovládat i přes PLC jednotku nebo přes počítač [58].



Obr. 15 UV vytvrzovací box INTELLIRAY 600 od společnosti Uvitron (převzato z [59]).

I u tohoto vytvrzovacího systému bylo provedeno měření degradace výbojky. Výsledky tohoto měření můžeme vidět na Obr. 16. Jak je patrné, tak intenzita ozáření klesla za 10 000 provozních hodin z hodnoty 170 mW/cm^2 na 150 mW/cm^2 , což tedy znamená, že pokles intenzity ozáření je přibližně 10%. Intenzita ozáření byla měřena radiometrem ve vzdálenosti 7,5 cm od výbojky [60].



Obr. 16 Pokles relativní intenzity ozařování halogenidové výbojky o výkonu 600 W od společnosti Uvitron v závislosti na čase (převzato a upraveno z [60]).

4.1.3 UV vytvrzovací box od společnosti Opsytec Dr. Gröbel

UV box s označením „BSM-03“ od společnosti Opsytec Dr. Gröbel je speciálně navržen pro UV vytvrzování materiálů [61]. Na plochu 60 cm x 40cm dopadá intenzita ozáření až 150 mW/cm² [61]. Uvnitř boxu dosahuje teplota až 45 °C, kterou snižuje vzduchové chlazení [61]. Vytvrzování zajišťuje jedna výbojka, u které udává výrobce životnost 1 000 až 3 000 hodin [61]. Systém je také vybaven světelnou závěrkou, která se ovládá automaticky podle nastaveného času na řídicí jednotce a radiometrickými senzory, které na řídicí jednotce zobrazují intenzitu ozáření [61]. Na obrazovce řídicí jednotky můžeme také vidět energii, která za uplynulý čas vytvrzování na vzorek dopadla udanou v J/cm² [61]. Celkovou dopadající energii si také můžeme na řídicí jednotce zvolit [61]. Podle toho se automaticky upraví čas vytvrzování v závislosti na okamžité intenzitě ozáření změřené radiometrem umístěným uvnitř boxu [61]. Toho můžeme využít u vytvrzování síťotiskových past, kde máme udanou celkovou energii záření, která by měla na vytvrzovaný vzorek dopadnout. Vytvrzovací box společně s řídicí jednotkou můžeme vidět na Obr. 17.



Obr. 17 UV vytvrzovací box s řídicí jednotkou od společnosti Opsytec Dr. Gröbel (převzato a upraveno z [61]).

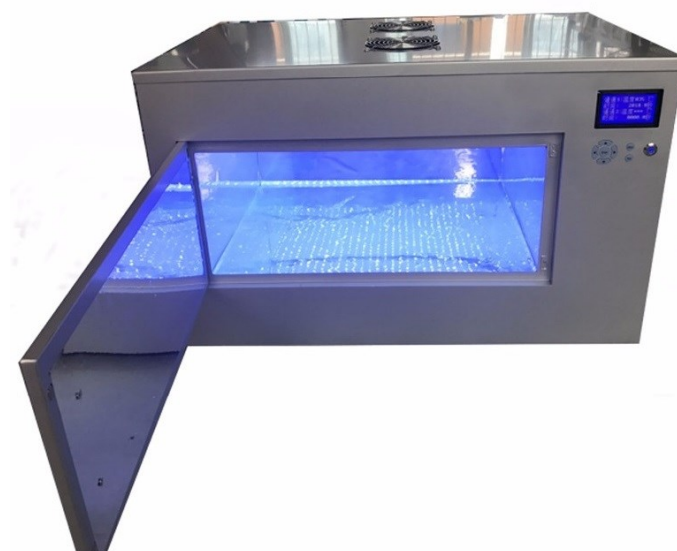
4.1.4 UV LED vytvrzovací box od společnosti Opsytec Dr. Gröbel

Další systém v kategorii UV vytvrzovací boxy je systém s označením „BSL-02“ od společnosti Opsytec Dr. Gröbel, který je dostupný ve variantách HO a ECO [62]. Box obsahuje LED pole s diodami o vlnových délkách 365 nm, 385 nm, 395 nm nebo 405 nm [62]. Vhodný typ diody si může zákazník zvolit podle typu aplikace [62]. Pro vytvrzování síťotiskových past bych zvolil diodu s vlnovou délkou 365 nm, která může vzorek ozářit intenzitou 100 mW/cm² (varianta ECO) nebo 200 mW/cm² (varianta HO) [62].

Vytvrzovací plocha je 46 cm x 36 cm a vzdálenost plochy od výbojky je 25 cm [62]. Provozní teploty uvnitř boxu, chlazeného vzduchem pomocí ventilátorů, se pohybuje okolo 40 °C [62]. Stejně jako předchozí systém od této společnosti i tento disponuje měřicími radiometry uvnitř boxu a kontrolní jednotkou [62].

4.1.5 UV LED vytvrzovací box od společnosti Height-LED

UV LED vytvrzovací box od společnosti Height-LED zobrazený na Obr. 18 poskytuje intenzitu vyzařování až 700 mW/cm² a vytvrzovací plochu 22 cm x 23 cm (při výrobě na zakázku může být vytvrzovací plocha upravena) [63]. Systém je dostupný s LED diodovým polem o vlnových délkách 365 nm, 385 nm, 395 nm nebo 405 nm [63]. Typ LED diod se může zákazník zvolit podle typu aplikace [63]. Doba vytvrzování se ovládá na přední straně boxu. Diodové pole je chlazeno vzduchem pomocí ventilátorů [63].



Obr. 18 UV LED vytvrzovací systém od společnosti Height-LED (převzato z [64]).

4.2 Pásové UV vytvrzovací systémy

Dalším typem UV vytvrzovacích systémů mohou být systémy s pásovým dopravníkem. Jako příklad je zde uveden systém od společnosti Dymax s označením „UVC-5“, zobrazený na Obr. 19 [65]. Tento systém je ideální pro vytvrzování menších objektů, protože disponuje dopravním pásem o šířce 12 cm [65]. Vzdálenost mezi výbojkou a pásem lze ručně nastavit na hodnotu 1,2 cm až 6 cm stejně jako rychlost, kterou lze zvolit v intervalu od 1 m/min až 10 m/min [65]. Systém obsahuje jednu halogenidovou nebo rtuťovou výbojku podle typu aplikace [65]. Šířka celého systému je

33 cm, délka 70 cm a výška 28 cm. Intenzita ozáření ve vzdálenosti 1 cm od výbojky je 800 mW/cm^2 [65]. Tato intenzita byla změřena výrobcem pomocí radiometru v části spektra UV-A (320 nm až 390 nm) [65].



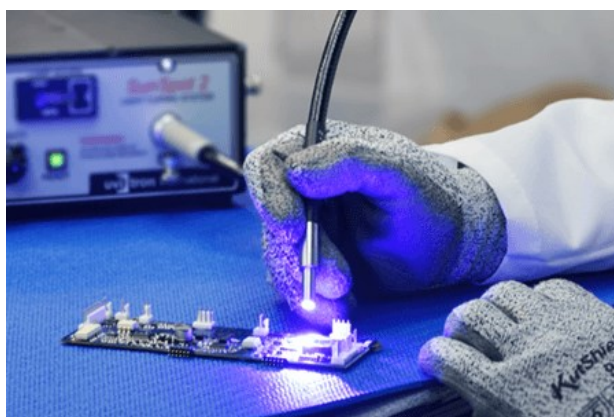
Obr. 19 Pásový UV vytvrzovací systém od společnosti Dymax (přavzato z [65]).

4.3 Bodové UV vytvrzovací systémy

4.3.1 Bodový vytvrzovací systém od společnosti Uvitron

Systém s označením „SunSpot SM“ je speciálně navržen pro ruční vytvrzování malých ploch, jako například menší opravy plošných spojů UV tvrditelným materiálem, jak můžeme vidět na Obr. 20 [66]. Osvit zajišťuje rtuťová výbojka [66].

U bodového vytvrzování se mění intenzita ozáření podle vzdálenosti výbojky od ozařovaného tělesa. U systému „SunSpot SM“ uvádí výrobce intenzitu vyzařování výbojky (tedy intenzitu v nulové vzdálenosti od výbojky) na $10,35 \text{ W/cm}^2$ [67]. Se vzrůstající vzdáleností intenzita ozáření samozřejmě klesá a například ve vzdálenosti 3,8 cm od výbojky už je pouze $0,51 \text{ W/cm}^2$ [67].



Obr. 20 Ruční bodový UV vytvrzovací systém od společnosti Uvitron (převzato z [68]).

4.3.2 Bodový UV vytvrzovací LED systém od společnosti Dymax

Bodová UV vytvrzovací jednotka „BlueWave MX-150“ od společnosti Dymax se skládá z řídicí jednotky s dotykovou obrazovkou a LED vytvrzovací hlavičce [69]. Uživatel si může vybrat ze tří typů LED s odlišnou vlnovou délkou (365 nm, 385 nm a 405 nm) [69]. Na rozdíl od bodových vytvrzovacích systémů s rtuťovou nebo halogenidovou výbojkou je u této jednotky umístěn zdroj elektromagnetického záření přímo ve vytvrzovací hlavičce, což eliminuje ztrátu intenzity vyzařování v dlouhých nebo ohnutých vedeních [69].

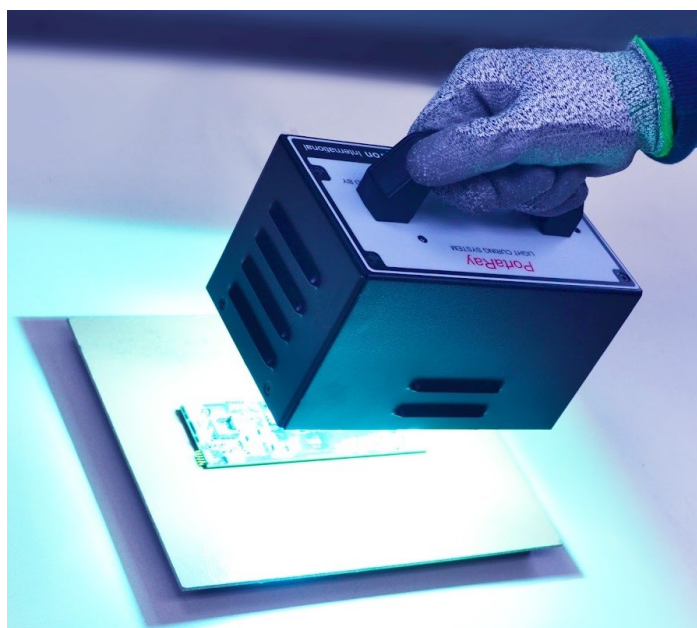
Vyzařovací intenzita systému s diodou o vlnové délce 365 nm je 24 W/cm^2 [69]. Radiometrem změřená hodnota intenzity ozáření změřené výrobcem ve vzdálenosti 2,5 cm od LED je $0,8 \text{ W/cm}^2$ [69].



Obr. 21 Bodový UV LED vytvrzovací systém s řídicí jednotkou od společnosti Dymax (převzato z [69]).

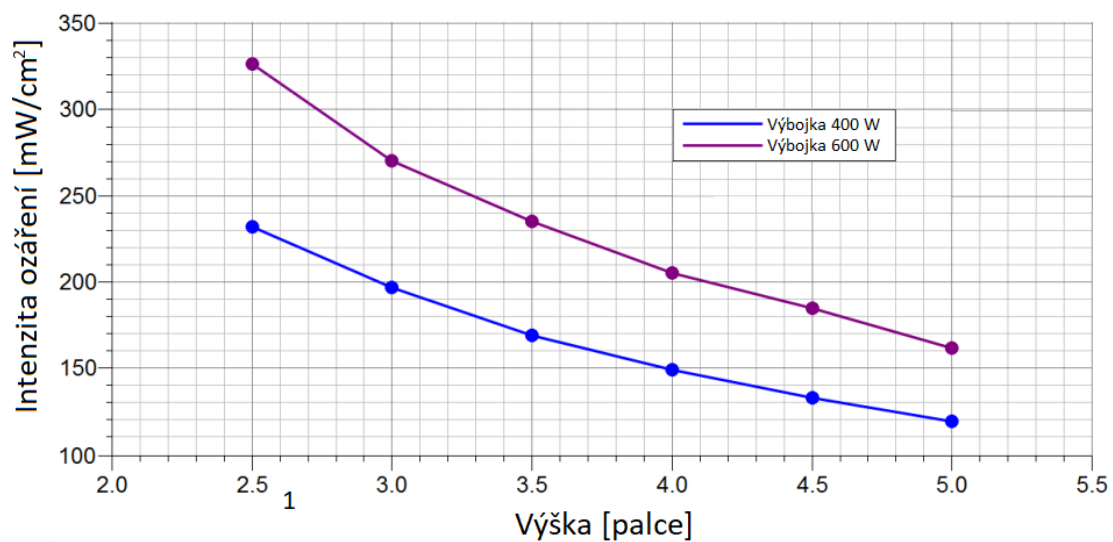
4.4 Ruční plošné UV vytvrzovací systémy

Posledním druhem vytvrzovacích systémů zmíněných v této práci jsou ruční plošné vytvrzovací systémy. Jako příklad tohoto typu systému je zde uvedeno zařízení s označením „PORTARAY“ od společnosti Uvitron [70]. Je to přenosné zařízení s efektivní plochou vytvrzení až 12,7 cm x 12,7 cm [70]. Systém se skládá z vytvrzovací hlavičky, která je zobrazena na Obr. 22 a vytvrzovacího boxu, do kterého lze hlavu umístit [70]. S vytvrzovací hlavičkou lze ručně manipulovat.



Obr. 22 Ruční plošný UV vytvrzovací systém (převzato z [71]).

Vytvrzovací hlavička o váze 1,5 kg obsahuje halogenidovou výbojku o výkonu 400 W nebo 600 W s typickou životností 2000 provozních hodin [70]. U tohoto systému se využívá buď parabolický reflektor, nebo zaostřený eliptický reflektor, který efektivně osvítil plochu 12,7 cm x 7,6 cm [70]. Intenzita ozáření, která dopadá na vytvrzovanou plochu, závisí na vzdálenosti vytvrzovací hlavičky, což je zobrazeno na Obr. 23. Na tomto obrázku můžeme vidět závislost intenzity ozáření na vzdálenosti dvou vytvrzovacích hlaviček s výbojkami 600 W a 400 W s parabolickým reflektorem [72].



Obr. 23 Závislost intenzity ozáření na vzdálenosti výbojky o výkonu 400 W a 600 W (převzato z [72]).

Závěr

Cílem této práce byl průzkum trhu v oblasti UV tvrditelných sítotiskových past a dostupných systémů pro jejich vytvrzení. Je zde zmíněno celkem 16 těchto past, z čehož je většina dielektrických. Ty se většinou používají pro potisk flexibilních substrátů, kde slouží jako ochrana a izolace vodivých cest. Vodivé UV tvrditelné pasty jsou na trhu téměř nedostupné. U všech zmíněných past v této práci je uveden výrobce a v tabulkách jsou shrnuty jejich jednotlivé parametry. Pro UV vytvrzení sítotiskové pasty je podstatné především množství celkové energie záření, která na její plochu dopadne. To způsobí polymeraci, při které pasta změní své vlastnosti a skupenství. Aby byly dlouhodobě zaručeny požadované vlastnosti pasty, je důležité jí skladovat v předepsaných podmínkách. Doporučuje se skladování v chladném a temném prostředí, protože velký dopad světelného záření by mohl její vlastnosti negativně ovlivnit. V datových listech od výrobců většinou můžeme zjistit i doporučené parametry a materiál síta, případně i materiál a tvrdost těrky.

V další části jsou popsány dostupné systémy pro vytvrzení těchto past. Systémů je na trhu velmi mnoho a jejich výrobou se zabývá velké množství firem. Proto je u každé kategorie vždy uveden alespoň jeden zástupce. Některé z těchto systémů disponují řídicí jednotkou, která zobrazuje například čas vytvrzování a dopadající intenzitu ozáření změřenou radiometrem. Z těchto hodnot je systém schopen dopočítat celkovou energii záření, která na plochu dopadla. Velikost dopadající energie můžeme u některých typů zařízení zadat také ručně a systém dopočítá čas vytvrzení, podle intenzity ozáření vzorku. . Toho lze samozřejmě využít při vytvrzování past, u kterých je doporučená hodnota energie ozáření udána výrobcem. U ručních vytvrzovacích systémů závisí dopadající intenzita ozáření především na vzdálenosti hlavice od vytvrzované plochy. Pro vytvrzování se většinou používají výbojky nebo LED. Výbojky bývají vyměnitelné a dají se od většiny výrobců pořídit i jednotlivě. Jejich cena se pohybuje okolo \$150 za kus. Bohužel výrobci většinou nezvěřejňují ceny kompletních systémů. Cena je uvedena pouze u vytvrzovacího boxu společnosti Dymax, která je \$5000.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *MONTÁŽ V ELEKTRONICE Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] ŘEBOUN, Jan. *Studijní materiál k předmětu ITE1, Tisková a flexibilní elektronika-tiskové technologie*. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření. 2017.
- [3] NOVAKOVIĆ, Dragoljub, Nemanja KAŠIKOVIĆ, Gojko VLADIĆ a Magdolna PÁL. 15 - Screen Printing BT - Printing on Polymers. In: *Printing on Polymers*. B.m.: William Andrew Publishing, 2016, s. 247–261. ISBN 978-0-323-37468-2.
- [4] LEŠIKAR, Adam. *Úvod do technologie sítotisku*. Praha: Nakladatelství grafické školy, 2010. ISBN 80-86824-09-8.
- [5] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Sítotisk (serigrafie). Střední škola průmyslová a umělecká, Opava* [online]. 2011 [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_IV/VY_32_INOVACE_B-05-17.pdf
- [6] TISKOVÁ TECHNIKA – SÍTOTISK. *Albrechtova střední škola, Český Těšín* [online]. [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://sshopct.cz/polygrafie/all/8/data/sitotisk.historie.rozdeleni.zakl.adni.pojmy.pdf>
- [7] FOSTER, Christopher W., Rashid O. KADARA a Craig E. BANKS. *Fundamentals of Screen-Printing Electrochemical Architectures*. B.m.: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-25193-6.
- [8] ŘEŘIČHA, Tomáš. *Studijní materiál k předmětu Technologie elektroniky, 3. cvičení. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni*.
- [9] SÍTOTISK. *STŘEDNÍ ŠKOLA HOTELOVÁ, OBCHODNÍ A POLYGRAFICKÁ, ČESKÝ TĚŠÍN* [online]. 2011 [vid. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://sshopct.cz/polygrafie/all/8/data/2.sitotisk-predlohy.ramy.a.sitoviny.pdf>
- [10] SOUKUP, R., A. HAMACEK a J. REBOUN. *Advanced screen printing for the fabrication of organic humidity sensors. 2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference* [online]. 2012 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6542183/>
- [11] *Tech Tips for Screen Printers. SaatiPrint U.S.A.* [online]. 2001 [vid. 2018-03-09]. Dostupné z: http://www.catspitproductionsllc.com/Documents/SaatiPrint_TechTip_Handbook.pdf
- [12] *Popis tisku přes planžetu. SEMACH výroba plošných spojů* [online]. [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: http://www.semach.cz/pdf/popis_smt
- [13] CLARKE, Joe a Coleen LYNCH. *M&R Professional Screen Printing Series*. Chicago: M&R Printing Equipment, 2001.
- [14] SOUKUP, R. *Technical Challenges of Screen Printing Deposition for Ultra-fine Patterns. ElectroScope* [online]. 2011 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/619>
- [15] Sefar® pet 1500. *Sefar Inc.* [online]. [vid. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.sefar.com/data/docs/en/10855/PS-PDF-SEFAR-PET1500-AL-EN.pdf?v=1.9>
- [16] *Thermal expansion. Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion

- [17] SÍTOTISK. *STŘEDNÍ ŠKOLA HOTELOVÁ, OBCHODNÍ A POLYGRAFICKÁ, ČESKÝ TĚŠÍN* [online]. 2011 [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://sshopct.cz/polygrafie/all/8/data/3.sitotisk-sterky.pdf>
- [18] SCHWAL, Reinhold. *UV Coatings: Basics, Recent Developments and New Applications*. B.m.: Elsevier Science, 2006. ISBN 978-0444529794.
- [19] KOLESKE, J. *Radiation Curing of Coatings*. Philadelphia: ASTM, 2001. ISBN 0803120958.
- [20] OZONE AND UV-RADIATION. *University of Oslo* [online]. 2009 [vid. 2018-05-26]. Dostupné z: http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3610/h09/undervisningsmateriale/compendium/Ozone_and_UV_2009.pdf
- [21] RUSŇÁK, K. *Radiometrie a fotometrie* [online]. 2016 [vid. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYI1/Radiometrie-a-fotometrie.pdf>
- [22] Fotometrie a radiometrie, Učební text k přednášce UFY102. *Fyzikální ústav UK* [online]. [vid. 2018-04-07]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf
- [23] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 9788070806173.
- [24] KUČERA, Vladimír. *Fotopolymerace*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická.
- [25] TEJKL, Miroslav. *UV zářením vytvrzované inkousty pro inkjet tisk*. Pardubice, 2012. Dizertační práce. Univerzita Pardubice. Fakulta chemicko-technologická.
- [26] STASIAK, Michal. *Vytvrzování cykloalifatických epoxidů pomocí UV záření*. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická.
- [27] LIGHT CURE ADHESIVE TECHNOLOGY GUIDE. *Henkel Corporation* [online]. 2017 [vid. 2018-03-27]. Dostupné z: http://na.henkel-adhesives.com/us/content_data/405675_henkel_adhesives_na_LightCure_Tech_Guide_201703_BR.pdf
- [28] LEE, Pamela. UV LED TECHNOLOGY. *UV+EB Technology Magazine* [online]. 2015 [vid. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/5426/deb825215e0fd77a8df077af2cded3c2d6ba.pdf>
- [29] Vytvrzování ochranných laků a hmot pomocí UV-LED. *Odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky* [online]. 2016 [vid. 2018-03-28]. Dostupné z: http://files.interconti.cz/200000562-922e993296/Vytvrzování_ochranných_laků_a_hmot_pomocí_UV-LED.pdf
- [30] UV LED Inks and Curing. *EVERY DENNISON CORPORATION* [online]. 2016 [vid. 2018-03-28]. Dostupné z: https://label.averydennison.com/content/dam/averydennison/lpm-responsive/doc/technical-bulletins/technical_marketing_bulletins/uv-led-inks-technical-bulletin.pdf
- [31] LED Curing. *Flint Group* [online]. 2014 [vid. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.flintgrp.com/media/4254/ledppt.pdf>
- [32] KARLICEK, Robert a Jennifer HEATHCOTE. UV-LED. *RadTech International* [online]. 2013 [vid. 2018-04-18]. Dostupné z: http://www.radtech.org/uvledbook/RadTech_eBook1_UVLED.pdf
- [33] UHP-T-LED-390 - Ultra High Power UV LED Light Source. *Prizmatix* [online]. [vid. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.prizmatix.com/uhp/uhp-t-led-390.htm>

- [34] HEERING, Wolfgang. UV SOURCES – Basics, Properties and Applications. *International Ultraviolet Association* [online]. 2004 [vid. 2018-03-27]. Dostupné z: http://iuvanews.com/stories/pdf/archives/060401Heering_2004.pdf
- [35] SOMMER, Regina, Alexander CABAJ a Georg HIRSCHMANN. Dezinfekce pitné vody UV zářením. *Klinický institut hygieny university Vídeň* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.smv.cz/res/archive/013/001611.pdf>
- [36] ZHANG, Qian, Chaolin LI a Ting LI. Rapid photocatalytic degradation of methylene blue under high photon flux UV irradiation: Characteristics and comparison with routine low photon flux. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2012, 7 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/398787>
- [37] DVORÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – vysokotlaké rtuťové výbojky, směšové výbojky. *Časopis světlo* [online]. 2008 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38296.pdf>
- [38] Advanced UV Curable Highly Conductive Silver Paste (Ink). *Polychem UV/EB International Corp.* [online]. [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.polychem.tw/index.php?module=faq&mn=1&f=content&tid=13918>
- [39] Z-904 UV CURABLE ANISOTROPIC CONDUCTIVE INK. *Applied Ink Solutions* [online]. [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.appliedinksolutions.com/pdf/z-904-anisotropic-ink.pdf>
- [40] ANISOTROPIC CONDUCTIVE FLEXIBLE UV ADHESIVE. *Creative Materials* [online]. [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: https://server.creativematerials.com/datasheets/DS_124_24.pdf
- [41] LOCTITE EDAG 1020A E&C. *Henkel Corporation* [online]. 2012 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: http://tds.loctite.com/tds5/Studio/ShowPDF/EDAG_1020A_EC-EN?pid=EDAG_1020A_EC&format=MTR&subformat=HYS&language=EN&plant=WERCS
- [42] Electrodag PF-455B. *Henkel Corporation* [online]. 2011 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/226328666A7D890E8525761E0064487D/\\$File/ELECTRODAG_PF-455B-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/226328666A7D890E8525761E0064487D/$File/ELECTRODAG_PF-455B-EN.pdf)
- [43] TARR, Martin. Thick film materials. *Thick Film Circuit* [online]. 2017 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.thick-film.com/EVENTNEWSView.html?id=9>
- [44] LOCTITE EDAG 452SS E&C. *Henkel Corporation* [online]. 2014 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/91EE09DFC756A620852575F500440B93/\\$File/EDAG_452SS_EC-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/91EE09DFC756A620852575F500440B93/$File/EDAG_452SS_EC-EN.pdf)
- [45] Electrodag PD-038. *Henkel Corporation* [online]. 2009 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/E3EA31A26DF5A0A88525761500645FD8/\\$File/ELECTRODAG_PD-038-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/E3EA31A26DF5A0A88525761500645FD8/$File/ELECTRODAG_PD-038-EN.pdf)
- [46] 125-17M. *Creative Materials* [online]. 2011 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: https://server.creativematerials.com/datasheets/DS_125_17M.pdf
- [47] 116-20. *Creative Materials* [online]. 2011 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: https://server.creativematerials.com/datasheets/DS_116_20.pdf
- [48] PE-UV3010 UV CURABLE COATING/ENCAPSULANT. *Applied Ink Solutions* [online]. 2016 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.appliedinksolutions.com/pdf/uv3010-encapsulant-conformal-coat.pdf>
- [49] PE-UV2530 UV CURABLE MATTE DIELECTRIC. *Applied Ink Solutions* [online]. 2015 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.appliedinksolutions.com/pdf/uv2530-uv-dielectric.pdf>

- [50] PE-UV1006S ULTRAVIOLET CURABLE DIELECTRIC. *Applied Ink Solutions* [online]. 2016 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.appliedinksolutions.com/pdf/uv-1006S-dielectric.pdf>
- [51] PE-UV2531 UV CURABLE GLOSSY DIELECTRIC. *Applied Ink Solutions* [online]. 2017 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.appliedinksolutions.com/pdf/uv2531-uv-dielectric.pdf>
- [52] D2150901D1. *Gwent Group* [online]. 2015 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_data_sheets/biosensor_products/polymer_based_dielectric_materials/clear_uv_cure_dielectric_d2150901d1.pdf
- [53] D2151013D1. *Gwent Group* [online]. 2015 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_data_sheets/biosensor_products/polymer_based_dielectric_materials/yellow_uv_cure_dielectric_d2151013d1.pdf
- [54] D2150914D1. *Gwent Group* [online]. 2015 [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_data_sheets/biosensor_products/polymer_based_dielectric_materials/white_uv_cure_dielectric_d2150914d1.pdf
- [55] Complete UV Light-Curing Flood Systems. *Dymax corporation* [online]. 2012 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.ellsworth.com/globalassets/literature-library/manufacturers/dymax/dymax-brochure-complete-uv-light-curing-flood-systems.pdf>
- [56] Dymax ZIP Shutter. *Dymax corporation* [online]. 2018 [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.dymax.com/images/pdf/manuals/man010_zip_shutter_user_guide.pdf
- [57] Dymax Corporation Application Case Histories. *Dymax corporation* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.dymax.com/index.php/application-case-histories>
- [58] INTELLIRAY 400 / 600. *Uvitron International* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.uvitron.com/pdf/brochures/brochure-floods-intelliray.pdf>
- [59] Full Features UV Oven. *Wisbay* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://wisbay.cn/upfiles/news/RayvenUVoven.jpg>
- [60] IntelliRay 600 lamp lifetime. *Uvitron International* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.uvitron.com/pdf/intelliray-600_lamp_life.pdf
- [61] UV curing chamber BSM-03. *Opsytec Dr. Gröbel* [online]. [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.opsytec.com/fileadmin/user_upload/products/downloads/e_bsm03.pdf
- [62] UV-LED chamber BSL-02. *Opsytec Dr. Gröbel* [online]. [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.opsytec.com/fileadmin/user_upload/products/downloads/e-uv-led-chamber-bsl02.pdf
- [63] UV LED curing box. *Height-led* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://en.height-led.com/devices/showproduct.php?lang=cn&id=162>
- [64] HTLD 365nm LOCA led uv curing oven. *Height-led* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://sc01.alicdn.com/kf/HTB1497ObLJNTKJjSspoq6A6mpXaY/HTLD-365nm-LOCA-led-uv-curing-oven.jpg>
- [65] UVC-5 UV Light-Curing Conveyor. *Dymax corporation* [online]. 2015 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: https://intertronics-electricstudiolt.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/09/dymax_uvc-5_uv_light_curing_conveyor_pb.pdf
- [66] SunSpot SM 100 Watt Curing System. *Uvitron International* [online]. 2012 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.uvitron.com/pdf/brochures/brochure-spots-sunspot_sm.pdf

- [67] SPOT SIZE & INTENSITY vs DISTANCE. *Uvitron International* [online]. [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.uvitron.com/pdf/sunspot_sm-spot_size_and_intensity_vs_distance.pdf
- [68] Small Area UV Curing. *Uvitron International* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.uvitron.com/images/home-img1.png>
- [69] BLUEWAVE® MX-150 PRODUCT BULLETIN. *Dymax corporation* [online]. 2017 [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.dymax.com/images/pdf/literature/pb054_bluewave_mx-150_pb.pdf
- [70] PORTARAY 400/600W. *Uvitron International* [online]. 2013 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.uvitron.com/pdf/brochures/brochure-floods-portaray.pdf>
- [71] Uvitron PortaRay Light Curing System. *Uvitron International* [online]. 2015 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: https://yt3.ggpht.com/a-/AJLlDp3SjvzWnuBkhzoS0dWixEnv6Q4jo94IP_sXKw=s900-mo-c-c0xffffffff-rj-k-no
- [72] PortaRay, UVA intensity vs height. *Uvitron International* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.uvitron.com/pdf/portaray-uva-intensity_vs_height.pdf