ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Samouzdravující polymery a jejich perspektiva v elektrotechnice

Daniel Háže **2020**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Daniel HÁŽE**
Osobní číslo:	**E17B0074P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektronika a telekomunikace**
Téma práce:	**Samouzdravující polymery a jejich perspektiva v elektrotechnice**
Zadávající katedra:	**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Pomocí odborné literatury popište teoretickou tématiku související se samouzdravujícími polymery.
2. Zpracujte přehled strategií používaných v polymerech k dosažení samouzdravujícího efektu.
3. Zpracujte přehled aplikačních možností samouzdravujících polymerů.
4. Formou literární rešerše uveďte několik konkrétních příkladů, které by mohly mít aplikační potenciál v elektrotechnice.

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

Seznam doporučené literatury:

1. S. K. Ghosh (Editor): Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31829-2.
2. M. Q. Zhang, M. Z. Rong: Self-healing polymers and polymer composites. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-49712-8.
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, Scopus, Interscience-Wiley apod.)

Vedoucí bakalářské práce:	**Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.** Katedra technologií a měření
Datum zadání bakalářské práce:	**4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**11. června 2020**

Západočeská univerzita v Plzni 1 Fakulta elektrotechnická

L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Záměrem této bakalářské práce je průzkum strategií a aplikačních možností samouzdravujících polymerů v elektrotechnice, do které moderní materiálové inženýrství stále více zasahuje. První kapitola práce je věnována základním termínům z oblasti polymerů, které jsou následně aplikovány v následujících kapitolách. Další část práce popisuje principy obecných postupů používaných k dosažení samouzdravujícího efektu. V části týkající se aplikačních možností samouzdravujících polymerů je proveden rozbor aplikačních možností s důrazem na elektrotechnický průmysl. Zde jsou jednotlivé metody prozkoumány z pohledu použitých technologií, návrhových možností a vlastností realizovaných vzorků. V závěru jsou jednotlivé aplikační možnosti rozebrány a zhodnoceny jejich výhody a nevýhody. Dále jsou zde zmíněny doporučení dalších potenciálních aplikačních možností pro elektrotechniku.

Klíčová slova

Samouzdravování, monomer, polymer, polymerizace, chemická vazba, interdifuze, mikrokapsle, mikrovaskulární síť, elektrotechnika, pneumatika, lak, tranzistor, kabel, vodič, displej.

Abstract

This thesis aims to investigate the strategies and application possibilities that are used in the field of self-healing polymers in electrical engineering, which is increasingly involved in modern material engineering. The first chapter is devoted to basic terms in the field of polymers which are subsequently applied in the following chapters. The next part describes the principles of general procedures used to achieve a self-healing effect. In the part concerning the application possibilities of self-healing polymers, an analysis of application possibilities is performed with an emphasis on the electrical industry. The individual methods are examined for used technologies, design possibilities and properties of realized samples. The individual application possibilities are analysed in conclusion and their advantages and disadvantages are evaluated. Recommendations of other potential application possibilities for electrical engineering are also mentioned here.

Key words

Self-healing, monomer, polymer, polymerization, chemical bonding, interdiffusion, microcapsules, microvascular network, electrical engineering, tire, varnish, transistor, cable, wire, display.

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 11.6.2020 Daniel Háže

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, trpělivost a metodické vedení práce.

Obsah

1 SAMOUZDRAVOVÁNÍ POLYMERŮ – ZÁKLADNÍ PRINCIPY 10

1.1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE 10

1.2 DEFINICE SAMOUZDRAVOVÁNÍ 12

2 STRATEGIE POUŽÍVANÉ PRO SAMOUZDRAVOVÁNÍ 13

2.1 POLYMERY S VNITŘNÍM SAMOUZDRAVOVÁNÍM 13

2.1.1 Polymery s vnitřním samouzdravováním založené na fyzikálních interakcích 13

2.1.2 Polymery s vnitřním samouzdravováním založené na chemických interakcích 16

2.2 POLYMERY S VNĚJŠÍM SAMOUZDRAVOVÁNÍM 18

2.2.1 Duté skleněné trubice a vlákna 18

2.2.2 Mikrokapsle 19

2.2.3 Tří-dimenzionální mikrovaskulární síť 20

3 APLIKAČNÍ MOŽNOSTI SAMOUZDRAVUJÍCÍCH POLYMERŮ 22

3.1 APLIKACE V NEELEKTROTECHNICKÉM PRŮMYSLU 22

3.1.1 Samouzdravující pneumatiky 22

3.1.2 Samouzdravující ochranné laky 23

3.2 APLIKACE V ELEKTROTECHNICKÉM PRŮMYSLU 24

3.2.1 Samouzdravující a flexibilní tranzistory 25

3.2.2 Samouzdravující kabelové izolace a ochrany 27

3.2.3 Flexibilní a samouzdravující vodiče 29

3.2.4 Samouzdravující kapacitní dotykové displeje 32

Úvod

V minulosti všeobecně panovalo přesvědčení, že samouzdravování je význačnou vlastností přírody, kterou bude jen velmi obtížné převzít a aplikovat v různých odvětvích průmyslu. Ovšem s rozvojem technologií je toto téma čím dál více zmiňováno. Člověk se přírodou a jejími principy samouzdravování inspiruje a aplikuje je ve vlastních experimentech. Jako vhodné odvětví se jeví oblast polymerních materiálů, která nabízí různorodé materiálové vlastnosti v závislosti na chemickém složení.

Se zvyšujícími se nároky na materiály používané v elektrotechnice je oblast samouzdravujících polymerů jednou z možností, jak zvýšit spolehlivost zařízení s konvenčními materiály. Zejména u zařízení instalovaných na odlehlých místech nebo v náročném prostředí je vyžadována co možná největší spolehlivost. Například se může jednat o citlivou elektroniku ve vesmírných družicích nebo odolnou kabelovou izolaci vysokonapěťových vedení.

Práce má nastínit nový pohled na samouzdravující polymery v elektrotechnice. Hlavním přínosem je zmapovat metody používané k dosažení samouzdravujícího efektu, rozšířit možnosti elektrotechnického průmyslu rešerší inovativních materiálů, kriticky zhodnotit a navrhnout přehled aplikační možnosti samouzdravujících polymerů v elektrotechnice.

Seznam symbolů a zkratek

°C ..... Stupeň Celsia

AgNW..... Kompozit tvořený perkolačními nanosítěmi ze stříbra (Ag nano-wires)

DA ..... Diels-Alderova reakce

DCPD ..... Dicyklopentadien

DPS..... Deska plošných spojů

EGaIn..... Eutetická sloučenina gallia a india

EMAA ..... Kopolymer ethylenu s methakrylovou kyselinou

FET ..... Tranzistor řízený elektrickým polem (Field-effect transistor)

I_{DS} ..... Proud kanálem FET tranzistoru (Drain-Source)

OFET ..... Organický FET (Organic field-effect transistor)

PEI ..... Polyetherimide

PHPMA ..... Polyhydroxyprophylmethakrylát

PMMA..... Polymethylmethakrylát

PUA ..... Polyurethanakrylát

UF ..... Močovinoformaldehydová pryskyřice

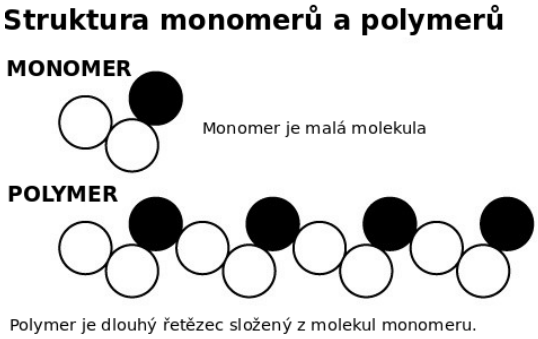
1 SAMOUZDRAVOVÁNÍ POLYMERŮ – základní principy

Tato kapitola se bude věnovat základní terminologii v oblasti polymerů, na kterou budou v dalších kapitolách navazovat samotné principy samouzdravujících polymerních materiálů.

1.1 Základní terminologie

- **Monomery**

Monomer je první a nejzákladnější termín, který kombinuje předponu mono-, což znamená „jeden“ a příponu -mer, znamenající „část“ [1]. Monomer je malá molekula, která tvoří základní jednotku polymerů. Jak lze vidět na obrázku *Obr. 1.1*, monomery se vážou na



Obr. 1.1 Struktura monomeru a polymeru (převzato z [2]*).*

jiné monomery za vzniku opakujících se řetězců molekul procesem známým jako polymerizace [3]. Typickými příklady monomerů jsou glukóza, vinylchlorid, nebo ethylen.

- **Polymery**

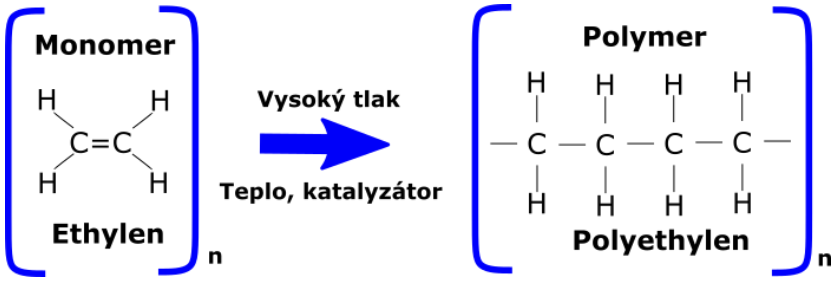
Zjednodušeně si polymery můžeme představit jako dlouhý vlak, kde je za sebou zapojeno mnoho stejných vagonů [4]. Slovo polymer označuje nespecifikovaný počet monomerních molekul. Pokud se spojí jen několik monomerů za vzniku polymeru, sloučeniny mají různé názvy, např. Dimer pro polymer sestávající se ze dvou monomerů, Trimer pro tři monomerní jednotky, Tetramer pro čtyři atd [3]. Když je počet monomerů velmi velký, sloučenina se někdy nazývá vysoký polymer. Polymery nejsou omezeny na monomery stejného chemického složení nebo molekulové hmotnosti a struktury. Některé přírodní polymery jsou složeny z jednoho druhu monomeru. Většina přírodních a syntetických polymerů je však tvořena dvěma nebo více různými typy monomerů, takové polymery jsou známé jako kopolymery [4, 5].

V závislosti na požadovaném použití mohou být polymery upraveny do takové podoby, aby se využily jejich určité výhodné vlastnosti. Těmi mohou být tažnost, pružnost, křehkost, průsvitnost, nebo reflektivita. Každodenně se setkáváme například s elastickými pryžemi, teflonovým kuchyňským náčiním nebo PET lahvemi.

- **Polymerizace**

Nezbytnou součástí při výrobě polymerních materiálů je proces zvaný polymerizace. Polymerizace je proces spojování monomerů a vytváření velkých makromolekul polymerů různých velikostí a tvarů [6, 7]. Rozlišujeme dva druhy polymerizace.

Adiční polymerizace [7–9] je reakce, kdy celá molekula monomeru i všechny její atomy přejdou do polymeru. Pro nastínění je na obrázku *Obr. 1.2* zobrazen zjednodušený proces



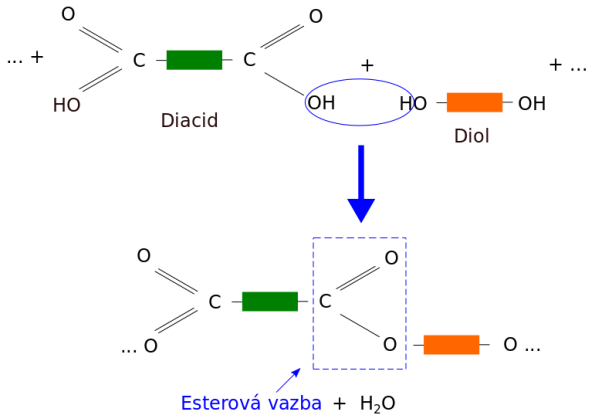
Obr. 1.2 Příklad adiční polymerizace polyethylenu. (převzato z [10]).

vzniku polyethylenu, který se obvykle provádí v přítomnosti katalyzátorů[1]. Tyto látky mohou mít v určitých případech kontrolu nad strukturou daného polymeru, a také mají důležité účinky na jejich vlastnosti.

Kondenzační polymerizace [7–9] je reakce, při které je každý krok procesu doprovázen tvorbou molekuly nějaké jednoduché sloučeniny, často vody. Zmiňovaná voda nebo obecně určité jednoduché nízkomolekulární produkty vyloučené kondenzační polymerizací jsou nazývány kondenzát. Ve výsledné polymerní sloučenině se to projeví tak, že se v ní neobjeví všechny atomy z původních monomerů. Tudíž je oproti monomeru nově vzniklý polymer

[1]Katalyzátor funguje jako činidlo přispívající k rychlejšímu dosažení chemické reakce. Výhodou je, že neovlivňuje její rovnováhu. Oproti nekatalyzované reakci výsledná přeměna probíhá méně energeticky náročným mechanismem, a to z důvodu přeměny látkami s nižší aktivační energií, než je aktivační energie původní reakce [14].

kondenzován. Příkladem takové reakce je polymerizace polyesteru na obrázku *Obr. 1.3*.



Obr. 1.3 Příklad kondenzační polymerizace polyesteru [10].

1.2 Definice samouzdravování

Termín „samouzdravování“ popisuje jakékoliv zařízení nebo systém, který je schopen se uzdravit (zotavit/opravit) automaticky a autonomně [11]. To znamená, že bez zásahu člověka provede nezbytné úpravy, aby se obnovil do původního stavu. Ovšem zavedení samoléčivých vlastností do umělých materiálů se často neobejde bez vnějšího zásahu [12]. Samouzdravování se proto často rozděluje do dvou kategorií [13]:

- autonomní (bez zásahu),
- neautonomní (vyžaduje vnější spuštění nebo zásah člověka).

Zajímavá je kombinace výše uvedeného a rozdělení použitá Qiu Mingem [12], který neřeší primárně jednotlivé metody z pohledu autonomnosti, ale metody rozdělil podle:

- fyzikálních principů,
- chemických principů.

Kromě toho lze zmíněné samouzdravující přístupy rozdělit také na:

- polymery s vnitřním samouzdravováním,
- polymery s vnějším samouzdravováním.

Polymery s vnitřním samouzdravováním využívají vlastní materiální schopnosti k samoléčení. Naproti tomu u polymerů s vnějšími samouzdravujícími koncepty musí být léčebná činidla předem zabudována do polymerní matrice. Všechny tyto přístupy vykazují různé rysy s ohledem na podmínky, za kterých dochází k samoléčení. Tato problematika bude prodiskutována v následující kapitole [12, 14].

2 STRATEGIE POUŽÍVANÉ PRO SAMOUZDRAVOVÁNÍ

V této kapitole jsou diskutovány různé principy samouzdravujících procesů používaných v problematice samouzdravujících polymerů. Tyto principy jsou základem pro výzkum a vývoj moderních materiálů se samouzdravujícími vlastnostmi.

2.1 Polymery s vnitřním samouzdravováním

Jak již bylo zmíněno výše, polymery s vnitřním samouzdravováním jsou materiály využívající vlastní materiálové vlastnosti pro samouzdravení. Samotná oprava molekulárních a makromolekulárních poškození je založena na dočasném zvýšení pohybu polymerních řetězců. Tohoto pohybu můžeme dosáhnout dodáním určitého množství energie, např. teploty, statického zatížení nebo UV záření [13]. Výhodou oproti polymerům s vnějším samouzdravováním je možnost úplného nebo částečného opravení počátečních vlastností konkrétního materiálu vícekrát. Léčebný přístup lze aplikovat jak na termoplasty, tak na reaktoplasty a elastomery [15]. Při dosavadních výzkumech bylo dosaženo úspěchů v oborech fyzikálních, chemických i supramolekulárních vazeb[2] [12].

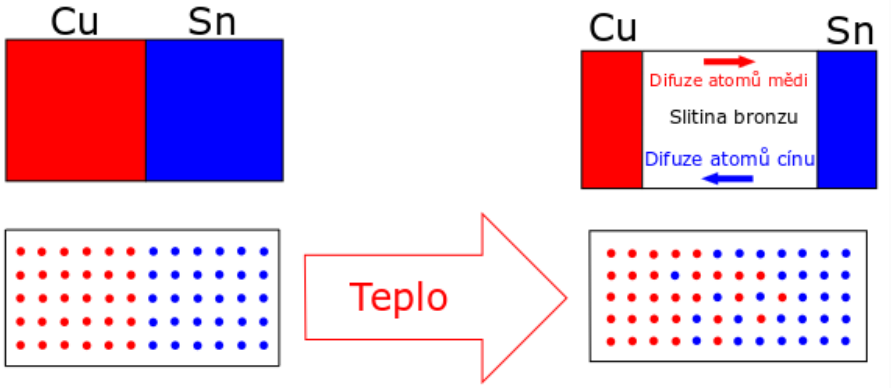
2.1.1 Polymery s vnitřním samouzdravováním založené na fyzikálních interakcích

Základními kroky všech fyzikálních principů samoléčení jsou interdifuze[3] a spletení polymerních řetězců. Obě vlastnosti závisí na mezimolekulárních silách, které úzce souvisejí s chemickou povahou polymeru a délkou molekul včetně závislosti na průměrné molekulové hmotnosti [11]. Oba faktory si však částečně odporují. Krátké řetězce umožňují rychlou molekulární interdifuzi, zatímco dlouhé řetězce vytvářejí materiály s vysokou pevností. Pro

[2] Supramolekulární vazby definují polymerní pole monomerních jednotek, držené pohromadě reverzibilními a vysoce směrovými sekundárními interakcemi - tj. nekovalentními vazbami, jako jsou například vodíkové vazby. Výsledné materiály kombinují dobré mechanické vlastnosti s nízkou teplotou tání pro snadnou vyrobitelnost, tvarovatelnost a flexibilní vlastnosti. Směry a síly interakcí jsou přesně vyladěny tak, aby se pole molekul chovalo jako polymer (chová se způsobem, který lze popsat teoriemi fyziky polymerů) [12, 52].

[3] K interdifuzi dochází, když se atomy přemisťují v nehomogenní látce, což je proces rozptylování způsobující přemístění atomů v celé směsi. Mezi mechanismy interdifuze patří náhodný Brownův pohyb (kapaliny, plyny) a intersticiální difuze v pevných látkách [53].

představu můžeme na interdifuzi narazit například při výrobě slitin. Velmi známým příkladem je tavení mědi a cínu, při kterém získáme slitinu zvanou bronz. Průběh tavení a difuze atomů obou materiálů si lze dobře představit při pohledu na obrázek *Obr. 2.1*. [11, 13].

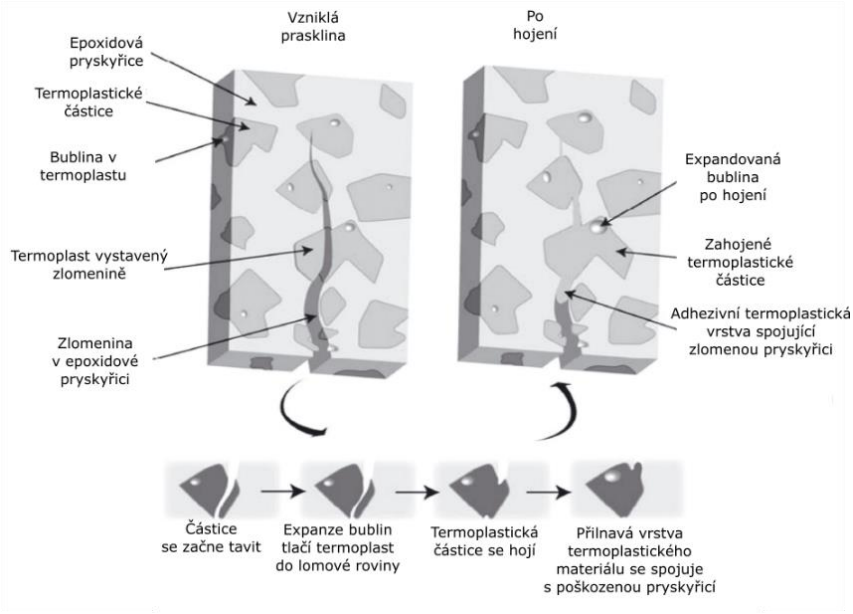


Obr. 2.1 Interdifuze atomů mědi a cínu při výrobě bronzu (převzato z [64]).

2.1.1.1 Tepelná aktivace

První metoda samouzdravování polymerních materiálů založených na fyzikálních interakcích je tepelná aktivace. Samouzdravení tepelnou aktivací můžeme dosáhnout začleněním termoplastické nebo reaktoplastické přísady do struktury polymerního materiálu [11, 12]. K samoléčení dochází tavením a následným rozšířením léčivého materiálu do roviny trhliny. Používané teploty se pohybují převážně nad teplotou skelného přechodu[4]. Pro názorné vysvětlení se můžeme podívat na obrázek *Obr. 2.2*, kde můžeme vidět disperzi termoplastického činidla EMAA (kopolymer ethylenu s metakrylovou kyselinou) do epoxidového kompozitu [12]. Při zahřátí kompozitu se termoplastické činidlo rozšířilo mezi sousední lomové hrany. Mechanismus dodávaní léčebného činidla zajišťují malé bublinky, které se při zahřívání rozpínají a léčebné činidlo se lépe rozlévá v porušeném prostoru [11].

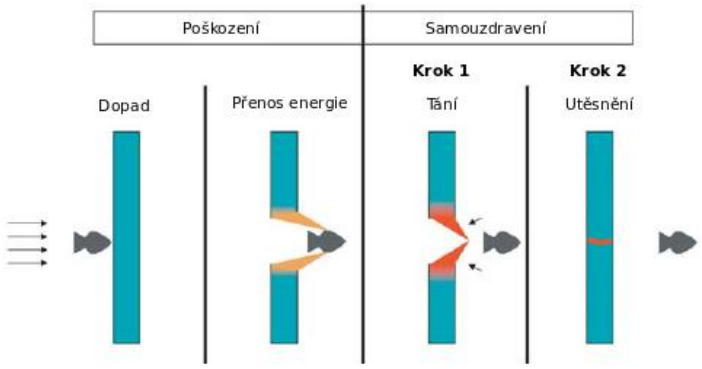
[4] Teplota skelného přechodu definuje teplotu, při které se prudce mění původní vlastnosti polymeru. Těmito vlastnostmi mohou být pevnost, elektrické vlastnosti, optické vlastnosti atd. Tento proces se nazývá skelný přechod a při dostatečném zvýšení teploty dosáhne materiál kaučukovitého stavu. Důvodem je dodání energie makromolekulám, které díky tomu zvýší svoji pohyblivost za poklesu mezimolekulárních sil [3, 4].



Obr. 2.2 Mechanismus dodávání léčebného činidla používaný opravitelnými epoxidovými pryskyřicemi obsahující částice EMAA (převzato z [12]*).*

2.1.1.2 Balistický samouzdravující mechanismus

K procesu samoléčení zde dochází při průstřelu projektilu materiálem. U použitého materiálu předpokládáme dva hlavní požadavky [13]: (i) událost vniku projektilu musí vést k lokálnímu stavu tání v polymerním materiálu a (ii) roztavený materiál musí mít dostatečnou pružnost pro zacelení vzniklého defektu [12, 13]. Na obrázku *Obr. 2.3* vidíme



Obr. 2.3 Dvoustádiový model balistického samouzdravování za použití filmu EMAA (převzato z [13]*).*

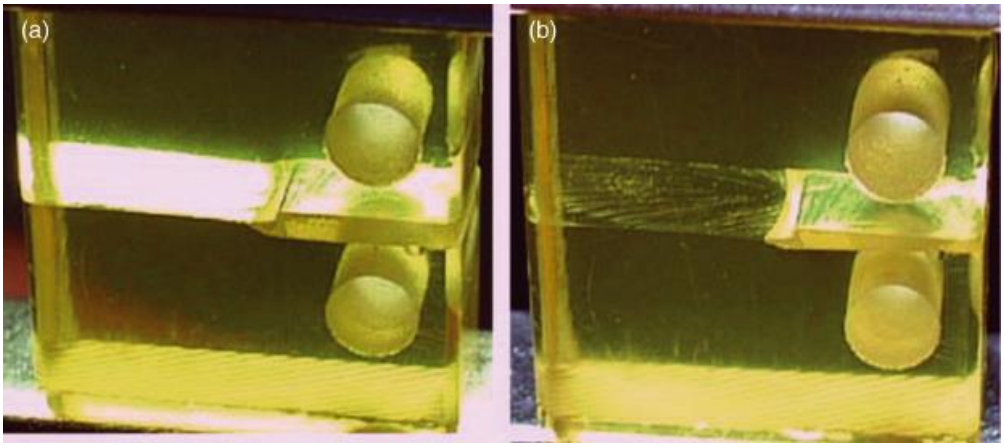
poškození způsobené vlivem průstřelu. Následně se v prvním kroku samouzdravení při nárazu přenese část energie projektilu do materiálu vlivem tření a místo průstřelu se lokálně změní (zahřeje) na taveninu [13]. V druhém kroku se roztavené povrchy spojí a rozptýlí, aby se díra utěsnila. Samotný proces samouzdravení je založen na stejném principu jako tepelná aktivace.

2.1.2 Polymery s vnitřním samouzdravováním založené na chemických interakcích

Principy samouzdravování formou chemických reakcí můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií založených na kovalentní nebo supramolekulární síťové struktuře. V případě kovalentní tvorby [11] sítě se vytvoří chemické vazby mezi funkčními skupinami, a tak se vytvoří stálá, ale někdy i reverzibilní neboli vratná síť. Naproti tomu supramolekulární sítě jsou běžně vratně spojovatelné.

2.1.2.1 Koncept vratné kovalentní sítě

Většina polymerních materiálů spadajících do této skupiny pracuje na principu Diels-Alderových (DA) reakcí[5]. Zahřívání je nezbytně nutné pro zvýšení pohyblivosti molekul v rovině trhliny a pro urychlení reakce DA. Příklad takového zahřátí je vidět na obrázku *Obr. 2.4*. Výhodou [11–13] principů samoléčení založených na reakcích DA je, že nevyžadují



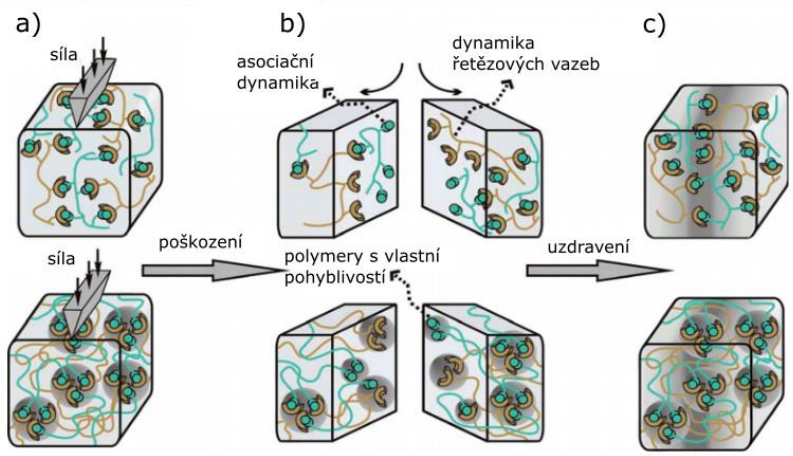
Obr. 2.4 Obrázky zkušebního vzorku (a) před a (b) po tepelném ošetření, ukazující zmizení trhliny v důsledku reverzibilních DA vazeb (převzato z [13]).

žádná aditiva v podobě mikrokapslí, mikrovaskulárních sítí apod. Také umožňují provést vícenásobné samoléčebné procesy ve stejné oblasti narušení.

[5] K DA reakci dochází při zvýšených teplotách po odstranění chemických vazeb. V důsledku slabších vazebných sil mezi dienem a dienofilem DA aduktu (ve srovnání s kovalentními vazbami) se tato vazba během poškození poškodí přednostně [12]. Hojení trhlin lze dosáhnout zahřátím polymeru nad teplotu požadovanou pro reverzibilní reakci DA. Teplo způsobuje částečné odpojení polymerních řetězců a také zvyšuje jejich pohyblivost. Po ochlazení se vytvoří nové DA vazby mezi jednotlivými atomy [54].

2.1.2.2 Supramolekulární interakce

Jak již bylo řečeno, koncept supramolekulárních samouzdravujících polymerů je založen na použití nekovalentních vazeb mezi atomy, které jsou schopny opakovatelně uzdravit poškozené místo [13]. Obecný proces samoléčení je znázorněn na obrázku *Obr. 2.5*,



Obr. 2.5 Samoléčebný mechanismus supramolekulárního materiálu: a) když je materiál rozdělen na dvě části, přednostně se rozdělí supramolekulární vazby (nahoře) nebo polymerní shluky (dole); b) supramolekulární vazby a shluky zůstávají rozdělené na zlomeném povrchu s možností znovuuspořádání; c) po opětovném spojení rozdělených ploch se supramolekulární vazby nebo shluky opětovně naváží na vazby mezi atomy (převzato z [16]*).*

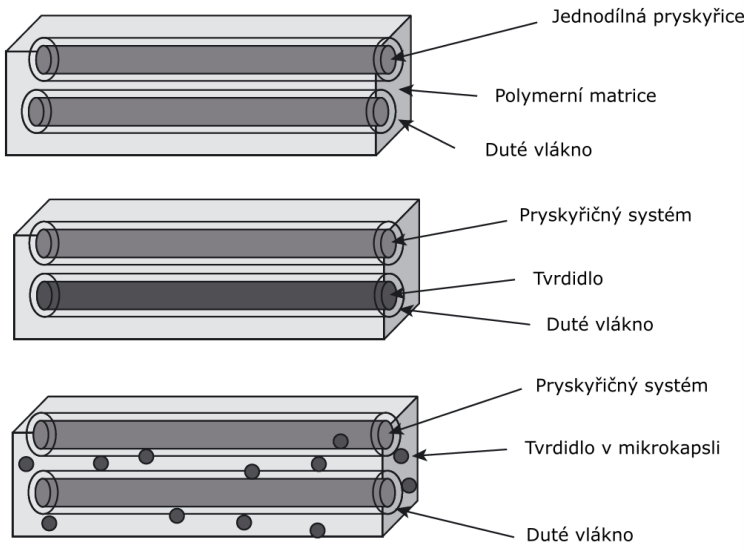
který ukazuje základní kroky samoléčení v supramolekulárních polymerech. Použitý nepoškozený materiál je tvořen polymerními řetězci s navázanými supramolekulárními vazbami, které tvoří síť schopnou rozpojit se a znovu spojit prostřednictvím reverzibilního chování podobného například „nálepce“[16]. Na rozdíl od „konvenčních“ polymerních materiálů je tedy pevnost materiálu generována „lepkavostí“ supramolekulárních vazeb a není generována kovalentními vazbami nebo vzájemným propletením polymerních řetězců. Zásadní pro tuto tvorbu sítě je specifická interakce mezi dvěma různými supramolekulárními vazbami spojujícími polymerní řetězce. Možnost a čas na uzdravení poškozeného místa závisí primárně na dvou faktorech. Prvním je doba, po kterou spolu supramolekulární vazby rekombinují, přičemž druhým je dostatečná dynamika jednotlivých polymerních řetězců, která je nezbytná pro opětovné navázání supramolekulárních vazeb [11]. Pro konstrukci takových samouzdravujících polymerů je tedy zapotřebí regulovatelná dynamika supramolekulárních interakcí uvnitř polymeru nebo zajištění reakce s polymery s dostatečnou pohyblivostí řetězce. Hlavní otázkou v tomto přístupu je nalezení správné rovnováhy mezi dobou a dynamikou chemické reakce, která má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu [11, 16].

2.2 Polymery s vnějším samouzdravováním

V případě polymerů s vnějším samouzdravováním musí být léčivé činidlo uloženo v nosných médiích a zakomponováno do materiálu předem. Jakmile trhliny zničí mechanicky křehké obaly (např. kapsle), léčivé činidlo se díky kapilárním účinkům přirozeně uvolní do rovin trhlin a trhliny uzdraví. V závislosti na typu použitého nosného média pro uložení léčivého činidla můžeme samouzdravující materiály rozdělit do dvou kategorií. První metodou je uložení léčivého činidla do dutých skleněných trubic a vláken. Druhou vhodnější metodou je ovšem použití mikrokapslí. V porovnání s vnějšími principy samouzdravování zde již není nutný manuální zásah pro spuštění samouzdravujícího procesu, ten se sám spustí samotným mechanickým poškozením materiálu [12].

2.2.1 Duté skleněné trubice a vlákna

Jednou z prvních metod vnějšího samouzdravování bylo využití dutých skleněných trubic [12]. Tyto trubice zároveň mohou sloužit jako výztuž použitého materiálu. Zprvu bylo nutné překonat problémem s dosažením malých rozměrů skleněných trubic a jejich naplnění léčivou látkou. Trubice s velkým průměrem (milimetrové měřítko) nesplňovaly požadavky na pevnost materiálu, naopak velmi tenké trubice splňovaly materiálové vlastnosti, ale zpočátku se jevily jako nevhodné pro naplnění léčebným materiálem z důvodu své velikosti. Jako optimální metoda se osvědčila možnost plnění léčebného činidla do malých kapilár vakuovou technikou [12, 13]. V souladu s tím byly vyvinuty tři typy léčebných systémů zobrazených na obrázku *Obr. 2.6*. Prvním řešením je naplnění kapilár jednosložkovým lepidlem. Příkladem takového lepidla je třeba kyanoakrylát používaný ve vteřinových lepidlech. Při mechanickém porušení materiálu se lepidlo přirozeně rozlije v rovině trhliny a trhlinu zacelí. Druhým řešením je použití dvousložkového lepidla. V tomto případě jsou jeho jednotlivé složky samostatně uloženy v kapilárách, které jsou střídavě rozmístěny v materiálu. Jednotlivé složky lepidla jsou tvořeny epoxidem a jeho vytvrzovacím činidlem. Poslední možností je opět dvousložkové lepidlo. Ovšem s tím rozdílem, že jedna jeho složka je začleněna do dutých kapilár a druhá do mikrokapslí [12]. Mezi hlavní výhody všech zmíněných léčebných systémů patří dostupnost velkého množství léčivého materiálu, variabilita chemických aktivací, materiálová variabilita, vizuální kontrola poškozeného místa nebo možnost kombinace kapilár s obvyklými výztužnými vlákny pro zvýšení pevnosti. Kromě výše uvedených výhod mají tyto systémy také své nevýhody. Mezi ně lze zařadit samotný mechanizmus, kdy se kapiláry musí nejprve rozbít, aby se uvolnil léčivý

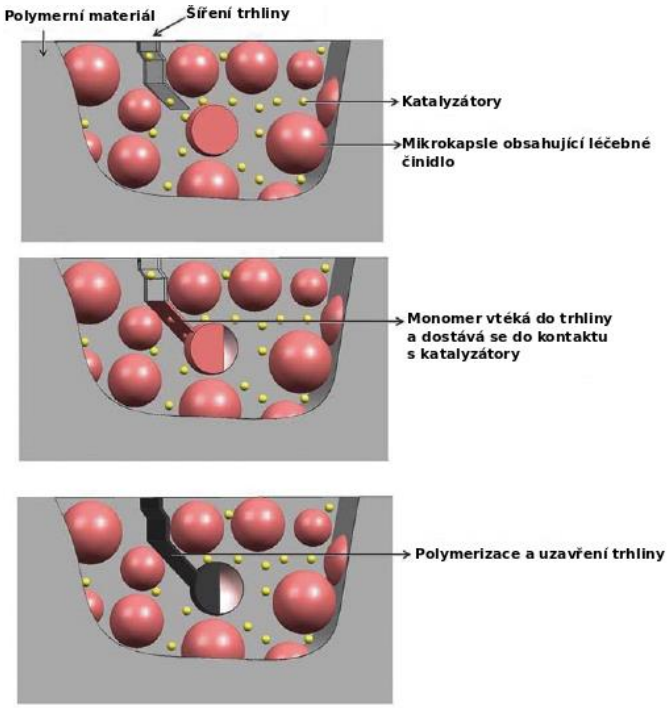


Obr. 2.6 Jednotlivé typy léčivých systémů s použitím dutých skleněných trubic a vláken (převzato z [12]).

prostředek. Dalším problémem je použití lepidla s nízkou viskozitou pro přirozené rozlití v rovině trhliny. Neméně významnou nevýhodou je použití různých materiálů v jednom celku, což vede k neshodě koeficientu tepelné roztažnosti a značné složitosti výroby [12, 13].

2.2.2 Mikrokapsle

Po dutých skleněných trubicích a vláknech jsou druhou kategorií vnějšího samouzdravování mikrokapsle. Jedná se o proces zakomponování mikronových částic pevných látek, kapiček tekutin nebo plynů do inertního obalu, který je izoluje a chrání před vnějším prostředím [11, 12]. Konečný produkt tohoto procesu se nazývá mikrokapsle, která je složena z jádra a skořepiny. Jádro je tvořeno samotnou léčivou látkou a skořepina zde funguje jako „nosič“, který při porušení materiálu uvolní léčivou látku do okolí trhliny. Mikrokapsle mohou mít kulové nebo nepravidelné tvary a jejich velikost se může lišit od nano až po mikroskopické rozměry [11]. Samoléčebný přístup založený na mikrokapslích má jednu hlavní nevýhodu, kterou je omezené množství léčivého činidla uvnitř kapslí. Tudíž není známo, kdy bude léčivé činidlo spotřebováno úplně. Vícenásobné hojení bude tedy možné pouze tehdy, když v mikrokapsli zůstane k dispozici dostatek léčivé látky po předcházejícím hojení. Jeden z prvních význačných praktických pokusů [11] provedl prof. Scot White v roce 2001, když zapouzdřil léčivé látky do membrány zakomponované v polymerní matrici obsahující dispergované katalyzátory. Použitá strategie je znázorněna na obrázku *Obr. 2.7*.



Obr. 2.7 Schématická reprezentace samouzdravujícího konceptu při použití zabudovaných mikrokapslí (převzato z [13]*).*

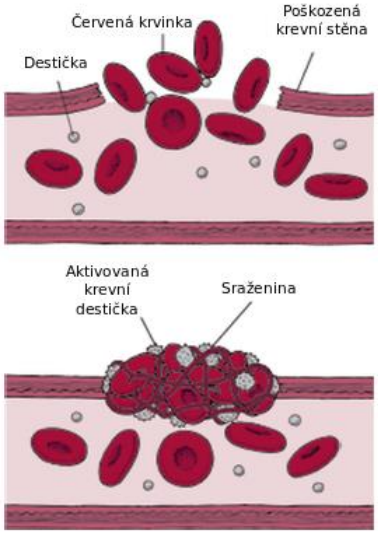
2.2.3 Tří-dimenzionální mikrovaskulární síť

Pro překonání obtíže s opakovatelným samouzdravováním stejného místa u dutých skleněných vláken a mikrokapslí byl navrhnut samoléčebný systém sestávající z trojrozměrné mikrovaskulární sítě, který je schopen samostatně opravit opakované poškození. Tento princip napodobuje strukturu lidské kůže. Jak je vidět na obrázku *Obr. 2.8,* když poranění lidské tkáně spustí krev z vlásečnic v místě poranění, rychle se díky krevním destičkám a červeným krvinkám vytvoří krevní sraženina [17]. Vzniklá sraženina slouží jako matrice[6], pod kterou v průběhu hojení migrují buňky a růstové faktory[7] [11–13].

Výrobní proces zmiňované struktury je velmi obtížný. Při výzkumu se dosáhlo úspěchů tiskem organického prchavého inkoustu do tvaru tří-dimenzionálních

[6] V tomto kontextu je matricí myšlena mechanická ochrana poraněného místa vůči vnějším vlivům, kterými jsou například infekce nebo rozsáhlejší únik krve.

[7] Růstové faktory jsou bílkoviny (proteiny), které řídí buněčné procesy při hojení ran. Přestože jsou v krvi přítomny pouze v malém množství, mají silný vliv na hojení a opravu ran [55, 56].



Obr. 2.8 Srážení krve při poranění (převzato z [12]).

mikrovaskulárních sítí [12]. Tyto sítě jsou následně zality epoxidovou pryskyřicí. Jakmile je vzniklá polymerní matrice vytvrzena, je prchavý inkoust odstraněn. Léčivé činidlo je následně natlačeno do vzniklých mikrovaskulárních sítí [12, 13].

3 APLIKAČNÍ MOŽNOSTI SAMOUZDRAVUJÍCÍCH POLYMERŮ

Samoléčivé polymerní materiály nachází široké uplatnění od oblasti stavebnictví, flexibilních materiálů, elektroniky až po medicínu. Tato kapitola popisuje aplikace samoléčivých materiálů při vývoji pneumatik, laků, tranzistorů, kabelových izolací, vodičů a dotykových displejů se zaměřením na jejich vlastnosti a budoucí perspektivu v průmyslu.

3.1 Aplikace v neelektrotechnickém průmyslu

3.1.1 Samouzdravující pneumatiky

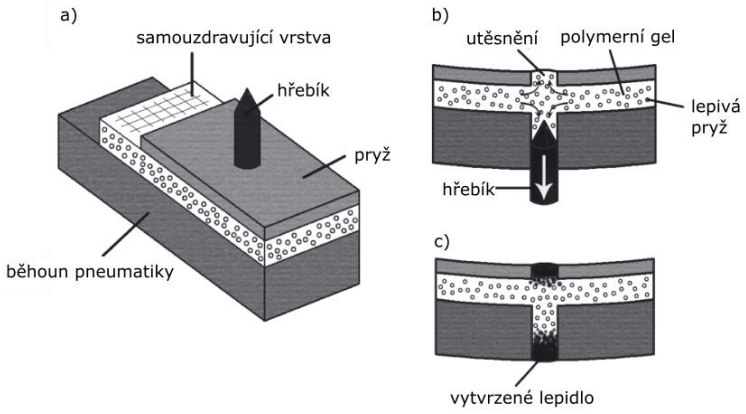
U některých z užitkových vozidel je často vyžadována vyšší průchodnost terénem. Do této skupiny spadají například vozidla provozovaná ve stavebnictví, v dopravě nákladů a osob, ve zdravotnických službách nebo u hasičské techniky [18]. Terén může být v častých případech velmi nepříznivý a zdlouhavá výměna defektu pneumatiky může mít fatální následky. Zvláště, pokud by se jednalo například o záchrannou misi zraněných osob. Hlavními příčinami defektu jsou ostré předměty jako hřebíky, úlomky skla, kamení a další. Samouzdravující pneumatiky mohou být v těchto podmínkách velkým přínosem, jelikož umožňují provozovatelům vozidel pokračovat v jízdě i po propíchnutí pneumatiky.

Jedno z technických řešení samouzdravujících pneumatik spočívá v tom, že je do běhounu uložena přídavná vrstva složená z lepivé látky, která pokrývá vnitřek pneumatiky mezi jednotlivými ramenními bočnicemi. Tato látka automaticky utěsní pneumatiku kolem předmětu, který jí propíchl, a odvrátí tak její vyprázdnění [19]. Jako vhodný materiál pro uzdravující výplň pneumatik se osvědčil lepkavý samoléčivý elastomer. Použití této metody bylo omezeno na bezdušové pneumatiky. Jak už bylo řečeno, samouzdravující elastomerní podšívka přilepená k vnitřnímu povrchu běhounu a boční stěně pláště pneumatiky, má ze své podstaty lepivý povrch. Tato elastomerní podšívka se váže na povrch předmětu, který pronikl pneumatikou. Když je předmět vytažen, lepivý elastomerní materiál se v místě průniku rozlije do vzniklé mezery a tu utěsní. To opět zabrání úniku stlačeného vzduchu z pneumatiky. Společnost Goodyear tuto pneumatiku vyvinula s garancí opakovatelného samouzdravení při proniknutí předmětu do průměru 6 mm [20].

Další strategií používanou v oblasti samouzdravujících pneumatik je nastříkání tenké vrstvy pryžové sloučeniny, skládající se z izoprenového kaučuku a dalších šesti kaučukových látek, do vnitřku pneumatiky. Pokud je pneumatika propíchnuta předmětem

do průměru 6 mm a délky 100 mm, superelastická vrstva pryže obepne vniknutý předmět a zabrání propíchnutí pneumatiky. Po vyjmutí předmětu je pneumatika schopná opětovného provozu včetně schopnosti dalšího několikanásobného samouzdravení. Provozní teploty těchto pneumatik se pohybují od -30 do 110 °C [21].

Neméně úspěšnou aplikací samouzdravujících pneumatik je zabudování těsnící vrstvy do běhounu. Ten se skládá ze dvou pryžových vrstev, ve kterých jsou zabudovány polymerní gelové částice rozdělené do mřížkové struktury [22], jak je znázorněno spolu s celkovou konstrukcí pneumatiky na obrázku *Obr. 3.1*. Použité polymerní částice jsou navíc



Obr. 3.1 Nákres samouzdravitelné pneumatiky na bázi gelového polymeru absorbujícího vodu: a) průřez propíchnuté pneumatiky; (b) odstranění ostrého předmětu vede k okamžitému utěsnění v důsledku expanze polymerního gelu; (c) když je pryžové lepidlo smíchané s polymerním gelem vystaveno vzduchu, je rychle vytvrzeno, což zabraňuje úniku polymerního gelu (převzato z [12]*).*

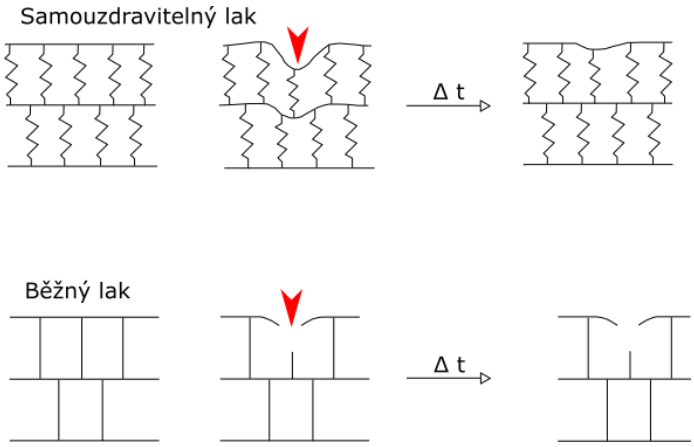
smíchány s pryžovým lepidlem, které při kontaktu se vzduchem velmi rychle ztvrdne a utěsní defekt [22]. Další vlastností je roztažnost směsi při kontaktu s vodou, což ještě více zvyšuje odolnost a spolehlivost pneumatiky.

3.1.2 Samouzdravující ochranné laky

Ochranné laky ve formě tenkého krycího povlaku mohou v různých aplikacích zlepšovat materiálové vlastnosti jako jsou vzhled, přilnavost, smáčivost, antikorozní účinnost nebo odolnost proti opotřebení a poškrábání [23].

Ochranné laky na bázi samouzdravitelných polymerních sloučenin se používají například v automobilovém průmyslu pro ochranu laku automobilů. Slouží zde jako kombinace estetických a funkčních vlastností laku, kdy dokáží zvýraznit barvu a lesklost laku spolu s ochranou proti poškrábání. Příkladem použití takové ochrany je inteligentní čirý lak použitý firmou Nissan [23, 24], který obsahuje vysoce elastickou syntetickou pryskyřici,

jež chrání původní barevný lak automobilu proti poškrábání. S tímto samouzdravujícím lakem se poškozený povrch automobilu vrátí do původního stavu autonomně za dobu definovanou vnějšími podmínkami. Zásadní vliv na dobu léčení má okolní teplota a přímý sluneční žár, kterému je lak vystaven [23]. Přirozeně, čím více budeme vystavovat lak slunečnímu světlu, tím rychleji dojde k uzdravení. Doba uzdravení se může pohybovat v rozmezí několika hodin až dní. Hlubší poškrábání zejména v kombinaci s nižšími teplotami dokáže tento časový interval značně prodloužit. Ve srovnání s konvenčními barvami je míra poškrábání pětkrát nižší [23], což si lze dobře představit při porovnání struktury obou laků na obrázku *Obr. 3.2*. Lak lze aplikovat mimo jiné také na podvozek,



Obr. 3.2 Porovnání struktury běžného a samouzdravitelného laku (převzato z [25]*).*

nárazníky nebo zpětná zrcátka automobilu.

Hlavní složkou čirého ochranného laku je polyurethanakrylát (PUA), který je kombinován s konvenčním akrylátovým čirým lakem. Další složkou laku jsou zabudované mikrobubliny, které se pod žárem slunce a vlivem venkovních teplot rozpínají a tím vyhlazují povrch laku. Nakonec se malé škrábance stanou pouhým okem neviditelné [25–27]. Tyto kroky dokážou zamezit poškrábání jemnějšími předměty, na který trpí konvenční laky. Při poškrábání dojde na povrchu pouze k plastické deformaci. K samouzdravení nemůže dojít v případě, pokud jsou škrábance příliš široké a hluboké, čímž by došlo k přerušení vazeb v čirém laku nebo pokud by byl čirý lak odloupnut [25].

3.2 Aplikace v elektrotechnickém průmyslu

Zvýšená spolehlivost a dlouhá životnost samoléčebných materiálů motivovala výzkumné pracovníky k tomu, aby navrhli specifické samoléčivé materiály vhodné pro využití v elektrotechnickém průmyslu. V této části budou diskutovány specifické samoléčivé materiály pro tranzistory, kabelové izolace, vodiče a dotykové displeje.

3.2.1 Samouzdravující a flexibilní tranzistory

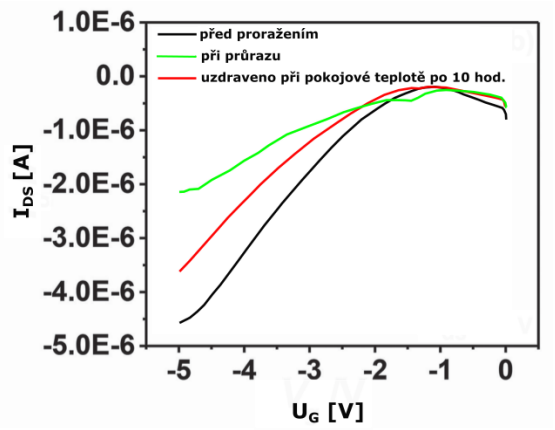
Jednou z uvedených aplikací samouzdravujících polymerních materiálů je jejich použití v elektronických zařízeních, konkrétně v tranzistorech. Tranzistor řízený elektrickým polem (FET) se stal nedílnou součástí drtivé většiny moderních zařízení. Se vznikem flexibilní a nositelné elektroniky byly provedeny studie zaměřené na návrh organických (OFET) tranzistorů[8]. Tato podkapitola popisuje studie zaměřené na zkoumání jejich samoléčebných vlastností při elektrických a mechanických poruchách [28].

Prvním příkladem je výzkum dielektrického samouzdravitelného materiálu použitého jako náhrada vrstvy oxidu křemičitého izolující hradlo FET tranzistoru. Organická polymerní sloučenina zvaná fosfolipid během výzkumu vykazovala nejlepší chování z pohledu stability elektrických vlastností a samouzdravitelné schopnosti [29]. Při testování fosfolipidu průrazným napětím bylo zjištěno, že průběh průrazu materiálu se liší oproti běžně používaným polymerním izolantům, u kterých dojde k proražení materiálu při definované intenzitě elektrického pole. Zde lze průběh poškození dielektrického materiálu popsat jako postupný proces vyžadující čas charakterizovaný mírou akumulovaného poškození. Průraz dielektrika je zapříčiněn následky vícestádiového procesu, který vede k postupnému lámání makromolekul na volné radikály [29, 30]. To má za následek snížení mezimolekulárních vazeb a hustota těchto vazeb má přímý vliv na elektrickou pevnost polymerního dielektrika. Jednoduše řečeno, čím déle bude dielektrikum umístěno v silném elektrickém poli, tím bude menší hodnota průrazného napětí. Po proražení polymeru elektrickým polem byl vzorek vystaven pokojové teplotě a proběhlo zkoumání samouzdravujících vlastností. Už po jedné hodině došlo k autonomnímu obnovení rezistivity vzorku na hodnotu začínající na 300 MΩ [29], což indikuje, že vzorek nebyl nenávratně proražen a dokáže se uzdravit bez jakéhokoliv vnějšího zásahu. Vzorek byl následně proražen šestkrát během jedné hodiny. Po tomto zátěžovém testu se doba samouzdravení prodloužila až na několik hodin, což poukazuje na

[8] Organické tranzistory řízené elektrickým polem (OFET) jsou základním stavebním kamenem pro ohebnou elektroniku a displeje [57]. Hlavní potenciál OFET tranzistorů spočívá v inovativní technologii tisku součástky na ohebnou podložku a možnost realizace výrobků s vysokou hustotou součástek za nízké náklady. Oproti klasickým tranzistorům s křemíkovými nebo germaniovými polovodiči se liší v tom, že ve svém kanálu používají organickou sloučeninu s polovodičovými vlastnostmi, která je do určité míry flexibilní [58].

stárnutí polymeru vlivem průrazů. Zajímavým poznatkem je to, že ohřívání vzorku stálou teplotou 36 °C po dobu 30 minut [31] (po 10. průrazu) vedlo k obnovení počáteční doby hojení při pokojové teplotě, jako by byl polymer znovu inicializován. Tato vlastnost je pozoruhodná a velmi zajímavá pro aplikaci v citlivých elektronických zařízeních [29, 31].

Se zvyšujícími se nároky na kvalitu použitého materiálu byl vyvinut materiál polyhydroxyprophylmethakrylát (PHPMA) [32, 33]. Jedná se o derivát polymethylmethakrylátu (PMMA) známého například z plexiskel. Zavedením hydroxylu do polymerního materiálu bylo dosaženo zvýšení interakcí mezi polymerními řetězci prostřednictvím četných dynamických vodíkových vazeb. Počet vodíkových vazeb byl však stále nedostačující pro dosažení samouzdravujícího efektu [32]. Navíc se teplota skelného přechodu pohybovala nad 100 °C, což není vhodné pro samouzdravování v okolním prostředí. Řešením bylo přidání flexibilnější polymerní sloučeniny polyetherimidu (PEI) [33], která se do PHPMA velmi dobře začlenila za vzniku amorfního materiálu PHPMA/PEI s teplotou skelného přechodu nepřesahující 40 °C. Vzniklá sloučenina je rozpustná v etanolu a již disponovala samouzdravujícími vlastnostmi. Po zabudování dielektrika do OFET tranzistoru bylo provedeno měření volt-ampérové charakteristiky tranzistoru v celém cyklu samouzdravujícího procesu. Z grafu na obrázku *Obr. 3.3* lze vyvodit, že před průrazem je



Obr. 3.3 Volt-ampérová charakteristika samouzdravujícího OFET tranzistoru (převzato z [33]*).*

proud kanálem (I_{DS}) při -5 V asi -4,6 µA. Při průrazu klesl proud I_{DS} na -2,2 µA v důsledku poškození dielektrika, které způsobilo nižší vodivost kanálu. Po autonomním léčení při pokojové teplotě po dobu 10 hodin byla vodivost kanálu částečně obnovena [33, 34]. V grafu je vidět, že proud tranzistoru I_{DS} se zvýšil na -3,6 µA neboli na 66 % své původní hodnoty. Důvodem snížení proudu I_{DS} při průrazu dielektrika je pokles vodivosti kanálu. Ten je způsoben nižší koncentrací nosičů náboje v blízkosti hradla tranzistoru vlivem poškozeného dielektrika. Lze také pozorovat mírnou změnu prahového napětí [33].

3.2.2 Samouzdravující kabelové izolace a ochrany

Jedním z důvodů poruch u elektrických izolačních materiálů a tím výraznému zkrácení jejich životnosti je elektrické stromečkování. Vzhledem k tomu, že poškození uvnitř izolačních materiálů je obtížné odhalit a zejména opravit, je schopnost samoléčení jako přímá reakce na elektrickou degradaci velmi lákavou, zejména v náročných podmínkách [35, 36].

Elektrické stromečky jsou duté trubičky nebo kanálky, které se postupem času vyvíjejí v polymerní matrici. Ke vzniku elektrického stromečkování dochází v místech s vysokou intenzitou elektrického pole. Nejčastějšími příčinami výskytu elektrického stromečkování jsou nečistoty v izolaci, různé výčnělky nebo dutiny. Izolační materiál musí být proto čistý, aby se zabránilo (nebo alespoň omezilo) vzniku elektrického stromečkování. Faktem ale je, že provedení izolace nikdy nebude dokonalé a dlouhotrvající působení elektrického pole způsobí určitou degradaci materiálu [35, 36]. Typickým tvarem takového stromečku je soustava kanálků, které se rozvětvují do vzájemně propojené struktury. Tato struktura se podobá stromu nebo keři v závislosti na vlnové délce, frekvenci a napětí signálu působícího na izolant. Lokální částečné výboje způsobí chemickou degradaci a rozpad polymerní izolace, což dále prodlužuje stromečkové kanálky, dokud nedojde ke konečnému elektrickému rozpadu. Tyto jevy elektrické degradace mají mnoho podobností s mechanickým praskáním materiálu [35].

Možným řešením degradace polymerních izolantů je zaimplementování mikrokapslí do polymerní sloučeniny [37]. Když u takového materiálu začne docházet k degradaci, některá ze vzniklých větví velmi pravděpodobně rozbije mikrokapsli, čímž se elektrický stromeček naplní monomerní léčivou látkou. Ta při kontaktu s katalyzátory spustí proces polymerizace a dutiny se utěsní. Protože je struktura stromečků propojena, bude pravděpodobně vyplněna většina stromečkové struktury. Z jaké části bude stromeček vyplněn, závisí na tlaku v mikrokapslích, viskozitě léčebného činidla, počtu léčení nebo dostupnosti činidla ve vztahu k rozměrům dutých trubek [35, 37]. Mikrokapsle navíc pravděpodobně ovlivní elektrické pole, protože elektrické vlastnosti kapsle se liší od zbytku matrice, což ovlivní šíření elektrických stromů v blízkosti mikrokapslí. Při praktické realizaci se jako vhodný materiál pro mikrokapsle jevila močovinoformaldehydová pryskyřice (UF) plněná dicyklopentadienem (DCPD). Po otestování vzorku izolantu vysokonapěťovým střídavým signálem byl proveden průzkum jeho struktury pro analýzu a ověření samoléčivých vlastností. Převládajícím trendem v celém vzorku bylo to, že

elektrické stromečky byly přitahovány mikrokapslemi. To vyvrátilo počáteční obavy, že by se jednotlivé větve mohly mikrokapslím vyhýbat a použitý materiál je tak vhodný pro uplatnění v oblasti kabelových izolací [35].

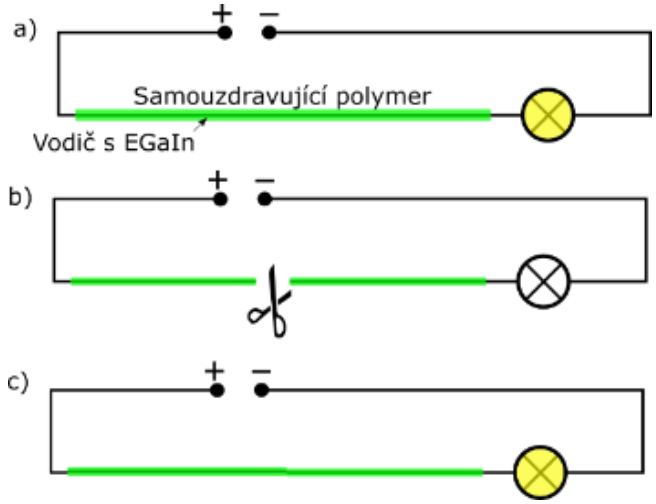
Inovativním řešením problematiky samouzdravujících kabelových izolací je zakomponování superparamagnetických[9] nanočástic do termoplastického polymeru. Zakomponované nanočástice tvořené oxidy železa vlivem oscilujícího magnetického pole migrují směrem k místům poškozeným elektrickým stromečkováním, kde způsobují lokální zvýšení teploty termoplastického polymeru [38, 39]. Díky lokálnímu stavu tání je materiál schopný se autonomně a opakovatelně uzdravit. Při testování byl jako vzorek izolačního materiálu použit polypropylen. Důležitým aspektem bylo zajistit, aby výsledná sloučenina neobsahovala více než 0,1 % nanočástic z důvodu zachování požadovaných izolačních vlastností [38]. Testovací vzorek byl poté vystaven elektromagnetickému poli o frekvenci 968 kHz po dobu 40 minut. Následně byla pořízena fotografie kvalitním infračerveným fotoaparátem pro prozkoumání rozložení teploty v izolantu. Teplota izolantu se z velké části pohybovala na 123 °C. Nebylo však možné zjistit teplotu v nejbližších místech poškození. Byly proto provedeny matematické simulace metodou konečných prvků. Výsledky simulace naznačují, že lokální teplota kolem míst poškozených elektrickým stromečkováním dosahuje 142 °C, což je o 19 °C vyšší než teplota polymeru dále od poškozených oblastí. Použitá sloučenina polypropylenu vykazovala bod tání 132 °C, tudíž tato teplota umožnila dosáhnout lokálního stavu tání v polymerním materiálu a následně autonomně uzdravit elektrické poškození [38].

[9] Superparamagnetismus je způsob magnetického chování spojeného s magnetickými nanočásticemi obvykle složenými z feromagnetických nebo ferrimagnetických materiálů. V dostatečně malých nanočásticích se může náhodně převrátit směr částice vlivem změny teploty. Typický čas mezi dvěma převráceními se nazývá Neelův relaxační čas. Při nepřítomnosti vnějšího magnetického pole a zároveň, když je doba použitá k měření magnetizace nanočástic mnohem delší než Neelův relaxační čas, je průměrná hodnota magnetizace nanočástic nulová. Tento stav nazýváme superparamagnetismus. V tomto stavu je vnější magnetické pole schopné magnetizovat nanočástice, podobně jako paramagnety. Ovšem oproti běžným paramagnetikům nabývá výsledná magnetizace daleko vyšších hodnot [59, 60].

3.2.3 Flexibilní a samouzdravující vodiče

Tato kapitola se oproti předchozí zaměřuje na vodivou část kabelu. Flexibilní a samouzdravující vodiče nabízejí nový pohled na různorodá flexibilní elektrotechnická zařízení. Experimentální výsledky ukazují, že navrhovaná technologie má potenciál v oblastech nositelné elektroniky, nástěnných displejů, elektronických papírů a jiné flexibilní elektroniky. Dále tyto vodiče nabízejí nové možnosti při přepojování elektrických obvodů. Veškeré přepojování je totiž možné provést pouze za pomoci obyčejných nůžek a následným opětovným spojením vodičů k sobě [40, 41].

Samotný vzorek vodiče se skládá ze samouzdravujícího polymeru, ve kterém jsou zakomponovány mikrokanálky naplněné tekutým kovem [40, 42]. Požadované vlastnosti zmíněné sloučeniny tekutého kovu jsou vysoká elektrická vodivost, nízká teplota tání a dostatečná viskozita pro možnost naplnění mikrokanálků. Vhodným materiálem pro tuto aplikaci je eutetická[10] sloučenina gallia a india (EGaIn) [40, 43]. Obrázek *Obr.3.4*



Obr. 3.4 Schéma znázorňující odpojení a opětovné připojení jednoduchého elektrického obvodu pomocí samouzdravujícího vodiče (převzato z [40]*).*

demonstruje na jednoduché ilustraci samouzdravující proces vodiče zapojeného v sérii

[10] Eutetická směs je sloučenina dvou nebo více látek, která je charakteristická svou teplotou zkapalnění, jež může být nižší než teploty zkapalnění jednotlivých složek sloučeniny. Výsledná sloučenina je mísitelná pouze v kapalném skupenství obou látek. Dále zavádíme teplotu zvanou Eutetická teplota, která definuje nejnižší teplotu, při které je sloučenina v kapalném skupenství [61–63].

s žárovkou a zdrojem. Při zapojení vodiče do obvodu se neděje nic nepředvídatelného a obvod přirozeně plní svou funkci. Při přestříhnutí samouzdravujícího vodiče obvodem přestane téct proud a žárovka zhasne. Důležitou vlastností je, že tekutý kov vystavený vzduchu rychle oxiduje. Oxidací se v místě přerušení vytvoří tenká vrstva oxidu gallia, která brání úniku kapalného kovu. Vrstva oxidu gallia je navíc velmi adhezivní, což napomáhá při opětovném spojování vodičů [40, 41, 43]. Přestřižený samouzdravující polymer založený na supramolekulárních vodíkových vazbách je schopný se při běžných okolních podmínkách autonomně uzdravit za dobu několika minut. K úspěšnému procesu samouzdravení je zapotřebí splnit podmínku opětovného spojení rozpojeného vodiče v řádu desítek minut od rozpojení. Zejména při ručním spojování je potřeba klást velký důraz na přesnost vzájemného zarovnání obou kusů vodiče. Nepřesné zarovnání má zásadní vliv na snížení vodivosti vodiče. Jakmile jsou přestřižené vodiče vzájemně vyrovnány, tekutý kov se sloučí dohromady a opět vytvoří souvislý a vodivý kus vodiče. Odpor vodiče se před testem samouzdravujících vlastností pohyboval v rozmezí jednotek miliohmů, což odpovídá předpokladům založených na známé vodivosti EGaIn a použitém průřezu vodičů [40, 41]. Po úspěšném samouzdravení byl opět změřen elektrický odpor vodičů, který vyšel v průměru o 3 % vyšší než původní ohmické hodnoty vodičů. Mírné zvýšení odporu je pravděpodobně způsobeno nedokonalým zarovnáním rozhraní během opětovného spojování nebo úniku malého množství tekutého kovu během přestřižení vodiče. Během testování mechanických vlastností v tahu byl nepoškozený samouzdravující vodič schopný protažení o 150 % oproti své původní délce. Procentuální velikost protažení ϕ definuje vztah (3.1), kde l je délka vodiče při natažení a l_0 je délka nenataženého vodiče [40].

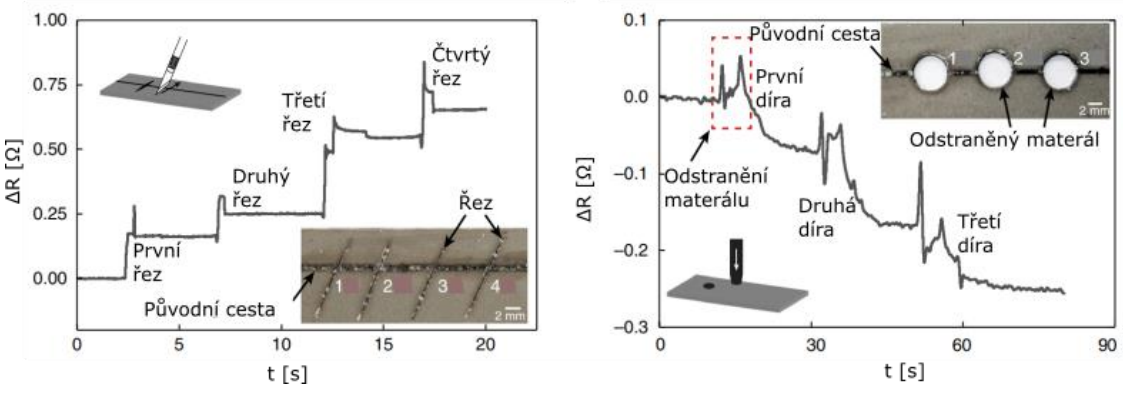
$$\phi = \left(\frac{l}{l_0} - 1\right) \cdot 100\ [\%] \tag{3.1}$$

Opravený vodič měl z pohledu flexibility téměř identické mechanické vlastnosti jako původní neporušený vodič. Pouze v tahovém testu selhal při nižším napětí (při protažení o 60 %). Přetržení nastalo v místě řezu, jak se logicky očekávalo. Vodič během mechanického namáhání vykazoval stabilní elektrické vlastnosti, pouze při napínání se vlivem snižujícího průřezu a větší délky vodiče snižovala jeho vodivost [40, 41, 43].

Dalším možným řešením flexibilních a samouzdravujících vodičů jsou kapalné kapičky kovu zakomponované ve flexibilním elastomeru. Výše zmíněná sloučenina EGaIn je zde opět použita jako vodivý materiál díky svým elektrickým vlastnostem a nízké toxicitě.

Eutetická sloučenina gallia a india je smíchána v hmotnostním poměru 75 % Ga a 25 % In [44]. Poté je vodivá kapalina rozptýlena do silikonového elastomeru, kde vzniknou mikrokapičky řádově o velkosti desítek μm. V počátečním stavu je výsledný kompozit elektricky nevodivý, protože mikrokapičky jsou od sebe vzájemně oddělené. Navíc jsou pokryty tenkou vrstvičkou oxidu gallia.

Vodivé cesty jsou vytvářeny lokálním působením tlaku na elastomer, ve kterém dojde k praskání kapiček kapalného kovu. K vytvoření vodivých cestiček se používá XY plotter, který umožňuje realizaci složitých vzorů vytvořených v PC [44–46]. V dosavadních experimentech byla používána třetí konstrukční třída DPS, aby se spolehlivě zabránilo neúmyslnému zkratu mezi jednotlivými vodivými cestičkami. Materiál byl poté podroben sérii testů. Zatěžovací zkouška opakovaného napínání kompozitu v počtu 1 milionu cyklů v rozmezí 0 a 40 % protažení ukázala, že až do mechanického selhání materiálu nedochází k výrazným změnám elektrické vodivosti. Při zjišťování vlastností odporu vodivých cest v závislosti na natažení bylo zjištěno, že ve fázi prvního cyklu protažení došlo k malému navýšení elektrického odporu. Při vrácení na běžnou délku však odpor klesl pod svou původní hodnotu. U vzorků dále došlo k mírnému snížení odporu při maximálním napnutí. Toto chování lze přisoudit mikrokapslím tekutého kovu v nejbližším okolí vodivých cest, které při napnutí vtlačí do vodivých cest další kapalinu a tím se zvýší elektrická vodivost [44, 45]. Tato vlastnost může být velmi výhodná v různých aplikacích, kde by mohlo snížení elektrické vodivosti flexibilních vodičů při jejich natažení způsobovat různé anomálie. Jak je znázorněno na obrázku *Obr. 3.5*, kompozitní materiál může být vážně poškozen, ale i přes



Obr. 3.5 Testování vlivu poškození samouzdravujících vodičů (převzato z [44]*).*

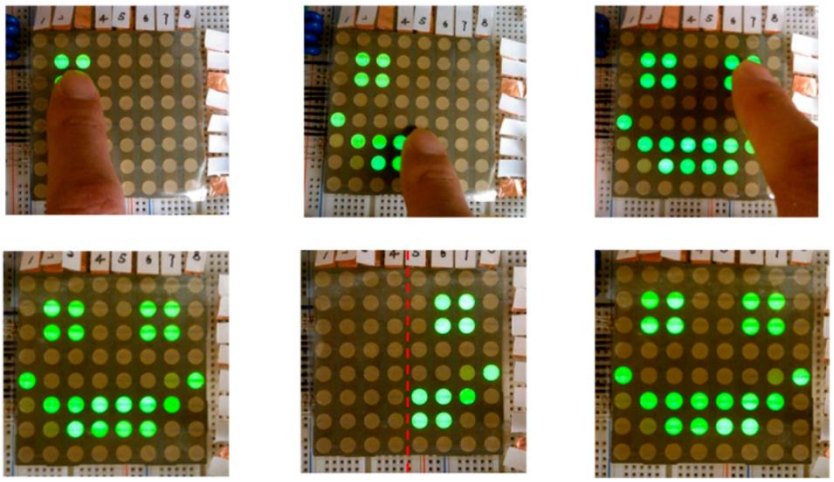
to si dokáže zachovat svou elektrickou vodivost. Samouzdravující vlastnosti materiálu byly zkoumány experimenty: přeříznutím vodivé cesty žiletkou a přerušením vodivé cesty průbojníkem. Nejprve byly zkoumány řezy žiletkou, kde bylo pozorováno minimální

zvýšení elektrického odporu (<1Ω). Mimo to, materiál byl schopný během i po zásahu vykazovat vodivé vlastnosti. Když byl kompozit proražen průbojníkem, mikrokapičky kapalného kovu v místech poškození popraskaly. Vystavením EGaIn vnějším podmínkám vznikla na jeho povrchu vrstva oxidu, která bránila úniku kapaliny. Tím se vytvořila nová vodivá cesta v rovině způsobeného poškození [44]. Je pozoruhodné, že při vytvoření děr v materiálu bylo pozorováno snížení celkového elektrického odporu vodiče. Tato odezva je způsobena elektrickou rekonfigurací poškozeného obvodu. Vzniklou díru si můžeme zjednodušeně představit jako paralelní kombinaci dvou stejných rezistorů. Tudíž výsledný elektrický odpor bude dán polovinou původního. Tuto vlastnost lze brát v úvahu pouze v případě, kdy bude poloměr vzniklého otvoru dostatečně nízký, aby vzniklý nárůst délky vodiče nedokázal vykompenzovat snížení elektrického odporu. Další podmínkou snížení celkového elektrického odporu vodiče je umístění otvoru v ose vodiče. Pro zajištění ochrany před poškozením vnějšími vlivy je možno zapouzdřit kompozit do elastomerní těsnící vrstvy [44, 46].

3.2.4 Samouzdravující kapacitní dotykové displeje

Přenosná elektronika jako mobilní telefony, tablety nebo notebooky se staly v našich zaměstnáních a domácnostech všudypřítomnou součástí života [47, 48]. Kapacitní dotykové displeje jsou v těchto zařízeních široce používány díky své vysoké citlivosti, přesnosti a nízké poruchovosti. Kapacitní dotykové snímače v displeji využívají vodivosti lidského těla nebo speciálního zařízení pro ovládání dotykového displeje. Přiložením prstu k displeji se změní kapacita daného místa a změnou této kapacity řídící obvody vyhodnotí místo doteku [49, 50]. Nejběžnější postup používaný k vytvoření dotykových senzorů je nanesení povlaku oxidu cínu a india na sklo. Sklo je ovšem velmi křehké a náchylné k poškrábání.

Pro nahrazení běžně používaných dotykových displejů byl vyvinut vysoce průhledný kompozit tvořený perkolačními nanosítěmi ze stříbra (AgNW) [51] a polymerním substrátem. Nanosítě jsou naneseny a uspořádány na povrch polymerního substrátu tak, aby tvořily síť dvojic elektrod (kondenzátorů) pro snímání dotyku displeje. Výsledný kompozit je tvořený samouzdravujícím polymerním substrátem založeným na DA reakcích, AgNW a ultratenkou vrstvou čirého samouzdravitelného filmu [47, 48, 51]. Pro demonstraci samouzdravujících vlastností byl materiál zakomponován do jednoduchého dotykového LED displeje zobrazeného na obrázku *Obr. 3.6*. Poté byl displej poškozen na místě zobrazeném červenou čárkovanou čarou. Hojení poškozených elektrod kondenzátorů je



Obr. 3.6 Realizace samouzdravujícího dotykového displeje (převzato z [47]*).*

nutné provádět při zvýšené teplotě 80 °C po dobu 30 sekund [47]. Lze ho provést například obyčejným fénem na vlasy. Tato teplota je zvolena jako kompromis mezi dostatečnou teplotou pro dosažení DA reakce a maximální snesitelnou teplotou citlivých elektronických součástek. Při zahřátí sníží polymerní substrát svoji viskozitu, díky které se horní oddělené vrstvy vlivem zkapalnění spodní vrstvy dokážou spojit dohromady. Ultratenká vrstva samouzdravitelného filmu dokáže při léčení opětovně spojit jednotlivé poškozené elektrody k sobě díky tomu, že je k AgNW velmi adhezivní. K poškození displeje může dojít až čtyřikrát. Poté se vlivem nedokonalého spojení elektrod kondenzátoru velmi zvyšuje jejich odpor, což může způsobit chybnou detekci dotyku displeje [47, 48].

Závěr

V této bakalářské práci byly nejprve popsány teoretické odborné výrazy týkající se otázky úvodu do samouzdravujících polymerních materiálů. Byly zde zjištěny základní poznatky týkající se samouzdravujících materiálů, charakteristik polymerů a chemických procesů při výrobě polymerů.

U strategií používaných k dosažení samouzdravujícího efektu obecně nelze říci, která je nejefektivnější, protože záleží na konkrétní aplikaci v praxi. Všechny metody mají své klady a zápory. U polymerů s vnitřním samouzdravováním je hlavní výhodou možnost úplného nebo částečného opravení počátečních vlastností konkrétního materiálu vícekrát. Nevýhodou je naopak v některých případech nutnost zavedení vnějšího podnětu (teplo, světlo, UV záření) pro spuštění samouzdravujícího procesu. Nevýhodu nutnosti manuálního zásahu pro spuštění samouzdravujícího procesu řeší polymery s vnějším samouzdravováním. Zde je proces léčení spuštěn samotným poškozením materiálu. Mezi nevýhody lze ovšem zařadit omezený počet uzdravovacích cyklů závislý na množství léčivého činidla uloženého v nosných médiích a složitější výrobní proces.

Při průzkumu aplikačních možností v elektrotechnice bylo cílem zjistit několik možných aplikací samouzdravujících polymerů, které by mohly mít v budoucnu využití v průmyslu. Samouzdravující izolační materiály izolující hradlo FET tranzistorů lze zařadit mezi ty, které aplikační potenciál určitě mají. Aktuálně hlavním nedostatkem těchto izolačních materiálů je různý izolační odpor po několikanásobném hojení, který má velký vliv na vlastnosti tranzistoru (V-A charakteristika). Další slibnou aplikací jsou kabelové termoplastické izolanty se zakomponovanými superparamagnetickými nanočásticemi léčící elektrické stromečkování. Tyto izolanty nabízí skoro neomezené množství autonomních samouzdravujících cyklů. Jejich hlavní omezení ovšem spočívá v samotném principu samouzdravování, které je předem vylučuje z aplikací v podmínkách se zvýšenými teplotami. Možným řešením by mohlo být použití další vrstvy vysokoteplotní izolace, která by kabel před vysokými teplotami chránila. Technologie flexibilních a samouzdravujících vodičů mají potenciál v oblastech nositelné a flexibilní elektroniky. Jejich nespornou výhodou je možnost uzdravení pouhým mechanickým spojením. Problémem ale je, že vodič po rozpojení již nevykazuje původní mechanické vlastnosti, tudíž je nutné brát v ohledu jeho mechanické vlastnosti až po rozpojení a následném spojení. Proto je tato aplikace opět závislá na konkrétních podmínkách použití. Samouzdravující kapacitní dotykové displeje

jsou zajímavou vyhlídkou do budoucna, ale nutnost zahřátí displeje na poměrně vysokou teplotu pro spuštění samouzdravujícího procesu zatím znemožňuje jej aplikovat ve větší míře do mobilních zařízení.

Problematika samouzdravujících polymerů je velmi rozsáhlá a jako další oblasti navazující na tuto bakalářskou práci lze zmínit například oblast samouzdravujících vodivých inkoustů, senzorů nebo elektrických pojistek. Nabízí se také optimalizace aplikačních možností zmíněných v této práci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] *Monomer Definition and Examples (Chemistry)* [online]. [cit. 2019-09-07]. Dostupné z: https://www.thoughtco.com/definition-of-monomer-605375

[2] *What are the monomers and polymers of protein? | Socratic* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://socratic.org/questions/what-are-the-monomers-and-polymers-of-protein

[3] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. B.m.: VŠCHT Praha (2. vydání, 2007). ISBN 978-80-7080-662-3.

[4] *polymer | Description, Examples, & Types | Britannica* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/polymer

[5] *What Is a Polymer? | Live Science* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.livescience.com/60682-polymers.html

[6] *Polymerace* [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://xantina.hyperlink.cz/organika/polymerace.html

[7] *Polymerization | chemical reaction | Britannica* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/polymerization

[8] *TYPES OF POLYMERIZATION - YouTube* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=fMGHlLcTjOw

[9] *POLYMERY II MECHANISMY VZNIKU - Výrobní postupy* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/2_ POLYMERY - MECHANISMY VZNIKU - VÝROBNÍ POSTUPY.pdf

[10] *Condensation Polymers (examples, answers, activities, experiment, videos)* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.onlinemathlearning.com/polymers-condensation.html

[11] BINDER, Wolfgang H. *Self-Healing Polymers*. B.m.: 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim. ISBN 978-3-527-33439-1.

[12] MING, QIU ZHANG, MIN, Zhi Rong. *Self-Healing Polymers and Polymer*

Composites [online]. 2012. ISBN 9783527326242. Dostupné z: doi:10.1002/9783527645213

[13] GHOSH, Swapan Kumar. *Self-healing Materials - Fundamentals, Design Strategies, and Applications*. B.m.: 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, 1392. ISBN 9783527318292.

[14] DÖHLER, Diana, Philipp MICHAEL a Wolfgang BINDER. *Principles of Self-Healing Polymers *)*. 2013.

[15] GARCIA, Santiago J. *Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers* [online]. 2014. ISSN 00143057. Dostupné z: doi:10.1016/j.eurpolymj.2014.01.026

[16] HERBST, Florian, Diana DÖHLER, Philipp MICHAEL a Wolfgang H. BINDER. Self-healing polymers via supramolecular forces. *Macromolecular Rapid Communications* [online]. 2013, **34**(3), 203–220. ISSN 10221336. Dostupné z: doi:10.1002/marc.201200675

[17] CREMALDI, Joseph C. a Bharat BHUSHAN. Bioinspired self-healing materials: Lessons from nature. *Beilstein Journal of Nanotechnology* [online]. 2018, **9**(1), 907–935. ISSN 21904286. Dostupné z: doi:10.3762/bjnano.9.85

[18] *The Latest Developments in Self-Sealing Tires - Utility Fleet Professional* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: https://utilityfleetprofessional.com/departments/technology/the-latest-developments-in-self-sealing-tires

[19] *US5099900A - Self-healing tire system having an inner tube and a puncture sealant layer - Google Patents* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/US5099900A/en

[20] *DuraSeal Technology Repair - YouTube* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=UgMWV9OjR4c

[21] *Finixx Self Sealing Tyre - It never goes Flat - Finixx tyre* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: http://finixx.com/self-sealing-tyre/

[22] NAGAYA, Kosuke, Sigeo IKAI, Manabu CHIBA a Xujing CHAO. *Tire with Self-Repairing Mechanism* *. Dostupné z: doi:10.1299/jsmec.49.379 .

[23] *Scratch Shield | NISSAN | TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT ACTIVITIES* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/scratch.html

[24] *Self-healing car paint uses sunlight to repair scrapes* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://newatlas.com/self-healing-car-paint/11254/

[25] *Scratching And Healing My Own Car - How Protective Films Work - YouTube* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ND4vE9vmQWE

[26] *A drive through paint design: self-healing paint | CarsGuide - OverSteer* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://www.carsguide.com.au/oversteer/a-drive-through-paint-design-self-healing-paint-66989

[27] *How This Magical Self-Healing Film Protects Cars From Scratches* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://www.roadandtrack.com/car-culture/buying-maintenance/a12184664/how-this-magical-self-healing-film-protects-cars-from-scratches/

[28] LATIF, S, S AMIN, S HAROON a M SAJJAD. Self-healing materials for electronic applications: An overview. Dostupné z: doi:10.1088/2053-1591

[29] DUMAS, Carine, Herve DALLAPORTA, Racha EL ZEIN a Anne CHARRIER. Autonomic Self-Healing Lipid Monolayer: A New Class of Ultrathin Dielectric [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: https://doi.org/10.1021/la202333n

[30] ZAKREVSKIĬ, V. A. a N. T. SUDAR'. Electrical breakdown of thin polymer films. *Physics of the Solid State* [online]. 2005, **47**(5), 961–967 [cit. 2020-02-24]. ISSN 10637834. Dostupné z: doi:10.1134/1.1924862

[31] KO, Jieun, Young Jae KIM a Youn Sang KIM. Self-Healing Polymer Dielectric for a High Capacitance Gate Insulator. *ACS Applied Materials and Interfaces* [online]. 2016, **8**(36), 23854–23861 [cit. 2020-02-24]. ISSN 19448252. Dostupné

z: doi:10.1021/acsami.6b08220

[32] JIANG, Yingying, Yunlong GUO a Yunqi LIU. *Engineering of Amorphous Polymeric Insulators for Organic Field-Effect Transistors* [online]. B.m.: Blackwell Publishing Ltd. 1. listopad 2017 [cit. 2020-03-04]. ISSN 2199160X. Dostupné z: doi:10.1002/aelm.201700157

[33] HUANG, Weiguo, Kalpana BESAR, Yong ZHANG, Shyuan YANG, Gregory WIEDMAN, Yu LIU, Wenmin GUO, Jian SONG, Kevin HEMKER, Kalina HRISTOVA, Ionnis J. KYMISSIS a Howard E. KATZ. A high-capacitance salt-free dielectric for self-healable, printable, and flexible organic field effect transistors and chemical sensor. *Advanced Functional Materials* [online]. 2015, **25**(24), 3745–3755 [cit. 2020-03-04]. ISSN 16163028. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201404228

[34] HUYNH, Tan Phat, Prashant SONAR a Hossam HAICK. Advanced Materials for Use in Soft Self-Healing Devices. *Advanced Materials* [online]. 2017, **29**(19), 1604973 [cit. 2020-03-05]. ISSN 15214095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201604973

[35] LESAINT, Cédric, Vetle RISINGGÅRD, Jorunn HØLTO, Hans H. AÆTERNES, Øystein HESTAD, Sverre HVIDSTEN a Wilhelm R. GLOMM. Self-healing high voltage electrical insulation materials. In: *EIC 2014 - Proceedings of the 32nd Electrical Insulation Conference* [online]. B.m.: IEEE Computer Society, 2014, s. 241–244 [cit. 2020-03-06]. ISBN 9781479927876. Dostupné z: doi:10.1109/EIC.2014.6869384

[36] SCHURCH, Roger, Simon M. ROWLAND a Philip J. WITHERS. Techniques for electrical tree imaging. In: *IST 2012 - 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Proceedings* [online]. B.m.: IEEE, 2012, s. 409–414 [cit. 2020-03-06]. ISBN 9781457717741. Dostupné z: doi:10.1109/IST.2012.6295555

[37] WHITE, S. R., N. R. SOTTOS, P. H. GEUBELLE, J. S. MOORE, M. R. KESSLER, S. R. SRIRAM, E. N. BROWN a S. VISWANATHAN. *Autonomic healing of polymer composites* [online]. 15. únor 2001 [cit. 2020-03-06]. ISSN 00280836. Dostupné z: doi:10.1038/35057232

[38] YANG, Yang, Jinliang HE, Qi LI, Lei GAO, Jun HU, Rong ZENG, Jian QIN, Shan X. WANG a Qing WANG. *Self-healing of electrical damage in polymers using superparamagnetic nanoparticles* [online]. B.m.: Nature Publishing Group. 1. únor 2019 [cit. 2020-03-09]. ISSN 17483395. Dostupné z: doi:10.1038/s41565-018-0327-4

[39] CORTEN, Cathrin C., Marek W. URBAN a F. SHELBY. Repairing polymers using an oscillating magnetic field. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(48), 5011–5015 [cit. 2020-03-09]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200901940

[40] PALLEAU, Etienne, Stephen REECE, Sharvil C. DESAI, Michael E. SMITH a Michael D. DICKEY. Self-healing stretchable wires for reconfigurable circuit wiring and 3D microfluidics. *Advanced Materials* [online]. 2013, **25**(11), 1589–1592 [cit. 2020-04-03]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201203921

[41] WANG, Jinqi, Shuchang LIU a Ajay NAHATA. Reconfigurable plasmonic devices using liquid metals. *Optics Express* [online]. 2012, **20**(11), 12119. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/oe.20.012119

[42] KASIRGA, T Serkan, Y Nuri ERTAS a Mehmet BAYINDIR. Microfluidics for reconfigurable electromagnetic metamaterials. *Citation: Appl. Phys. Lett*. 2009, **95**, 214102. Dostupné z: doi:10.1063/1.3268448

[43] JEONG, Jinwon, Jeong Bong LEE, Sang Kug CHUNG a Daeyoung KIM. Electromagnetic three dimensional liquid metal manipulation. *Lab on a Chip*. 2019, **19**(19), 3261–3267. ISSN 14730189. Dostupné z: doi:10.1039/c9lc00503j

[44] MARKVICKA, Eric J., Michael D. BARTLETT, Xiaonan HUANG a Carmel MAJIDI. An autonomously electrically self-healing liquid metal-elastomer composite for robust soft-matter robotics and electronics. *Nature Materials* [online]. 2018, **17**(7), 618–624 [cit. 2020-04-03]. ISSN 14764660. Dostupné z: doi:10.1038/s41563-018-0084-7

[45] LIN, Yiliang, Christopher COOPER, Meng WANG, Jacob J ADAMS, Jan GENZER, Michael D DICKEY, Y LIN, C COOPER, J GENZER, M D DICKEY, M WANG a J J ADAMS. Handwritten, Soft Circuit Boards and Antennas Using Liquid Metal Nanoparticles Circuit Boards [online]. 2015 [cit. 2020-04-03]. Dostupné

z: doi:10.1002/smll.201502692

[46] BOLEY, John William, Edward L. WHITE a Rebecca K. KRAMER. Mechanically sintered gallium-indium nanoparticles. *Advanced Materials* [online]. 2015, **27**(14), 2355–2360 [cit. 2020-04-03]. ISSN 15214095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201404790

[47] LI, Junpeng, Jiajie LIANG, Lu LI, Fengbo REN, Wei HU, Juan LI, Shuhua QI a Qibing PEI. Healable capacitive touch screen sensors based on transparent composite electrodes comprising silver nanowires and a furan/maleimide diels-Alder cycloaddition polymer. *ACS Nano* [online]. 2014, **8**(12), 12874–12882 [cit. 2020-04-07]. ISSN 1936086X. Dostupné z: doi:10.1021/nn506610p

[48] LUO, Crystal Shaojuan, Pengbo WAN, Hui YANG, Sayyed Asim Ali SHAH a Xiaodong CHEN. Healable Transparent Electronic Devices. *Advanced Functional Materials* [online]. 2017, **27**(23), 1606339 [cit. 2020-04-07]. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201606339

[49] *What is capacitive touch screen? - Definition from WhatIs.com* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://whatis.techtarget.com/definition/capacitive-touch-screen

[50] *Už vím, jak fungují dotykové displeje – MobilMania.cz* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.mobilmania.cz/clanky/uz-vim-jak-funguji-dotykove-displeje/sc-3-a-1108570/default.aspx

[51] HONG, Sukjoon, Junyeob YEO, Jinhwan LEE, Habeom LEE, Phillip LEE, Seung S. LEE a Seung Hwan KO. Selective laser direct patterning of silver nanowire percolation network transparent conductor for capacitive touch panel. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* [online]. 2015, **15**(3), 2317–2323 [cit. 2020-04-07]. ISSN 15334899. Dostupné z: doi:10.1166/jnn.2015.9493

[52] *Supramolecular polymers | Nature* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://www.nature.com/articles/453171a

[53] *Briefly explain the difference between self diffusion and interdiffusion? | Yahoo Answers* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://malaysia.answers.yahoo.com/question/index?qid=20131005023905AAMc

cQX&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuYmluZy5jb20vc2VhcmNoP3E9c2VsZitkaWZmdXNpb24rdnMraW50ZXJkaWZmdXNpb24mRk9STT1RU1JFMQ&guce_referrer_sig=AQAAAHXY-ZgyYsV-C3Ovmn4atifgSPzeWu5VuABfL-Fg1eLBjj_Ar2O6w8yTXEUP_D-k0Nd5Bh_xNF49cTw-PFUJgNlBXcWkqc8e5AKKtXL9pDQJGRvqJV9HIhVRNywWzXcVCHOSyVN9Cq9zCGE4cSepXkuAAY5YDynj90C5shwN1Gn5&guccounter=1

[54] WEIZMAN, Haim, Christian NIELSEN, Or S. WEIZMAN a Sia NEMAT-NASSER. Synthesis of a self-healing polymer based on reversible Diels-Alder reaction: An advanced undergraduate laboratory at the interface of organic chemistry and materials science. *Journal of Chemical Education*. 2011, **88**(8), 1137–1140. ISSN 00219584. Dostupné z: doi:10.1021/ed101109f

[55] *Přínosy vlhkého hojení | Léčba rány* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.lecbarany.cz/clanky/prinosy-vlhkeho-hojeni

[56] STEED, D. L. The role of growth factors in wound healing. *Surgical Clinics of North America* [online]. 1997, **77**(3), 575–586 [cit. 2020-03-26]. ISSN 00396109. Dostupné z: doi:10.1016/S0039-6109(05)70569-7

[57] *Organic Field Effect Transistor (OFET) Materials - Organic and Printed Electronics | Sigma-Aldrich* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=19352529

[58] *Organic Transistor Materials* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://www.tcichemicals.com/pdf/F2039E.pdf

[59] *Superparamagnetizmus – Aldebaran Glossary* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1382

[60] *Superparamagnetism - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/superparamagnetism

[61] *Eutektikum* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://cs.dbpedia.org/page/Eutektikum

[62] *Eutectic Definition and Examples* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.thoughtco.com/eutectic-definition-and-examples-608317

[63] *Eutektická směs – Aldebaran Glossary* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1440