

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Pasty určené pro vytváření vodivých struktur
na keramických substrátech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan MATĚJKA**
Osobní číslo: **E13B0373P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Pasty určené pro vytváření vodivých struktur na keramických substrátech**
Zadávací 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 problematikou tisku vodivých motivů na keramických substrátech.
2. Zmapujte trh vodivých sítotiskových past.
3. Zpracujte podrobný přehled past, srovnání jejich parametrů a ceny.
4. Vybrané pasty otestujte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. LEŠIKAR, Adam. Sítotisk: úvod do technologie sítotisku. V Praze: Nakladatelství grafické školy, 2010
2. Datasheety výrobců (Heraeus, Dupont, ESL, Ferro apod.)
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hromadka
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na vodivé pasty určené k tisku na keramické substráty. Je zde uvedeno základní rozdělení druhů keramických substrátů, zpracován přehled vodivých past od různých výrobců a jejich následné porovnání z hlediska odporu, tloušťky, rozlišení, viskozity, času spotřeby a ceny. Dále je zde popsána problematika tisku vodivých past na keramické substráty. V praktické části jsou vybrané pasty otestovány z hlediska jejich odporu. Následně je ověřena závislost odporu na čtverec u motivů různé šířky a různého rozsahu.

Klíčová slova

Vodivá pasta, keramický substrát, sítotisk, testování.

Abstract

This bachelor thesis is focused on conductive pastes used for printing on ceramic substrates. The thesis includes description of basic types of ceramic substrates, summary of conductive pastes from different producers and their comparison in terms of resistivity, thickness, printing resolution, viscosity, shelf life and price. The thesis is also focused on issues connected with printing of conductive pastes on ceramic substrates. The practical part of this thesis is focused on testing of selected pastes in terms of their resistivity. The dependence of the square resistance is afterwards verified by motives of different width and size.

Key words

Conductive paste, ceramic substrate, screen printing, testing.

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 29.5.2016

Jan Matějka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Hromadkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval firmě ELCERAM a.s. sídlící v Hradci Králové, za ochotu při realizaci praktické části této práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| 1 SUBSTRÁT | 12 |
| 1.1 VLASTNOSTI SUBSTRÁTŮ | 12 |
| 1.2 DRUHY SUBSTRÁTŮ | 13 |
| 1.3 DBC SUBSTRÁTY | 14 |
| 1.4 DBA SUBSTRÁTY | 15 |
| 2 KERAMICKÉ SUBSTRÁTY | 16 |
| 2.1 VÝROBA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTŮ | 16 |
| 2.2 KORUNDOVÁ KERAMIKA | 17 |
| 2.3 BERYLIOVÁ KERAMIKA | 18 |
| 2.4 KERAMIKA Z NITRIDU HLINÍKU | 18 |
| 2.5 KERAMIKA Z NITRIDU KŘEMÍKU | 18 |
| 3 METODY NANÁŠENÍ PAST | 19 |
| 3.1 SÍTOTISK | 19 |
| 3.1.1 Sítovina a rámy | 20 |
| 3.1.2 Vlivy na přenos tisku | 20 |
| 3.1.3 Sítotiskové technologie a stroje pro sítotisk | 20 |
| 3.2 ŠABLONOVÝ TISK | 21 |
| 3.3 TĚRKA | 22 |
| 4 VODIVÉ A ODPOROVÉ PASTY | 23 |
| 4.1 VÝROBCI | 23 |
| 4.1.1 Heraeus | 23 |
| 4.1.2 DuPont | 23 |
| 4.1.3 ESL ElectroScience | 24 |
| 4.2 VLASTNOSTI PAST | 24 |
| 4.2.1 Složky pasty | 25 |
| 4.2.2 Ředidla | 25 |
| 4.2.3 Tvrzení a sušení past | 26 |
| 4.2.4 Vypalovací proces | 26 |
| 4.3 ODPOROVÉ PASTY | 27 |
| 4.4 VODIVÉ PASTY | 28 |
| 4.5 TYPY VODIVÝCH PAST A JEJICH POROVNÁNÍ | 29 |
| 4.5.1 Porovnání vodivých past dle odporu | 29 |
| 4.5.2 Porovnání vodivých past dle tloušťky natištěné vrstvy | 30 |
| 4.5.3 Porovnání vodivých past dle rozlišení čar | 31 |
| 4.5.4 Porovnání vodivých past dle viskozity | 31 |
| 4.5.5 Porovnání vodivých past dle expirace | 32 |
| 4.5.6 Porovnání vodivých past dle ceny | 32 |
| 4.5.7 Celkové porovnání vodivých past | 33 |
| 5 PRAKTICKÁ ČÁST | 35 |
| 5.1 TESTOVÁNÍ VODIVÉ PASTY | 36 |
| 5.2 TESTOVÁNÍ ODPOROVÉ PASTY | 48 |

| | |
|--|-----------|
| ZÁVĚR | 53 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 55 |
| PŘÍLOHY | 58 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|-----------|---|
| IMS..... | Insulated Metal Substrate – izolovaný kovový substrát |
| BT..... | Bis-maleimide Triazine |
| AMB..... | Active Metal Brazing – aktivní pájení železa |
| PTFE..... | Polytetrafluorethylen |
| DBC..... | Direct Bonded Copper – přímé spojování mědi s keramikou |
| DBA..... | Direct Bonded Aluminium – přímé spojování hliníku s keramikou |
| OH..... | Hydroxilová Skupina |
| UV..... | Ultra Violet – ultrafialové |

Úvod

V poslední době jsou kladeny stále větší nároky na velikost elektronických součástek a z toho důvodu se stále zdokonalují metody tisku plošných spojů. Tradiční a nejpoužívanější technologie tisku jsou sítotisk a šablonový tisk, pomocí kterých jsou tištěny pasty odlišných vlastností či složení na substráty z různých materiálů.

Mezi nejpoužívanější substráty k vytváření vodivých motivů patří substráty z korundové keramiky. Tento materiál je vhodný pro přesné motivy a vyznačuje se širokým rozsahem použitelných výkonových zatížení.

Bakalářská práce je zaměřena převážně na vodivé pasty určené pro tisk na keramické substráty. Je rozdělena na 5 částí.

První část je zaměřena na substrát. Jsou zde popsány základní, mechanické, chemické, elektrické a tepelné vlastnosti, složení a druhy substrátů. Druhá část je věnována keramickým substrátům. Zde je popsána jejich výroba a druhy materiálů používaných pro keramické substráty. Mezi nejpoužívanější druh keramiky pro keramické substráty se řadí oxid hliníku, proto je tomuto materiálu věnována největší pozornost. Ve třetí části práce jsou popsány dvě základní a nejpoužívanější metody pro tisk plošných spojů - sítotisk a šablonový tisk. V předposlední části této bakalářské práce jsou stručně představeni výrobci vodivých past a popsány hlavní složky past. Dále jsou definovány vlastnosti vodivých past. Hlavní část práce se věnuje porovnání vlastností vodivých past. Poslední praktická část se zabývá testováním vybraných past, kde byla měřena závislost odporu na počtu čtverců motivu.

1 Substrát

Substrát je materiál, který slouží jako nosič vodivého motivu. Jeho účel je nést elektronické součástky či různé mechanické prvky. Skládá se obvykle z vodiče, dielektrika a z výztuže. V praxi se používá široká škála substrátů různých vlastností v pevné, ohebné nebo kombinované formě. [1]

1.1 Vlastnosti substrátů

Každý substrát musí obsahovat především kvalitní izolant, který zajistí odizolování vývodů součástek, a vhodný systém vodivých motivů pro spolehlivý rozvod elektrických signálů. Celý substrát musí být odolný proti mechanickému, tepelnému či chemickému namáhání. Vhodné je, aby měl substrát dobrou tepelnou vodivost pro zajištění odvodu tepla ze součástek, a zamezit tím jejich přehřívání. [2][3]

Mechanické vlastnosti

Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti substrátů patří pevnost, stálost rozměrů, nehořlavost nebo odolnost vůči výrobním a provozním prostředím. Zejména u povrchové montáže, kdy jsou součástky na desku pájeny nebo lepeny, je důležitá tepelná roztažnost. Největší namáhání je na pájku, která je namáhána stříhem, smykem a tahem z důvodu, že je měkčí než součástka a základní materiál. Namáhání můžeme zmírnit například tím, že volíme vhodně materiál substrátu s podobnou tepelnou roztažností jako má pájená součástka. [1][2][3]

Chemické vlastnosti

Během výroby substrátů jsou používány různá rozpouštědla, tavidla nebo pájecí prostředky, proti kterým musí být substrát odolný. Vodivý motiv musí být zejména odolný vůči korozi. [1]

Tepelné vlastnosti

S rostoucími požadavky na integraci součástek jsou podstatně větší výkony navrhovány na stále menší plochu. Spolehlivost součástek se odvíjí od provozní teploty. Je tedy nutné zajistit odvod tepla z výkonových součástek například vedením nebo prouděním. Vedení tepla

se využívá hlavně u aplikací, kde nestačí proudění vzduchu. Proudění významnou měrou ochlazuje součástky i substrát. Jako medium je nejčastěji využíván vzduch, který je filtrován, aby nebyl do systému zanášen prach a chemické nečistoty. [1][2]

Elektrické vlastnosti

Mezi hlavní elektrické vlastnosti substrátu patří povrchová rezistivita. U některých aplikací může hodnota povrchové rezistivity dosáhnout až $10^{15} \Omega$. K dalším důležitým elektrickým vlastnostem patří relativní permitivita a ztrátový činitel. Tyto parametry mají významnou roli hlavně ve vysokofrekvenčních aplikacích. Důležité vlastnosti vodivých motivů jsou vodivost, vzájemná indukčnost a odpor vodičů. [2][3]

1.2 Druhy substrátů

Mezi jedny z nejpoužívanějších substrátů patří keramické substráty. Dále se používají také organické substráty, které mohou být ohebné či pevné, nebo substráty s kovovým jádrem, označované jako IMS substráty.

Mezi organické substráty patří epoxidové substráty, které jsou nejvyužívanějším základním materiálem pro elektrotechniku v současnosti. Skládají se z etylenchlorhydrinu a bisfenolu se skelnou výztuží. [2]

Další organické substráty jsou například fenolické substráty vyrobené z impregnovaného papíru, kompozitové substráty, kde základem je papír a sklo, či třeba výkonové substráty. Mezi ně počítáme například polyimidový substrát, u kterého se jako výztuž používá aramidové vlákno, nebo BT-epoxidový substrát, který je vyroben ze směsi pryskyřice. [1]

Ohebné substráty jsou substráty, které jsou tvořeny z pryskyřic, stejně jako pevné substráty, jen postrádají výztuž. Pro jejich výrobu se používá nejčastěji materiál poly-pyromellitic-imid a polyester. [1]

3D substráty jsou čím dál více využívány z důvodu požadavků na nejrůznější tvary výrobků. Může se vyrobit ohybem nevytvrzeného substrátu, který se poté vytvrdí, či pomocí formy. Pro výrobu se používají vysokoteplotní termoplasty nebo termosety s přidanými plnivy. [1]

IMS substráty jsou definovány jako kovový materiál, kde je měděná vrstva spojena s tenkou elektricky izolovanou dielektrickou vrstvou. Jsou využívány především pro své malé rozměry, nízkou provozní teplotu a cenu. [4]

Základním materiálem substrátu je nejčastěji dielektrikum, které je jednostranně nebo oboustranně plátované vodivou fólií. To se skládá nejčastěji z pryskyřičného základu a je vyztuženou jednou, či několika vrstvami výztuže. Přehled složek základního materiálu uvádí tabulka 1. [2]

Tab. 1 Přehled složek základního materiálu [2].

| Výztuž | Dielektrikum | Vodič |
|--------------------------|---------------------|------------------|
| bez výztuže | epoxid | měď |
| skelná tkanina | fenol | nikl |
| bavlněný papír | bismaleimid-triazin | měď/invar/měď |
| buničitý papír | modifikovaný epoxid | měď/molybden/měď |
| netkané skelné vlákno | polyimid | nikl/měď |
| křemenné sklo | kyanatan esteru | |
| aramidová tkanina | PTFE | |
| netkané aramidové vlákno | polyester | |
| lehčená PTFE tkanina | melamin | |
| kevlarové vlákno | | |
| skelná rohož | | |

1.3 DBC substráty

DBC (Direct Bonded Copper) substráty jsou substráty vyrobené technologií Direct Bonded Copper pro výkonovou elektroniku. Při jeho výrobě je na povrch keramického jádra umístěna z obou stran měděná fólie s vysokou čistotou. V poslední době jsou DBC substráty používané především kvůli vysoké proudové kapacitě vodičů, výborné tepelné vodivosti (jako každý substrát vyrobený z keramiky), vysokému izolačnímu odporu a vysokému koeficientu teplotní roztažnosti. Vyznačují se hlavně tlustými vrstvami mědi (o šířce 150 μm až 650 μm) se silnou adhezí na substrátech z korundové keramiky nebo na substrátech vyrobených z aluminium-nitridu. Oproti většině ostatních keramických substrátů mají poměrně nízký koeficient tepelné roztažnosti, což umožňuje pájet větší plochy součástek na vodivý povrch, aniž by došlo k selhání spoje. Nevýhodou DBC substrátů je možnost vzniku částečných výbojů. Je to způsobeno malými dutinkami mezi mědí a keramikou. Proto se pro polovodičové moduly určené pro vysokonapěťové trakční aplikace používají jiné druhy substrátů. [5][6][7]

1.4 DBA substráty

U DBA (Direct Bonded Aluminium) substrátů je vytvářen spoj mezi hliníkovou fólií vysoké čistoty a keramickým materiálem. Existují dva typy výroby DBA substrátu. Při prvním způsobu výroby DBA substrátů je jako pojivo mezi hliníkem a keramickým jádrem používána pájecí fólie, která při přetavení zajistí spojení materiálů. Druhým, častěji využívaným způsobem, je umístění hliníkové fólie přímo na substrát bez použití přídavných pájecích vrstev. Po umístění fólie na keramický substrát se celá struktura ohřeje na teplotu 610 °C při tlaku 0,4 MPa po dobu 30 minut. Životnost DBA substrátů je oproti DBC až desetkrát delší. [5]

2 Keramické substráty

Keramické substráty jsou vyrobené z přírodních materiálů, které ovšem obsahují velké množství nečistot (například z jejich výroby), a mohou zhoršovat jejich vlastnosti. Pro výrobu keramických substrátů jsou používány technologie lití nebo válcování. Materiály, které jsou zejména na neorganické bázi, jsou používány za pomoci technologie tlustých a tenkých vrstev. Velkou výhodou je, že tenkovrstvé a tlustovrstvé rezistory jsou nanášeny přímo na podložku, což znamená vyšší hustotu osazení a spolehlivost. [2][3]

Mezi hlavní výhody keramických substrátů patří dobrá tepelná vodivost a přizpůsobení se roztažnosti různých keramických součástí.

Právě kvůli jejich dobré tepelné vodivosti se keramické substráty používají převážně pro výrobu hybridních integrovaných obvodů. [2][3]

Mezi keramické substráty můžeme zařadit například oxid hliníku (Al_2O_3), nitrid hliníku (AlN), oxid beryllia (BeO), silikon karbid (SiC), nitrid boru (BN). [8]

2.1 Výroba keramických substrátů

Při výrobě keramiky je kvůli vysokému bodu tání a tvrdosti keramiky přidáno pojící a tavné sklo, které usnadňuje výrobu a snižuje teplotu tání. [9]

Pro substráty z oxidu hliníku, oxidu beryllia a nitridu hliníku je výroba téměř stejná. Jako první je rozemlet základní materiál na jemný prášek, který je následně smíchán s již zmíněným sklem obsahujícím hořčík a vápník, v práškové podobě. Poté je přidáno organické pojivo a výsledná hmota je vložena do mlýna, který odstraní aglomeráty a směs sjednotí. Směs je dále formována pomocí následujících procesů. [9]

Válcování

Směs je nanesena na rovný povrch a následně vysušena tak, aby získala konzistenci tmelu. Nakonec je směs protlačena skrz dva válce, které jsou nastavitelné podle požadované tloušťky výsledného listu. [9]

Izostatické lisování

Izostatické lisování může probíhat za tepla i studena. Je využíváno ohebné lisovací formy, kde je tlak rozložen ve všech směrech za účelem stlačení keramických prášků. [9][10]

Tape casting

Směs na jezdícím páse je posouvána a následně pomocí nože tvarována. [9]

Lisování prášku

Prášek je natlačen do lisovací formy, kde je následně za pomoci vysokého tlaku stlačován do požadovaného tvaru. [9]

Extruze

Princip extruze spočívá v protlačení vysoce viskózní plastické směsi keramického prášku a aditiv skrz tvarovací trysku. Tato směs je vložena do zásobníku a je dále přepravována šroubovým, nebo axiálním pohybem. [11]

Slinování

Nakonec dochází ke slinování, které je prováděno při teplotě nad bodem tavení skla, pro vytvoření spojitě struktury [9]. Je to proces, při kterém jsou jednotlivé části hmoty zpevňovány v jediný celek. První fáze slinování obsahuje přeskupení částic a vytváření tzv. „krčků“ při vzájemném kontaktu mezi jednotlivými částicemi. Ve druhé slinovací fázi dochází ke zvětšování krčků mezi částicemi. V této fázi se keramické těleso výrazně smršťuje. Třetí fáze slinování dokončuje slinovací proces, kdy se póry postupně uzavírají. Ve třetí fázi se keramické těleso už nesmršťuje a zachovává si svoji velikost. [11]

2.2 Korundová keramika

Korundová keramika neboli alumina je nejčastěji využívaný materiál používaný pro keramické substráty. Substrát oxidu hlinitého (Al_2O_3) se vyznačuje zejména výbornou mechanickou pevností, vysokou odolností vůči korozi, nízkou tepelnou vodivostí (provozní teplota až 1500 °C) a relativní permitivitou nepřesahující hodnotu 12. Jako každý keramický substrát obsahuje i korundová keramika určité procento nečistot. Podle technologií výroby obsahují substráty obvykle 9 %, 4 %, 0,5 % nebo 0,4 % nečistot a příměsí. [2][3]

Výrobu substrátů z korundové keramiky v České republice najdeme například v Hradci Králové, ve firmě ELCERAM a.s.

2.3 Beryliová keramika

Substrát z beryliové keramiky je známý hlavně pro jednu nevýhodu, kterou je vysoká toxicita v práškové formě. Navzdory tomu se ale v praxi vyskytují jeho modifikace. Oxid beryllia, z něhož je tento substrát vyroben, má při teplotách od 20 °C do 400 °C až 7x větší tepelnou vodivost, než je tomu u substrátu z korundové keramiky. [2][3]

2.4 Keramika z nitridu hliníku

Substrát z nitridu hliníku se vyznačuje velmi dobrou tepelnou vodivostí, která je srovnatelná s kovy, a nahrazuje toxickou beryliovou keramiku. Jeho tepelná vodivost dosahuje hodnoty kolem $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dalšími charakteristickými znaky aluminium-nitridové keramiky je vysoká tvrdost, která se dá srovnávat s diamantem, vysoký měrný elektrický odpor, dobrá chemická odolnost a vysoká teplota tání (kolem 2 300 °C). Tvar vypáleného výrobku se musí určit již před výpalem, protože právě kvůli vysoké tvrdosti je opravení po výpalu velmi obtížné. [3]

2.5 Keramika z nitridu křemíku

Nitrid křemíku je v průmyslu využíván hlavně díky svým mechanickým vlastnostem, mezi které patří dobrá odolnost proti oxidaci a vysoká spolehlivost. Oproti korundové keramice má nitrid křemíku vyšší pevnost, houževnatost a tepelnou vodivost. Vysoké spolehlivosti se dosahuje v aplikaci s AMB metodou, díky které se měděný plátek spojí se substrátem. AMB proces vytváří spoj mezi keramikou a kovem. Při použité této metody je kovová fólie připájena ke keramice pomocí pájecí pasty a vysoké teploty. [5]

3 Metody nanášení past

Od počátku plošných spojů až do současnosti je největší pozornost věnována především kvalitě přenosu obrazce na substrát, což je důležité pro správnou a spolehlivou funkci zařízení.

Postupem času se možnosti vytváření obrazců zvětšily, ale nejvyužívanější technikou pro tisk obrazců je stále sítotisk, který je využíván již mnoho let. Především kvůli své jednoduchosti a cenové přístupnosti jej volí mnoho firem vyrábějící plošné spoje. [2]

Za pokračovatele sítotisku je brán šablonový tisk. Původní úlohu síta přebírá fólie. Ta byla zpočátku šablonového tisku kovová, dnes je fólie i plastová. Některé odborné práce nazývají obě technologie šablonovými s tím, že jedna technologie je tisk síťovou šablonou, a druhá tik foliovou šablonou. [2]

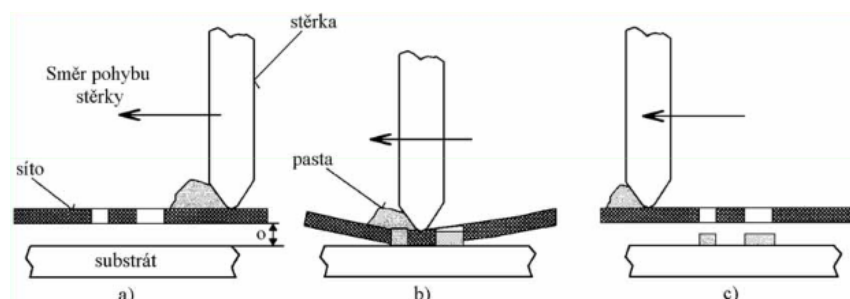
Díky rozvoji elektrotechniky vznikají i nová řešení vytváření obrazců jako je například dispensing, jetting nebo vytváření obrazců pomocí laseru. [2]

3.1 Sítotisk

Sítotisk je ve výrobě plošných spojů nejvíce rozšířenou technologií pro nanášení past, která se i přes dlouhou historii používání stále zdokonaluje.

Principem sítotisku je vytlačování pasty pomocí třerky sítím, které je propustné pouze v místě požadovaného motivu. [15]

Sítotisk má tři důležité součásti: síťovinu s otvory, pastu a vhodné zařízení pro aplikaci pasty přes síto na substrát. [2][12]



Obr. 1 Průběh sítotisku [převzato z 13].

Na obrázku č. 1 je zobrazen postup sítotisku, kdy třerka roztírá pastu a tlačí síto k substrátu (b). Následně oky síta pronikne pasta na substrát (c).

3.1.1 Sítovina a rámy

Šablony určené k sítotisku jsou vyráběny pomocí napínání sítoviny z vláken polyesteru nebo nerezové oceli na vhodný rám. Dříve byly rámy z dřeva, v současnosti jsou používány převážně rámy z hliníku nebo oceli, a to z důvodu, že lépe odolávají tahu napnutých vláken. Mezi nejpoužívanější technologie používané k napnutí vláken patří pneumatické či mechanické systémy. [2]

Pro zajištění dobrého průchodu pasty tkaninou musí být velikost otvoru nejméně 2,5 krát až 3 krát větší než je velikost částic používané pasty. [2]

3.1.2 Vlivy na přenos tisku

Přesnost tisku je dána správnou volbou poměru formátu rámu a obrazce, šířkou a délkou dráhy těrky nebo vzdáleností síta od substrátu, na který nanášíme obrazec. Důležité je zachování elasticity vláken, která může být narušena až moc velkým napětím síta nebo přílišným tlakem na těrku. Dalším důležitým parametrem sítotiskových motivů je úhel směru vláken síta a tištěného motivu. Pomocí experimentů bylo zjištěno, že nejvhodnější úhel pro tisk je natočení o 22,5 °. [2]

Velmi důležitým parametrem při tisku je také vzdálenost síta od substrátu, tzv. odtrh. Ten ovlivňuje celkové zobrazení na podložce. Tlak na těrku způsobí prohnutí síta až k substrátu a následné protlačení pasty v místě kontaktu. Pokud by byl odtrh malý nebo až příliš velký, může to kvalitu tištěného obrazce výrazně narušit. [2]

3.1.3 Sítotiskové technologie a stroje pro sítotisk

Zařízení pro tisk mohou být jednoduchá, ale i celkem složitá. Je možné sestavit levné zařízení pro ruční tisk, nicméně je důležité zajistit, aby konstrukce byla masivní, pevná, a aby rám se sítem byl stále rovnoběžně k substrátu. [2]

Ve velkovýrobě se používají poloautomatické či automatické stroje pro tisk. Poloautomatické stroje vyžadují obsluhu člověka, kdy se substrát vkládá ručně a tisk provádí stroj. Automatické stroje jsou obsluhovány plně elektronicky, obsluha pouze provádí kontrolu tisku. Tato zařízení musí zajistit nastavení rychlosti, tlaku těrky, snadné nastavení umístění tisknutého obrazce a snadnou obsluhu. [2][12]

3.2 Šablonový tisk

V případě šablonového tisku je oproti sítotisku použita folie s otvory pro průchod pasty. Folie má lepší rozměrovou stabilitu a přesnost. Následkem toho odpadají některé problémy s vytvářením obrazce. Naopak oproti sítu má folie nižší pružnost. Tloušťka tisku je tvořena přímo tloušťkou folie. [2]

Šablona je vyrobena z mosazi, nerezové oceli, mědi nebo molybdenu. V současnosti se již také používají plasty. Nejčastěji se používá mosaz, jejíž výhodou je možnost volby tloušťky podle požadavků tisku. Vlastnosti tisku je možné zlepšit pokovením niklem, který zajistí hladší povrch otvorů alepší průchod pasty na substrát. Otvory v šabloně se vyrábějí zpravidla pomocí leptání. [2]

U šablony z nerezové oceli se pro její tvrdosti vyrábějí otvory pomocí laseru. Šablony z mědi se pokovují niklem, z důvodu měkkosti mědi, kvůli které se povrch snadno poškodí. Molybdenové šablony se používají pro tisk jemných motivů. [2]

V poslední době se šablony vyrábějí z plastu. Výhodou je dobrá pružnost při vyšších tloušťkách a také cena. [2]

Pro výrobu šablon se používají technologie leptání, řezání laserem nebo galvanoplastika.

Leptání je nejrozšířenější technikou výroby šablon. Šablona je leptána z obou stran současně. V místě spojení otvorů se může vytvořit zúžení. Aby k tomu nedošlo, vytváří se otvory o 50 % užší, než je tloušťka šablony. [2]

Řezání pomocí laseru je technika, která má oproti leptání daleko přesnější rozměry a probíhá pouze z jedné strany. Nevýhodou laseru je oproti leptání je cena, a to hlavně u šablon větších rozměrů, jelikož výrobci odvíjejí cenu podle počtu otvorů. [2]

Galvanoplastika vytváří šablonu pomocí nárůstu kovové vrstvy na podkladu z nerezové oceli, na kterém byl pomocí fotorezistu vytvořen obrazec otvorů. Následně elektrolyticky narůstá kovová vrstva tam, kde není podklad pokrytý fotorezistem. Po dosažení požadované tloušťky je podklad oddělen. Cena šablony se pohybuje mezi cenou leptání a řezání laserem. [2]

3.3 Těrka

Těrka je používána k rozetření pasty po ploše síta nebo šablony a vtlačení do jejich otvorů. Je to plochá deska s břitem na spodní straně, který se pohybuje po sítu nebo šabloně.

Těrky se vyrábějí ze dvou materiálů, a to z pryže nebo kovu. Výběr materiálu na výrobu pasty se řídí vlastnostmi pasty a šablony. Výhodou těrky z pryže je snadná a levná výměna. Nevýhodou může být, že nejsou vhodné pro velké otvory, a to z důvodu, že z otvorů nabírají pastu. [2]

Kovové těrky poskytují velmi rovnou vrstvu rozetřené pasty, nenabírají z otvorů pastu a je možné používat nízký přitlak. Dále jsou odolné vůči poškození. Nevýhodou je jejich vyšší cena. [2]

Při ručním tisku je velmi složité udržet veškeré požadavky na správnou funkci těrky, jako jsou třeba správná rychlost posuvu těrky, její přitlak, kvalita povrchu a úhel natočení. Pro lepší vlastnosti natisknutého motivu se používá strojní tisk. [2]

4 Vodivé a odporové pasty

Materiály používané v elektrotechnice pro vytváření motivů na substrátech jsou dodávány ve formě past s definovanou viskozitou. Jsou připravovány mícháním a roztíráním práškových materiálů s pojivem, které dodává pastě určitou viskozitu. Materiálové kompozice jsou připravené ve formě práškových frit, s co nejdefinovanějším tvarem jednotlivých částic (průměrně $< 5 \mu\text{m}$) tak, aby byly zajištěny co nejlepší tiskové vlastnosti a také homogenita pasty při jejím natištění a následném výpalu. [13]

Pasty mohou být vodivé, odporové či dielektrické.

4.1 Výrobci

Největším dodavatelem past pro elektrotechniku je německá společnost Heraeus Holding GmbH. Dalšími velkými dodavateli jsou americký výrobce DuPont nebo ESL ElectroScience.

4.1.1 Heraeus

Heraeus Holding GmbH je německá technologická společnost, která se zabývá vzácnými kovy, speciálními kovy a technikou pro medicínu. Společnost byla založena v Hanau v roce 1851 Wilhelmem Carlem Herausem a je jednou z největších společností v Německu, které jsou v rodinném vlastnictví. [14]

Podle jejich prohlášení zaměstnává zhruba 12 600 pracovníků ve více než 100 pobočkách, mezi které patří například Heraeus Electronics, Heraeus Chemicals a mnoho dalších. [14][15]

4.1.2 DuPont

E. I. du Pont de Nemours and Company, známá jako DuPont, je americká chemická společnost, která byla založena v roce 1802 Éleuthère Irénée du Pontem. [16]

Ve 20. století DuPont vyvinul mnoho dnes používaným polymerů, jako například neopren, teflon, nylon nebo kevlar. Společnost vyvinula také freon, který se používá jako

chladiivo do průmyslu, a později i verzi, která je šetrnější k životnímu prostředí. [16]

V současnosti najdeme DuPont na trhu v mnoha odvětvích, například v elektronice, potravinách, barvách, plastech a mnoha dalších. Podle průzkumu se jedná o čtvrtou největší chemickou společnost na světě na základě tržeb a osmou na základě příjmů. [16][17]

4.1.3 ESL ElectroScience

ESL ElectroScience je společnost, která byla založena ve Philadelphii v roce 1962 s cílem vyrábět tlustovrstvé pasty pro mikroelektronický průmysl. Dnes je tato společnost jedním ze světových lídrů v oblasti materiálů pro širokou škálu průmyslových aplikací. [18]

V současnosti se zabývá především výrobou tisknutelných vodivých, odporových a dielektrických past či substrátů pro plošné spoje. [18]

4.2 Vlastnosti past

Z důvodu nárůstu složitosti motivů plošných spojů, ekologických důvodů a vývoje nových procesů vzniká mnoho nových past, které nahradily původní klasické pasty pro sítotisk. I přes tyto důvody je možné rozdělit pasty na dvě základní skupiny, a to podle způsobu jejich sušení a tvrzení. [2]

První skupinu past tvoří pasty, které jsou sušené nebo tvrzené teplem. Jejich obsahem jsou různé typy pryskyřic. Například bisfenol-A epoxid, fenolické, polyesterové pryskyřice apod. [2]

Druhou skupinu tvoří tzv. UV tvrditelné pryskyřice. To jsou výlučné estery kyseliny akrylové a metakrylové s různými polyglykoly, polyetery, epoxidy a uretany.

Pomocí hlavního řetězce pryskyřice je možné dosáhnout různých stupňů tvrdosti, pružnosti, odolnosti nebo přilnavosti. [2]

Hlavním úkolem pryskyřic v pastě je fungovat jako pojídlo pigmentů, plnidel a ostatních aditiv, které tvoří souvislou vrstvu na substrátu. Mezi nejdůležitější vlastnosti past patří jejich přilnavost k podložce, neboli adheze. [2][19]

Estery jsou organické sloučeniny, ve kterých je vodík v OH skupině nahrazen organickým zbytkem vzniklým z alkoholu po odštěpení vodíku. [20]

Polyglykoly jsou častým základem syntetických olejů. Získávají se z látek o vysoké molekulární hmotnosti. [21]

4.2.1 Složky pasty

Pasty určené k potisku substrátů mají tři základní složky, na kterých závisí výsledné vlastnosti natisknutého motivu. První z nich se jmenuje funkční složka, která určuje výsledný charakter pasty. Funkční složka u různých past obsahuje rozdílné materiály, u vodivých past jsou to drahé kovy, u dielektrických past dielektrické materiály nebo u odporových past oxidy. Druhá složka se nazývá tavivová, která obsahuje různá nízkotavná skla s teplotou měknutí od 600 °C. Tato složka slouží k vytvoření vazby na substrát. V poslední době se stále více používají pasty s oxidovou vazbou, vytvořenou přidaným kovem. Při výpalu musí u tavivové složky dojít k měknutí, nikoliv však k roztavení, aby vznikla nosná matrice pro funkční složku. Třetí složka je složka pojivová, která obsahuje organické materiály (např. terpineol), které jsou potřeba pro dosažení potřebné viskozity. Při výpalu se pojivová složka vypaří a nepodílí se na konečné funkci. [13]

Některé pasty mohou obsahovat také pigmenty. Například černé vodivé pigmenty jsou používány pro vodivé a odporové dráhy tlustovrstvých obvodů. [2]

4.2.2 Ředidla

Pro úpravu viskozity se používají vhodná ředidla. Ty mají různé vlastnosti, jimiž jsou: rozpouštěcí schopnost, rychlost odpařování, ekologické vlastnosti a cena. [2] Každý výrobce doporučuje v katalogových listech past konkrétní ředidlo.

Pro pasty od společnosti Heraeus uvedené v tabulce č. 4 jsou používána dvě různá ředidla. Pro měděné pasty je používáno ředidlo HVS 507 a pro ostatní pasty HVS 100. Ředidlo HVS 100 představuje univerzální ředidlo pro většinu past od společnosti Heraeus, ovšem vždy je nutné provést kontrolu s katalogovým listem. HVS 507 má oproti HVS 100 tu odlišnost, že způsobuje pomalejší sušení past. Společnost DuPont uvádí pro většinu past různá ředidla. Pasty DuPont 7484, DuPont 7484R a 7740 mají společné ředidlo DuPont 4553, které není nijak blíže specifikováno. Pasty společnosti ESL mají uvedena v katalogových listech dvě ředidla ESL 401 a ESL 413. ESL 401 je texanol a ESL 413 terpineol. [22][23][24]

4.2.3 Tvrzení a sušení past

Pasta je po tisku sušena několika různými způsoby. Mezi nejjednodušší patří odpaření rozpouštědel z mokré vrstvy. To je možné provádět při normální teplotě místnosti nebo při zvýšené teplotě (například kolem 85 °C). Aby proces probíhal dostatečně rychle, je nutno zajistit dostatečnou cirkulaci vzduchu. Při opravách může být pasta sejmuta ze substrátu pomocí ředidla. [2]

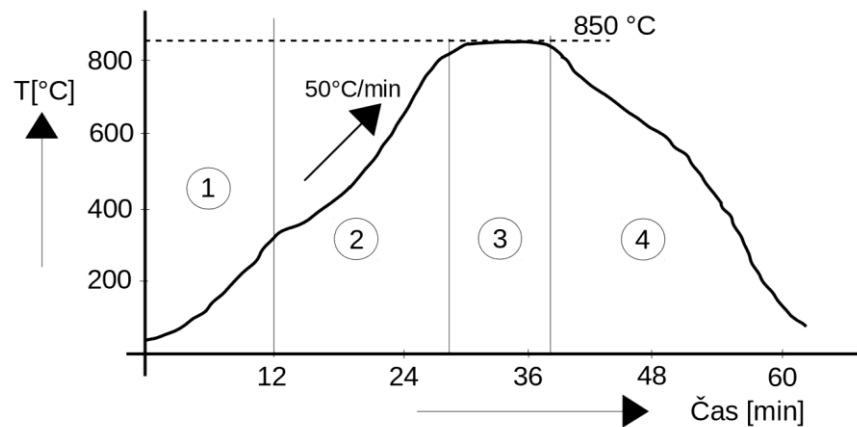
Pokud je požadována vyšší chemická odolnost pasty na substrátu, používá se termoplastický systém. Ten využívá chemické vytvrzovací principy. Procesy pracují za zvýšené teploty. Vytvrzovací systém může být podle požadavků jednosložkový nebo vícesložkový. [2]

Byly také vyvinuty světlocitlivé pasty, u kterých se diferenciací prování obvykle expoziční přes matici a následným vyvoláním. [2]

Pro většinu vodivých past od společnosti Heraeus je v katalogových listech uváděno sušení při teplotě 150 °C až 180 °C po dobu 10 minut až 20 minut. Vodivé pasty společnosti DuPont mají ve většině případů uváděnou dobu sušení 10 minut až 15 minut při teplotě 150 °C. Vodivé pasty od společnosti ESL ElectroScience, zmiňované v této práci, mají v katalogovém listu uvedenu dobu sušení 10 minut až 15 minut při teplotě 125 °C. [22][23][24]

4.2.4 Vypalovací proces

Po nanesení pasty na substrát následuje aktivování pasty pomocí sušení a výpalu. V jeho průběhu se vytváří spojení vrstvy se substrátem a na jejím povrchu se formuje aktivní struktura. Výsledná vypálená vrstva je tvrdá a odolná vůči chemickým i mechanickým vlivům. [13]



Obr. 2 Průběh vypalovacího procesu s vyznačením důležitých fází [13].

Příklad průběhu vypalovacího procesu je vyobrazen na obrázku 2. V první fázi (1) probíhá sušení pasty, které trvá 15 minut až 30 minut a dosahuje se zde teploty v rozmezí 70 °C až 150 °C. Ve druhé fázi (2) se pasta předehřívá při 350 °C a teplota roste o 50 °C za minutu až do doby, dokud teplota nedosáhne požadované vypalovací teploty. Vypalovací fáze (3) trvá přibližně deset minut při teplotě 850 °C (u různých past se může vypalovací teplota i čas lišit). Poslední fází (4), je fáze chladnutí. [13]

4.3 Odporové pasty

Odporové pasty mohou být tvořeny například materiálem cermet, který je založen na kombinaci práškového vodivého pigmentu a skelné boritokřemičité frity. Požadované hodnoty odporu lze dosáhnout volbou koncentrace vodivých částic v heterogenním systému. Kvalita odporových vrstev závisí především na přesné teplotě výpalu ± 1 °C. [13]

Cermet je kombinací slov ceramic (keramika) a metal (kov). Jedná se o kompozitní materiál, který vzniká spékáním směsi prášků kovů a keramiky. [25]

Pro odporové pasty jsou požadovány následující vlastnosti:

- stabilita odporové hodnoty, především při vysokých teplotách,
- široký rozsah hodnot vrstevového odporu,
- nízký teplotní součinitel odporu,
- dobrá reprodukovatelnost parametrů na různých substrátech,
- nízký napěťový součinitel odporu,
- kompatibilita s vodivými pastami [13].

Moderní odporové pasty jsou založeny na bázi kysličníků rhutenia, iridia a rhenia. Ty jsou méně citlivé na změnu teploty v průběhu vypalovacího procesu než klasické cermetové pasty. Také mají lepší stabilitu a teplotní součinitel odporu. Vlastnosti některých typů odporových past jsou uvedeny v tabulce č. 2. [13]

Tab. 2 Vlastnosti odporových past [26].

| Základ pasty | Paladium stříbro | RuO ₂ | Ruteničitany |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Odpor [Ω/\square] | 10 - 10 ³ | 1 - 10 ⁷ | 10 - 10 ⁷ |
| Průměrný rozptyl odporu po výpalu [%] | 30 | 10 | 25 |
| Teplotní součinitel [K^{-1}] | 300.10 ⁻⁶ | 300.10 ⁻⁶ | 250.10 ⁻⁶ |
| Napět'ový součinitel [V^{-1}] | 150.10 ⁻⁶ | 400.10 ⁻⁶ | -19.10 ⁻⁶ |
| Vypalovací teplota [$^{\circ}C$] | 850 | 980 | 850 |
| Doba výpalu [min] | 60 | 45 | 60 |

4.4 Vodivé pasty

Vodivé pasty mají 4 základní funkce, a to propojení součástek, zakončení rezistorů, použití pro kontaktní plošky diskretních součástek a pro elektrody tlustovrstvých kondenzátorů. [13]

Pro vodivé pasty jsou požadovány následující vlastnosti:

- dobrá adheze,
- dobrá vodivost, a to mezi 0,002 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ až 0,15 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- spolehlivý základ pro připojení drátového vodiče,
- pájitelnost s vysoce čistým spojem,
- stabilní a neměnné vlastnosti,
- dobrá přesnost tisku a dobré rozlišení natištěných čar,
- dobré tiskové vlastnosti,
- dlouhá živostnost [13].

Pojivová složka vodivých past určuje tiskové vlastnosti materiálu. Zaujímá kolem 12 % až 25 % hmotnosti celé vodivé pasty. Obsahuje alkoholy a různé oleje. [13]

Funkční složka obsahuje vodivé kovové částice, menší než 5 μm . Standardně zaujímá 50 % až 70 % celkové hmotnosti pasty. Rozložení a tvar částic mají velký význam pro výsledné elektrické a fyzikální vlastnosti natištěné vrstvy pasty. Funkční složku představují

prášky různých drahých vodivých kovů či jejich slitin. Nejpoužívanější jsou AgPd, AuPd, AuPt či Au. Přidáním druhého kovu lze upravit vlastnosti vrstvy, například omezení elektrické migrace. Vlastnosti některých typů vodivých past jsou uvedeny v tabulce č. 3. Odpor na čtverec je uveden na tloušťku čáry v rozmezí 7 μm až 40 μm . [13]

Tab. 3 Vlastnosti vodivých past [13][26].

| Základ pasty | Zlato | Paladium stříbro | Paladium zlato | Platina zlato |
|---------------------------------------|--------------|------------------|----------------|---------------|
| Odpor (Ω/\square) | 0,003 – 0,01 | 0,01 – 0,06 | 0,05 – 0,1 | 0,08 – 0,1 |
| Rozlišení tisku [μm] | 50 – 400 | 50 – 400 | 50 – 400 | 50 – 400 |
| Teplota výpalu [$^{\circ}\text{C}$] | 760 – 1000 | 760 – 1000 | 760 - 1000 | 800 – 1000 |
| Cena | Vysoká | Nízká | Vysoká | Vysoká |

4.5 Typy vodivých past a jejich porovnání

Na současném trhu můžeme najít mnoho druhů past od různých výrobců, jež se liší složením, vlastnostmi či cenou. V této kapitole jsou popsány hlavní vlastnosti past, které jsou vyráběny společnostmi Heraeus, DuPont a ESL Electroscience pro keramické substráty. Všechny důležité vlastnosti past jsou shrnuty v tabulce č. 4. Nejvíce používané pasty jsou tvořeny převážně stříbrem a platinou nebo stříbrem a paladiem. Žádná z porovnávaných past neobsahuje žádné stopy kadmia ani niklu. [22]

Ne všechna následující srovnání obsahují pasty od všech výrobců. Důvodem je absence některých údajů v katalogových listech výrobků.

4.5.1 Porovnání vodivých past dle odporu

U vodivých past je požadován odpor co nejmenší, aby nenastávaly velké ztráty.

Nejmenší odpor uváděný výrobcem ze všech porovnávaných mají tři pasty od společnosti Heraeus. Všechny mají v katalogovém listu uvedený odpor menší než 0,8 $\text{m}\Omega/\square$ a u všech třech obsahuje funkční složka pasty měď. První z nich je pasta C 7720, která se používá především na místech, kde jsou vysoké požadavky na tepelné a elektrické vlastnosti, a může být aplikována pomocí sítotisku či šablonového tisku. Nicméně tato pasta byla stažena z prodeje a nahrazena dvěma pastami s téměř identickými vlastnostmi. Jsou to pasty C 7403C a C 7404C. Obě mohou být tisknuty sítotiskem či šablonovým tiskem a jsou vypalovány

v atmosféře dusíku. Jediným rozdílem mezi C 7403C a C 7404C je ten, že pasta C 7403 je označována jako adhezní, tiskne se tedy výhradně jako první, zatímco C 7404C slouží pro zvětšení tloušťky vrstvy (až na 300 μm). [22]

Z porovnání vyplývá, že největším konkurentem výše uvedených past jsou další dvě pasty. Jsou to C 1075S od společnosti Heraeus a 9912-K FL od společnosti ESL ElectroScience. Obě obsahují funkční složku ze stříbra. C 1075 S má uváděný odpor menší než 2,2 $\text{m}\Omega/\square$ a jako hlavní výhoda je zmíněna dobrá adheze, výborná pájitelnost a dobrá vodivost. Pasta 9912-K FL má uváděný odpor menší než 2,5 $\text{m}\Omega/\square$ a je používána pro široké spektrum aplikací, například pro čipové senzory, potenciometry atd. Výrobce vyzdvihuje výborné rozlišení natisknutých čar 75/75 μm . Pata může být použita mimo keramické substráty i na substráty ze skla. [22][24]

4.5.2 Porovnání vodivých past dle tloušťky natištěné vrstvy

Malá tloušťka natisknuté čáry má výhodu v menší spotřebě materiálu a čára může být také díky tomu relativně úzká. Větší tloušťka naopak zajišťuje lepší rozvod tepla či menší odpor na čtverec.

Absolutně nejmenší tloušťku čáry uvádí katalogový list pasty C 3657 vyrobené společností Heraeus, a to 5 μm . Její funkční složka obsahuje platinu a oproti pastám v předcházející kapitole má několikanásobně větší odpor 60 $\text{m}\Omega/\square$ až 90 $\text{m}\Omega/\square$. Může být používána mimo korundovou keramiku i na oxidu zirkonu a hlavní výhodou je dobrá chemická odolnost. [22]

Druhou nejmenší tloušťku dohledanou v katalogovém listu má pasta 8844-G společnosti ESL ElectroScience. Tloušťka natištěné vrstvy se u této pasty pohybuje v rozmezí 7 – 9 μm . Funkční složka obsahuje zlato, což se podepisuje na celkové ceně pasty. V porovnání s C 3657 je její odpor menší. Používá se pro propojení SOFC, což je pevný palivový článek, který vyrábí elektrickou energii přímo z oxidování paliva. Mimo korundovou keramiku může být 8844-G použita i na dielektriku z kadmia nebo olova. [24][27]

Třetí pasta v pořadí s nejmenší tloušťkou je pasta 8847, rovněž vyrobena společností ESL ElectroScience. Také její funkční složka obsahuje zlato. V průměru má uváděnou tloušťku vrstvy stejnou jako 8844-G, její rozmezí se ale pohybuje mezi 6 μm až 10 μm . Je to zlatá, cermetová pasta, jejímiž hlavními výhodami jsou podle výrobce dobré rozlišení čar a hladkost vypáleného povrchu. [24]

4.5.3 Porovnání vodivých past dle rozlišení čar

Rozlišení čar je v katalogovém listu výrobců ve většině uváděno ve formě šíře čáry/šíře mezery. Opět je kladen důraz na co nejmenší šířku, a to z důvodu snahy vtěsnání co největšího množství motivů na desku. V následujícím porovnání jsou zahrnuty pouze pasty od společností DuPont a ESL ElectroScience, jelikož společnost Heraeus ve svých katalogových listech v drtivé většině rozlišení past neuvádí.

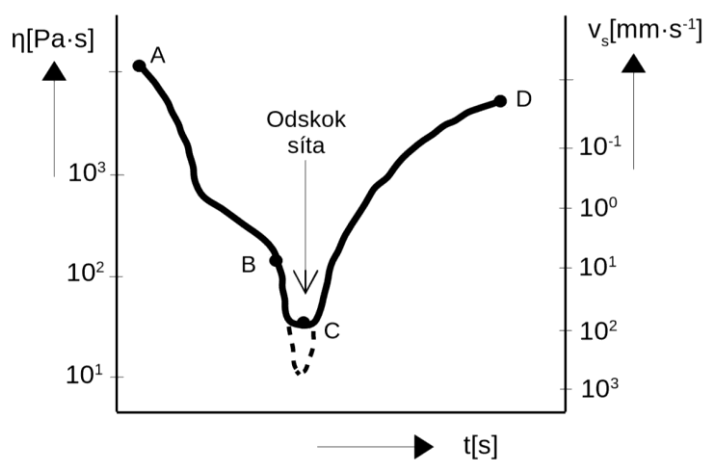
Nejmenší výrobci uvedené rozlišení, a sice 75/75 μm mají hned čtyři pasty, a všechny vyráběné společností ESL ElectroScience. Dvě z nich jsou zlatá pasta 8844-G a stříbrná pasta 9912F FL, které je popsány již v přechozích porovnáních. [24]

Další pastou s rozlišením 75/75 μm je pasta 8880-G, která je vyrobena ze zlata. Výrobce vyzdvihuje dobrou adhezi této pasty. [24]

V pořadí čtvrtou pastou se stejným rozlišením šíře čáry/šíře mezery je stříbrná pasta 9912-G s uváděnou dobrou vodivostí a adhezí. [24]

4.5.4 Porovnání vodivých past dle viskozity

Viskozita je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami proudící kapaliny. Pro pasty určené k tisku motivů je viskozita velmi důležitým parametrem. Na obr. 3 je možno vidět, že při zvýšeném tlaku na pastu se viskozita snižuje, a tím se zajistí dobré protlačení pasty sítem. [28]



Obr. 3 Viskozita [29].

Pokud bude viskozita příliš nízká, může nastat rozmazání motivu na substrátu. Při vysoké viskozitě pasta naopak nemusí protéct sítím. V celém průběhu tisku se viskozita pasty mění. Největší viskozity dosahuje surová pasta (A), která se dále rozmíchá na menší hodnotu viskozity, aby byla pro tisk použitelná (B). V okamžiku tisku pasty na substrát má viskozita hodnotu mezi 50 – 80 Pa·s. Poté nastává tzv. leveling (nivelizace), kde zmizí stopa po sítu, a tím pádem vznikne hladký povrch (D). [29]

Z porovnávaných past mají nejmenší uváděnou viskozitu pasty společnosti Heraeus, C 3605S a C 3657. První z nich má viskozitu 25 – 45 Pa·s. Jedná se o platinovou pastu, která je určena ke smíchání přesně podle požadavků zákazníka na adhezi. Mimo korundovou keramiku může být použita i na karbidu křemíku, nebo oxidu zirkonu. [22]

Druhá pasta C 3657 má v katalogovém listu uvedenou viskozitu 30 – 45 Pa·s. Jedná se také o pastu, kde je obsahem funkční složky platina. Může být také použita mimo korundovou keramiku i na oxidu zirkonu a mezi uváděné výhody patří dobrá vodivost a chemická odolnost. [22]

4.5.5 Porovnání vodivých past dle expirace

Drtivá většina past má určený čas spotřeby na šest měsíců od koupě. Po uplynutí této doby mohou být pasty dále používány, ovšem za cenu možných horších vlastností.

Nejdelší spotřební lhůtu mají z dostupných past tři pasty od společnosti Heraeus, a to pasta C 2030, C 2040 a C 2060. Všechny mají spotřební lhůtu 12 měsíců od koupení a mají téměř totožné vlastnosti. Liší se pouze složením - C 2030 obsahuje stříbro a paladium v poměru 3:1, C 2040 v poměru 4:1 a C 2060 v poměru 6:1. Paladium se přidává z toho důvodu, že čisté stříbro má problém s migrací. Obě pasty jsou vhodné pro aplikace, u nichž je požadován vysoký výkon. Výrobce jako hlavní přednosti uvádí dlouhotrvající adhezi, a to i po vícenásobném výpalu, a dobrou pájitelnost. [22]

4.5.6 Porovnání vodivých past dle ceny

Cena patří mezi hlavní faktory, které rozhodují při nákupu pasty. Klade se především důraz na to, aby pasta za určitou cenu měla přiměřené vlastnosti. Společnost DuPont bohužel neposkytl žádné údaje ohledně nákupních cen jejich výrobků.

Nejlevnější jsou pasty společnosti Heraeus C 7403C a C 7404C popsané v kapitole č. 4.5.1. Obě stojí při nákupu 50 g 100 €, což vychází na 2 €/g. Při pořízení 1 kg vychází cena na 0,33 €/g.

Druhou nejlevnější pastou, rovněž od společnosti Heraeus, je Ag/Pd pasta C 2040, která při nákupu 50 g vychází na 2,05 €/g. Cenu při nákupu 1 kg Heraeus neposkytl.

Dalšími pastami s nejnižší cenou jsou čtyři pasty společnosti Heraeus, jejichž cena se pohybuje při nákupu 50 g okolo 2,08 €/g. Jsou to pasty C 2060, C 2240 a C 1075 S, které jsou popsány v předcházejících porovnáních, a pasta C 1076 SD. Všechny při nákupu 1 kg vycházejí v rozmezí 0,88 €/g až 0,96 €/g.

Pasta C 1076 SD je vyrobena z Ag/Pt a používá se pro tisk jemných, tenkých motivů nebo také pro rozsáhlé motivy. Výhody uváděné v katalogovém listu jsou dobrá pájitelnost a vodivost.

Dalšími nejlevněji dostupnými pastami jsou již popsané pasty společnosti ESL ElectroScience 9912-G a 9912-K FL, které při pořízení 50 g vyjdou na 4,42 €/g.

Naopak nejdražší pastou je zlatá pasta od ESL ElectroScience 8831-UF, která při nákupu 50 g vychází na 106,1 €/g. Pasta sama o sobě nemá vůbec žádnou přilnavost ke korundové keramice, proto se používá pouze jako další vrstva na již natištěných vodivých motivech. [24]

4.5.7 Celkové porovnání vodivých past

Jako nejlépe cenově dostupné jsou dvě pasty společnosti Heraeus C 7403C a C7404C. Bohužel je to za cenu velmi nízké spotřební lhůty (expirace tři měsíce po zakoupení) a nižší viskozity. Naopak výhodou je možnost vytvořit velmi tlustou vrstvu, a to dokonce nejtlustší ze všech zde uvedených past.

Další poměrně dostupné pasty jsou C 1075S, C 1076SD, C 2040, C 2060 nebo C 2240, které mají nízkou uváděnou viskozitu. U past C 2040 a C 2060 najdeme v katalogovém listu spotřební lhůtu až 12 měsíců, ovšem obě mají společně s pastou C 2240 poměrně vyšší odpor.

V porovnání z hlediska poměru cena/výkon mají nejlepší parametry dvě pasty od společnosti ESL ElectroScience, a to 9912-G a 9912-K FL. Obě mají pořizovací cenu při nákupu 50 g 4,42 €/g, mají ze všech porovnávaných past nejlepší rozlišení, mají vysokou viskozitu a ani odpor není zdaleka nejhorší - pohybuje se v rozmezí 2,5 mΩ/□ až 3 mΩ/□. [22][24]

Tab. 4 Souhrn katalogových vlastností past, data z [22][23][24].

| Název | Výrobce | Složení | Tloušťka [μm] | Odpor [mΩ/□] | Rozlišení [μm] | Viskozita [Pa·s] | Exspirace [měs] | Výpal [°C/m] | Cena 50g [€/g] | Cena 1kg [€/g] |
|--------------|---------|-----------|---------------|--------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| C 1075 S | Heraeus | Ag | 13,0 – 16,0 | ≤ 2,2 | VN | 30 – 50 | 6 | 850/10 | 2,08 | 0,88 |
| C 1076 SD | Heraeus | Ag/Pt | 12,5 – 15,5 | ≤ 4,0 | VN | 30 – 50 | 6 | 850/10 | 2,09 | 0,91 |
| C 2030 | Heraeus | Ag/Pd 3:1 | 12,0 – 15,5 | ≤ 40 | VN | 30 – 50 | 12 | 850/10 | VN | VN |
| C 2040 | Heraeus | Ag/Pd 4:1 | 12,0 – 15,5 | ≤ 40 | VN | 30 – 50 | 12 | 850/10 | 2,05 | VN |
| C 2060 | Heraeus | Ag/Pd 6:1 | 12,0 – 15,5 | ≤ 30 | VN | 30 – 50 | 12 | 850/10 | 2,08 | 0,96 |
| C 3605 P | Heraeus | Pt | VN | VN | VN | VN | 3 | 1100 -1500/5-30 | 42,80 | 12,84 |
| C 3605 S | Heraeus | Pt | VN | VN | VN | VN | 6 | 1100-1500/5-30 | 42,80 | 12,84 |
| C 3657 | Heraeus | Pt | 5.0 | 60 – 90 | VN | 30 – 45 | 6 | 850-950/10 | 42,80 | 12,84 |
| C 7720 | Heraeus | Cu | 40,0 – 60,0 | ≤ 0,8 | VN | 30 – 90 | 6 | 950/10-12 | VN | VN |
| C 2240 | Heraeus | Ag/Pd | 8,0 – 12,0 | ≤ 30 | ≥ 125 | 30 – 50 | 6 | 850/10 | 2,08 | 0,96 |
| C 7403C | Heraeus | Cu | 25,0 – 60,0 | ≤ 0,8 | VN | 30 – 90 | 3 | 890/10-12 | 2,00 | 0,33 |
| C 7404C | Heraeus | Cu | 25,0 – 60,0 | ≤ 0,8 | VN | 30 – 90 | 3 | 890/10-12 | 2,00 | 0,33 |
| DuPont 4593 | DuPont | Ag/Pd/Pt | 16,0 – 20,0 | ≤ 60 | 150/100 | 250 – 350 | 6 | 850-950/10 | VN | VN |
| DuPont 4597 | DuPont | Au | 13,0 – 17,0 | 30 – 100 | 150/100 | 180 – 280 | 6 | 850 | VN | VN |
| DuPont 4597R | DuPont | Pt/Pd/Au | 13,0 – 17,0 | 30 – 100 | 150/100 | 180 – 280 | 6 | 850 | VN | VN |
| DuPont 7484 | DuPont | Ag/Pd | 9,0 – 13,0 | 15 – 30 | 150 | 150 – 230 | 6 | 850 | VN | VN |
| DuPont 7484F | DuPont | Ag/Pd | 8,0 – 13,0 | 15 – 30 | ≥ 100 | 300 – 410 | 6 | 850 | VN | VN |
| DuPont 7484R | DuPont | Ag/Pd | 9,0 – 13,0 | 15 – 30 | ≥ 150 | 150 – 230 | 6 | 850 | VN | VN |
| DuPont 7740 | DuPont | Ag | 55,0 | VN | VN | 110 – 180 | 6 | 850/10 | VN | VN |
| DuPont 9141 | DuPont | Pt | 7,0 – 10,0 | 60 – 100 | VN | 65 – 100 | 6 | VN | VN | VN |
| 2321-G | ESL | Cu | VN | ≤ 2 | 125/125 | 215 – 415 | 6 | 900-980/10-12 | VN | VN |
| 5837 | ESL | Au/Pt | 10,0 – 14,0 | 40 – 60 | 125/125 | 325 – 375 | 6 | 850/10-12 | 88,41 | VN |
| 5837-G | ESL | Au/Pt | 12,0±2,0 | < 85 | 125/125 | 225 – 270 | 6 | 850/10 | 88,41 | VN |
| 8831-UF | ESL | Au | VN | VN | VN | 370 – 430 | 6 | 980/10-15 | 106,10 | VN |
| 8844-G | ESL | Au | 7,0 – 9,0 | < 6 | 75/75 | 325 – 375 | 6 | 850/10 | 84,88 | VN |
| 8847 | ESL | Au | 6,0 – 10,0 | ≤ 5 | 100/100 | 175 – 275 | 6 | 850/10-15 | 84,88 | VN |
| 8880-G | ESL | Au | 8,0 – 12,0 | 2 – 4 | 75/75 | 260 – 360 | 6 | 850/10 | 84,88 | VN |
| 8884-G | ESL | Au | 10,0 – 15,0 | 2 – 5 | VN | 300 – 350 | 6 | 850/10-12 | 84,88 | VN |
| 9598-G | ESL | Ag/Pt | 10,0 – 15,0 | ≤ 80 | 125/125 | 275 – 325 | 6 | 850/10 | 30,06 | VN |
| 9912-G | ESL | Ag | 10,0 – 15,0 | ≤ 3 | 75/75 | 225 – 275 | 6 | 850/10-12 | 4,42 | VN |
| 9912-K FL | ESL | Ag | 10,0 – 15,0 | < 2,5 | 75/75 | 290 – 330 | 6 | 850/10 | 4,42 | VN |

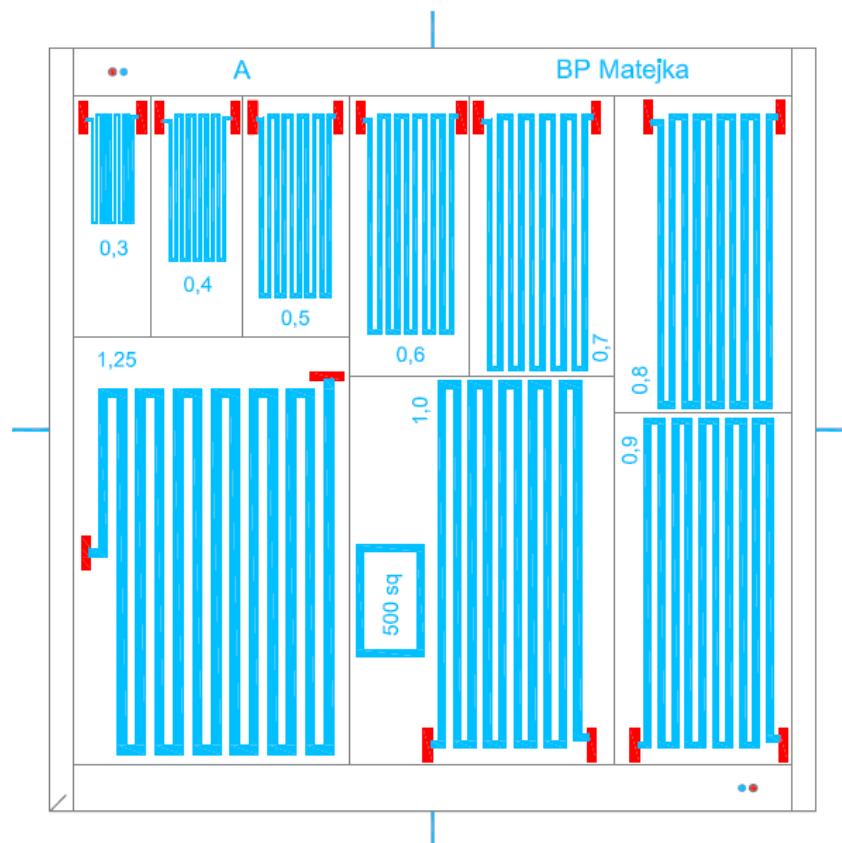
*VN - Výrobce neuvedl

5 Praktická část

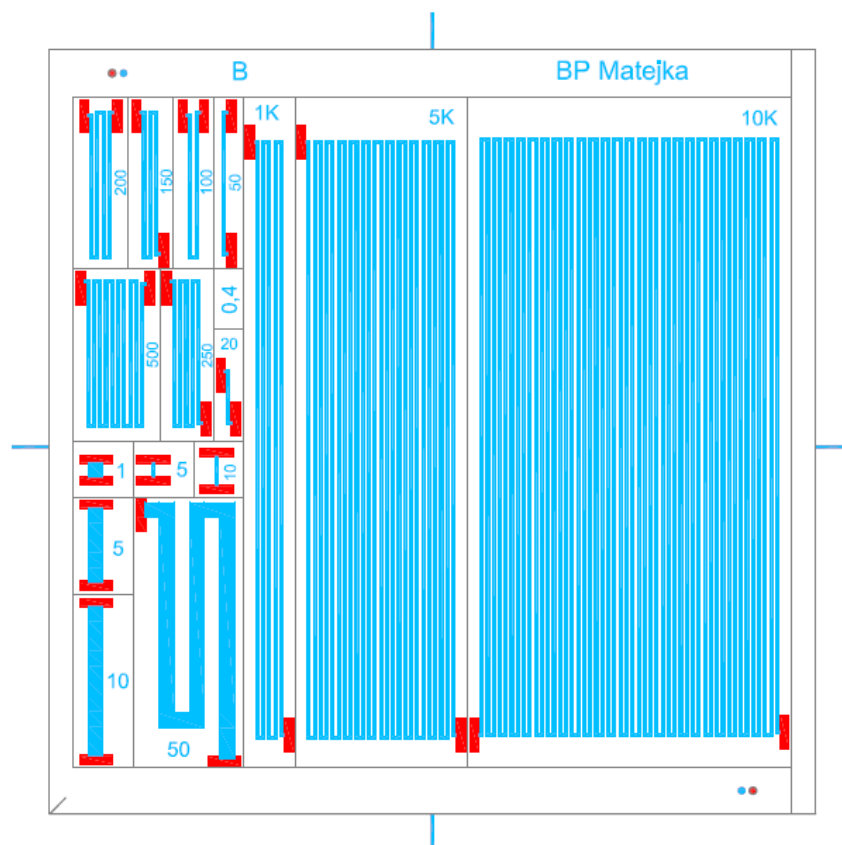
Hlavním cílem praktické části této práce bylo zjistit odpor pasty na čtverec pro motivy obsahující různý počet čtverců nebo pro motivy s různou tloušťkou čáry. Pro účely experimentu byl navrhnut speciální motiv, který je zobrazen na obr. 4 a 5. Modrá oblast vyznačuje plochu, která je potištěna pastou. Červené plochy slouží pro umístění hrotů měřícího zařízení. Byly testovány vodivé pasty C 1076 SD, C 2030 a C 2060, které byly zvoleny pro ověření katalogového odporu z důvodu jejich vysokého používání. Během prací na bakalářské práci vznikl také požadavek stejné firmy na změření odporové pasty R 8921, jejíž katalogové vlastnosti jsou v příloze A této práce.

Na základě navrženého motivu (obr. 4 a 5) byla zhotovena šablona, a následně síto ve společnosti Elceram. Na desce A je konstantní počet 500 čtverců různé šířky natištěné vrstvy. Na desce B je různý počet čtverců při konstantní šířce 0,4 mm natištěné vrstvy.

Jako dodatek je zde 1 čtverec až 50 čtverců při šířce motivu 2 μm . V šedých místech je keramika rýhována laserem pro snadné oddělení jednotlivých motivů od sebe.



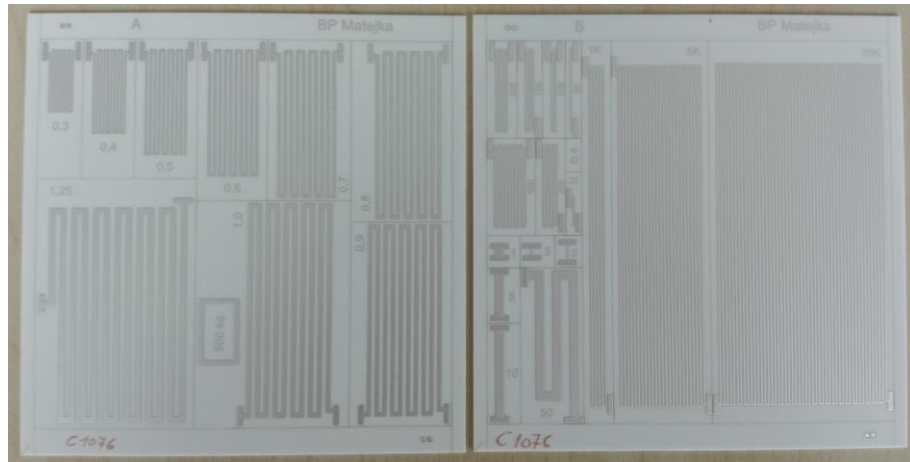
Obr. 4 Schéma motivu – deska A.



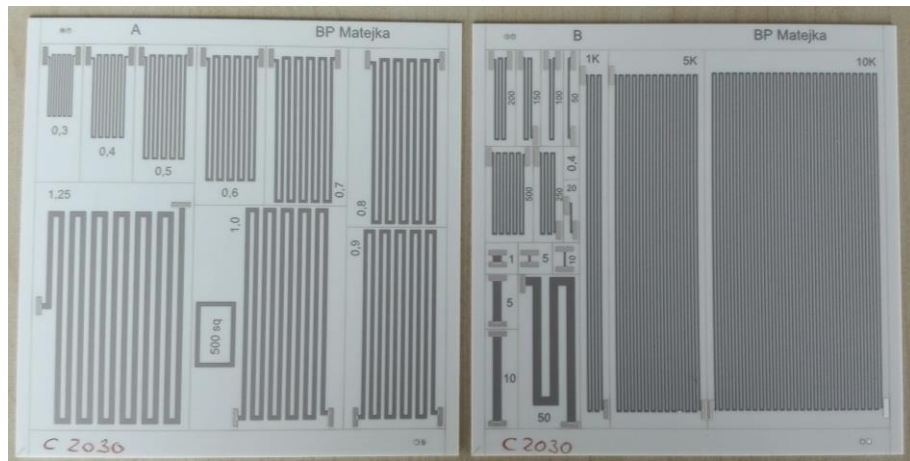
Obr. 5 Schéma motivu – deska B.

5.1 Testování vodivé pasty

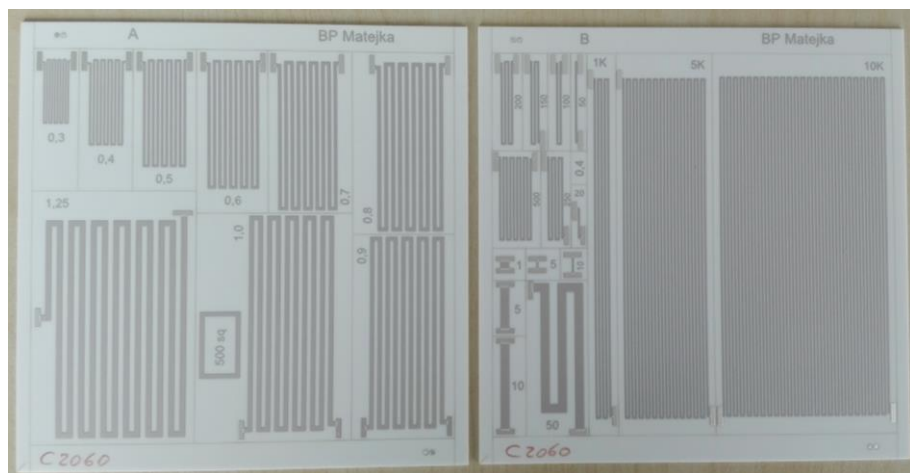
Jako pasty určené pro testování byly vybrány na vodivou vrstvu C 1076SD, C 2030, C 2060 a na vodivé kontaktní plošky pasta C 1076SD. Tloušťka natisknuté vodivé vrstvy u pasty C 1076SD je 8 μm až 9 μm , u past C 2030 a C 2060 9 μm . Pro kontaktní plošky vyrobené pastou C 1076SD je tloušťka natisknuté vrstvy 15 μm . U každé pasty byly testovány 3 stejné desky A a B. V případě pasty C 1076SD byly vyhotoveny desky B pouze dva kusy. Testovací motiv byl měřen multimetrem čtyř-vodičovou metodou. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách 5 až 16 a na obrázcích 9 až 17. Na obrázcích 6 až 8 jsou zobrazeny natištěné motivy vodivými pastami.



Obr. 6 Natisknutý motiv vodivou pastou C 1076SD.



Obr. 7 Natisknutý motiv vodivou pastou C 2030.



Obr. 8 Natisknutý motiv vodivou pastou C 2060.

C 1076SD

Tab. 5 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 1076SD – deska A.

| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 0,3 | 1,515 | 1,518 | 1,533 |
| | 0,4 | 1,568 | 1,570 | 1,575 |
| | 0,5 | 1,553 | 1,554 | 1,557 |
| | 0,6 | 1,571 | 1,574 | 1,564 |
| | 0,7 | 1,627 | 1,627 | 1,610 |
| | 0,8 | 1,582 | 1,592 | 1,581 |
| | 0,9 | 1,630 | 1,639 | 1,646 |
| | 1 | 1,704 | 1,711 | 1,707 |
| | 1,25 | 1,707 | 1,715 | 1,717 |

Tab. 6 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 1076SD – deska B.

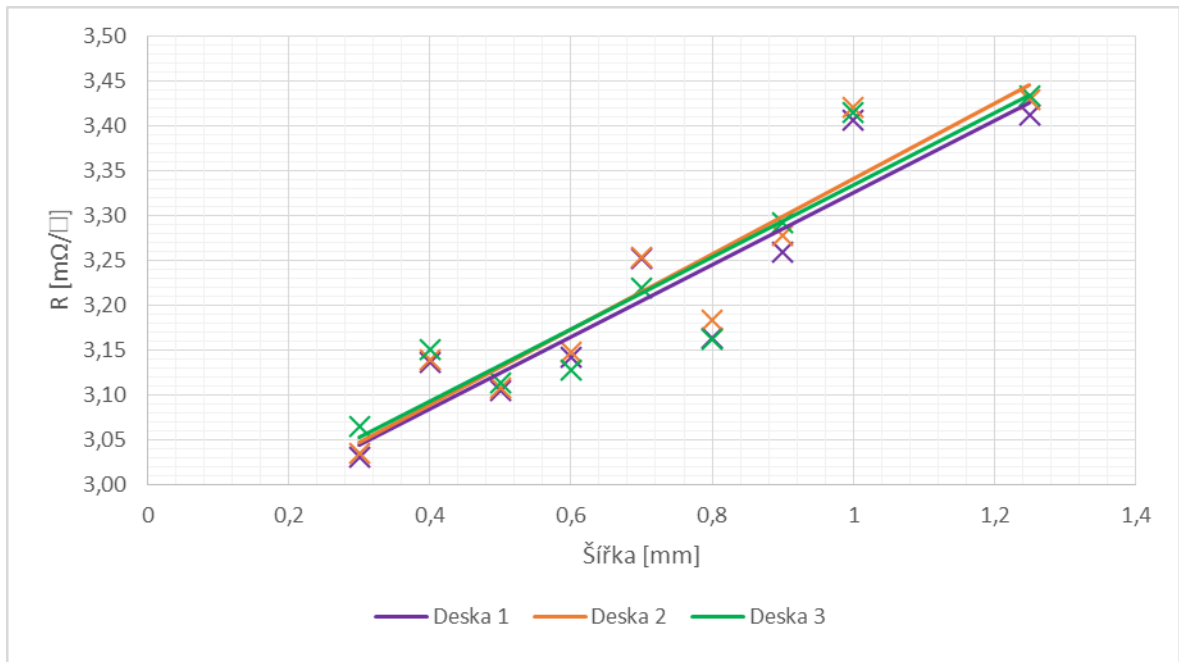
| | | Deska1 | Deska2 |
|---|---------------|-----------------|-----------------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [Ω] | R [Ω] |
| | 5 | 0,012 | 0,012 |
| | 10 | 0,030 | 0,028 |
| | 20 | 0,053 | 0,051 |
| | 50 | 0,152 | 0,150 |
| | 100 | 0,314 | 0,310 |
| | 150 | 0,463 | 0,458 |
| | 200 | 0,620 | 0,611 |
| | 250 | 0,810 | 0,804 |
| | 500 | 1,593 | 1,566 |
| | 1000 | 3,383 | 3,340 |
| | 5000 | 16,76 | 16,63 |
| 10000 | 34,20 | 33,88 | |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [m Ω] | R [m Ω] |
| | 1 | 2,700 | 2,100 |
| | 5 | 13,94 | 13,78 |
| | 1 | 29,60 | 26,60 |
| | 50 | 176,2 | 175,8 |

Tab. 7 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 1076SD na 1 čtverec – deska A.

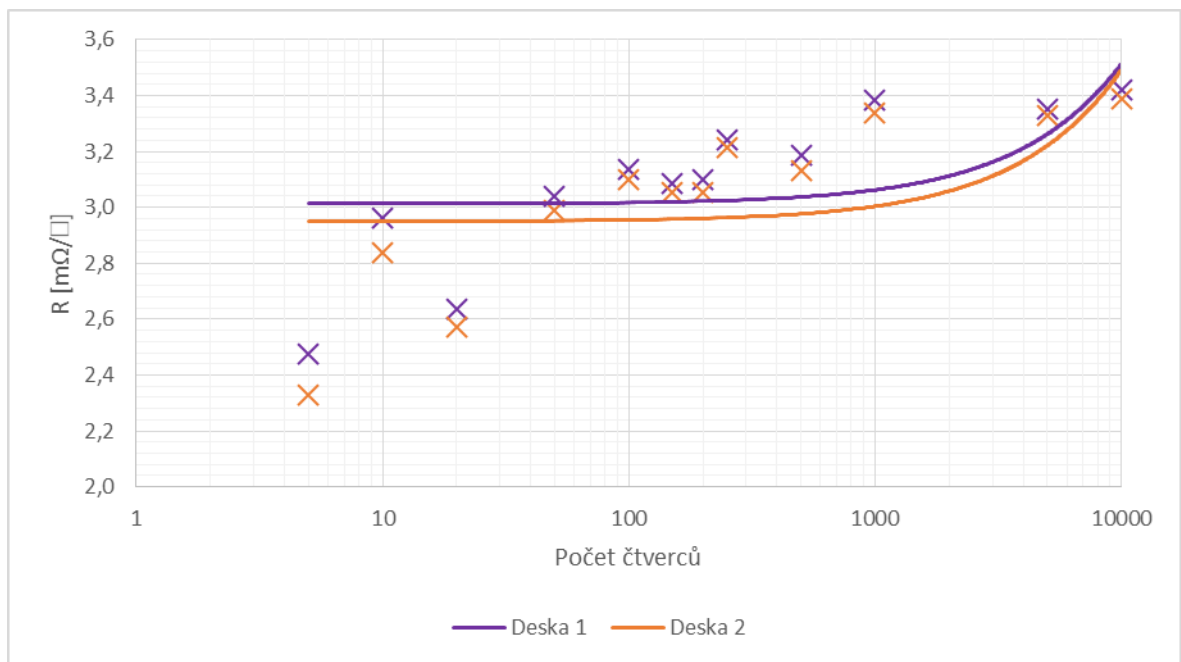
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|-------------|----------|----------|----------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 0,3 | 3,031 | 3,035 | 3,066 |
| | 0,4 | 3,137 | 3,140 | 3,151 |
| | 0,5 | 3,105 | 3,107 | 3,113 |
| | 0,6 | 3,142 | 3,147 | 3,128 |
| | 0,7 | 3,253 | 3,254 | 3,219 |
| | 0,8 | 3,164 | 3,184 | 3,163 |
| | 0,9 | 3,259 | 3,278 | 3,293 |
| | 1 | 3,407 | 3,422 | 3,415 |
| | 1,25 | 3,413 | 3,430 | 3,434 |

Tab. 8 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 1076SD na 1 čtverec – deska B.

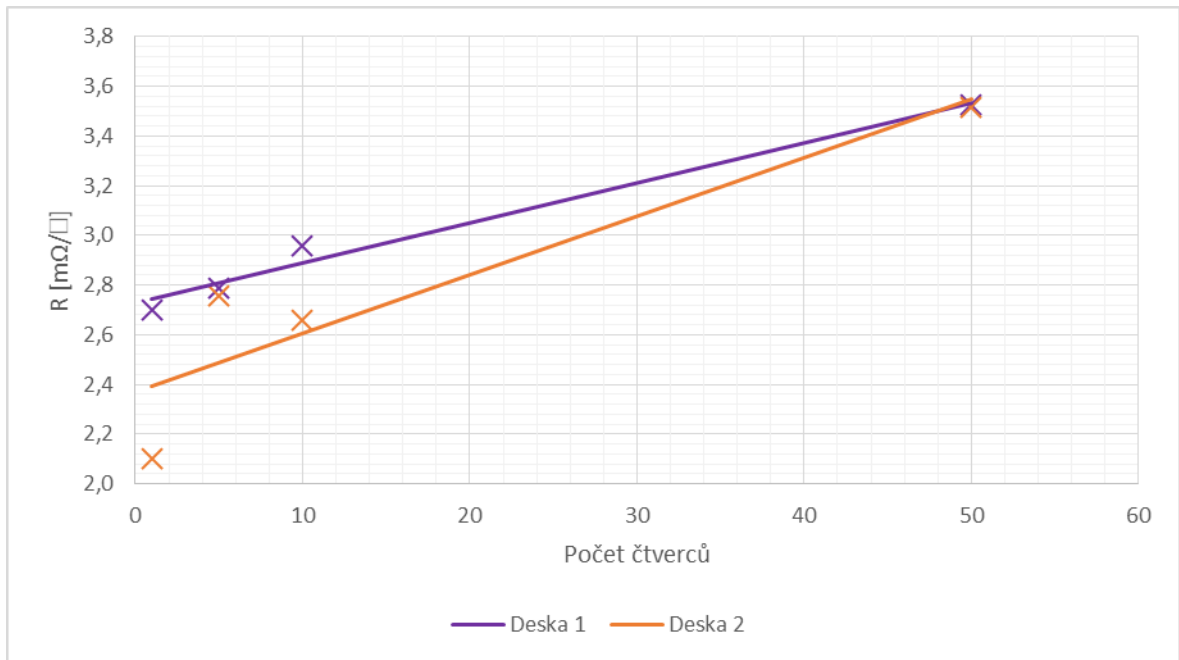
| | | Deska1 | Deska2 |
|---|---------------|----------|----------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 5 | 2,474 | 2,330 |
| | 10 | 2,962 | 2,837 |
| | 20 | 2,636 | 2,570 |
| | 50 | 3,038 | 2,990 |
| | 100 | 3,138 | 3,099 |
| | 150 | 3,087 | 3,052 |
| | 200 | 3,099 | 3,054 |
| | 250 | 3,240 | 3,214 |
| | 500 | 3,185 | 3,131 |
| | 1000 | 3,383 | 3,340 |
| | 5000 | 3,351 | 3,327 |
| | 10000 | 3,420 | 3,388 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 1 | 2,700 | 2,100 |
| | 5 | 2,788 | 2,756 |
| | 1 | 2,960 | 2,660 |
| 50 | 3,523 | 3,516 | |



Obr 9 Závislost odporu na čtverec na šířce vodivé čáry pasty C 1076 SD při konstantním počtu čtverců (500).



Obr 10 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (0,4 mm) vodivé čáry pasty C 1076SD.



Obr. 11 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (2 mm) vodivé čáry pasty C 1076SD.

C 2030

Tab. 9 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 2030 – deska A.

| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|------|--------|--------|--------|
| Šířka [mm] | | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | 0,3 | 18,01 | 18,24 | 18,23 |
| | 0,4 | 18,67 | 18,60 | 18,74 |
| | 0,5 | 18,62 | 18,43 | 18,60 |
| | 0,6 | 18,86 | 18,83 | 18,99 |
| | 0,7 | 19,91 | 19,68 | 19,99 |
| | 0,8 | 19,15 | 19,06 | 19,52 |
| | 0,9 | 19,84 | 19,93 | 20,02 |
| | 1 | 20,91 | 21,13 | 21,20 |
| | 1,25 | 20,57 | 21,07 | 20,90 |

Tab. 10 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 2030 – deska B.

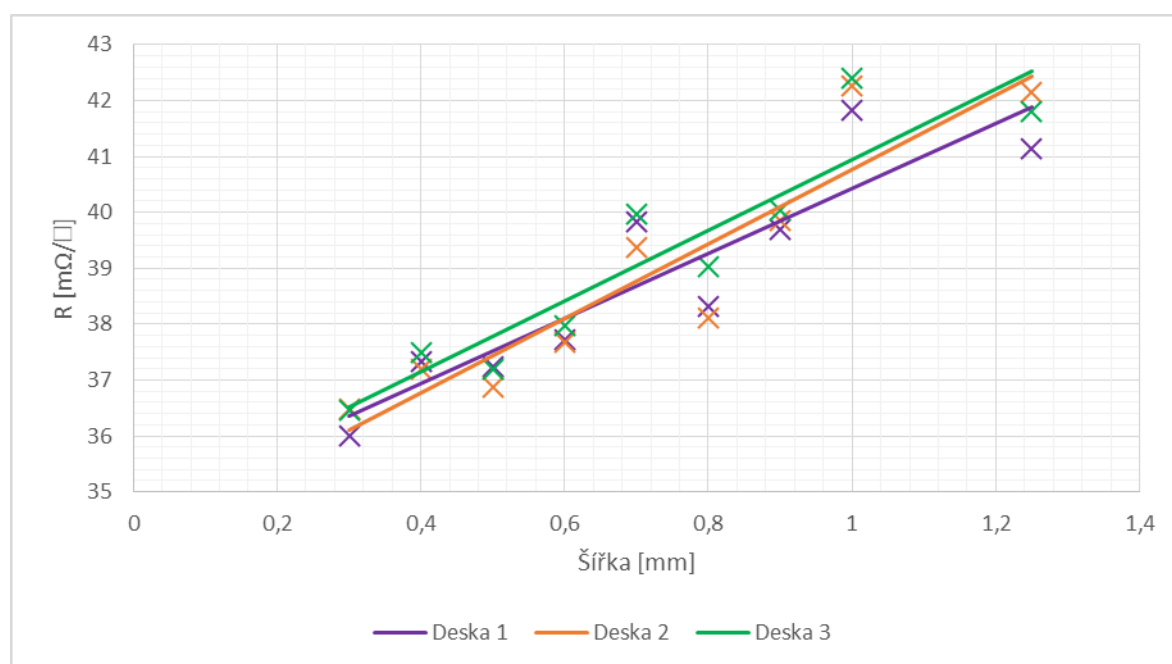
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 5 | 0,142 | 0,144 | 0,139 |
| | 10 | 0,349 | 0,365 | 0,357 |
| | 20 | 0,630 | 0,647 | 0,619 |
| | 50 | 1,789 | 1,821 | 1,798 |
| | 100 | 3,734 | 3,790 | 3,787 |
| | 150 | 5,472 | 5,579 | 5,531 |
| | 200 | 7,386 | 7,365 | 7,408 |
| | 250 | 9,665 | 9,854 | 9,840 |
| | 500 | 18,88 | 19,20 | 19,09 |
| | 1000 | 40,65 | 41,12 | 40,72 |
| | 5000 | 202,0 | 204,0 | 203,3 |
| | 10000 | 411,4 | 417,0 | 413,8 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 1 | 0,024 | 0,024 | 0,024 |
| | 5 | 0,190 | 0,145 | 0,194 |
| | 1 | 0,381 | 0,388 | 0,397 |
| | 50 | 2,162 | 2,187 | 2,165 |

Tab. 11 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 2030 na 1 čtverec – deska A.

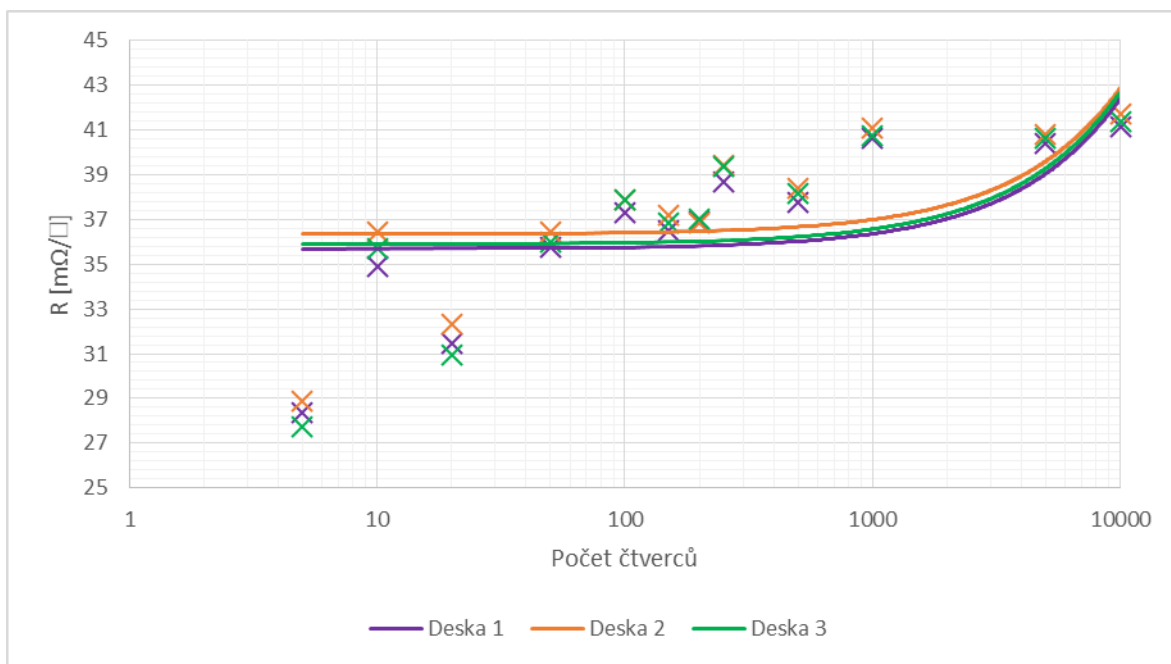
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 0,3 | 36,01 | 36,47 | 36,46 |
| | 0,4 | 37,34 | 37,20 | 37,48 |
| | 0,5 | 37,23 | 36,87 | 37,20 |
| | 0,6 | 37,72 | 37,67 | 37,97 |
| | 0,7 | 39,82 | 39,37 | 39,97 |
| | 0,8 | 38,31 | 38,11 | 39,04 |
| | 0,9 | 39,68 | 39,86 | 40,03 |
| | 1 | 41,83 | 42,27 | 42,39 |
| 1,25 | 41,14 | 42,14 | 41,80 | |

Tab. 12 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 2030 na 1 čtverec – deska B.

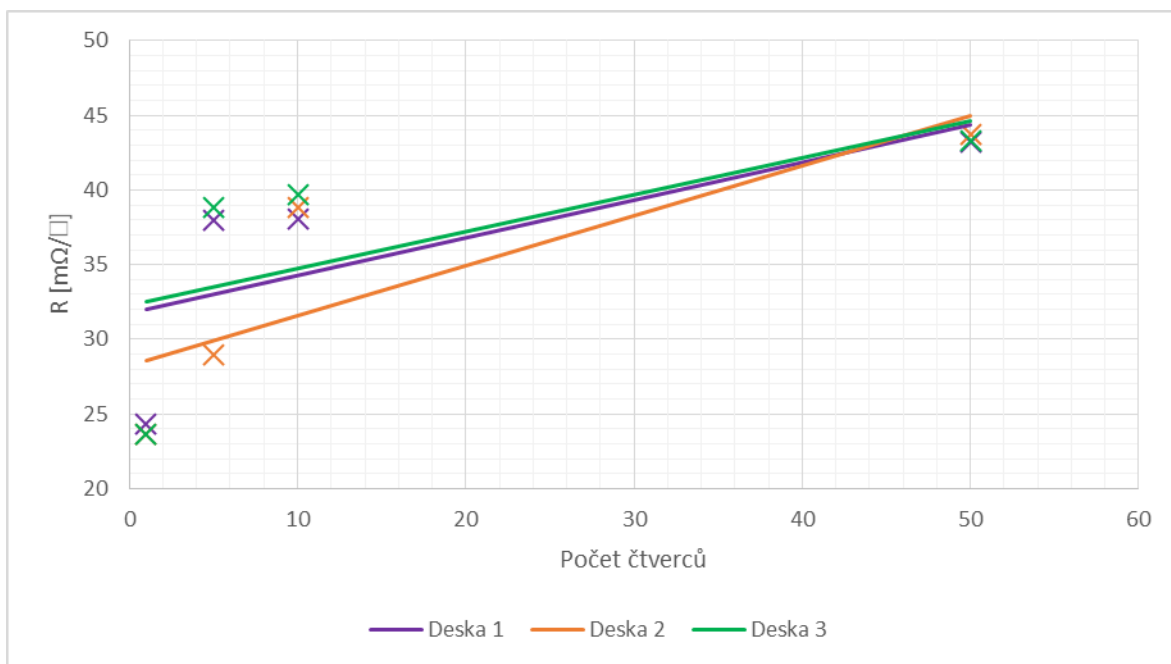
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 5 | 28,38 | 28,86 | 27,74 |
| | 10 | 34,90 | 36,47 | 35,73 |
| | 20 | 31,49 | 32,33 | 30,96 |
| | 50 | 35,78 | 36,42 | 35,96 |
| | 100 | 37,34 | 37,90 | 37,87 |
| | 150 | 36,48 | 37,19 | 36,88 |
| | 200 | 36,93 | 36,83 | 37,04 |
| | 250 | 38,66 | 39,41 | 39,36 |
| | 500 | 37,75 | 38,40 | 38,18 |
| | 1000 | 40,65 | 41,12 | 40,72 |
| | 5000 | 40,41 | 40,79 | 40,66 |
| | 10000 | 41,14 | 41,70 | 41,38 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 1 | 24,34 | 23,60 | 23,60 |
| | 5 | 38,00 | 28,96 | 38,80 |
| | 1 | 38,10 | 38,83 | 39,72 |
| | 50 | 43,24 | 43,74 | 43,29 |



Obr 12 Závislost odporu na čtverec na šířce vodivé čáry pasty C 2030 při konstantním počtu čtverců (500).



Obr 13 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (0,4 mm) vodivé čáry pasty C 2030.



Obr 14 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (2 mm) vodivé čáry pasty C 2030.

C 2060

Tab. 13 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 2060 – deska A.

| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 0,3 | 9,923 | 9,840 | 9,834 |
| | 0,4 | 10,22 | 10,20 | 10,15 |
| | 0,5 | 10,08 | 10,13 | 10,09 |
| | 0,6 | 10,21 | 10,26 | 10,23 |
| | 0,7 | 10,67 | 10,83 | 10,73 |
| | 0,8 | 10,24 | 10,36 | 10,22 |
| | 0,9 | 10,69 | 10,64 | 10,45 |
| | 1 | 11,03 | 11,10 | 10,98 |
| | 1,25 | 11,02 | 11,06 | 10,96 |

Tab. 14 Naměřené hodnoty vodivé pasty C 2060 – deska B.

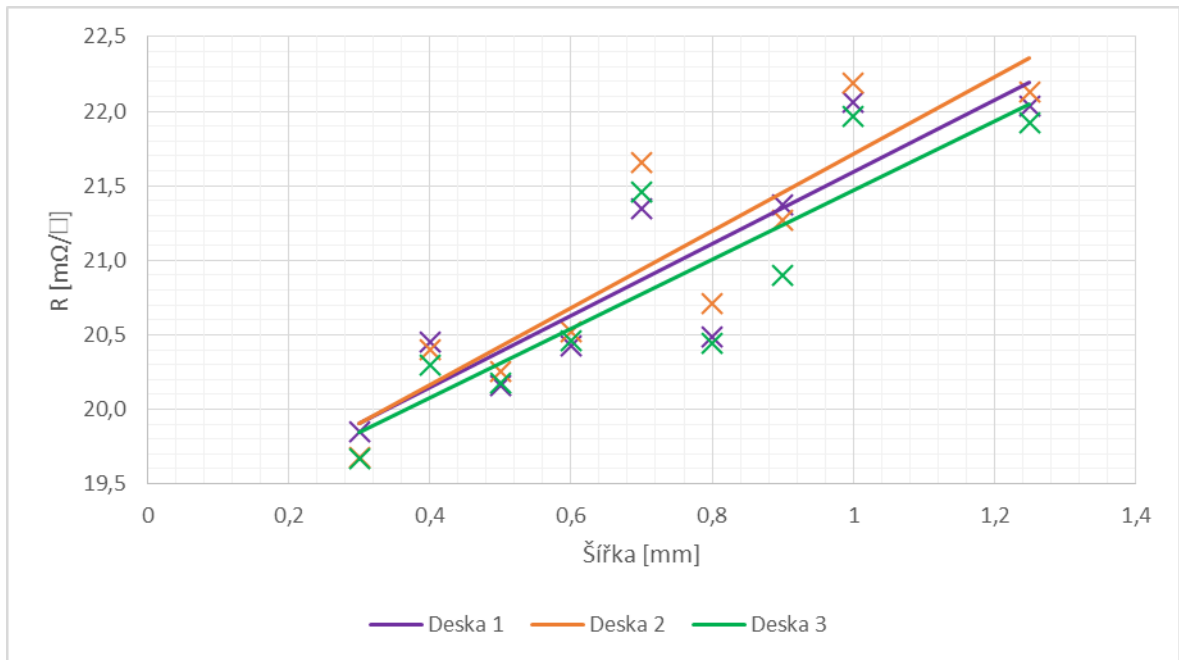
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 5 | 0,080 | 0,079 | 0,079 |
| | 10 | 0,197 | 0,192 | 0,193 |
| | 20 | 0,355 | 0,347 | 0,344 |
| | 50 | 1,013 | 0,988 | 0,990 |
| | 100 | 2,108 | 2,062 | 2,063 |
| | 150 | 3,099 | 3,039 | 3,035 |
| | 200 | 4,100 | 4,074 | 4,061 |
| | 250 | 5,459 | 5,401 | 5,401 |
| | 500 | 10,54 | 10,63 | 10,58 |
| | 1000 | 22,69 | 22,56 | 22,61 |
| | 5000 | 113,6 | 112,8 | 113,3 |
| | 10000 | 231,3 | 230,0 | 229,8 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [Ω] | R [Ω] | R [Ω] |
| | 1 | 0,012 | 0,012 | 0,010 |
| | 5 | 0,100 | 0,105 | 0,102 |
| | 1 | 0,197 | 0,207 | 0,203 |
| | 50 | 1,188 | 1,195 | 1,197 |

Tab. 15 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 2060 na 1 čtverec – deska A.

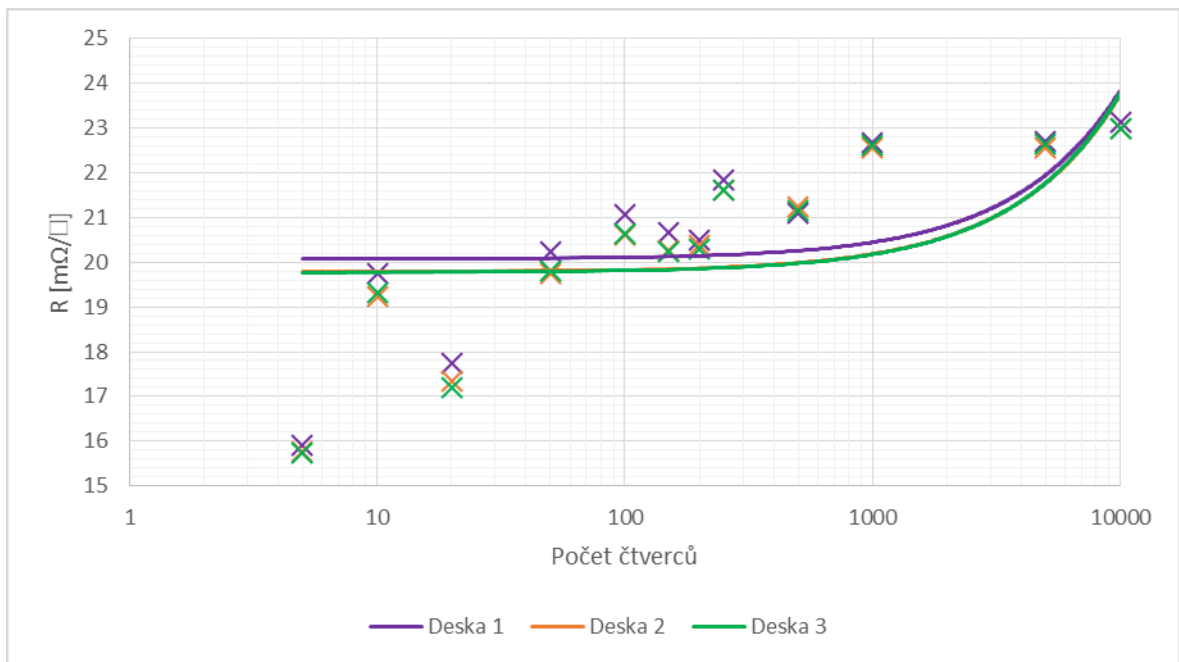
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|-------------|----------|----------|----------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 0,3 | 19,85 | 19,68 | 19,67 |
| | 0,4 | 20,45 | 20,40 | 20,29 |
| | 0,5 | 20,16 | 20,25 | 20,18 |
| | 0,6 | 20,43 | 20,52 | 20,46 |
| | 0,7 | 21,35 | 21,66 | 21,46 |
| | 0,8 | 20,48 | 20,71 | 20,44 |
| | 0,9 | 21,38 | 21,27 | 20,90 |
| | 1 | 22,06 | 22,19 | 21,97 |
| | 1,25 | 22,04 | 22,13 | 21,92 |

Tab. 16 Přepočtené hodnoty vodivé pasty C 2060 na 1 čtverec – deska B.

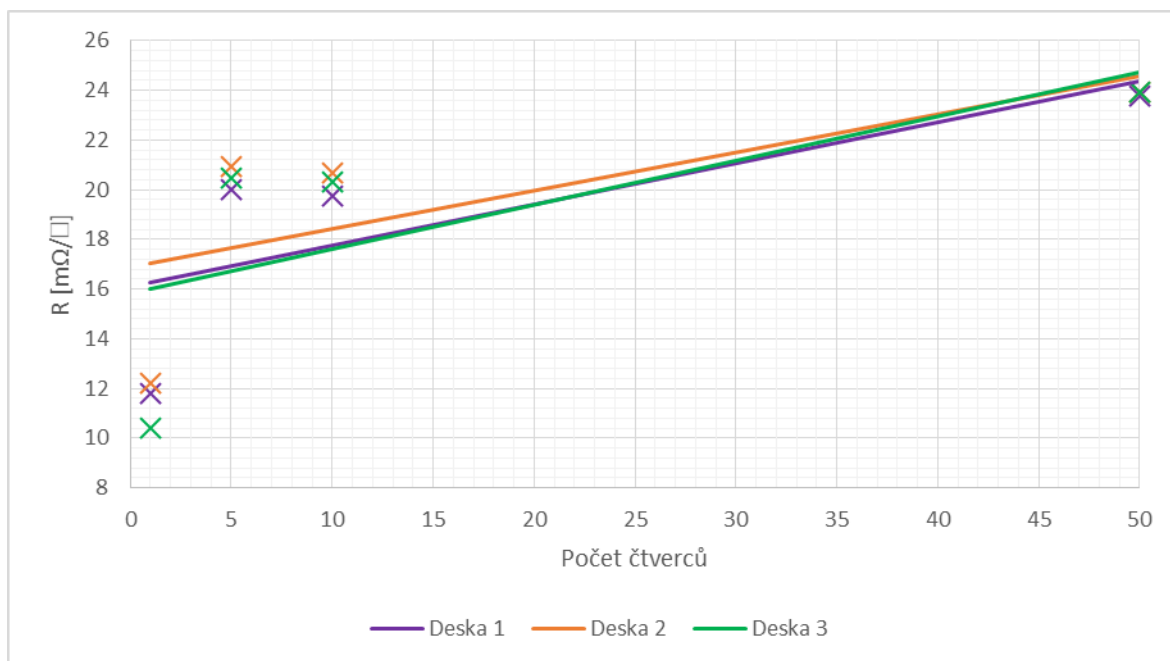
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 |
|---|---------------|----------|----------|----------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 5 | 15,91 | 15,76 | 15,73 |
| | 10 | 19,75 | 19,24 | 19,32 |
| | 20 | 17,76 | 17,34 | 17,19 |
| | 50 | 20,25 | 19,76 | 19,80 |
| | 100 | 21,08 | 20,62 | 20,63 |
| | 150 | 20,66 | 20,26 | 20,24 |
| | 200 | 20,50 | 20,37 | 20,31 |
| | 250 | 21,83 | 21,60 | 21,60 |
| | 500 | 21,09 | 21,25 | 21,16 |
| | 1000 | 22,69 | 22,56 | 22,61 |
| | 5000 | 22,71 | 22,57 | 22,65 |
| | 10000 | 23,13 | 23,00 | 22,98 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] | R [mΩ/□] |
| | 1 | 11,80 | 12,20 | 10,40 |
| | 5 | 20,00 | 20,94 | 20,46 |
| | 1 | 19,73 | 20,68 | 20,32 |
| | 50 | 23,77 | 23,91 | 23,94 |



Obr 15 Závislost odporu na čtverec na šířce vodivé čáry pasty C 2060 při konstantním počtu čtverců (500).



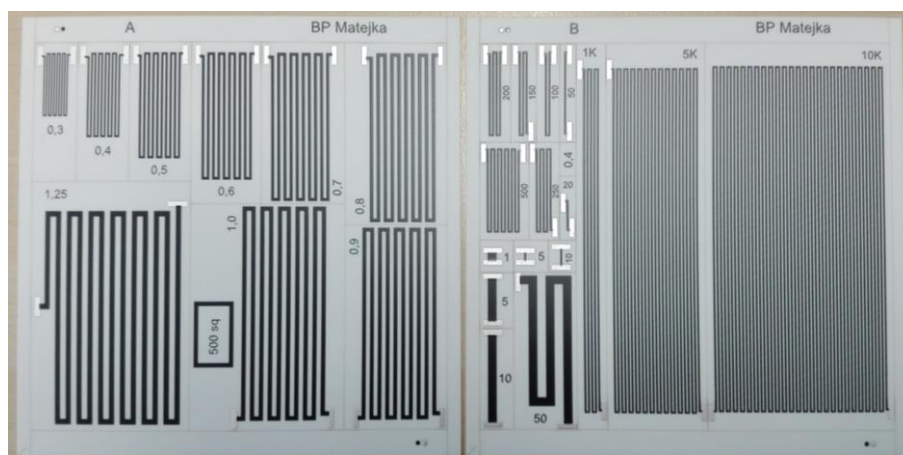
Obr 16 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (0,4 mm) vodivé čáry pasty C 2060.



Obr 17 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (0,4 mm) vodivé čáry pasty C 2060.

5.2 Testování odporové pasty

Jako pasty určené pro testování byly vybrány na odporovou vrstvu R 8921 a na vodivé kontaktní plošky pasta C 1076SD. Tloušťka natisknuté vrstvy odporové pasty je 8 μm až 9 μm a vodivé pasty 14 μm až 16 μm . Bylo testováno 5 stejných desek A a B. Testovací motiv byl měřen multimetrem čtyř-vodičovou metodou. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách 17 až 20 a na obrázcích 19 až 21, Na obrázku 18 je zobrazen natištěný motiv odporovou pastou.



Obr. 18 Natisknutý motiv odporovou pastou R 8921.

Tab. 17 Naměřené hodnoty odporové pasty R 8921 – deska A.

| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 | Deska4 | Deska5 |
|---|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] |
| | 0,3 | 65,68 | 66,92 | 63,99 | 69,26 | 69,77 |
| | 0,4 | 71,21 | 71,48 | 70,29 | 73,59 | 75,08 |
| | 0,5 | 69,56 | 69,65 | 68,70 | 71,07 | 72,39 |
| | 0,6 | 70,79 | 70,60 | 70,03 | 71,46 | 72,99 |
| | 0,7 | 75,15 | 74,71 | 74,64 | 75,26 | 77,91 |
| | 0,8 | 71,89 | 70,83 | 71,46 | 72,06 | 74,20 |
| | 0,9 | 79,47 | 78,63 | 79,43 | 80,46 | 80,86 |
| | 1 | 80,70 | 80,53 | 80,95 | 81,89 | 82,96 |
| | 1,25 | 80,08 | 79,86 | 79,09 | 81,12 | 82,25 |

Tab. 18 Naměřené hodnoty odporové pasty R 8921 – deska B.

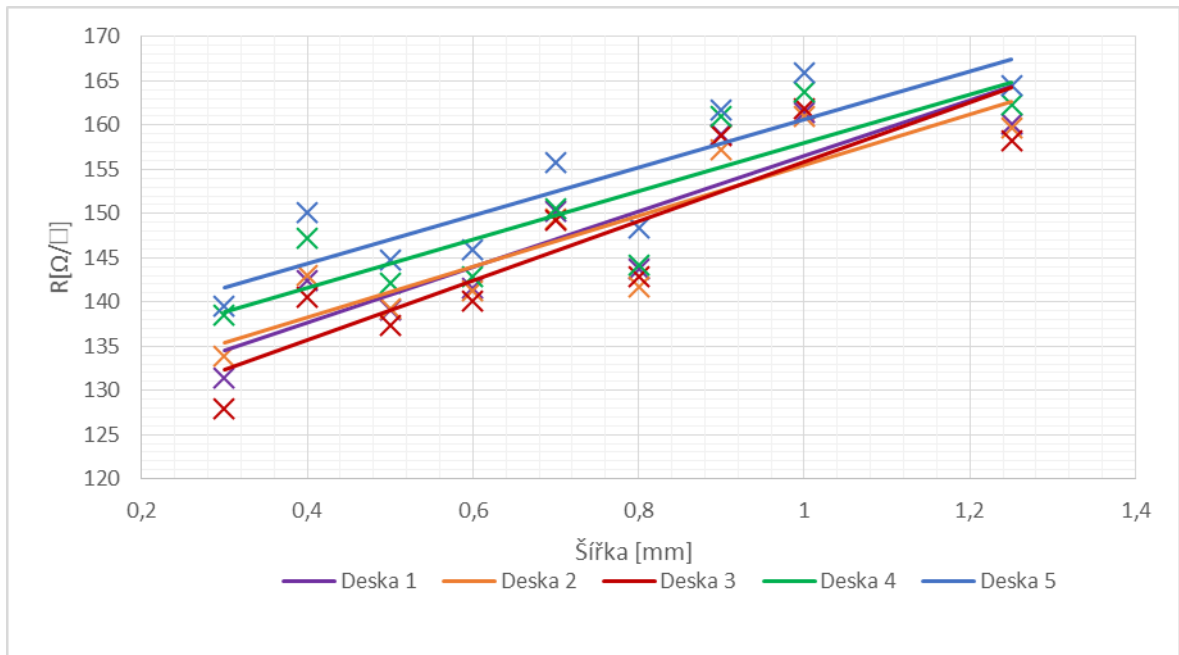
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 | Deska4 | Deska5 |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] |
| | 5 | 0,572 | 0,564 | 0,581 | 0,552 | 0,567 |
| | 10 | 1,331 | 1,306 | 1,322 | 1,320 | 1,303 |
| | 20 | 2,337 | 2,318 | 2,367 | 2,308 | 2,324 |
| | 50 | 6,518 | 6,467 | 6,505 | 6,588 | 6,548 |
| | 100 | 14,42 | 13,40 | 13,35 | 13,57 | 13,51 |
| | 150 | 19,87 | 19,83 | 20,05 | 20,34 | 20,07 |
| | 200 | 22,22 | 19,76 | 20,23 | 19,66 | 18,35 |
| | 250 | 34,94 | 34,95 | 34,98 | 35,17 | 35,15 |
| | 500 | 65,39 | 64,36 | 64,86 | 66,47 | 64,96 |
| | 1000 | 148,4 | 147,4 | 148,3 | 148,4 | 148,4 |
| | 5000 | 733,3 | 732,0 | 732,5 | 732,5 | 731,8 |
| 10000 | 1521 | 1518 | 1519 | 1512 | 1517 | |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] | R [kΩ] |
| | 1 | 0,113 | 0,111 | 0,114 | 0,113 | 0,112 |
| | 5 | 0,726 | 0,707 | 0,732 | 0,734 | 0,731 |
| | 10 | 1,431 | 1,469 | 1,483 | 1,493 | 1,473 |
| | 50 | 7,960 | 7,862 | 7,912 | 7,899 | 7,902 |

Tab. 19 Přepočtené hodnoty odporové pasty R 8921 na 1 čtverec – deska A.

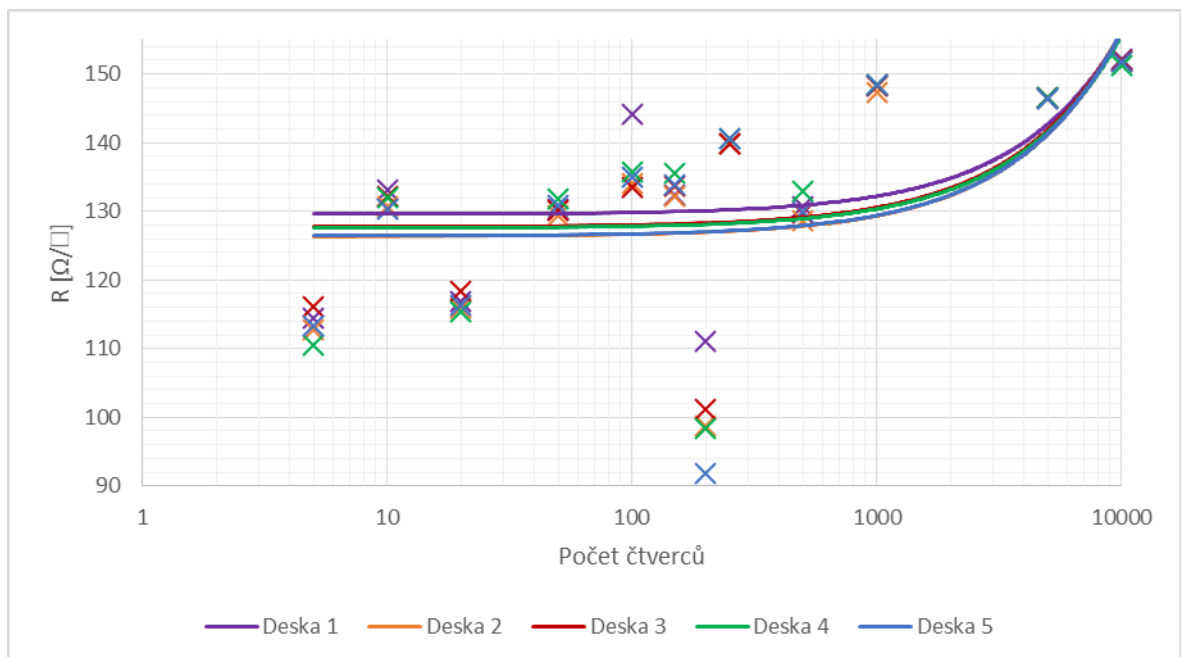
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 | Deska4 | Deska5 |
|---|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Deska A: Konstantní počet 500 čtverců s různou šířkou čáry | Šířka [mm] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] |
| | 0,3 | 131,4 | 133,8 | 128,0 | 138,5 | 139,5 |
| | 0,4 | 142,4 | 143,0 | 140,6 | 147,2 | 150,2 |
| | 0,5 | 139,1 | 139,3 | 137,4 | 142,1 | 144,8 |
| | 0,6 | 141,6 | 141,2 | 140,1 | 142,9 | 146,0 |
| | 0,7 | 150,3 | 149,4 | 149,3 | 150,5 | 155,8 |
| | 0,8 | 143,8 | 141,7 | 142,9 | 144,1 | 148,4 |
| | 0,9 | 158,9 | 157,3 | 158,9 | 160,9 | 161,7 |
| | 1 | 161,4 | 161,1 | 161,9 | 163,8 | 165,9 |
| | 1,25 | 160,2 | 159,7 | 158,2 | 162,2 | 164,5 |

Tab. 20 Přepočtené hodnoty odporové pasty R 8921 na 1 čtverec – deska B.

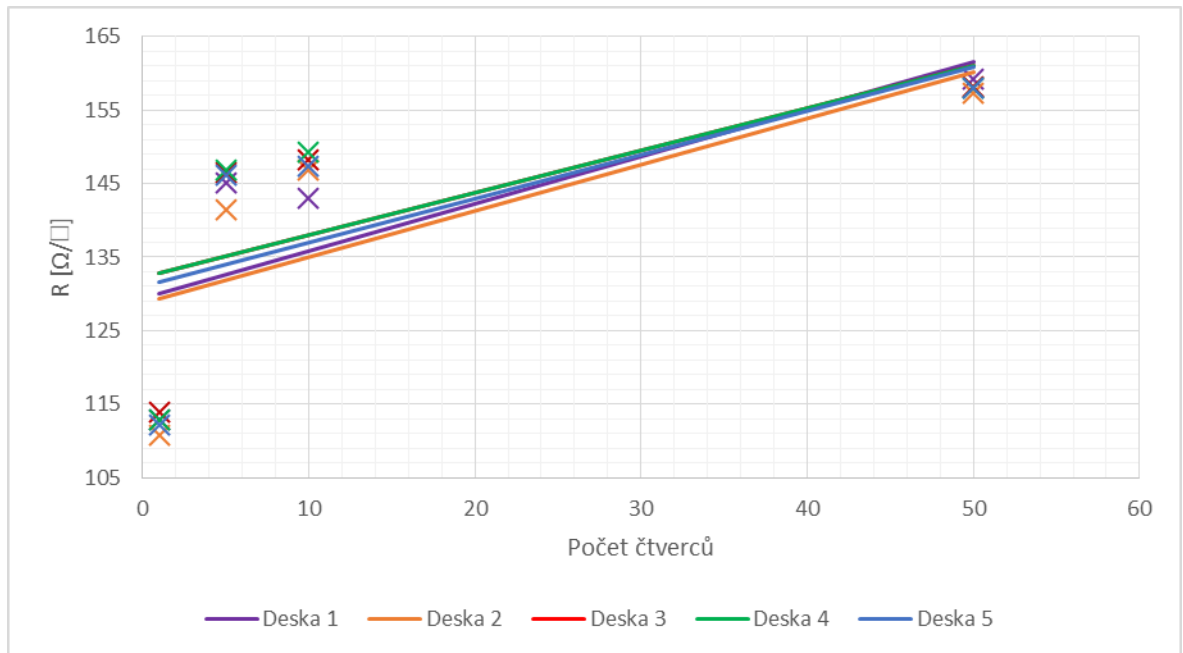
| | | Deska1 | Deska2 | Deska3 | Deska4 | Deska5 |
|---|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Deska B: Konstantní šířka 0,4 mm při různém počtu čtverců | Počet čtverců | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] |
| | 5 | 114,4 | 112,8 | 116,2 | 110,5 | 113,3 |
| | 10 | 133,1 | 130,6 | 132,2 | 132,0 | 130,3 |
| | 20 | 116,9 | 115,9 | 118,4 | 115,4 | 116,2 |
| | 50 | 130,4 | 129,3 | 130,1 | 131,8 | 131,0 |
| | 100 | 144,2 | 134,0 | 133,5 | 135,7 | 135,1 |
| | 150 | 132,5 | 132,2 | 133,7 | 135,6 | 133,8 |
| | 200 | 111,1 | 98,82 | 101,1 | 98,28 | 91,74 |
| | 250 | 139,8 | 139,8 | 139,9 | 140,7 | 140,6 |
| | 500 | 130,8 | 128,7 | 129,7 | 132,9 | 129,9 |
| | 1000 | 148,4 | 147,4 | 148,3 | 148,4 | 148,4 |
| | 5000 | 146,7 | 146,4 | 146,5 | 146,5 | 146,4 |
| | 10000 | 152,2 | 151,9 | 152,0 | 151,2 | 151,7 |
| Konstantní šířka 2 mm při různém počtu čtverců | | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] | R [Ω/\square] |
| | 1 | 112,8 | 110,8 | 113,9 | 112,8 | 112,1 |
| | 5 | 145,1 | 141,5 | 146,4 | 146,9 | 146,2 |
| | 10 | 143,1 | 146,9 | 148,3 | 149,3 | 147,3 |
| 50 | 159,2 | 157,2 | 158,2 | 158,0 | 158,0 | |



Obr 19 Závislost odporu na čtverec na šířce odporové čáry pasty R 8921 při konstantním počtu čtverců (500).



Obr 20 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (0,4 mm) odporové čáry pasty R 8921.



Obr 21 Závislost odporu na čtverec na různý počet čtverců při konstantní šířce (2 mm) odporové čáry pasty R 8921.

Závěr

Cílem práce bylo seznámit čtenáře s problematikou tisku vodivých motivů, zmapovat trh vodivých past pro keramické substráty, jejich následné porovnání podle parametrů a na vybraných vzorcích provést testy.

V úvodu práce jsou definovány základní požadavky na elektronické aplikace, popsány požadované vlastnosti na substrát, popsány vlastnosti substrátů a jejich druhy.

Kapitola 2 je věnována keramickým substrátům. Je zde popsána jejich výroba, konkrétně v kapitole 2.1, a jsou zde definovány základní typy keramických substrátů. Nejpoužívanější z nich je substrát z korundové keramiky, který má nízké výrobní náklady, výbornou mechanickou pevnost, vysokou odolnost vůči korozi, ale v porovnání s některými ostatními keramickými substráty nízkou tepelnou vodivost.

Kapitola 3 popisuje dvě tradiční metody používané k nanášení pasty na substrát a to sítotisk a šablonový tisk.

Stěžejní kapitola této práce, kapitola 4, se zabývá převážně vodivými pastami. Jsou zde uvedeni jejich hlavní výrobci, mezi které patří Heraeus, DuPont a ESL ElectroScience. Dále je v této kapitole popsán proces sušení a vypálení past. Nejdůležitější část kapitoly 4 obsahuje přehled vodivých past a jejich následné porovnání z hlediska vlastností, jako je například odpor, tloušťka natištěné vrstvy, rozlišení čar, viskozita, exspirace a cena. V porovnání z hlediska poměru cena/výkon mají nejlepší parametry dvě pasty od společnosti ESL ElectroScience, a to 9912-G a 9912-K FL. Obě mají pořizovací cenu při nákupu 50 g 4,42 €/g, mají ze všech porovnávaných past nejlepší rozlišení čar 75/75 μm , mají vysokou viskozitu 250 Pa·s a 310 Pa·s a jejich odpor se pohybuje v rozmezí 2,5 $\text{m}\Omega/\square$ až 3 $\text{m}\Omega/\square$.

Kapitola 5, což je praktická část práce, je věnována testování závislosti odporu na počtu čtverců vybraných vodivých past C 1076SD, C 2030, C 2060 a také odporové pasty R 8921. V rámci bakalářské práce byly navrženy dva různé typy desek, deska A (konstantní počet 500 čtverců různé šířky natištěné vrstvy) a deska B (různý počet čtverců při konstantní šířce 0,4 mm natištěné vrstvy).

Vodivé pasty C 1076SD, C 2030 a C 2060 byly testovány na třech vzorcích. Stříbrná pasta C 1076SD má katalogový odpor uveden $\leq 4 \text{ m}\Omega/\square$ a v žádném z uvedených měření tuto hodnotu nepřekračuje. Pasta C 2030 má uvedený odpor v katalogovém listu $\leq 40 \text{ m}\Omega/\square$ a to je splněno při měření desky A, u šířky motivu od 0,3 mm do 0,9 mm. V případě širšího motivu 1 mm a 1,25 mm je katalogová hodnota překročena o přibližně 2 $\text{m}\Omega/\square$. Při měření desky B je hodnota změřeného odporu nižší než katalogová pouze u motivů od 5 čtverců do 500 čtverců.

Při větším rozsahu je uváděný katalogový odpor překročen. Pasta C 2060 má katalogový odpor $\leq 30 \text{ m}\Omega/\square$ a ten se u všech měření potvrzuje.

V průběhu vypracovávání bakalářské práce vznikl požadavek od spolupracující firmy ELCERAM a.s. na použití navržených motivů také pro změření odporu pro odporovou pastu R 8921, která byla testována na pěti vzorcích. U měření desky A je u všech vzorků značný výkyv odporu směrem dolů u šířky čáry 0,8 mm a směrem nahoru u šířky čáry 1 mm. U měření desky B je u všech měřených vzorků velmi velký výkyv u rozsahu motivu 200 čtverců. Uváděný katalogový odpor pasty R 8921 je $90 \Omega/\square$ až $110 \Omega/\square$ a v drtivé většině měření je překročen. Do uvedeného rozsahu odporu na čtverec se vtěsná pouze měření motivu o šířce odporové čáry 0,4 mm a rozsahu 200 čtverců.

Výkyvy v hodnotách mohou být způsobeny nedokonalou geometrií natisknuté vrstvy, což znamená, že v průřezu natisknuté čáry se nejedná o ideální obdélník, nebo nedokonalostí tisku.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] FRIDRICHOVSKÝ, Martin. *Diagnostika desek plošných spojů*. Plzeň, 2014. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [2] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] FRIEDRISCHKOVÁ, Kristýna. *Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba* [online]. B.m., 2011. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: [http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne spoje.pdf](http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne_spoje.pdf)
- [4] TWISTED TRACES. *IMS Insulated Metal Substrate* [online]. 2013 [vid. 2016-květen-12]. Dostupné z: <https://www.twistedtraces.com/mini-panel/ims-inslated-metal-substrate/ims-insulated-metal-substrate-detail.html>
- [5] GIRAŠEK, Tomáš. *Substráty pro výkonovou elektroniku* [online]. 2015 [vid. 2016-duben-17]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=18118>
- [6] SCHULZ-HARDER, Jürgen. *Advantages and new development of direct bonded copper substrates* [online]. B.m., 2003. b.n. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271402003438?np=y>
- [7] *DBC Ceramic substrate* [online]. 2011 [vid. 2016-květen-12]. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20130111021959/http://www.eleceramic.com/blog/post/Direct-Bonded-Copper.html>
- [8] KOHOUTOVÁ, Petra. *Substráty pro výkonové elektronické aplikace*. Plzeň, 2013. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [9] HARPER, Charles. *High performance printed circuit boards*. Boston: New York: McGraw Hill, 2000. ISBN 00-702-6713-8.
- [10] BODYCOTE. *Izostatické lisování* [online]. [vid. 2016-květen-12]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/hot-isostatic-pressing/isostatic-pressing-services/cold-isostatic-pressing.aspx>
- [11] KAŠTYL, Jaroslav. *Vytlačování vrstevnatých keramických těles* [online]. B.m., 2011. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42438
- [12] JANOTA, Radek. *Mechanismus těrky sítotiskového stroje*. Plzeň, 2009. Západočeská Univerzita v Plzni.

- [13] SZENDIUCH, Ivan. Tlusté vrstvy (2). *Vysoké Učení Technické v Brně, FEKT, ÚMEL* [online]. 2013 [vid. 2016-březen-20]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9_vrstvy%28Bc%29.pdf
- [14] *Heraeus Holding GmbH* [online]. 2016 [vid. 2015-říjen-08]. Dostupné z: <http://www.heraeus.com/en/home.html>
- [15] *Heraeus* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heraeus>
- [16] *DuPont USA* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-09]. Dostupné z: www.dupont.com
- [17] *DuPont* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/DuPont>
- [18] *ESL ElectroScience* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-10]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/about.html>
- [19] ABZ.CZ. *Slovník cizích slov - adheze* [online]. 2015 [vid. 2015-listopad-08]. Dostupné z: <http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/adheze-adhese>
- [20] *Estery* [online]. 2016 [vid. 2016-leden-05]. Dostupné z: www.zsjablunka.cz/html/vyuka/chemie/chemie9/estery.ppt
- [21] EKOLUBE, s.r.o. *Základové oleje* [online]. 2016 [vid. 2016-leden-05]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Zakladove-oleje>
- [22] HERAEUS HOLDING GMBH. *Datasheets* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-07]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/en/product_datasheets/datasheets.aspx
- [23] DUPONT USA. *Datasheets* [online]. [vid. 2015-říjen-07]. Dostupné z: http://www.dupont.com/search.html?ss=&site=default_collection&output=xml_no_dtd&q=datasheet&SiteSearch_SiteSearch2Button=
- [24] ESL ELECTROSCIENCE. *Datasheets* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-07]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/products.html>
- [25] SANDVIK CZ S.R.O. *Cermet* [online]. 2015 [vid. 2015-říjen-08]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/cermet/pages/default.aspx
- [26] FEKT VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ. *Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě* [online]. 2010 [vid. 2016-květen-01]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11122685-1-vytvareni-tlustovrstve-pasivni-site.html>

- [27] *Solide Fuel Cells* [online]. 2016 [vid. 2016-duben-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_oxide_fuel_cell
- [28] SLOVNÍK FYZIOLOGIE. *Viskozita* [online]. 2016 [vid. 2016-duben-15]. Dostupné z: <http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/Viskozita>
- [29] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FEKT, ÚMEL. *Tlusté vrstvy* [online]. [vid. 2016-duben-15]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf

Přílohy

Příloha A: Katalogový list odporové pasty

Heraeus

Resistors

R 8900 (WP 09-XY) Series

REACH Compliant Air Fired Resistor System / DPIS*

* Development Product Information Sheet

Description

The Heraeus resistor R 8900 (WP 09-XY) Series resistor materials are REACH compliant version of R 8900 Series which is part of complete thick film materials system. Materials in this system are designed for production of high reliability, commercial and industrial hybrid microcircuit and resistor networks. The Series is not only entirely free of cadmium and nickel, but also phthalate, and it shows additionally the following key benefits:

Key Benefits

- Excellent noise and STOL values
- Compatible with C 2000 Series (Ni and Cd-free)
- R 8900 (WP 09-XY) Series offers a range of $1 \Omega / \square$ - $1 M\Omega / \square$.
- Free of nickel, cadmium and phthalate
- REACH ¹¹ and RoHS ¹² compliant

Typical Fired Resistor Properties ¹⁾

| R 8900 Series ^{2,3} | R 8911 (WP 09-56) | R 8921 (WP 09-81) | R 8931 (WP 09-42) | R 8935 L (WP 09-85) | R 8935 HN ¹⁰ (WP 09-86) | R 8941 N ¹⁰ (WP 09-82) | R 8951 N ¹⁰ (WP 09-43) | R 8961 N ¹⁰ (WP 09-83) |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Resistivity ⁴ [Ω/\square] | 10 \pm 10% | 100 \pm 10% | 1 k \pm 10% | 5 k \pm 10% | 5 k \pm 10% | 10 k \pm 10% | 100 k \pm 10% | 1 M \pm 10% |
| Temperature coefficient of resistance ⁴ TCR [ppm/K] | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 | 0 \pm 100 |
| Voltage coefficient of resistance ^{5,13} VCR [ppm/V/mm] | - | - | - | - | - | - 50 | - | - |
| Short term overload voltage ^{6,13} [V/mm] | 9 | 28 | 87 | 155 | 180 | 238 | 497 | 524 |
| Standard working voltage ^{7,13} [V/mm] | 3.6 | 11 | 35 | 62 | 72 | 95 | 199 | 209 |
| Maximum rated power dissipation ^{8,13} [mW/mm ²] | 1300 | 1280 | 1220 | 770 | 1040 | 910 | 395 | 44 |
| Quan tech noise ^{9,13} [dB] | - | - 32 | - 21 | - 10 | - 13 | - 10 | - 3 | - |

- 1) Typical properties based on laboratory test methods. For optimum results all materials should be fired in a profiled furnace supplied by dried, hydrocarbon and other contaminant free air (PP-1).
- 2) Also available: R 8901 (WP 09-84) (Resistivity: $1 \Omega/\square \pm 20\%$; TCR: ± 250 ppm/K ³⁾; other resistivity values available on request.
- 3) Processing conditions: termination; Heraeus Silver / Palladium conductor composition C 1214, prefired at 850 °C; substrate: 96% alumina (Ceramatec, Rubalit 708 S); printing: 200 mesh stainless steel screen with 30 μ m emulsion, to a dried thickness of $25 \pm 3 \mu$ m (resistivity $\leq 10 \Omega/\square$: $22 \pm 3 \mu$ m); firing: 60 minute cycle (furnace entry to exit) to a peak temperature of 850 °C for 10 minutes.
- 4) Shipping specifications: Resistor geometry: 1.5 x 1.5 mm. Temperature coefficient of resistance: -55 °C to +25 °C and +25 °C to +125 °C.
- 5) Voltage coefficient of resistance: Resistor geometry 1 x 1 mm laser trimmed with P-cut to 1.5 x fired value. VCR measured from 5 - 50 VDC.
- 6) Short term overload voltage: voltage required (5 seconds duration) to induce a resistance change of 0.1% in a 1 x 1 mm resistor at 25 °C.
- 7) Standard working voltage: 0.4 x short term overload voltage.
- 8) Maximum rated power dissipation: (standard working voltage)²/resistance
- 9) Resistor geometry: 1 x 1 mm
- 10) Improved pastes with decreased firing sensitivities
- 11) REACH compliant according to the Commission Regulation (EU) No 143/2011 of 17 February 2011 amending Annex XIV to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals ("REACH") by European Chemicals Agency and its subsequent amendments; we define a material as REACH compliant, as long as substances used are not recorded in the Annex XIV.
- 12) RoHS compliant according to the Directives (European Union) No 2011/65/EC of Restriction of Hazardous Substances ("RoHS") and its subsequent amendments including the exceptions No. 7.c. I of the EU Directive e.g. related to Pb
- 13) Test made with R 8900 Series

Resistors

R 8900 (WP 09-XY) Series

REACH Compliant Air Fired Resistor System / DPIS*

* Development Product Information Sheet

Processing

1. Stir well prior to processing. When stored in a refrigerator allow paste to come to room temperature to avoid condensation.
2. Print through a 200 mesh stainless steel screen, 30 µm emulsion. Total screen thickness: 90 – 110 µm.
3. Level at room temperature for 5 – 10 minutes.
4. Dry at 150 °C for 10 minutes. Dried film thickness should be 25 ± 3 µm.
5. The electrical performance given in this data sheet refers to a 60 minute firing cycle, with a peak temperature of 850 °C for 10 minutes.

Blend Break

1. Adjacent decades may be blended to yield intermediate values that conform to R 8900 (WP 09-XY) Series specifications.
2. A blend break exists between R 8931 (WP 09-42) and R 8941 N (WP 09-82) which are not directly blendable, but for blending, two 5 kΩ/□ pastes are available, e.g. R 8935 L (WP 09-85) (compatible with the low-ohmic end R 8931 (WP 09-42)) and R 8935 HN (WP 09-86) (compatible with the high-ohmic end R 8941 N (WP 09-82)).

Laser Trim Stability

All tests were performed on 1 x 1 mm resistors, not overglazed, and terminated with C 1214 (Ag/Pd).

Thinner HVS 100

Typical Properties

| | |
|-------------|---|
| Form: | Thixotropic paste |
| Viscosity: | 20 - 50 Pas (25 °C, D = 100 s ⁻¹) |
| Coverage: | 80 - 110 cm ² / g |
| Shelf life: | 6 months from date of shipment with correct storage (in a dry, cool (5 – 25 °C) and dark place with container tightly shut) |

Compatibilities

| | |
|--|-----------------------|
| Conductors, various standard terminations: | |
| Ag | C 1075 S, C 1075 SD |
| AgPd | C 2000 Series, C 1214 |
| AgPt | C 1076 SD |
| Au | C 5754 B, C 5007 |

Overglazes: IP 9025 ST (500 °C)
IP 9029 H (600 °C)

Dielectrics: IP 9117 Series

Trimming Parameters

Trimming to 1.5 times the fired value with a Nd-YAG-laser with a single plunge cut

| | |
|----------------|--------------|
| Trim Speed: | 10 - 30 mm/s |
| Q-Rate: | 2 - 5 kHz |
| Average Power: | 0.8 - 1.5 W |

Trim Performance

Initial Accuracy: ± 0.1 %

Long Term Stability (1000 hrs):

85 °C/ 85 % RH: ± 0.2 %

150 °C aging: ± 0.2 %