

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Metody pouzdření elektronických součástek a modulů na  
textilních substrátech**

**Jiří Kovář**

**2021**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří KOVÁŘ**  
Osobní číslo: **E18B0128P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Metody pouzdření elektronických součástek a modulů na textilních substrátech**  
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou pouzdření elektronických součástek a modulů.
2. Vypracujte přehled metod pouzdření konvenčních součástek a elektronických modulů.
3. Provedte literární rešerši dostupných publikací popisujících montáž konvenčních el. komponent a celých modulů na textilní substráty.
4. Analyzujte výsledky rešerše na jejichž základě uveďte doporučení pro pouzdření na textilních substrátech.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ARDEBILI, Haleh, ZHANG, Jiawei a PECHT, G. Michael : Encapsulation Technologies for Electronic Applications. 2. vydání. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-811978-5.
2. MACH, Pavel, URBÁNEK Jan a SKOČIL Vlastimil: Montáž v elektronice: pouzdržení aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
3. Electronické informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Kalaš**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na pouzdření elektronických součástek a to zejména na textilních substrátech. Cílem této práce je popis jednotlivých technik a použitých materiálů pro pouzdření, konvenčních elektronických součástek a modulů na textilních substrátech, kritické zhodnocení jednotlivých přístupů a posouzení vhodnosti pro textilní aplikace. V první části práce jsou obecné informace a přehled metod o pouzdření konvenčních elektronických součástek. Druhá část práce obsahuje popis již zmíněných technologií montáže elektronických konvenčních komponentů na textilní substráty.

## **Klíčová slova**

Elektronické pouzdření, metody pouzdření, enkapsulace, e-textilie, nositelná elektronika

## **Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the encapsulation of electronic components mainly on textile substrates. The aim of this work is to describe the types of methods for the use of conventional electronic components on textile substrates, to describe the problems of this technology and to recommend individual methods for certain applications. The first part of the thesis contains general information and an overview of methods for encapsulation conventional electronic components. The second part of the work contains a description of the already mentioned technologies of assembly of electronic conventional components on textile substrates.

## **Key words**

Electronic encapsulation, encapsulation methods, encapsulation, e-textiles, wearable electronics

## **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/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2021

Jiří Kovář

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Kalašovi, za ochotu, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1. POUZDŘENÍ ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK A MODULŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1    ÚROVNĚ POUZDŘENÍ .....	12
1.2    FUNKCE POUZDRA .....	13
<b>2. METODY POUZDŘENÍ KONVENČNÍCH SOUČÁSTEK A MODULŮ</b> .....	<b>16</b>
2.1    HERMETICKÁ POUZDRA .....	16
2.2    NEHERMETICKÁ POUZDRA.....	18
2.2.1.  MATERIÁLY .....	18
2.2.2.  TECHNOLOGIE VÝROBY NEHERMETICKÝCH POUZDER .....	20
<b>3. METODY POUZDŘENÍ KONVENČNÍCH ELEKTRONICKÝCH KOMPONENT A MODULŮ     NA TEXTILNÍ SUBSTRÁTY</b> .....	<b>25</b>
3.1    DRUHY METOD POUŽÍVANÝCH PRO POUZDŘENÍ NA TEXTILNÍ SUBSTRÁTY:.....	26
<b>4. DOPORUČENÉ POUZDŘENÍ NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ ANALÝZY REŠERŠE</b> .....	<b>40</b>
4.1    ANALÝZA VÝSLEDKŮ REŠERŠE .....	40
4.2    VYHODNOCENÍ .....	47
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ:</b> .....	<b>49</b>



## Úvod

V současné době jsou na vzestupu nové materiály a technologie, které umožňují plně integrovat aktivní i pasivní sensorové prvky (teplota, tlak, vlhkost apod.) nebo antény do textilií. Tyto prvky lze využít například pro monitorování životních funkcí pacientů, sledování okolního prostředí hasičů, nebo optimalizovat tréninkové jednotky u sportovců. Avšak ne všechny obvody a součástky, zejména integrované obvody lze snadno integrovat přímo do textilu. Tento problém lze v současné době vyřešit buď vyčleněním vyhodnocovací, komunikační nebo ovládací elektroniky mimo textilií nebo kontaktováním součástek a modulů přímo na textilní substrát. Elektrický kontakt na textilií lze realizovat řadou metod - například pájením a lepením, jenž vychází z výroby standardních plošných spojů, odporovým svařováním, ultrazvukovým svařováním nebo šitím. Realizace kontaktu je však pouze první krok k vytvoření spolehlivého a dlouhodobě stabilního kontaktu. Pro zajištění mechanické a chemické odolnosti je nezbytnou součástí také pouzdření daných součástek a modulů. Pouzdření není jen obyčejné „vlození“ součástek do obalu, ale problém, při jehož řešení musíme brát v potaz řadu elektrických (dielektrické ztráty, permitivita, dielektrická pevnost), ale i mechanických (odolnost proti oděru a vibracím) či chemických (odolnost pro zásadám a solím) vlastností vybraných materiálů. To dělá z pouzdření nejen na textilní substráty multidisciplinární obor s požadavky na vysokou jakost a odolnost výrobku, ale zároveň na nízkou cenu a miniaturizaci. Tyto požadavky jsou v případě textilních substrátů dále rozšířeny o zachování flexibility a pohodlí uživatele. A právě výběrem a porovnáním vhodných technologií a metod pouzdření se zabývá předkládaná bakalářská práce.

V této bakalářské práci jsou popsány metody pouzdření elektronických komponentů na textilní, ale i konvenční substráty a problematika s těmito technologiemi spojená. Dále se tato práce zaměřuje na spjitosti, nebo naopak rozdíly mezi konvenčními technikami pouzdření na běžné rigidní a flexibilní substráty a pouzdření na textilie. V závěru práce je pak věnován prostor zhodnocení jednotlivých metod pouzdření na textilní substráty a jejich vhodnost v závislosti na cílové aplikaci.

## Seznam symbolů a zkratk

<i>BGA</i>	Ball grid array (typ pouzdra s vývody tvaru „kuliček“)
<i>CPU</i>	Central processing unit (centrální procesorová jednotka)
<i>Co-fired</i>	„Spolu-vypalovatelné“ – označení typů keramických pouzder
<i>CAD</i>	Computer aided design (počítačem podporované projektování)
<i>CTE</i>	Koeficient tepelné roztažnosti
<i>DIP</i>	Dual in-line package (elektronické pouzdro s dvěma řadami vývodů)
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>ECAD</i>	Electronic and Electrical Computer-aided design (CAD pro elektroniku)
<i>EMC</i>	Electromagnetic compability (elektromagnetická kompatibilita)
<i>EP37-3ELF</i>	Typ lepidla
<i>FEA</i>	Finite element method (metoda konečných prvků)
<i>ISO 6330</i>	Norma pro testování pracích cyklů
<i>JESD22</i>	Norma pro testování teplotních cyklů
<i>LED</i>	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
<i>MCAD</i>	Mechanical Computer-aided design (CAD pro modelování oběktů)
<i>MEMS</i>	Micro electro mechanical systems (mikro elektro mechanické systémy)
<i>PC</i>	Personal comuter (osobní počítač)
<i>RF</i>	Radio frequency (vysokofrekvenční)
<i>SMD</i>	Surface-mount device (povrchově montované součástky)
<i>SMT</i>	Surface-mount technology (povrchová montáž součástek)
<i>THT</i>	Tthrough-hole technology (montáž součástek s drátovými vývody)
<i>UV</i>	Ultraviolet (ultrafialové záření)
<i>3D</i>	Trojdimenzionální, trojrozměrný
<i>ABS</i>	Akrylonitril-butadien-styren
<i>TPE</i>	Termoplast elastomer
<i>TPU</i>	Termoplastický polyuretan
<i>Co</i>	Kobalt
<i>Cu</i>	Měď
<i>Fe</i>	Železo
<i>Kovar</i>	Slitina železa, niklu a kobaltu
<i>Ni</i>	Nikl
<i>PDMS</i>	Polydimethylsiloxan

*PTEG* ..... Polyethylen tereftalát glykol  
*PVC*..... Polyvinylchlorid (druh plastu)  
*SiO<sub>2</sub>* ..... Oxid křemičitý

# 1. Pouzdření elektronických součástek a modulů

Pouzdra poskytují elektronickým součástkám ochranu před vlivy vnějšího prostředí, rozvod elektrického signálu, odvod tepla atd. Pouzdra elektronických součástek existují v nejrůznějších provedeních. Tato provedení se mohou dle aplikace lišit - lze jmenovat několik příkladů: součástky určené pro výkonové aplikace musí být dimenzovány tak, aby byly schopné odvést ztrátové teplo; součástky určené pro vysokofrekvenční aplikace vyžadují materiály s nízkou permitivitou; moduly určené do výbušných prostředí, které musí mít disipativní povrch, zaručující odvod povrchového náboje a zamezení vzniku jiskry, která by mohla mít fatální následky; v případě smart textilií je nutná dostatečná chemická a mechanická odolnost a miniaturní rozměry. V dnešní době je velmi časté použití zapouzdřených součástek na pevných deskách plošných spojů (DPS), kde nejčastěji můžeme vidět součástky typu SMT (surface-mount technology), které jsou osazeny na povrchu DPS, nebo THT (through-hole technology) které mají vývody procházející otvory v DPS a jsou k ní připájeny. Kvůli rychlému vývoji v elektrotechnice se musí neustále vyvíjet i metody pouzdření tak, aby bylo možné vyhovět požadovaným aplikacím.

## 1.1 Úrovně pouzdření

V elektronických aplikacích se můžeme setkat s různými úrovněmi pouzdření. Každá úroveň využívá jiné technologie, jiné výrobní postupy pouzdření a klade na ně jiné nároky.

- **Montáž první úrovně**

Je proces, kdy je součástka (čip) první úrovně montována na základnu pouzdra první úrovně. Součástka se propojuje s vývody základny první úrovně a to celé se zapouzdří ochranným krytem, který je například z kovu či plastu a tento celek dá dohromady diskrétní součástku. Součástka, která vznikne montáží první úrovně se nazývá součástkou druhé úrovně (to může být například integrovaný obvod) [1].

- **Montáž druhé úrovně**

Při této montáži se osazuje součástka druhé úrovně na základnu pouzdra druhé úrovně. Děje se tak třeba při montáži integrovaného obvodu na DPS, nebo na jakýkoliv jiný substrát, například ten textilní. Vznikají tak například grafické, síťové, nebo zvukové karty

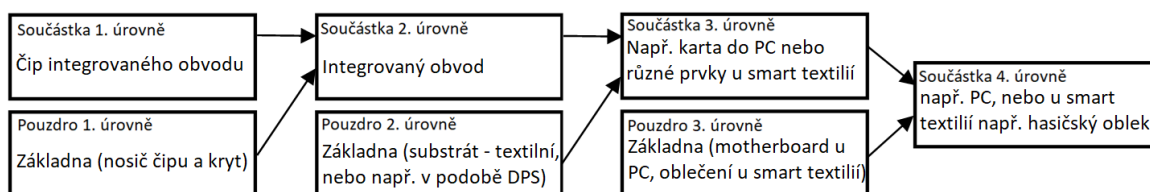
u PC. Výsledkem montáže druhé úrovně je součástka třetí úrovně [1].

- **Montáž třetí úrovně**

V rámci této úrovně jsou moduly z předchozí úrovně spojeny do jednoho celku. To se děje například při vkládání grafických nebo síťových karet do mateřské desky u PC. Nebo také spojení různých funkčních částí u „elektronických inteligentních textilií“ do jednoho funkčního celku (například hasičského obleku). Výsledkem montáže třetí úrovně vznikne funkční celek čtvrté úrovně, což může být například PC [1].

- **Montáž čtvrté úrovně**

Tato montáž by vznikla například spojením různých systémových skříní, nebo různých jiných celků [1], [2].



Obr. 1 Příklad hierarchie součástek a pouzder v systému pc (nakresleno na základně informací z [1] a [2]).

## 1.2 Funkce pouzdra

Pouzdro jako takové musí plnit několik funkcí, které jsou nezbytné pro dlouhodobou stabilitu a funkci. Mezi hlavní funkce můžeme zařadit:

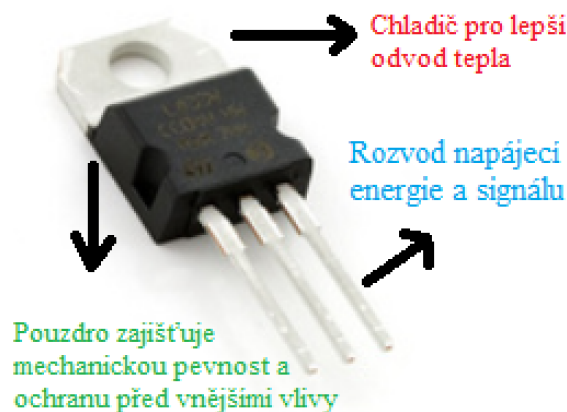
- **Rozvod elektrického signálu a napájení**

Hlavní elektrická funkce pouzdra je přenos signálu (analogového, či digitálního) v co nejkratším čase. U střídavého signálu dochází například ke změně amplitudy a tvaru. V tomto případě hrozí riziko špatné indikace logické úrovně, nebo změnu časového odstupu mezi pulzy a tím chybnou funkci logické jednotky a to dále může zapříčinit chybnou funkci zařízení obsahující tuto součástku. U stejnosměrného napájecího napětí je

závažné zkreslení jeho velikosti, kdy se toto napětí musí pohybovat v určitých mezích. Ještě závažnější je ale změna referenčního napětí, jelikož ta může způsobit nesprávné vyhodnocení logické úrovně a tím pádem i celého obvodu. Rozvod elektrického signálu musí být řešen tak aby docházelo k co nejmenší degradaci signálu v důsledku fyzikálních parametrů spojů a byl maximálně potlačen přeslechový šum. Spoje by měly být co nejkratší, aby bylo minimalizováno zpoždění signálu. Speciální kapitolou je rozvod napájení, který by měl co nejméně omezovat ostatní spoje, musí být dimenzován s ohledem na přenášený výkon a dovolené oteplení vlivem ztrátového tepla součástky a také by měl být co nejmenší počet průchozích děr [1], [2].

- **Odvod tepla**

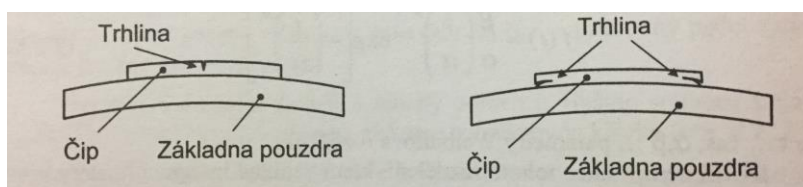
Odvod tepla je rovněž velice důležitý, jelikož například integrované obvody se v dost případech značně zahřívají. Toto teplo se odvádí základnou pouzdra, vývody a také vlastním pouzdem. Při větších tepelných výkonech musí být pouzdro opatřeno chladičem, který je s pouzdem mechanicky a tepelně spojen. Když nestačí ani chladič je potřeba zařízení opatřit ventilátorem, či jiným chladičím systémem [1], [3].



Obr. 1.2 Základní funkce pouzdra elektronické součástky (překresleno z [4])

- **Zajištění mechanické pevnosti a ochrany před vnějšími vlivy**

Zajištění mechanické pevnosti je důležité kvůli ochraně před vlivy vnějšího prostředí. Tyto pouzdra se vybírají s ohledem na prostředí, ve kterém budou plnit svou úlohu a také s ohledem na cenu. Ochranná pouzdra se vyrábí například z keramiky, kovů, nebo plastů (které jsou oproti kovovým a keramickým materiálům lacinější). Pouzdro vytváří ze součástky jeden celek, který je mechanicky odolný podle požadavků. Elektronické součástky se skládají z různých materiálů, které mají rozdílné koeficienty délkové roztažnosti a to zapříčiňuje při změnách teploty (zahřívání při funkci součástky) mechanické napětí, které může způsobit praskliny. U tenkých substrátů vznikají trhlinky v oblasti připojení čipů, v pájených spojích apod. [1].



Obr. 1.3 Na tomto obrázku jsou vidět trhlinky čipů připojených na základny kovových či plastových pouzder (převzato z [1])

Mechanické zatížení vzniká také u rozebíratelných kontaktů na DPS například v důsledku špatné rovinnosti propojovací desky při její montáži. Krom materiálů ze kterého jsou pouzdra obvodů vyrobeny má na jejich mechanické namáhání vliv i jejich konstrukce. Například pouzdra typu SMD, nebo BGA jsou mnohem náchylnější k prasklinám způsobeným rozdílnými roztažnostmi materiálů ovlivněných změnou teploty než vývodové součástky. Vývodové součástky totiž částečně změnu délky materiálu převedou do deformace pružnějších vývodů a tím pádem je menší riziko prasklin. Pouzdro také musí zajistit ochranu součástek proti vibracím a nárazům. Vibrace a nárazy totiž způsobují mikrotrhliny jednak v pouzdru a také u pájených spojů. Tyto mikrotrhliny se postupně zvětšují a časem mohou způsobit poruchu. Vibracím a otřesům jsou vystaveny například mobilní zařízení. Proto je důležité aby součástky měly malou hmotnost a byly z odolných materiálů. Pájené spoje lze ovlivnit typem pájky, geometrií vývodů velikostí a hmotností pouzdra [1].

- **Splnění podmínek elektromagnetické kompatibility**

Pouzdro by mělo splňovat podmínky elektromagnetické kompatibility (EMC) [5], aby nenarušovalo chod jiných prvků a také aby jiné prvky nemohly ovlivňovat elektroniku v pouzdru. Je proto třeba řešit stejnosměrné i vysokofrekvenční vlastnosti vodivých spojů a případně řešit stínění pouzdra. Ve výsledku by pouzdro mělo zabraňovat vyzařování signálů a stínit před vnějším rušením [1].

## **2. Metody pouzdření konvenčních součástek a modulů**

Pouzdra a pouzdřicí hmoty tvoří ochrannou „schránku“ polovodičových čipů, elektronických součástek, integrovaných obvodů a funkčních modulů. Chrání je před mechanickými a chemickými vlivy okolního prostředí, odvádí přebytečné teplo a tvoří elektrickou izolaci. Podle vzduchotěsnosti lze pouzdra rozdělit na:

### **2.1 Hermetická pouzdra**

Hermetická pouzdra jsou plynotěsná a odolná vůči vlhkosti a vnějším chemickým vlivům. Nejčastěji se jedná o kovová nebo keramická pouzdra, která vykazují vyšší spolehlivost než pouzdra nehermetická. Z toho důvodu jsou rozšířena především v lékařské, letecké či například ve vojenské technice. Díky dobré tepelné vodivosti jsou také využívána pro výkonové aplikace [6].

- **Keramická pouzdra**

Tato pouzdra se používají pro náročnější aplikace jako jsou pouzdra CPU pro PC a pouzdra pro RF (vysokofrekvenční) či MEMS aplikace. Dříve tato pouzdra dominovala, dnes je u většiny aplikací nahradila pouzdra plastová. Mohou být spojeny se skleněným nebo metalickým vrškem. Tato pouzdra jsou kvůli náročnější výrobě dražší než pouzdra plastová [7].

### **Technologie výroby**

Tyto součástky se obvykle vytvářejí jako monolity, které se celé vypalují v peci (odtud název „Co-Fired keramika“) i s veškerými vodivými, odporovými a dielektrickými



materiály. Často se vyrábí jako vícevrstvé. Výchozím materiálem jsou kompozitní „zelené pásy“, (které jsou flexibilní a snadno obrobitelné) obsahující polymerní pojiva a keramické částice. Kovové struktury lze přidávat do vrstev, obvykle pomocí výplně a sítotisku. Jednotlivé pásy se pak spojí při laminování před vypálením v peci, kde se spaluje polymerní část a keramické částice se slinují a tvoří keramickou složku [7].

- **Skleněná pouzdra**

Tato pouzdra mají výborné těsnící vlastnosti a jsou chemicky téměř netečná. Bývají použity tam kde je třeba rozdílný tlak oproti okolnímu prostředí, nebo chemické, či elektrické odizolování. Sklo může být dobře průhledné a proto se používá pro různé „optické aplikace“, jako jsou zdroje světla (např. žárovka), či optické detektory. Tato pouzdra se dříve také hojně využívala pro konstrukci elektronek [8].

### **Technologie výroby**

Tato pouzdra se zpracovávají tepelně, například tavením a následným „vyfukováním skla“ podobně jako se to dělá u skleněných nádob a finálním zatavováním vývodů [8].

- **Kovová pouzdra**

Kovová pouzdra jsou hermetická, velmi dobře chrání obvod, odstiňují elektromagnetické záření, a dobře odvádí teplo (např. u výkonových aplikací), jsou ale dražší než plastová. Nejběžnější materiál, ze kterého jsou kovová pouzdra vyrobena, je kovár. To je obchodní název pro slitinu železa, niklu a kobaltu (Fe 52 %, Ni 29 %, Co 18 %). Typické pouzdro se pak skládá ze základny s vývody nesoucí čip a víčka, které je potřeba velmi dobře spojit (například pájením nebo svařením) [7], [8].

### **Technologie výroby**

Výběr technologie záleží na pracovní teplotě obvodu. Vývody z pouzdra jsou těsněny borokřemičitým sklem, jež zajišťuje hermetičnost a izolaci mezi vývodem a pouzdrům. Toto sklo při zahřátí k teplotě tavení skla (cca 500 °C až 600 °C) rozpustí do svého objemu oxidy z povrchu materiálu pouzdra. Vznikne tak vrstva (v anglické literatuře označovaná jako “glass to metal seal”) mezi materiálem pouzdra a těsnícím borokřemičitým sklem, jež

zajišťuje správnou adhezi a má s pouzdem podobný koeficient tepelné roztažnosti CTE [7], [8].

## 2.2 Nehermetická pouzdra

Hermetická pouzdra mají řadu užitečných vlastností, ale v souvislosti s chytrými textiliemi se vyznačují jednou velkou nevýhodou, a to vysokou teplotou zpracování [9], [10], která je činí zcela nekompatibilní se standardními textilními substráty [11], [12]. S ohledem na teplotní odolnost textilních materiálů, hmotnost, a pružnost, které je u textilu důležité brát v potaz, se jako použitelné jeví pouze metody nehermetického pouzdření s využitím polymerních materiálů. Na základě tohoto faktu je tato kategorie detailněji popsána. Jelikož více druhů nehermetických pouzder lze vyrobit ze stejného materiálu a zároveň pro jeden typ nehermetického pouzdra lze využít více materiálů, tak jsou v této kapitole nejprve popsány polymerní materiály, které se nejčastěji využívají pro výrobu nehermetických pouzder a následně metody pouzdření, které tyto materiály využívají. Díky své nízké ceně, všestrannosti a snazší automatizaci tvoří plastová pouzdra přibližně 95% trhu s pouzdry. Existují však i nevýhody, mezi které patří např. nízká doba skladovatelnosti pouzdřicích materiálů. Výsledné vlastnosti pouzdra jsou výrazně ovlivněny délkou a vývojem teploty během skladování. Aby bylo docílilo co nejdelší životnosti, jsou tyto materiály uchovávány při nízkých teplotách. Většina používaných materiálů je na bázi pryskyřic se složkami zajišťující vazební, vytvrzovací a samozhášivé vlastnosti. Typickými představiteli jsou epoxidové, silikonové a polyuretanové pryskyřice. Obecně lze materiály plastových pouzder rozdělit do tří skupin: reaktoplasty, termoplasty, elastomery [6].

### 2.2.1. Materiály

- **Reaktoplasty (termosety)**

Reaktoplasty jsou vysoce zesítené polymerní řetězce. Užívají se velmi často pro výrobu pouzder, například kvůli svým výborným elektrickým, mechanickým a tepelným vlastnostem, snadné automatizaci výroby či nízké ceně. Bývají často tmavě hnědé nebo černé barvy. Materiály tohoto typu se vytvrzují teplem, tlakem, zářením nebo působením katalyzátoru. Opětovným působením těchto vlivů nelze reaktoplasty dostat do původního

stavu [13] a tím pádem je není možné recyklovat a použít pro výrobu dalších součástek. Do této skupiny patří například [6]:

- **Epoxidové pryskyřice** které jsou u pouzder nejpoužívanější a mají výbornou adhezi ke kovu i sklu, nevýhodou je frekvenční závislost permitivity a činitele dielektrických ztrát, odolávají teplotám od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$  a také jsou odolné vůči působení množství chemických látek.

- **Silikony**, jenž jsou sloučeniny tvořené křemíkem a kyslíkem. Vyrábí se např. ve formě ochranného laku, lepidla či pasty. Silikony disponují velmi dobrou tepelnou stabilitou. Odolávají teplotám v rozmezí od  $-60^{\circ}\text{C}$  až  $200^{\circ}\text{C}$  a krátkodobě odolají i teplotám do  $350^{\circ}\text{C}$ . Jejich dielektrické vlastnosti se mění jen minimálně s teplotou a frekvencí. Jedná se o fyziologicky inertní materiály. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

- **Fenolytické pryskyřice**

- **Kaučuky, pryže**



Obr. 2.1 Plastová pouzdra DIP (převzato z [14])



Obr. 2.3 Obvod zalitý v epoxidu (převzato z [6])

- **Termoplasty**

Termoplasty jsou materiály s dlouhými lineárními molekulami bez mezimolekulárních vazeb. Díky nepřítomnosti mezimolekulárních vazeb je umožněno velkým lineárním molekulám se po sobě pohybovat. Díky tomuto typu pojiva se dosahuje dobré pružnosti i odolnosti vůči únavovému poškození způsobeného ohybem. Jsou tvárné při zahřátí nad

určitou teplotu (často od 100 °C do 130 °C) a tím pádem dobře zpracovatelné (např. metodou odlévání nebo lisování) [15]. Díky této vlastnosti je ale nelze použít v aplikacích kde je třeba, aby pouzdro odolávalo vyšším teplotám. Do termoplastů patří například polyethylen, polystyren, polymethylmethakrylát (plexisklo), polyvinylchlorid (PVC) nebo polyamidy (např. nylon, silon) [6].

- **Elastomery**

Jsou vhodné pro své elastické vlastnosti. Používají se pro výrobu izolací, lepidel, těsnění, nebo také podrážek či tlumičů [6].

### 2.2.2. Technologie výroby nehermetických pouzder

- **Potting (zalévání)**

Používají se termosetické plasty, gely ze silikonového kaučuku, ale i epoxidové pryskyřice. Zalévání se používá pro zvýšení odolnosti vůči nárazům, vibracím, vlhkosti, korozivním látkám, či pro vysokonapěťové aplikace a omezení plynných jevů jako je koronový výboj.

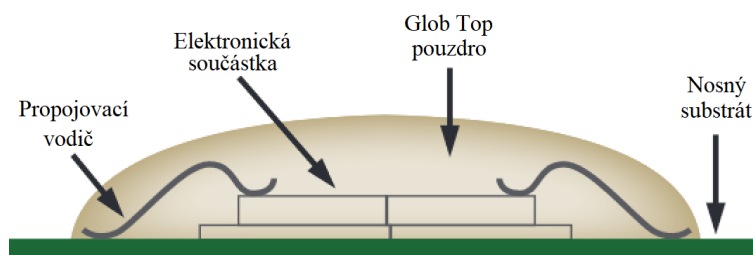
Při této metodě se elektronické sestavy zalévají uvnitř formy izolační kapalnou sloučeninou, která po vytvrzení trvale chrání sestavu. Forma je po vytvrzení zalévací hmoty sejmuta z výrobku, nebo je jeho součástí a tvoří vnější obal [16].



Obr. 2.4 Zalévání napájecího zdroje pro automotive (převzato z [17])

- **Glob Top**

Tato metoda se často používá například pro pouzdření holých čipů přímo na nosný substrát. Onen čip se přilepí k substrátu a následně se elektricky propojuje pomocí mikrodrátků. V této fázi je čip s propoji velice náchylný na mechanické namáhání, chemikálie a korozi způsobenou vlhkostí. K zamezení těchto nežádoucích vlivů je následně nanesen jedno nebo dvousložkový epoxid či UV vytvrditelná sloučenina. Tento materiál má často tixotropní vlastnosti (snadno teče během aplikace, ale po aplikaci se viskozita rychle zvyšuje). Tato změna viskozity umožňuje materiálu plynulý tok do úzkých prostorů a zároveň brání toku materiálu mimo oblast pouzdřeného čipu. Po vytvrzení tento vzniklý glob-top chrání příslušné komponenty před nečistotami, vlhkostí a nežádoucími mechanickými vlivy. Glob-top výborně elektricky izoluje zapouzdřené součástky, odvádí teplo, je odolný vůči velkému množství chemikálií a obvykle neobsahuje iontové nečistoty, jež by mohly reagovat s vlhkostí a způsobovat korozi. Je důležité, aby daný glob-top po vytvrzení vykazoval minimální smrštění, který by způsoboval mechanické napětí na chip a propojovací vodiče. U této technologie je důležité neopomenout tepelné charakteristiky použitých materiálů. Pro snížení koeficientu tepelné roztažnosti (CTE) se k základní směsi přidávají plniva jako je oxid křemičitý, či oxid hlinitý. CTE značí změnu délky materiálu při změně teploty o jeden stupeň. Pokud je CTE substrátu a glob-topu hodně rozdílné, může dojít k poškození zařízení [18].

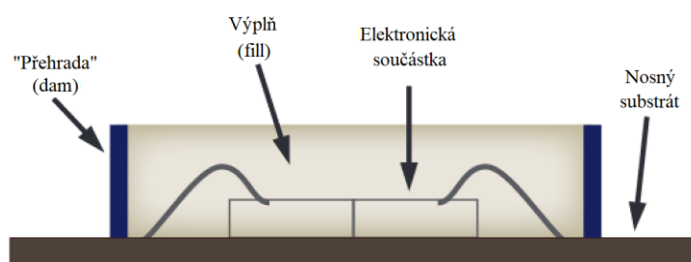


Obr. 2.5 Příklad zapouzdřeného čipu na DPS metodou „Glob Top“

(převzato z [19])

- **Dam&Fill**

Tato metoda je podobná metodě glob-top, ale s tím rozdílem že jsou použity 2 druhy materiálu s různou viskozitou. Nejprve se vytvoří „přehrada“ z materiálu s vysokou (vyšší než u výplně) viskozitou, která tvoří pevnou hráz na přesně definovaném místě, do které je možné vpravit materiál s nižší viskozitou. Do hotové „přehrady“ se pak aplikuje materiál s nižší viskozitou, která zaručuje zatečení materiálu i do nejmenších prostor. Dam-and-fill je preferována pro aplikace, které mají náročné tolerance výšky čipu, jako je nízkoprofilová čipová karta. Teplota při tomto pouzdrění závisí na materiálu, ale pohybuje se někde mezi 60 °C - 110 °C, zahřátím této pouzdricí hmoty se dosahuje menší viskozity a lepšímu proudění a tím se snižuje riziko vzduchových kapes. Tato metoda pouzdrění je jednoduchá, rychlá a není příliš drahá a lze takto pouzdrřit elektronické součástky, integrované obvody, celé elektronické sestavy nebo pouze samotné čipy. Dnešní technologie jsou schopné vytvářet i spodní výplně pod pouzdry BGA. Tato metoda nese označení „Underfilling“. Pouzdricí hmota se nanáší zařízením zvaným „dispenzer“, který tuto hmotu nanáší v definovaných dávkách pomocí jehly. Používají se způsoby jako je tlakové nanášení s definovanou dobou, nanášení prostřednictvím rotačního čerpadla nebo lineární nanášení [20], [21].

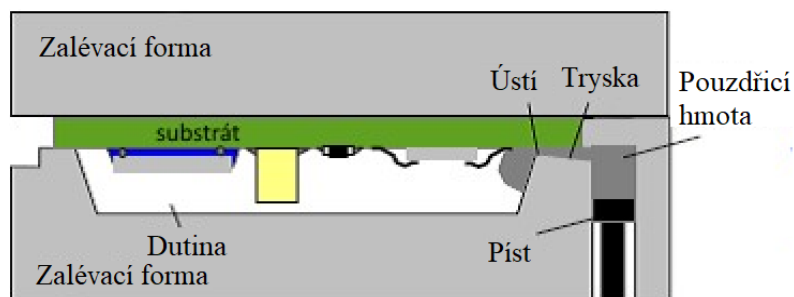


Obr. 2.6 Příklad zapouzdrěného čipu na DPS metodou „Dam&Fill“  
(převzato z [19])

- **Vstřikování**

Výrobky zhotovené vstřikováním mají dobrou rozměrovou stálost. Touto metodou lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů a nějaké druhy reaktoplastů či kaučuků. Vyrábí se z plastových granulí, které se za působení určitého tlaku a teploty roztaví a poté

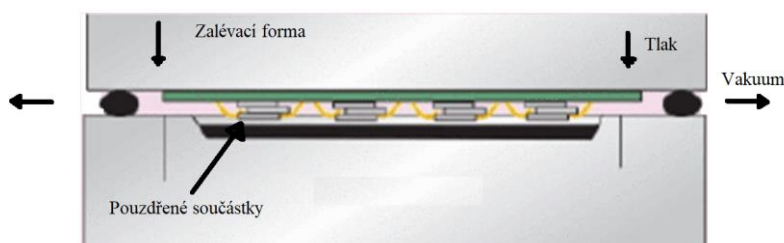
se vstříknou do kovové formy, kde se také za určitého tlaku a teploty zformují do požadovaného tvaru, který při zchladnutí zůstává [6].



Obr. 2.7 Obrázek znázorňující metodu vstřikování (převzato z [6])

- **Lisování**

Lisování je metoda tváření převážně reaktoplastů ve vyhřáté ocelové formě za působení tlaku, kdy se do formy vloží definované množství plastického materiálu, na nějž následně působí teplota a tlak formuje jej do požadovaného tvaru. Následně se sníží tlak pro odplynění. Postupně dochází k vytvrzování [6].

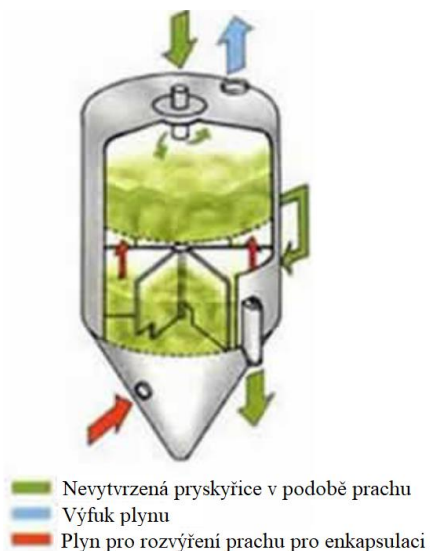


Obr. 2.8 Obrázek znázorňující metodu lisování (převzato z [22])

- **Fluidizace**

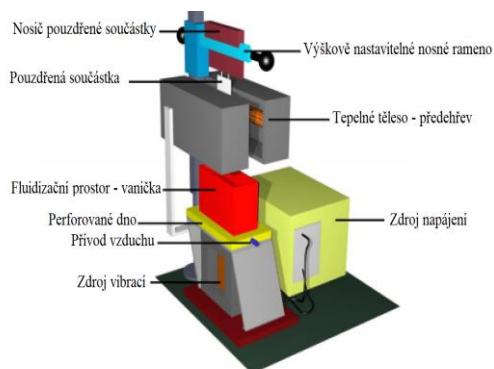
Jedná se o technologický proces, při kterém se prachové částice plastické hmoty pouzdrěcího materiálu usazují na povrchu pouzdrěné součástky. Součástka upevněná za vývody se zahřeje na určitou teplotu a vloží do fluidizační komory, kde se víří prach nevytvrzené pryskyřice. Jemný prášek je vystaven současnému působení vzduchu, vibrací

a teploty, čímž dochází k vytvoření tzv. „fluidu“. Fluidum je terminologie, kterou se označuje stav, při kterém získávají jemné prachové částice hmoty vlastnosti kapalin. Pryskyřice obalí zahřátou součástku, zkapalní a po vyndání součástky a jejím zchladnutí ztuhne. Při této metodě se používají termosetové materiály [6], [23].



Obr. 2.9 Víceřadá fluidní komora

(převzato z [23])



Obr. 2.10 Příklad fluidního zařízení

(převzato z [6])



### 3. Metody pouzdření konvenčních elektronických komponent a modulů na textilní substráty

V předchozí kapitole byly popsány různé metody pouzdření, které se aktuálně používají v rámci konvenční elektroniky. Většina z těchto metod je ale vhodná pouze pro standardní substráty (např. substrát FR4). Textilní substrát oproti standardní DPS neposkytuje elektronickým součástkám potřebnou mechanickou pevnost, je na něm obtížné realizovat propojení jednotlivých komponentů tak aby nedocházelo k poškození nebo chybné funkčnosti způsobené například zkraty a také aby byla zachována co nejmenší hmotnost, největší pružnost, ohebnost, tvárnost a další přirozené vlastnosti textilu. Elektronika na textiliích musí odolat velkému náporu různých nestandardních faktorů jako je například lidský pot, vystavování vlhkosti, časté mechanické zatěžování a především prací cykly, při kterých je celý systém zatěžován chemicky (různými čistícími prostředky), vodou (může docházet ke zkratům, oxidaci a migraci), značnými změnami teplot a také velkému mechanickému namáhání (narážení v bubnu pračky). Proto je pouzdření na textiliích v porovnání se standardními plošnými spoji mnohem náročnější úlohou a některé standardní přístupy zde mohou selhávat [24], [25].

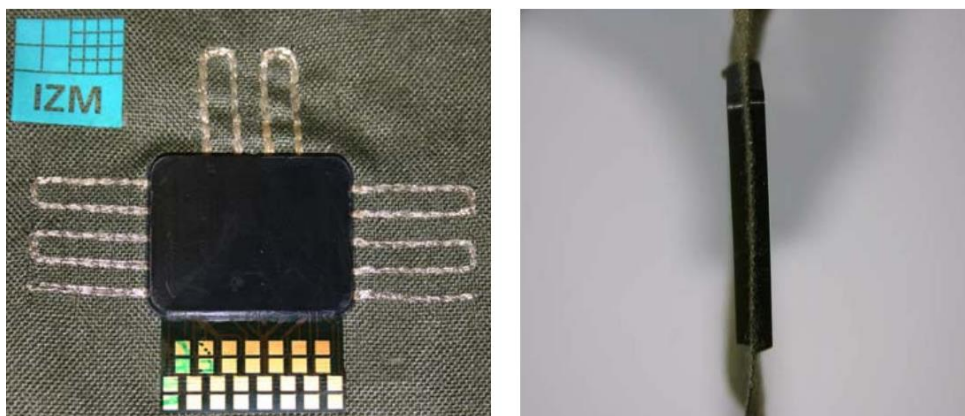
Součástky (především ty rozměrnější jako jsou mikroprocesory), a moduly způsobí neelastičnost a neprodyšnost v daném místě, což lze vyřešit jejich vhodným umístěním. U některých typů oblečení jako jsou třeba bundy nejsou velké požadavky na elastičnost a mohou zde být větší nepružné moduly než třeba u triček. Například hasičský oblek vyvíjený na Západočeské univerzitě v Plzni [26] má umístěné některé ze svých modulů na ramenou, také v oblasti náprsních kapes a další přibližně uprostřed hrudníku, kde by ale při civilním použití docházelo ke ztrátě komfortu. U civilních, elektronicky vyhřívaných bund značky Ororo [27], či PerfectEU [28] je elektronický modul integrován na místo náprsní kapsy, kde tento modul nijak neomezuje. Lidé u sebe také nosí mobilní telefony a peněženky, které jsou rovněž tuhé a přesto je nijak neomezují. Jiná situace je ale u více přiléhajícího oblečení jako jsou trička [29] která mají implementovány např. flexibilní moduly na zádech, či spodní prádlo [30] kde se moduly uchycují obvykle na boční stranu gumy. Metody pouzdření na textilní substráty často více či méně, vychází z konvenčních metod. Ty ale ovšem musí být přizpůsobené konkrétní aplikaci, tak aby byly splněny

stanovené požadavky a co nejméně omezovaly pohodlí uživatele.

### 3.1 Druhy metod používaných pro pouzdření na textilní substráty:

- **Transfer molding**

U konvenčních aplikací se tato metoda používá například při pouzdření mikročipů určených pro tuhé podklady. Tato metoda je do jisté míry podobná lisování s tím rozdílem, že pouzdřicí hmota není jako v případě lisování aplikována ve vhodném množství do formy a následně stlačena a vytvrzena, ale je do formy stlačována. V případě vstřikování není na rozdíl od transfer moldingu nutné připravovat pouzdřicí materiál odděleně ve dvou fázích a je možné pracovat jak s reaktoplasty, tak termoplasty [31]. Hmota používaná při této metodě se skládá se z epoxidové pryskyřice, vytvrzovacího materiálu a také SiO<sub>2</sub> (přibližně 70-80% hmotnosti). SiO<sub>2</sub> se do směsi přidává kvůli přizpůsobení tepelné roztažnosti (CTE) k elektronickým komponentům a díky tomu se stává výsledné pouzdro více spolehlivé, jelikož při změnách teplot nedochází k takovému namáhání funkčních struktur [32]. Materiál pro tuto metodu – dvousložkovou epoxydovou pryskyřici lze sehnat ve formě lisovaného prášku, který musí být skladován při nízkých teplotách (-40 °C). Při formování se tento materiál rychle zahřeje na teplotu kolem 160 °C - 185 °C, díky tomu sníží svou viskozitu a následně se aplikuje do formy s teplotou 160 °C – 185 °C, kde vytvrdne přibližně do dvou minut za zvýšeného tlaku. Pro větší odolnost tohoto pouzdra integrovaného na textil, je výhodné aplikovat oboustranné pouzdření (viz obr. 15), neboť má větší spolehlivost než pouzdření jednostranné, které bylo uvedeno ve studii [33]. Transfer molding je v průmyslu naprosto běžná metoda, která se využívá u sériové velkovýroby. Při této výrobě se ale využívá lisovací stroj, který je relativně drahý pro malovýrobu. Velká nevýhoda této metody pro pouzdření na textil spočívá ve vysokém tlaku a teplotě při formování [34].



Obr. 3.1 a 3.2 Oboustranné zapouzdření metodou transfer molding (převzato z [34])

### Testy spolehlivosti metody transfer molding:

Byly zde provedeny testy mytím v automatické pračce a také testy teplotními cykly. Testy pracími cykly byly provedeny podle podmínek ISO 6330: 2000 6A [35], kdy se vzorky praly při teplotě 40° C. Mezi pracími cykly byly sušeny odkapáváním a následně měřeny na elektrické poruchy a změny parametrů. Po tom, co vzorek prodělal 20 pracích cyklů, byla aplikována analýza pro zjištění příčin selhání. Testy teplotními cykly byly provedeny podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N [36], kdy je vzorek vystaven po dobu 15 minut teplotě 85 °C a následně je tento vzorek vystaven dalších 15 minut teplotě -40° C. Při tomto testu mohly být poruchy elektroniky odhaleny přímo během testu, jelikož vzorek může být měřen při současně při testování. Po tom co proběhlo 1025 cyklů, tak byly aplikováním průřezové analýzy zjišťovány mechanismy případného selhání [37].

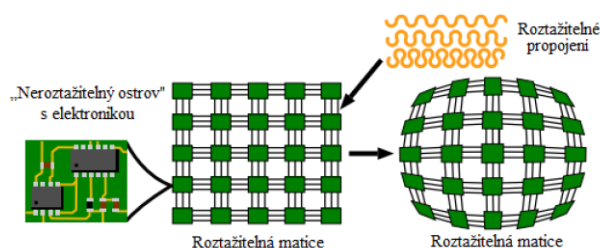
### Výsledky testů metody transfer molding:

U pouzdra zhotoveného touto metodou se potvrdilo, že je velice spolehlivé. Při pracích cyklech uvnitř pouzdra nedošlo k žádným poruchám. Při tepelných cyklech nastala porucha jen jedna, což prý odpovídá jednomu procentu všech testovaných struktur. Při tomto tepelném cyklování došlo ke zlomení flip chipu či k přerušení měděného vodiče. Při praní ale došlo k poklesu vodivosti nezapouzdřených vláken o 19%, což bylo způsobeno poškozením vysokou teplotou a tlakem během výrobního procesu a následné degradaci během praní. Při této metodě se bohužel potvrdilo, že díky velkému tlaku a teplotě při výrobním procesu dochází k poškození okolí zhotoveného pouzdra, jako jsou například vodivá vlákna. Popsaný problém kdy došlo ke ztrátě vodivosti na vodičích mimo pouzdro lze řešit alternativní ochranou vodivých vláken během praní, či jiným postupem výroby,

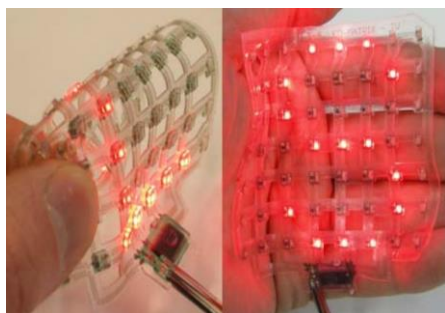
kdy se modul propojí s vodivými vlákny až po vylisování.

- **Flexibilní hybridní matice**

Při této metodě je celý elektronický systém zabudovaný do elastomerového materiálu. Vhodným materiálem pro tuto aplikace je například polydimethylsiloxan (PDMS, silikon). Tento elektronický systém se skládá ze standardních pevných SMD komponentů, jež jsou rozděleny na jakési „ostrůvky“. Tyto „ostrůvky“ jsou pokud možno tak malé, aby v případě integrace do oblečení co nejméně omezovala uživatele při nošení. Rigidní části („ostrůvky“), jsou spojeny vodiči ve tvaru meandru, díky kterým je výsledný systém roztažitelný [38].



Obr. 3.3 Znárodnění flexibilní hybridní matice (převzato z [38]).



Obr. 3.4 Flexibilní hybridní matice přilepená k textilu (převzato z [38])

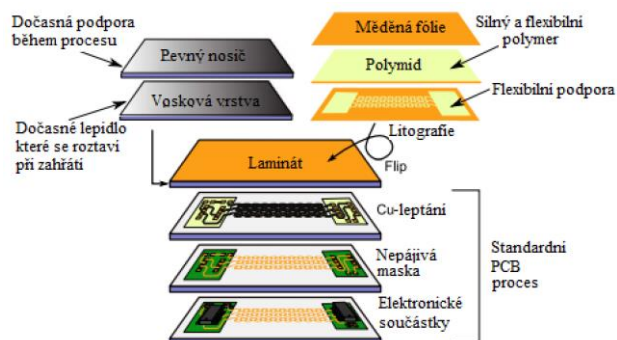


Obr. 3.5 Flexibilní hybridní matice přilepená k textilu (převzato z [38])

### Výroba flexibilní hybridní matice probíhá ve dvou fázích:

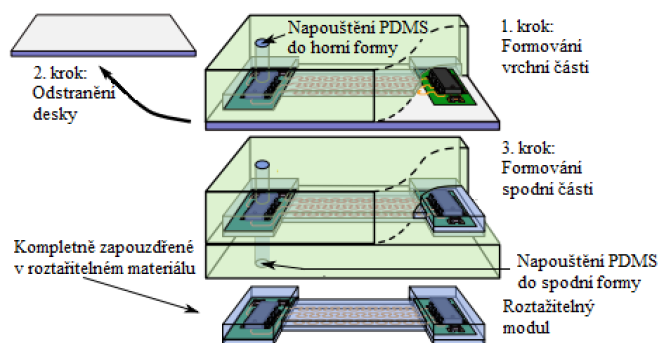
1. fáze: Výroba substrátu - Podobné postupy jako při klasickém opracovávání DPS. Nejprve je měděná fólie pokryta vrstvou fotocitlivého polyimidu. Poté je na polyimid nanese šablona tak aby byly vytvořeny neroztažitelné, pružné ostrovy a také podpora pro měděné meandry. Dále je měděná strana laminována voskem na tuhý nosič, který bude později odstraněn. Následné kroky se shodují s výrobními kroky DPS (litografickou metodou je nanese šablona plošných spojů a poté vyleptána, sítotiskem nanese pájecí

maska, montáž komponent a pájení přetavením) [38].



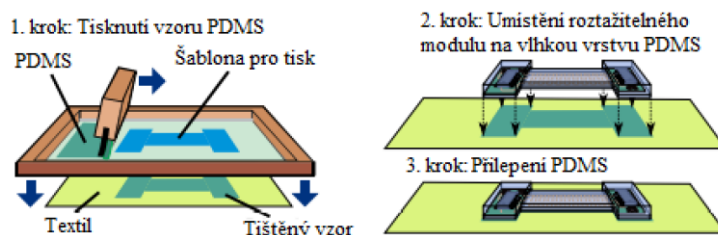
Obr. 3.6 Postup při výrobě roztažitelného substrátu (převzato z [38])

2. fáze: Formování - při této fázi je vrchní část obvodu zalita ve formě do PDMS. Po zatuhnutí PDMS je odejmuta dočasná nosná deska a obvod je zalit i ze spodní strany do formy. Po zatuhnutí a vyjmutí z formy je obvod zapouzdřený v roztažitelném polymeru [38].



Obr. 3.7 Zapouzdření elektroniky do PDMS (převzato z [38])

Metodou sítotisku, se nanáší tenká vrstva PDMS a na ně je poté umístěna celá elektronická sestava. Po umístění a zatuhnutí PDMS je celý elektronický systém připevněn k textilu. Je důležité sledovat viskozitu nanášeného PDMS, protože při přílišném prosáknutí do textilu, ztrácí textil své vlastnosti [38].



Obr. 3.8 Lepení zapouzdřeného celku na textil metodou sítotisku (převzato z [38])

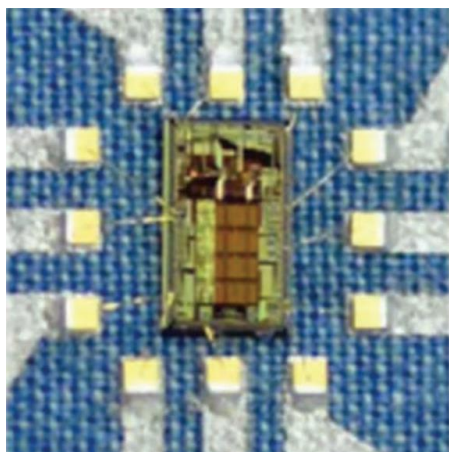
### Testy spolehlivosti roztažitelné hybridní matice a jejich výsledky:

Při teplotě 40 °C a sušením odkapáváním byl 1. vzorek funkční i po pěti cyklech. 2. vzorek testovaný za stejných podmínek, ale bez ochranného pytlíku po šestém cyklu přestal fungovat. 3. Vzorek testovaný s ochranným pytlíkem a sušen v bubnové sušičce při teplotě 80 °C byl nefunkční již po druhém cyklu (testy byly prováděny rovněž podle standardu ISO 6330: 2000 6A).

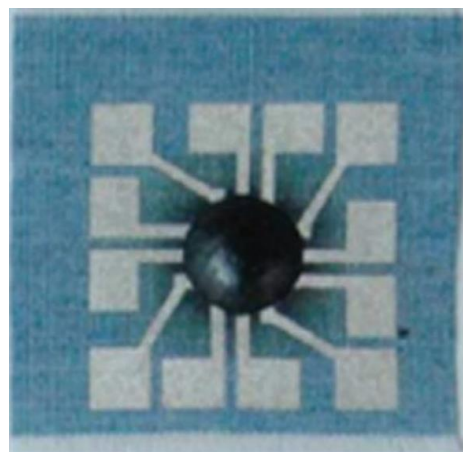
Při analýze výsledků bylo zjištěno, že došlo k přerušení propojení. Na krajích pevných komponentů. Tomuto nedostatku by se dalo zabránit například použitím tužší vrstvy PDMS na kritických místech. Dále byl proveden test odolnosti v tahu, který prokázal, že zapouzdřený systém lze roztáhnout cca na 130% své délky.

- **Glob top**

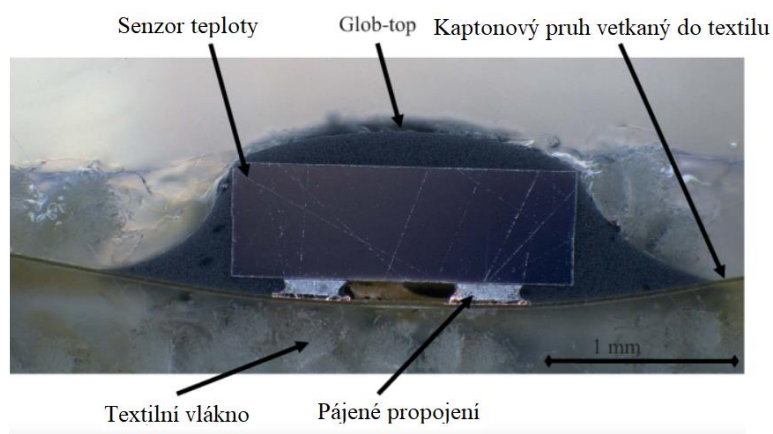
U této metody lze použít materiály jako jsou silikony nebo epoxidové pryskyřice. Silikony mají velmi vysoké CTE, což u některých aplikací nemusí příliš vadit, jelikož tento materiál negeneruje příliš velké mechanické napětí způsobené teplem. Přesto je ale pro realizaci Glob Topu vhodnější použít materiály na bázi epoxidové pryskyřice s částicemi plniva SiO<sub>2</sub> pro vyrovnání CTE jako tomu bylo metody transfer molding kdy materiál obsahoval přibližně 70% - 80% hmotnosti [32]. U metody glob top je však nutné použít méně částic plniva SiO<sub>2</sub> (přibližně 60% - 70% hmotnosti), kvůli menší viskozitě, díky které tento materiál lze nanést injekční stříkačkou na požadované místo a poté vytvrdit. Tato metoda je tedy levnější, jelikož není nutné používat formovací stroj, který má poměrně vysoké pořizovací náklady. Další výhodou této metody je poměrně jednoduché provedení a malé rozměry výsledného pouzdra. Nevýhodou je proti transfer moldingu nižší přizpůsobení tepelné roztažnosti (CTE) mezi pouzdřicím materiálem a elektronickými komponenty z důvodu nižšího podílu SiO<sub>2</sub> plniva a proto pouzdro není tak spolehlivé jako pouzdro realizované metodou transfer moldingu. Další nevýhodou je vzhled takto realizovaného pouzdra, neboť jeho tvar není nijak řízen. Tato metoda je poměrně praktickou variantou ochrany čipu připevněného k textilnímu substrátu. Mimo epoxidových pryskyřic je využíván také materiál na bázi silikonu, ten je však mnohem méně spolehlivý při použití v náročném prostředí [34].



Obr. 3.9 součástka před zapouzdřením  
(převzato z [25])



Obr. 3.10 zapouzdřený prvek metodou glob top  
(převzato z [25])



Obr. 3.11 Průřez tepelného senzoru připojeného k flexibilnímu substrátu, vetkaného do textilu (převzato z [39])

### Testy spolehlivosti metody glob top:

Byly zde provedeny testy mytím v automatické pračce a také testy teplotními cykly. Testy pracími cykly byly provedeny podle podmínek ISO 6330: 2000 6A [35], kdy se vzorky praly při teplotě 40° C. Mezi pracími cykly byly sušeny odkapáváním a následně měřeny na elektrické poruchy a změny parametrů. Po tom, co vzorek prodělal 20 pracích cyklů, byla aplikována analýza pro zjištění příčin selhání. Testy teplotními cykly byly provedeny podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N [36], kdy je vzorek vystaven po dobu 15 minut teplotě 85 °C a následně je tento vzorek vystaven dalších 15 minut teplotě -40° C. Při tomto testu mohly být poruchy elektroniky odhaleny přímo během testu, jelikož vzorek může být měřen při současně při testování. Po tom co proběhlo 1025 cyklů, tak byly aplikováním průřezové analýzy zjišťovány mechanismy případného

selhání [37].

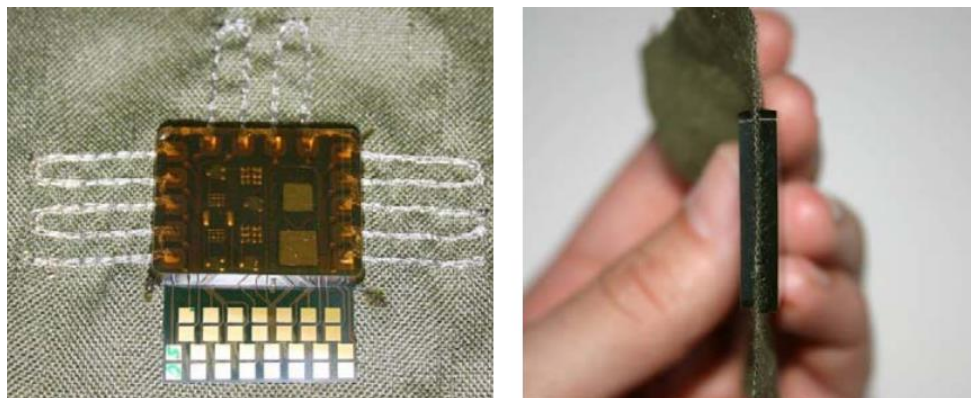
### **Výsledky testů metody glob top:**

Metoda glob top při jejíž výrobě není substrát vystaven vysokým teplotám, se oproti metodě zalévání osvědčila jak při testech praním, tak i při testech teplotního cyklování. Nedošlo k viditelné destrukci, avšak stoupl odpor některých kontaktů nad  $1 \Omega$ , z původních hodnot odporů které se pohybovaly v rozmezí cca od  $60 \text{ m}\Omega$  do  $140 \text{ m}\Omega$  [37].

- **Hot melt**

Tato metoda je založena na stejném principu jako konvenční metoda vstřikování. Při této metodě jsou rovněž užívány termoplastické materiály. Tyto materiály se vyznačují svou nízkou teplotou tání pohybující se od  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $130^\circ\text{C}$  (někdy až do  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Po překročení této teploty mají termoplastické materiály nízkou viskozitu a tak je lze bez problému formovat. Při teplotách nižších než je bod tání materiál tuhne a udržuje si svůj tvar. Roztavený materiál se se leje do chladné formy, kde ztuhne přibližně do 30 sekund, přičemž není třeba na tento materiál působit příliš velkým tlakem a tak nedochází k výraznému namáhání textilu. Tyto materiály nelze plnit částicemi  $\text{SiO}_2$  jelikož viskozita roztavených termoplastů je ve srovnání s termosetovými epoxidy příliš vysoká. Kvůli absenci částic plniva je tento proces méně abrazivní než při formování metodou transfer molding, a proto je možné použít místo nástrojů z kalené oceli mnohem levnější nástroje zhotovené z hliníku. Narozdíl od dvou předchozích metod je nutné počítat s vyššími rozdíly tepelné roztažnosti (CTE), kvůli absenci částic  $\text{SiO}_2$  a také menší odolností vůči chemikáliím. Touto metodou lze zformovat pouzdra přesných tvarů, stejně jako je tomu u metody transfer molding, což je u textilních aplikací výhodné [34]. Podobně jako u metody transfer molding byl testovací modul zapouzdřen z obou stran, neboť dle výsledků studie [33] je tato varianta charakteristická vyšší spolehlivostí a odolností. (viz obr. 18).





Obr. 3.12 a 3.13 Oboustranné zapouzdření metodou hot melt (převzato z [34])

### Testy spolehlivosti metody hot melt:

Byly zde provedeny testy mytím v automatické pračce a také testy teplotními cykly. Testy pracími cykly byly provedeny podle podmínek ISO 6330: 2000 6A [35] (praní při teplotě 40° C). Mezi pracími cykly byly sušeny odkapáváním a následně měřeny na elektrické poruchy a změny parametrů. Po tom, co vzorek prodělal 20 pracích cyklů, byla aplikována analýza pro zjištění příčin selhání. Testy teplotními cykly byly provedeny podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N [36], kdy je vzorek vystaven po dobu 15 minut teplotě 85° C a následně je tento vzorek vystaven dalších 15 minut teplotě -40° C. Při tomto testu mohly být poruchy elektroniky odhaleny přímo během testu, jelikož vzorek může být měřen při současně při testování. Po tom co proběhlo 1000 cyklů, tak byly aplikováním průřezové analýzy zjišťovány mechanismy případného selhání [34].

### Výsledky testů metody hot melt:

Pouzdra zhotovená touto metodou poskytují výrazně menší ochranu elektronickým komponentům než metoda „transfer molding“. Při tepelném cyklování byly zlomeny měděné vodiče uvnitř pouzdra kvůli rozdílným CTE (koeficientům tepelné roztažnosti materiálů). CTE materiálu používaného u „hot melt“ se totiž pohybuje přibližně v rozmezí od 200 do 300 ppm/°K, zatímco u mědi kolem 17 ppm/°K. U této metody tedy nebyly způsobeny defekty pracími cykly, ale cykly teplotními. Také došlo k značnému počtu poruch u vyšíváných spojů a částečné delaminaci, což mělo za následek zvýšení kontaktního odporu (z původních cca 60 mΩ ve 36% procentech případů až na 100 Ω a odpor 1Ω byl překročen v 79% testovaných případech). Tato problematika by se dala řešit rozšířením vodičů, nahrazením flex substrátu za rigid-flex substrát (pro větší pevnost), nebo možným zvolením jiného pouzdríčního materiálu pro „hot melt“ [34].

- **Kombinace metod glob top a hot melt**

V případě této metody se nejprve aplikuje metoda glob top a následně metoda hot melt. Glob top pouzdro eliminuje síly působící na pouzdřený komponent, které jsou způsobené rozdílnými teplotními roztažnostmi materiálů. V druhém kroku byla přidána druhá pouzdřicí vrstva metodou hotmelt, kterou byl vytvořen pružný přechod mezi textilním substrátem a rigidním pouzdrům vytvořeným metodou glob top. Ve studii [37] byla také popsána metoda, která používala podobný postup, s tím rozdílem že místo glob top pouzdření bylo na propoje nanášeno vodivé lepidlo, které zlepšovalo elektrický kontakt. Vytvrzení probíhalo při teplotě 85 °C.

**Testy spolehlivosti metody kombinující glob top a hot melt:**

Byly zde provedeny testy mytím v automatické pračce a také testy teplotními cykly. Testy pracími cykly byly provedeny podle podmínek ISO 6330: 2000 6A [35], kdy se vzorky praly při teplotě 40° C. Mezi pracími cykly byly sušeny odkapáváním a následně měřeny na elektrické poruchy a změny parametrů. Po tom, co vzorek prodělal 20 pracích cyklů, byla aplikována analýza pro zjištění příčin selhání. Testy teplotními cykly byly provedeny podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N [36], kdy je vzorek vystaven po dobu 15 minut teplotě 85° C a následně je tento vzorek vystaven dalších 15 minut teplotě -40° C. Při tomto testu mohly být poruchy elektroniky odhaleny přímo během testu, jelikož vzorek může být měřen při současně při testování. Po tom co proběhlo 1025 cyklů, tak byly aplikováním průřezové analýzy zjišťovány mechanismy případného selhání [37].

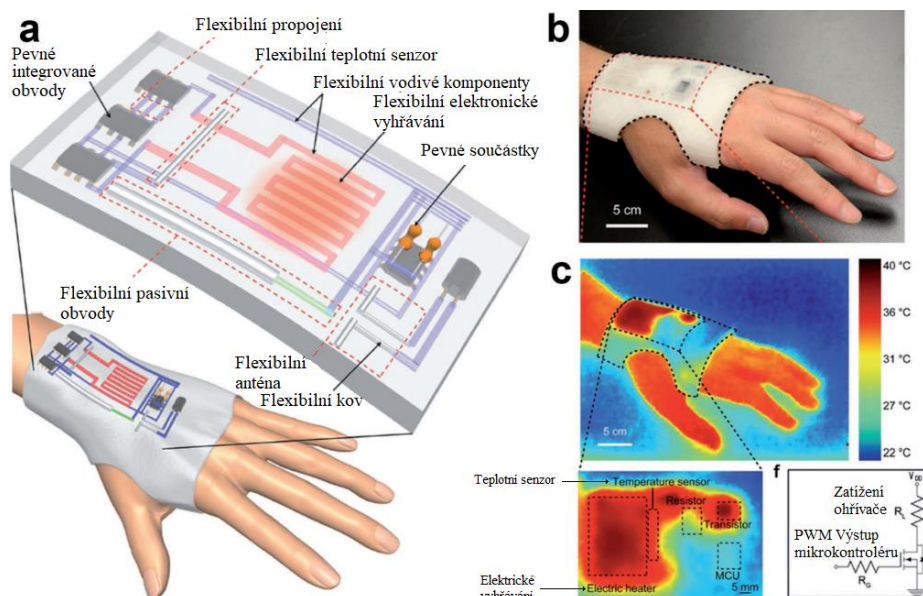
**Výsledky testů metody kombinující glob top a hot melt:**

U této metody nedošlo po testech k žádné poruše, ani ztrátě vodivosti a stejně tomu tak bylo i u metody kdy se nejprve na vodivý pouzdřený komponent nanášelo vodivé lepidlo a dále byl zapouzdřen metodou hot melt [37].

- **Použití 3D tisku**

Výhodou této metody je možnost realizovat velmi složitě tvarované předměty (např. navržené v CAD), které by konvenčními metodami byly jen obtížně proveditelné. Pokud jde ale (mimo jiné) o textilní a flexibilní elektroniku, tak je tato metoda stále omezena vlastnostmi jako je například flexibilita, vodivost a přilnavost materiálů, které je možné pro 3D tisk použít. Tato relativně nová metoda výroby elektronických zařízení je velice perspektivní do budoucna, a proto se stále pracuje na odstraňování nedostatků a rozšiřování použitelných materiálů. Již dnes je ale možné vytvářet flexibilní, vodivé, polovodivé nebo dielektrické struktury a tím pádem tuto metodu lze do jisté míry použít pro výrobu elektronických komponent na textilní substráty. Existuje mnoho druhů materiálů pro 3D tisk s různou flexibilitou, teplotou tání, mechanickou a chemickou odolností i s různou barvou. Touto metodou je tedy možné vyrobit různé elektronické zařízení (např. různé druhy senzorů) [40].

Metodou 3D tisku je možné vytvářet flexibilní předměty na bázi organických polymerů a touto cestou i základní pasivní součástky a vodivá propojení. Takto zhotovená celá zařízení 3D tiskem mají proti těm klasickým elektronickým tu výhodu, že si i při deformaci dokáží udržet své elektrické vlastnosti, avšak za použité speciálních směsí pro 3D tisk (flexibilní vodivé pasty a inkousty). Je tedy možné tuto technologii použít snáze pro nositelné aplikace než elektroniku konvenční. V dnešní době ale stále tato technologie není na tak vysoké úrovni, aby se mohla svým výpočetním výkonem a dalšími elektronickými parametry přiblížit konvenčním křemíkovým obvodům. Proto při určitých aplikacích kdy 3D tisknutelná elektronika nedostačuje požadavkům, musí být vytvořen hybridní systém, kdy je 3D tiskem zhotovena základová struktura obsahující rozvody, komponenty uskutečnitelné metodou 3D tisku a sloty do kterých přijdou různé konvenční součástky. Po té je celý systém „zapouzdřen“ opět metodou 3D tisku [40].



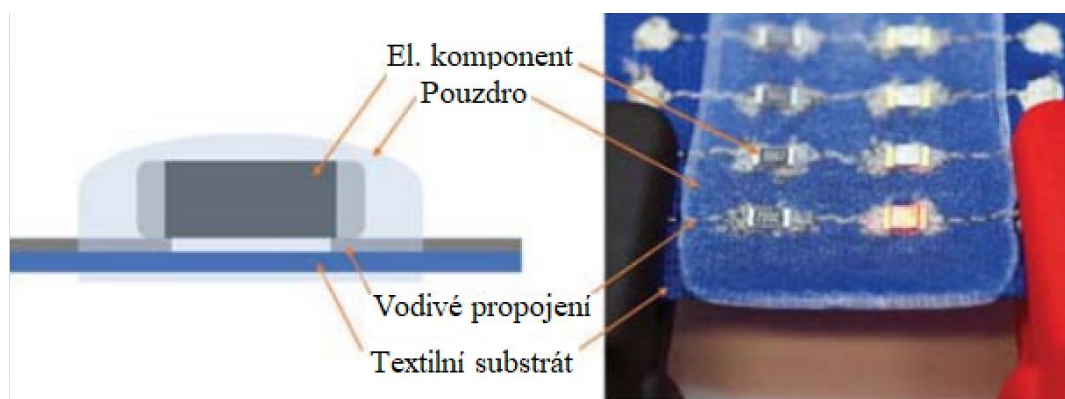
Obr. 3.14 Thermoterapeutické rukavice sloužící k zahřívání a následnému prokrvení ruky (převzato z [40])

a) Schéma 3D tištěných flexibilních elektronických rukavic s konvenčními a 3D tištěnými součástkami b) Fotka 3D tištěných pružných elektronických rukavic c) Snímek kde je rukavice vidět v infračerveném spektru při své funkci

Dalším přístupem k pouzdrění s metodou 3D tisku může být ten, že se pomocí 3D tiskárny vytiskne pouzdro pro elektronické součástky a dále se využije termotransferové zařízení, jež se běžně používá v textilním průmyslu. Ve studii [41] byla 3D tiskárnou zhotovena pouzdra z materiálů PETG (polyethylen tereftalát glykol), ABS (Akrylonitril-butadien-styren), TPE (termoplast elastomer) a TPU (termoplastický polyuretan). Proces kontaktování a pouzdrění termokompresí probíhal krocích: návrh el. obvodu, jeho výroba a realizace vodivého propojení.

### Návrh a výroba

Návrh elektronického obvodu probíhal obdobně jako u klasických DPS v ECAD. Následně bylo navrženo v MCAD pouzdro opatřené dutinami pro osazení součástek. V dalším kroku bylo pomocí 3D tiskárny vyrobeno samotné pouzdro dle návrhu a na textilní substrát byly vyšity vodivé cesty (postříbřené Cu vodiče). V poslední fázi byly součástky vloženy do pouzdra, pouzdro umístěno na určené místo na textilním substrátu a působením tlaku a teploty na pouzdro došlo k trvalému vodivému propojení součástek a vodivých vláken tím, že došlo k roztavení pouzdrího materiálu spolu s přilnutím součástek k textilu s vodivými vlákny.



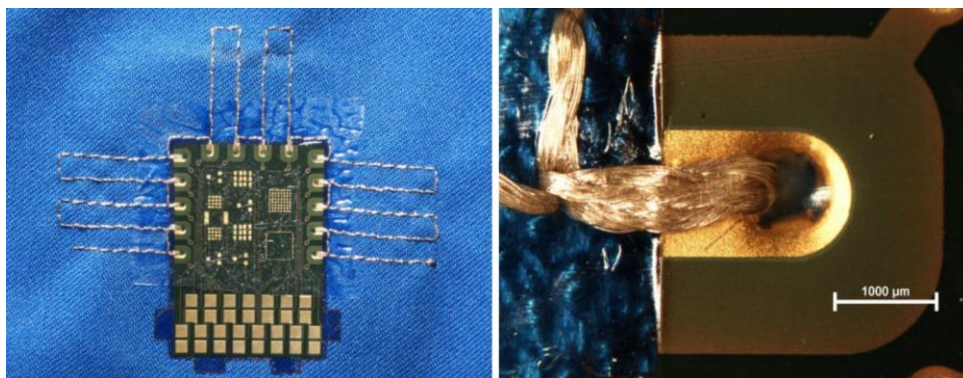
Obr. 3.15 Rezistory a LED kontaktovány a zapouzdrořeny termokompresní metodou (převzato z [41])

### Vyhodnocení testů 3D tisku:

V [41] byly provedeny testy pracími a sušicími cykly, kdy byl vzorek prán v ochranném vaku (podle standardu ISO 6330, při teplotě vody 40 °C a teplotě vzduchu při sušení 60 °C) kdy s každým pracím cyklem stoupal elektrický odpor jen v řádech  $m\Omega$ , což se dá označit jako velice dobrý výsledek.

- **Ochranná lepicí fólie**

Tato metoda je další alternativou pro ochranu elektronického komponentu připevněném na textilním substrátu. Je ale zmíněna spíše pro porovnání s předchozími metodami, jelikož tato ochrana zdaleka nedosahuje odolnosti, kterou disponují předchozí druhy enkapsulace. Lze ji využít například u vyšíváných propojení, která se díky této fólii zafixují. Tato fólie je z polyuretanu a k textilu se připevňuje při teplotě kolem 190 °C. Polyuretan má malou přilnavost k ušlechtilým kovům a tak při tomto spojení dochází při praní k delaminaci [37].



Obr. 3.16 Vyšívané kontakty na tenkém pružném modulu chráněném lepicí polyuretanovou fólií  
(převzato z [20])

### Testy spolehlivosti ochranné lepicí fólie:

Byly zde provedeny testy mytím v automatické pračce a také testy teplotními cykly. Testy pracími cykly byly provedeny podle podmínek ISO 6330: 2000 6A [35], kdy se vzorky praly při teplotě 40° C. Mezi pracími cykly byly sušeny odkapáváním a následně měřeny na elektrické poruchy a změny parametrů. Po tom, co vzorek prodělal 20 pracích cyklů, byla aplikována analýza pro zjištění příčin selhání. Testy teplotními cykly byly provedeny podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N [36], kdy je vzorek vystaven po dobu 15 minut teplotě 85° C a následně je tento vzorek vystaven dalších 15 minut teplotě -40° C. Při tomto testu mohly být poruchy elektroniky odhaleny přímo během testu, jelikož vzorek může být měřen při současně při testování. Po tom co proběhlo 1000 cyklů, tak byly aplikováním průřezové analýzy zjišťovány mechanismy případného selhání [34].

### Výsledky testů:

Při testech pracími cykly dochází k značné delaminaci a razantnímu zvýšení odporů (z původních cca 550 mΩ někdy až na 100 Ω). Při testech tepelného cyklování dochází ke zvýšení odporu také, ale méně často (u navýšení odporu došlo u méně testovaných vzorků).

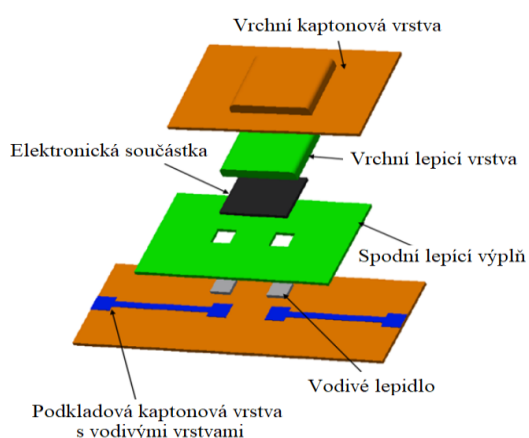
- **Kaptonové pouzdrění**

Tato metoda se začala vyvíjet kvůli nositelné elektronice. Cílem vývoje této metody bylo zvýšení spolehlivosti a snížení mechanického napětí vzniklého komponentu při

používání. Pouzdřený komponent je spojen se spodním Kaptonovým substrátem, na kterém jsou vodivá propojení a spojovací podložky tvořící funkční obvod. Obvod překrývá tvarovaná kaptonová fólie (jež je tvarována při teplotě 360 ° C po dobu 60 sekund), která obvod „zapouzdřuje“. Kaptonové pouzdro má stejnou tloušťku horní i spodní kaptonové i adhezivní vrstvy, aby byla vytvořena symetrická sestava a zapouzdřený prvek byl udržen na správném místě [42].

### Toto pouzdro se skládá z vrstev kterými jsou:

1. Spodní podkladová vrstva substrátu, tvořenou kaptonem s vodivými cestami
2. vodivé lepidlo / pájecí pasta
3. lepidlo pod výplní
4. zapuštěná křemíkového čipu
5. vrchní lepidlo
6. tvarovaný kaptonový obal tvořící vršek pouzdra



Obr. 3.17 Vrstvy kaptonového pouzdra (převzato z [42]) Obr 3.18 Textilie s vetkanými kaptonovými pásky (převzato z [43])

### Vyhodnocení kaptonového pouzdření:

Pro tento typ pouzdření bylo v práci „Electronic Packaging for Functional Electronic Textiles“ testováno experimentální metodou a metodou konečných prvků (FEA) několik různých materiálů, rozměrů jednotlivých materiálů a technik pro zhotovení pouzdra. Při jednotlivých fázích vývoje tohoto pouzdra zde byly aplikovány ať metodou konečných prvků, či metodou experimentální: Test ohybu, test smyku, testy pracími cykly (pro účely porovnávání je předpokládáno, že testy proběhly podle standardní normy ISO 6330: 2000 6A, kdy se vzorky praly při teplotě 40° C), testy v krutu, testy v tahu a testy tepelné

roztažnosti.

Jako nejvhodnější možnost se ukázalo být pouzdro, skládající se z kaptonového podkladového substrátu o tloušťce 0,05 – 0,052 mm, křemíkové matrice s tloušťkou 0,025 mm, adhezivní vrstvou typu EP37-3ELF, vodivými cestami na základovém substrátu tvořené mědí a vodivého dvousložkového lepidla na bázi epoxidové pryskyřice obsahující stříbrné vločky. Toto pouzdro zůstalo neporušené i více jak po 35 cyklech. K razantnímu zvětšení odporu došlo ale již po prvním cyklu kdy se jeho nárůst pohyboval v hodnotách mezi 20% až 30% původního odporu a po pěti pracích cyklech v hodnotách od 60% do 90% původního odporu. Toto zvýšení odporu bylo způsobené odlepením vodivého lepidla. Výsledný vzorek odolal 180° v krutu a 90° v ohybu.

## 4. Doporučené pouzdření na základě výsledků analýzy řešerše

V dostupných pramenech popisujících problematiku pouzdření konvenčních součástek na textilní substráty byly představeny různé metody, které jsou popsány v předchozí kapitole. Tato kapitola se zabývá rozbořem informací, jež z popsaných metod vzešly.

### 4.1 Analýza výsledků řešerše

- **Použití jednotlivých metod v závislosti na textilním substrátu**

Při volbě metody pouzdření na textilní substrát je nutné brát ohled na teplotní odolnosti daného substrátu a zároveň teplotu, při které se určité pouzdro formuje. Textilní substráty lze rozdělit například na přírodní a syntetické. Přírodní textilie se vyznačují ve většině případů větší tepelnou odolností nežli textilie syntetické. Krom teplotních odolností textilních substrátů, je důležité řešit kompatibilitu pouzdra s textilním substrátem. Pro zvýšení adheze k danému textilu, je možné tento textilní substrát vystavit například pracím cyklům, kdy textil přijde o povrchovou vrstvu škrobového zátěru. Při tomto způsobu se ale látka opotřebovává a po tom již není tak odolná vůči nepříznivým vlivům, kterým je při používání vystavena. Proto lze textilní substrát lokálně upravit například metodou plazmování.



Tab. 1 Vhodné metody pouzdření pro různé typy textilních substrátů (na základě teploty žehlení) (hodnoty převzaty z [44])

<b>Možnosti užití pouzdřících metod na textilní substráty podle doporučených teplot</b>											
<b>Textilní substráty:</b>	<b>Přírodní textilie</b>				<b>Syntetické textilie</b>						
	<b>Len</b>	<b>Bavlna</b>	<b>Vlna</b>	<b>Hedvábí</b>	<b>Triacetát</b>	<b>Viskóza</b>	<b>Plyester</b>	<b>Acetát</b>	<b>Akryl</b>	<b>Lycra</b>	<b>Nylon</b>
<b>Doporučené teploty na žehlení [°C]</b>	230	204	148	148	200	190	148	143	135	135	135
<b>Transfer molding</b>	✓	✓			✓						
<b>Glob top</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Glob top &amp; hot melt</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
<b>Flexibilní hybridní matice</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Hot melt</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
<b>Pouzďření s pomocí 3D tisku</b>	✓	✓			✓	✓					
<b>Lepicí ochranná fólie</b>	✓	✓			✓						
<b>Kaptonové pouzdření</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tab. 2 Vypsání výsledky testů odolnosti testovaných metod

Srovnání podle odolnosti			
Druhy metod	Prací cykly	Tepelné cykly	Mechanické testy
<b>Transfer molding</b>	<b>Test a)</b> Uvnitř pouzdra žádné poruchy. Vodičům vycházejícím z pouzdra poklesla u studie [34] vodivost o 19% a u studie [37] nastala úplná ztráta vodivosti.	<b>Test f)</b> Porucha pouze v 1% testovaných vzorků (zlomení flip chipu či přerušování měděného vodiče).	
<b>Glob top</b>	<b>Test a)</b> Bez viditelné destrukce. Zvýšení hodnoty odporu kontaktů z cca 50mΩ nad 1 Ω [37].	<b>Test f)</b> Nedošlo ke zvýšení elektrického odporu referenčního vodivého motivu.	
<b>Hot melt</b>	<b>Test a)</b> Nedošlo ke zvýšení elektrického odporu referenčního vodivého motivu.	<b>Test f)</b> Byly zlomeny měděné vodiče uvnitř pouzdra, poničeny vyšívané spoje a kryt částečně delaminován. Nastalo zvýšení odporu z cca 60 mΩ případů až na 100 Ω ve 36% případů.	

<b>Glob top &amp;</b>	<b>Test a)</b> Nedošlo ke zvýšení elektrického odporu referenčního vodivého motivu.	<b>Test f)</b> Nenastala žádná porucha.	
<b>Roztažitelná hybridní matice</b>	<b>Test b)</b> 1. Vzorek funkční i po pěti cyklech. <b>Test c)</b> 2. Po šestém cyklu přestal fungovat. <b>Test d)</b> 3. Byl nefunkční již po druhém cyklu.		
<b>Lepicí ochranná fólie</b>	<b>Test a)</b> Došlo ke značné delaminaci a razantnímu zvýšení odporů (z původních cca 550 mΩ někdy až na 100 Ω).	<b>Test f)</b> Došlo ke zvýšení odporu (z původních cca 550 mΩ někdy až na 100 Ω).	
<b>Kaptonové pouzření</b>	<b>Test a)</b> Neporušené pouzdro i více jak po 35 cyklech. Po prvním pracím cyklu nárůst původního odporu o 20% až 30%, po pěti od 60% do 90%.		<b>Test h)</b> po 927 cyklech praskl křemíkový čip <b>Test g)</b> Odpor se snížil cca o 4%.
<b>Pouzření s pomocí 3D tisku</b>	<b>Test e)</b> S každým pracím cyklem stoupal elektrický odpor jen v řádech mΩ, což se dá označit jako velice dobrý výsledek.		

- **Popis testů pro tab. 2:**

Test a) - 20 Pracích cyklů při teplotě 40 °C podle normy ISO 6330: 2000 6A, sušení odkapáváním

Test b) - Praní při teplotě 40 °C podle normy ISO 6330: 2000 6A, s ochranným pytlíkem, sušení odkapáváním

Test c) - Praní při teplotě 40 °C podle normy ISO 6330: 2000 6A, bez ochranného pytlíku, sušení odkapáváním

Test d) - Praní při teplotě 40 °C podle normy ISO 6330: 2000 6A, bez ochranného pytlíku, sušení v bubnové sušičce při teplotě 80 °C

Test e) - Praní při teplotě 40 °C podle normy ISO 6330: 2000 6A, s ochranným pytlíkem, sušení v bubnové sušičce při teplotě 60 °C

Test f) - 1000 Tepelných cyklů podle standardu JESD22-A104 testovacího stavu N (15 min 85° C a následně 15min. -40 °C)

Test g) - Test odolnosti v tahu

Test h) - Test Cyklů ohýbání do 90 °

Test i) - 20 000 Cyklů kroucení do 180 °

Test j) - Prací cyklus při teplotě 30 °C, 900 ot/min, po dobu 41 minut

Tab. 3 Vlastnosti uvedených metod pouzdrění na textilní substráty

<b>Shrnutí vlastností jednotlivých metod pouzdrění na textilní substráty</b>		
	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
<b>Transfer molding</b>	Přizpůsobené CTE; účinně chrání zapouzdrěnou elektroniku	Při výrobě velké teplo a tlak, které poškozují textil a elektroniku; tvrdé přechody mezi pevným obalem a pružnou textilií; vysoká pořizovací cena pohybující se řádově od stovek tisíc do miliónů korun [45]; při změně geometrie je nutná nová forma
<b>Glob top</b>	Přizpůsobené CTE; účinně chrání zapouzdrěnou elektroniku; malé rozměry; velice snadná aplikace pomocí injekce, levná výroba (lze aplikovat i manuálně pomocí injekce)	tvrdé přechody mezi pevným obalem a pružnou textilií; nelze tvarovat
<b>Hot melt</b>	Lze dobře tvarovat; recyklovatelné; ochrana vůči vlhkosti; levnější přístrojové vybavení než u transfer moldingu [46] (řádově desítky až stovky tisíc)	Vysoké CTE díky kterému dochází k přerušením vodivých propojení; není vhodný pro náročnější aplikace kde musí například odolávat teplu
<b>Glob top &amp; hot melt</b>	Přizpůsobené CTE, přizpůsobení přechodů vodičů z tvrdého glob top pouzdra do textilu; velká odolnost proti pracím cyklům a tepelnému cyklování	Je třeba řešit 2 metody s rozdílnými postupy výroby;

<b>Flexibilní hybridní matice</b>	Dobrá roztažnost (cca na 130% své délky); odolnost vůči vlhkosti a částečně i proti pracím cyklům, lze zapouzdřit celý elektronický systém a připojit ho na textil; při aplikování na textil není zvýšená teplota; pro malovýrobu cena v řádech desítek tisíc (stroj na výrobu PCB + formy na PDMS)	Velká váha PDMS na textilu; Malá odolnost vůči pracím cyklům; pro velkovýrobu v současné době nevýhodné kvůli malé poptávce a vysokým pořizovacím nákladům.
<b>Lepicí ochranná fólie</b>	Snadná aplikovatelnost; velice levná alternativa, která nevyžaduje žádný stroj pro formování	Velice slabá ochrana proti mechanickému namáhání, pracím i tepelným cyklům
<b>Kaptonové pouzdření</b>	Lze dobře vetkat do textilu; může být dobrou oporou pro senzory a čipy	Při praní stoupá odpor o desítky procent (záleží na konstrukci pouzdra)
<b>Pouzďření s pomocí 3D tisku</b>	Skvělá variabilita; dobré přizpůsobení k lidskému tělu; snadný návrh; nízké pořizovací náklady v řádu desítek tisíc (3D tiskárna [47]+ termotransferové zařízení [48])	Nízká adheze k textilnímu substrátu

## 4.2 Vyhodnocení

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že nejvhodnější metodou enkapsulace je v dnešní době **glob top** a to jak z pohledu ekonomického, tak kvalitativního. Lze aplikovat manuálně s naprosto minimálními náklady (řádově i méně než tisíce korun včetně enkapsulačního materiálu) a to v dnešní době, kdy textilní elektronika není zatím příliš rozšířená je tedy více vyhovující nežli sériová velkovýroba. Není jej ale možné tvarovat. Také v této práci byla popsána pouzdřicí metoda kombinující **glob top a hot melt**, která se jeví jako více odolná vůči pracím cyklům, avšak její užití je limitováno na teploty pod 100 °C. Z pohledu velkosériové výroby by v budoucnu mohla být perspektivní i metoda **transfer molding** ale jedině v případě odstranění vážných nedostatků jako je deformace textilu během procesu enkapsulace, které ji v současnosti při aplikaci na textil provází a to jen na textilní substráty, které dokáží odolat vysokým teplotám, kterými se tato metoda vyznačuje. Metoda **hot melt** by mohla být po odstranění svých nedostatků využita u aplikací, při kterých na pouzdro nepůsobí příliš vysoké teploty (cca nad 100 °C dochází k tavení termoplastu) a není vystaveno přílišným teplotním změnám kvůli CTE. Metoda **flexibilní matice** zalité z PDMS by mohla sloužit k dekorativním, nebo signalizačním účelům, avšak by se musel brát ohled na její ne příliš dobrou odolnost vůči pracím cyklům. A metoda **pouzdrění pomocí kaptonu** vyniká svou teplotní odolností, nízkým profilem a flexibilitou, proto lze snadno zakomponovat do oblečení. Pouzdrění **lepící ochrannou fólií** není sice nákladné, avšak za cenu nízké odolnosti vůči pracím i teplotním cyklům. Poslední zde uváděnou je metoda **3D tisku** která vyniká svými možnostmi dokonalému přizpůsobení výrobnímu procesu a specifickým požadavkům zákazníků.

## Závěr

Tato práce představuje různé metody pouzdření elektronických součástek a modulů na konvenčních substrátech a zkoumá přenositelnost jejich principů do světa textilních substrátů. Nároky na textilní elektroniku a pouzdření jsou v porovnání se standardními plošnými spoji zatíženy požadavkem na odolnost vůči pracím cyklům, které v sobě kombinují chemické a mechanické namáhání daného pouzdra. Zároveň je nutné co nejméně ovlivnit přirozené vlastnosti textilu, například jeho roztažnosti. V této rešeršní práci bylo odhaleno, že většina moderních metod pouzdření je postavena na principech, které jsou dobře známé z průmyslu. Některé tyto principy a technologie byly ovšem modifikovány právě kvůli náročnějším požadavkům ve smart textilních aplikacích.

V současné době existují studie, které se zabývají pouzdřením na textilní substráty s využitím metod, jež byly popsány ve 3. kapitole. Každá z technik má své výhody a nevýhody, které jsou porovnány v kapitole 4. Jako nejméně vhodná metoda pouzdření se v dnešní době jeví pouzdření ochranou lepící fólií kvůli své nízké odolnosti. Na druhou stranu pouzdření pomocí glob top bylo charakterizováno velice snadnou aplikovatelností, nízkými náklady a dobrou odolností proti pracím, ale i proti tepelným cyklům. Další výhodou této metody je, že při výrobním procesu nedochází k teplotnímu namáhání textilního substrátu. Oproti tomu při aplikaci metody transfer molding je na textil vyvíjena teplota, která tuto metodu limituje pouze na druhy textilu s vyšší teplotní odolností. Takto tepelně náročné způsoby pouzdření jsou s ohledem na teplotní odolnost standardních syntetických materiálů vhodné spíše pro substráty na přírodní bázi jako je například bavlna nebo len.

V tomto technologickém odvětví probíhá intenzivní vývoj jak na poli enkapsulačních materiálů, tak v oblasti pouzdřících technologií. Předpokládá se, že využití popsaných metod pouzdření na textil bude mít vzrůstající trend vzhledem ke stoupající poptávce po moderních, účelných výrobcích oděvního průmyslu.



## Seznam literatury a informačních zdrojů:

- [1] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001.
- [2] B. Švec, “Moderní hardware. Konstrukce a technologie elektrických obvodů - pouzdření a propojování (1)” 2017. Dostupné z: <https://docplayer.cz/42928574-Moderni-hardware-konstrukce-a-technologie-elektricky-obvodu-pouzdeni-a-propojovani-1.html> (accessed May 28, 2021).
- [3] O. Sraňková, “Základy návrhu elektrických pouzder (7) Teplotní management návrhu elektronických systémů” 2016. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2300103-Zaklady-navrhu-elektricky-pouzder-7-teplotni-management-navrhu-elektronicky-systemu.html> (accessed May 29, 2021).
- [4] “8 Pouzdra elektronických součástek - Hradla, volty, jednočipy.” Dostupné z: [https://maly.gitbook.io/hradla-volty-jednocipy/8\\_pouzdra\\_elektronicky\\_soucetek](https://maly.gitbook.io/hradla-volty-jednocipy/8_pouzdra_elektronicky_soucetek) (accessed Jun. 03, 2021).
- [5] R. Suchánek and V. Dashöfer, “Postup posuzování shody pro přístroje dle směrnice o EMC 2004/108/ES | Předpisy, normy, vzory a příklady z oblasti kvality, ISO a strojních zařízení.” Dostupné z: <https://www.qmprofi.cz/33/postup-posuzovani-shody-pro-pristroje-dle-smernice-o-emc-2004-108-es-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EvD6cPpZTsNIAJWMAoK7DzM/> (accessed Jun. 07, 2021).
- [6] M. Kristek, “Ekonomické způsoby pouzdření integrovaných obvodů a modulů,” Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [7] J. Smejkal, “Keramická pouzdra - interakce kovů s keramickými materiály při výpalových teplotách,” Vysoké technické učení v Brně.
- [8] E. Skaar, “Structural Design of Glass-to-Metal Sealing.” Dostupné z: <https://www.elantechnology.com/glass/structural-design-of-glass-to-metal-sealing/> (accessed May 29, 2021).
- [9] “Projekt: Inovace oboru Mechatronik pro Zlínský kraj Registrační číslo: Základy metalografie a tepelné zpracování.”
- [10] “Sklo.” Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html> (accessed Jun. 07, 2021).
- [11] K. Anýžová, “Bavlna.” Dostupné z: <http://www.guffoo.cz/textil-tul/index.php?nid=2634&lid=cs&oid=305066> (accessed Jun. 07, 2021).

- [12] “Chemická vlákna.” Dostupné z: <https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/tool/print/index.php?id=2363> (accessed Jun. 07, 2021).
- [13] “Reaktoplast – Wikipedie.” Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Reaktoplast> (accessed Jun. 07, 2021).
- [14] H. Štětina, Dostupné z: “Fyzická kontrola integrovaných obvodů pomocí reverzního inženýrství,” Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [15] “Termoplast – Wikipedie.” Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoplast> (accessed Jun. 07, 2021).
- [16] “Potting (electronics).” Dostupné z: <https://www.henkel-adhesives.com/cz/en/products/encapsulants/potting-compounds.html> (accessed May 29, 2021).
- [17] “Potting & Encapsulation for the Automotive Industry | Insulcast®.” Dostupné z: <https://itwperformancepolymers.com/markets/transportation/automotive/potting-encapsulation-automotive> (accessed May 29, 2021).
- [18] “Glob top materials to chip on board components - TWI.” Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/glob-top-materials-to-chip-on-board-components-october-1998> (accessed May 29, 2021).
- [19] “E-linking.” Dostupné z: [http://www.e-linking.com/InfoPages\\_1070.html](http://www.e-linking.com/InfoPages_1070.html) (accessed May 29, 2021).
- [20] “Protect Electronic Components with Dam & Fill - IEEE Spectrum.” Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/protect-electronic-components-with-dam-and-fill> (accessed May 29, 2021).
- [21] S. J. Adamson and C. Q. Ness, “Dam and Fill Encapsulation for Microelectronic Packages,” 1999. Accessed: May 29, 2021. [Online]. Dostupné z: [www.asymtek.com](http://www.asymtek.com).
- [22] “Plastic Molding Technologies/Transfer Molding and Compression Molding | TOWA Corporation.” Dostupné z: <https://www.towajapan.co.jp/en/technology/molding/> (accessed Jun. 02, 2021).
- [23] P. Voráč, “Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby,” Dostupné z: Vysoké technické učení v Brně.
- [24] L. Wang *et al.*, “Application Challenges in Fiber and Textile Electronics,” *Advanced Materials*, vol. 32, no. 5. Wiley-VCH Verlag, Feb. 01, 2020, doi: 10.1002/adma.201901971.

- [25] S. de Mulatier, M. Nasreldin, R. Delattre, M. Ramuz, and T. Djenizian, “Electronic Circuits Integration in Textiles for Data Processing in Wearable Technologies,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 10, pp. 1–26, 2018, doi: 10.1002/admt.201700320.
- [26] T. Blecha, “Smart firefighter protective suit – functional blocks and technologies,” pp. 18–21, 2018, [Online]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8481335>.
- [27] “Amazon.com: ORORO Heated Hoodie with Battery Pack (Small, Black): Clothing.” Dostupné z: [https://www.amazon.com/ORORO-Heated-Hoodie-Battery-Large/dp/B07FQLRQM6?ref\\_=ast\\_sto\\_dp&th=1&psc=1](https://www.amazon.com/ORORO-Heated-Hoodie-Battery-Large/dp/B07FQLRQM6?ref_=ast_sto_dp&th=1&psc=1) (accessed Jun. 06, 2021).
- [28] “Pánská elektrická vyhřívaná bunda s tlačítkem a USB napájením.” Dostupné z: <https://www.perfect-dress.eu/panska-elektricka-vyhrivana-bunda-s-tlacitkem-a-usb-napajenim-aiw001/> (accessed Jun. 06, 2021).
- [29] “Integration of a Bluetooth Based ECG System into Clothing.” Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8481335> (accessed Jun. 06, 2021).
- [30] “Skiin’s ‘smart’ underwear takes fitness tracking to the next level.” Dostupné z: <https://mashable.com/2018/01/09/myant-skiin-smart-underwear/?europe=true> (accessed Jun. 06, 2021).
- [31] Cantor, Kirk M. “*Applied Plastics Engineering Handbook // Plastics Processing*.” Feb. 01, 2020, doi:10.1016/B978-1-4377-3514-7.10012-1.
- [32] “2.1 Silicon Dioxide Properties.” <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node26.html> (accessed Jun. 07, 2021).
- [33] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, and H. Reichl, “Embroidering Electrical Interconnects with Conductive Yarn for The Integration of Flexible Electronic Modules into Fabric,” in *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC’05)*, 2005, vol. 2005, pp. 86–91, doi: 10.1109/ISWC.2005.19.
- [34] T. Linz *et al.*, “Embroidered interconnections and encapsulation for electronics in textiles for wearable electronics applications,” *CIMTEC 2008 - Proc. 3rd Int. Conf. Smart Mater. Struct. Syst. - Smart Text.*, vol. 60, pp. 85–94, 2008, doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.60.85.
- [35] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, “TEXTILES — DOMESTIC WASHING AND DRYING PROCEDURES FOR TEXTILE TESTING,” 2005.
- [36] “Thermal Fatigue (Temperature Cycle Fatigue).” <https://kyjworld.web.fc2.com/thermalfatigueprelim.htm> (accessed Jun. 04, 2021).

- [37] T. Linz, *Analysis of Failure Mechanisms of Machine Embroidered Electrical Contacts and Solutions for Improved Reliability Analyse van faalmechanismen van machinaal geborduurde elektrische contacten en oplossingen voor een betere betrouwbaarheid* Torsten Linz. 2011.
- [38] T. Vervust, G. Buyle, F. Bossuyt, and J. Vanfleteren, “Integration of stretchable and washable electronic modules for smart textile applications,” *J. Text. Inst.*, vol. 103, no. 10, pp. 1127–1138, 2015, doi: 10.1080/00405000.2012.664866.
- [39] “Integration Method for Electronics in Woven Textiles | Semantic Scholar.” Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integration-Method-for-Electronics-in-Woven-Zysset-Kinkeldei/3f74e724e2744e1c47f26b798d6f1b524fd59cb4> (accessed May 30, 2021).
- [40] H. Yang, W. R. Leow, and X. Chen, “3D Printing of Flexible Electronic Devices,” *Small Methods*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1002/smt.201700259.
- [41] D. Kalas, S. Suchy, J. Kalcik, J. Reboun, R. Soukup, and A. Hamacek, “Contacting of SMD Components on the Textile Substrates,” in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, May 2020, vol. 2020-May, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9120911.
- [42] M. Li, “Electronic Packaging for Functional Electronic Textiles,” 2018.
- [43] “100624\_funkt\_textil\_1-hires.jpg (800×600).” Dostupné z: [https://www.ethlife.ethz.ch/archive\\_articles/100701\\_smart\\_e\\_textilien\\_per/100624\\_funkt\\_textil\\_1-hires.jpg](https://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/100701_smart_e_textilien_per/100624_funkt_textil_1-hires.jpg) (accessed Jun. 03, 2021).
- [44] “Select the Right Setting for Ironing Any Fabric.” Dostupné z: <https://www.thespruce.com/select-correct-ironing-temperature-for-fabrics-2146186> (accessed Jun. 07, 2021).
- [45] “Resin Transfer Molding Machines | Products & Suppliers | Engineering360.” Dostupné z: [https://www.globalspec.com/industrial-directory/resin\\_transfer\\_molding\\_machines](https://www.globalspec.com/industrial-directory/resin_transfer_molding_machines) (accessed Jun. 06, 2021).
- [46] “Automatic Liquid Dispensing Robot Supplier | Topbest.” Dostupné z: [https://www.topbest-cn.com/products/collections/robotic-fluid-dispensing-system.html?gclid=Cj0KCQjw5PGFBhC2ARIsAIFIMNdXPkAyJ2WwjsZtuGJOov\\_a1OJlb19IG43eFlZYIYDzgRabOHp9-CgQaAjKjEALw\\_wcB](https://www.topbest-cn.com/products/collections/robotic-fluid-dispensing-system.html?gclid=Cj0KCQjw5PGFBhC2ARIsAIFIMNdXPkAyJ2WwjsZtuGJOov_a1OJlb19IG43eFlZYIYDzgRabOHp9-CgQaAjKjEALw_wcB) (accessed Jun. 06, 2021).
- [47] “Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S.” Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa->

i3-

mk3s.html?gclid=Cj0KCQjw5PGFBhC2ARIsAIFIMNeTgxlHaTevmax8qDW72ol  
mErMeL9xeTIauktJT\_kd\_PVkcdrvXKeNsaAqVyEALw\_wcB (accessed Jun. 07,  
2021).

- [48] “China HP8in1 Combo 8 1 Magic Mug Heat Press Machine - China Heat Press Transfer Machine, T-Shirt Heat Press Machine.” Dostupné z:  
<https://micvevor.en.made-in-china.com/product/ysJxEnNShpcB/China-HP8in1-Combo-8-1-Magic-Mug-Heat-Press-Machine.html> (accessed Jun. 07, 2021).