

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**HODNOCENÍ VYUŽITÍ TECHNOLOGIE STUDENÉ
KINETICKÉ DEPOZICE NA MATERIÁLECH POUŽÍVANÝCH
V ELEKTROTECHNICE**

EVALUATION OF THE USE OF COLD KINETIC DEPOSITION TECHNOLOGY ON MATERIALS USED IN
ELECTRICAL ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Šteiniger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jakub Šteiniger

ID: 195254

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

**Hodnocení využití technologie studené kinetické depozice na materiálech
používaných v elektrotechnice**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište princip a využití technologie studené kinetické depozice (cold spray) na materiálech. Vytvořte experimentální vrstvu povlaku na vybraném materiálu, zhodnoťte vlastnosti vytvořeného povlaku na základním materiálu při různém korozním napadení. Podle zjištěných výsledků zhodnoťte hraniční limity vytvořeného povlaku po degradačním působení koroze. Navrhněte teoretické využití této technologie v praxi a vhodnou vědeckou metodou vyhodnoťte svůj návrh oproti současnému řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá procesom nazývaným studená kinetická depozícia. Pomocou tejto technológie bola vysokotlakovým striekaním pri tlaku 25 barov vytvorená na vzorku s hliníkovým substrátom medená vrstva. V experimentálnej časti sa posudzoval vplyv degradačného pôsobenia korózie v soľnej komore pri časových cykloch 100 h, 200 h a 300h, kde sa merali zmeny vnútorných a povrchových odporov pred a po korózii. Následne bola uskutočnená analýza koróznych splodín, kde sa pomocou elektrónového mikroskopu určil rozsah korózneho napadnutia. Tieto metódy viedli k cieľovému vyhodnoteniu hraničných limitov, nanesej vrstvy povlaku pomocou studenej kinetickej depozície, po pôsobení korózie. Zistilo sa, že vzorka umiestnená a ponechaná v koróznej komore najdlhšiu dobu bola najviac zasiahnutá koróziou. Na záver bola navrhnutá teoretická aplikácia studenej kinetickej depozície.

Kľúčové slová

studená kinetická depozícia, povlak, nanášanie, korózia, solárny panel, vzorka, meď

Abstract

The master's thesis deals with a process called cold kinetic deposition technology. Using this technology, a copper layer was formed on a sample with an aluminium base by high-pressure cold spraying at a pressure of 25 bar. In the experimental part, the influence of corrosion degradation in the salt chamber was assessed at the time cycles of 100 h, 200 h and 300h, where changes in internal and surface resistances before and after corrosion were measured. Subsequently, the analysis of corrosion products was performed, where the extent of corrosion attack was determined using an electron microscope. These methods led to a final evaluation of the boundary limits of the applied coating layer by cold kinetic deposition, after the effect of corrosion. Finally, a theoretical application of this technology was suggested. It was discovered that the sample placed and left in the corrosion chamber for the longest time was the most affected by corrosion. Finally, a theoretical application of cold kinetic deposition was proposed.

Keywords

cold kinetic deposition, coating, deposition, corrosion, solar panel, specimen, copper

Bibliografická citace:

ŠTEINIGER, Jakub. *Hodnocení využití technologie studené kinetické depozice na materiálech používaných v elektrotechnice* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-09].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134501>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Tomáš Binar.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jakub Šteiniger*

VUT ID studenta: *195254*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Hodnocení využití technologie studené kinetické depozice na materiálech používaných v elektrotechnice*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 18. květen 2021

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Binarovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 18. květen 2021

podpis autora

Obsah

Úvod	1
1 Historický vývoj studenej kinetickej depozície.....	2
2 Princíp metódy studenej kinetickej depozície.....	5
2.1 Vysokotlakové striekanie za studena – HPCS	6
2.2 Nízkotlakové striekanie za studena- LPCS	7
2.3 Typy využívaných plynov	8
3 Porovnanie metódy studenej kinetickej depozície s metódou tepelného striekania	11
3.1 Charakteristika tepelného striekania.....	11
3.2 Výhody tepelného striekania	13
3.3 Nevýhody tepelného striekania	14
3.4 Výhody studenej kinetickej depozície	15
3.4.1 Tuhé skupenstvo prášku.....	16
3.4.2 Bez oxidácie.....	16
3.4.3 Pevnosť väzieb.....	16
3.4.4 Bez zmeny fáze	17
3.4.5 Vysoká tepelná a elektrická vodivosť	17
3.4.6 Tlakové zvyškové napätie.....	18
3.4.7 Vysoká hustota a nízka pórovitosť	18
3.4.8 Minimálny tepelný príkon v substráte.....	18
3.4.9 Odolnosť proti korózií	19
3.4.10 Výrobné výhody.....	19
3.5 Nevýhody studenej kinetickej depozície	20
4 Využitie studenej kinetickej depozície v praxi.....	22
4.1 Letecký priemysel	22
4.2 Automobilový priemysel	23
4.2.1 3D tlač pre automobilový priemysel pomocou studenej kinetickej depozície	24
4.2.2 Výroba produktov pre automobilový priemysel pomocou studenej kinetickej depozície..	25
4.2.3 Ochranné povlaky pre automobily využívajúce proces studenej kinetickej depozície	27
4.3 Metóda výroby dosiek plošných spojov pomocou aplikovania studenej kinetickej depozície	27
5 Charakteristika medi, zliatiny a príklady využitia v elektrotechnike	30

6	Charakteristika hliníka, zliatiny a využitie.....	32
7	Korózia.....	36
7.1	Druhy korózneho napadnutia.....	36
7.2	Korózne správanie medi, hliníka a ich zliatin v morskej vode	41
8	Vodivosť materiálov.....	43
9	Experimentálna časť	45
9.1	Výroba vzoriek	45
9.2	Delenie vzoriek.....	46
9.3	Meranie odporov	48
9.3.1	Soľná komora.....	49
9.3.2	Meranie odporov po korózii.....	50
9.3.3	Vnútný odpor: porovnanie výsledkov, tabuliek a grafických závislostí	50
9.3.4	Povrchový odpor: porovnanie výsledkov, tabuliek a grafických závislostí	55
9.4	Analýza korózie korózných splodín pomocou elektrónového mikroskopu	57
9.5	Návrh aplikácie studenej kinetickej depozície.....	65
10	Diskusia k výsledkom.....	72
	Záver	73
	Literatúra	75
	Zoznam skratiek	79

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Ruské experimenty v aerodynamickom tunely ukazujúce a) častice medi dosahujúce rýchlosť 250 m/s sa odrazia a nelepia sa, ale b) častice pri rýchlosti 900 m/s vytvárajú vrstvu.....	2
Obr. 2 Prvé zariadenie studenej kinetickej depozície používané na nanášanie kovov a keramicko-kovových kompozitov.....	3
Obr. 3 Schéma procesu studenej kinetickej depozície.....	4
Obr. 4 Schéma vysokotlakového zariadenia.....	6
Obr. 5 Schéma nízkotlakového zariadenia.....	7
Obr. 6 Nízkotlaková axiálna injekčná dýza na prášok.....	7
Obr. 7 Systémy dodávky plynu potrebné pre proces studenej kinetickej depozície....	8
Obr. 8 Proces tepelného striekania.....	12
Obr. 9 Letecká časť vyrobená z horčíka pred (vľavo) a po aplikovaní studenej kinetickej depozície (vpravo).....	23
Obr. 10 Príklady 3D tlače využívajúci proces studenej kinetickej depozície : titánová tepelná trubica (vľavo) , komponenty do stroja z titánu (vpravo).....	25
Obr. 11 Vykonaná skúška tesnosti pri výrobe hliníkového výmenníka tepla pomocou studenej kinetickej depozície a) pred a po b) po 500 hodinách koróznej skúšky.....	26
Obr. 12 Ukážka substrátu striekaného pomocou studenej kinetickej depozície.....	28
Obr. 13 Zoznam vlastností medi a hliníka.....	35
Obr. 14 Rovnomerná korózia, 1- pôvodný povrch, 2- povrch po napadnutí.....	37
Obr. 15 Štrbinová korózia.....	37
Obr. 16 Bodová korózia.....	38
Obr. 17 Jamková korózia.....	38
Obr. 18 Schéma galvanickej korózie.....	39
Obr. 19 Korózne praskanie pod napätím.....	40
Obr. 20 Medzikryštalická korózia.....	41
Obr. 21 Impact Cold spray systém.....	45
Obr. 22 Doska s medeným nástrekom pred procesom delenia.....	46
Obr. 23 Proces delenia vzorky pomocou rezného kotúča.....	47
Obr. 24 Vzorky po rozdelení.....	47
Obr. 25 Sterilizátor horkovzdušný Stericell a LCR-meter HP 4284A.....	48
Obr. 26 Vzorky uložené v soľnej komore.....	49

Obr. 27 Stav vzoriek po vybratí zo soľnej komory počas 100, 200, 300 h.....	50
Obr. 28 Vzorka č.3 pre vnútorný odpor pri teplote 40 °C.....	54
Obr. 29 Vzorka č.4 pre vnútorný odpor pri teplote 20 °C.....	54
Obr. 30 Vzorka č.4 pre povrchový odpor pri teplote 20 °C.....	55
Obr. 31 Snímka elektrónového mikroskopu.....	57
Obr. 32 Hrana podkladového materiálu hliník.....	58
Obr. 33 Šírka hrany nastriekanej medi (vpravo) a šípkami označené korózne praskliny na hliníku (vľavo).....	59
Obr. 34 Povrch medi s priblížením 5000x.....	59
Obr. 35 Prechod hrany medzi hliníkom a meďou.....	60
Obr. 36 Hrana medi vzorky č.3.....	61
Obr. 37 Povrch medi vzorky č.3.....	61
Obr. 38 Povrch medi vzorky č.4.....	62
Obr. 39 Prechod hrany medzi hliníkom a meďou priblíženie 200x.....	63
Obr. 40 Prechod hrany medzi hliníkom a meďou priblíženie 50x.....	64
Obr. 41 Prechod hrany medzi hliníkom a meďou priblíženie 10000x.....	64
Obr. 42 Prvý diel určený na konštrukciu.....	66
Obr. 43 Druhý diel určený na konštrukciu.....	67
Obr. 44 Tretí diel určený na konštrukciu.....	67
Obr. 45 Návrh zostavy konštrukcie.....	68
Obr. 46 Návrh solárneho panelu.....	68
Obr. 47 Vrstvy solárneho panelu.....	69
Obr. 48 Návrh finálnej zostavy konštrukcie so solárnym panelom.....	69
Obr. 49 Solárny panel s červenou vyznačenou časťou aplikovania studenej kinetickej depozície.....	70
Obr. 50 Výkres zostavy.....	70
Obr. 51 Detail výkresu: solárny panel s kótami.....	71
Obr. 52 Detail výkresu: konštrukcia solárneho panelu s kótami.....	71

Zoznam tabuliek

Tab. 1 Vzorka č.3 pre vnútorný odpor pri teplote 40°C.....	52
Tab. 2 Vzorka č.4 pre vnútorný odpor pri teplote 20°C.....	53
Tab. 3 Vzorka č.4 pre povrchový odpor pri teplote 20°C.....	56

Úvod

Studená kinetická depozícia je jedným z mnohých pomenovaní, ktoré popisujú proces nanášania povlakov, pri ktorom je kovový alebo dielektrický substrát vystavený vysokorýchlostnému prúdu s rýchlosťou 300 až 1200 m/s malých častíc priemeru 5–40 μm . Dané častice sú urýchlené pomocou vysokorýchlostného prúdu stlačeného plynu a rozširujú sa v de Laval dýze. Tento proces je založený na výbere kombinácie teploty častíc, rýchlosti a veľkosti, ktoré umožňujú nástrek pri najnižšej možnej teplote. [1]

V procese studenej kinetickej depozície sa častice prášku urýchľujú vysokorýchlostným prúdom plynu pri teplote, ktorá je vždy menšia, ako teplota topenia materiálu, čo vedie k tvorbe povlaku z častíc v tuhom skupenstve. Po opustení dýzy a po náraze na substrát sa pevné častice plasticky deformujú a vytvárajú kombináciu metalurgického a mechanického spájania s okolitým materiálom. To vedie k vytvoreniu povlaku, ale k nanášaniu materiálu dochádza iba v prípade, ak nárazová rýchlosť častíc prekročí stanovenú prahovú hodnotu závislú od materiálu a teploty, takzvanú kritickú rýchlosť. [1]

Pri nanášaní, striekané materiály zažívajú len mierne zmeny v mikroštruktúre a s malou oxidáciou rozkladu. Väčšina kovov ako meď, hliník, nikel, titán a zliatiny na báze niklu sa môžu nanášať studeným postrekom. [2]

V dôsledku toho sú škodlivé účinky vysokoteplotnej oxidácie, odparovania, kryštalizácie, zvyškového napätia, uvoľňovania plynu, oddeľovania povrchu a ďalších bežných problémov, pre tradičné spôsoby tepelného striekania znížené alebo vylúčené. Odstránenie škodlivých účinkov pri vysokej teplote na povlaky a substráty ponúka značné výhody a nové možnosti, ktoré robia studenú kinetickú depozíciu sľubnou pre mnoho priemyselných aplikácií. [2] [3]

Cieľom práce je vyhodnotiť technológiu studenej kinetickej depozície na navrhutej aplikácii. Posudzovalo sa, aký má vplyv korózia na zmenu elektrických veličín a to konkrétne vnútorného a povrchového odporu. Na tieto skutočnosti poukazujú metódy ako napríklad využitie koróznej komory a analýza pomocou elektrónového mikroskopu.

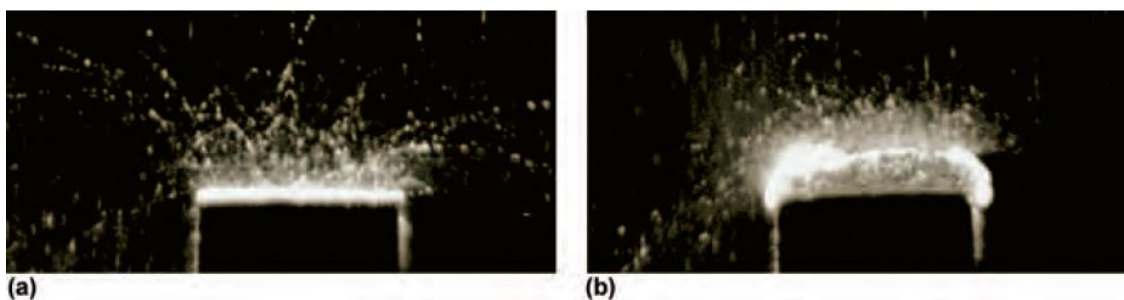
Elektrónovým mikroskopom bolo potrebné zistiť, ako sa korózia šíri, tým pádom prebehlo skúmanie na povrchu materiálu, na hrane materiálu a na rozhraní medzi nanosenou med'ou pomocou studenej kinetickej depozície a substrátom hliníka.

1 Historický vývoj studenej kinetickej depozície

Základná myšlienka procesu studenej kinetickej depozície bola známa a patentovaná na začiatku 20 storočia a praktický objav tohto procesu je v Rusku pred 30 rokmi v 80tych rokoch. Jeho komerčný vývoj sa však začal začiatkom roku 2000. Vynález procesu striekania za studena možno datovať do doby vynálezu procesu tepelného striekania Schoopom. [4]

Myšlienka využitia energie nárazu častíc na vytvorenie povlaku pomocou prúdu nosného plynu sa však využívala viac ako sto rokov. Technológia potrebná na praktické využitie tejto myšlienky však bola v tom čase zložitá a vyžadovala si ďalší vývoj. V dôsledku toho trvalo 80 rokov, kým sa uskutočnila prvá ukážka, ktorá sa stala náhodne počas experimentu v Rusku. Techniku studenej kinetickej depozície možno považovať ako vedľajší dôsledok studenej vojny medzi superveľmocami. [4]

Pri štúdiu experimentov podrobených v aerodynamickom tuneli na Ruskej akadémii vied vedci pozorovali, že pri náraze častíc rôznej veľkosti, uhlu nárazu, a rýchlosti na rôzne materiály sa častice usadili na povrchu, keď bola rýchlosť nárazu vyššia ako kritická hodnota (Obr. 1). [4], [5]

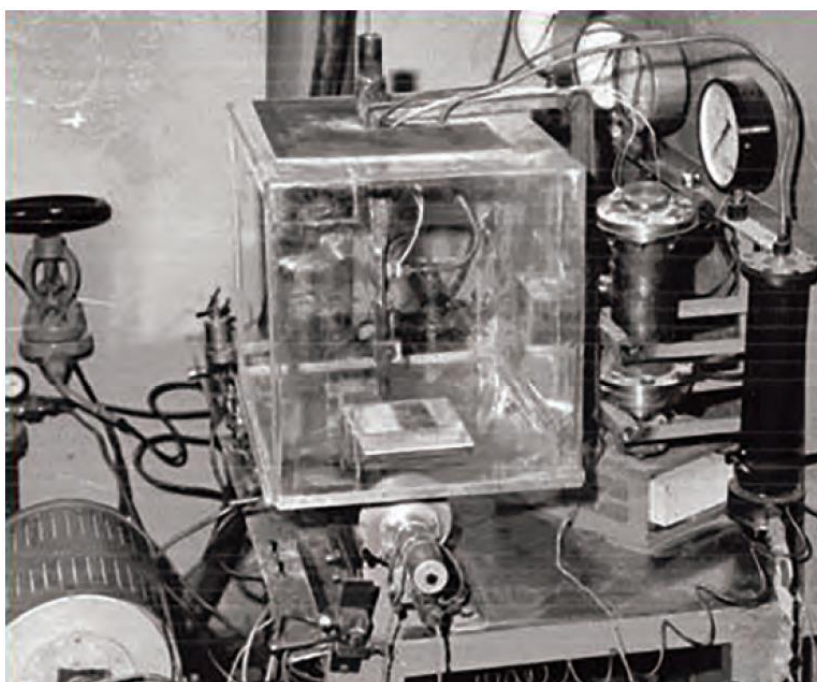


Obr. 1 Ruské experimenty v aerodynamickom tuneli ukazujúce a) častice medzi dosahujúce rýchlosť 250 m/s sa odrazia a nelepia sa, ale b) častice pri rýchlosti 900 m/s vytvárajú vrstvu [5]

Odvtedy bolo venované veľké úsilie do vývoja tohoto procesu a v súvislosti s touto priemyselnou technológiou vzrástol počet patentov a výskumných publikácií. Vývoj danej technológie začal od roku 1902, kedy podal žiadosť o americký patent Samuel H. Thurston s názvom „Metóda nanášania jedného kovu na druhý“. Pri tomto spôsobe sú kovové častice nanášané na kovovú dosku pomocou stlačeného plynu s takou silou, ktorá spôsobuje, že častice sú usadené na povrchu kovu a vytvárajú tak trvalý povlak. [4], [5]

V marci 1915 Schoop patentoval proces tepelného striekania. Vyvinul proces, pri ktorom sa kvapky roztaveného kovu striekajú na povrch, aby sa vytvoril povlak. Trvalo 50 rokov, keď sa 28. septembra 1958 rozhodol Rocheville na rozdiel od Thurstona patentovať spôsob nanášania častíc pomocou využitia de Lavalovej dýzy, ktorá poháňa častice vyššou rýchlosťou pomocou vysokotlakového vzduchu. Rýchlosť ale nebola dosť vysoká na to, aby sa vytvorili hrubé povlaky.[4], [5]

Koncom 80tych rokov 20 storočia A.P. Alkhimov, Anatoli Papyrin, V.F. Kossarev a ich tím na Inštitúte teoretickej a aplikovanej mechaniky divízie Ruskej akadémie vied v Novosibirsku vyvinuli metódu nanášania povlaku prevedením experimentov v aerodynamickom tuneli na realizovateľnú techniku a patentovali to. V 1986 podal žiadosť Alkhimov a ostatní členovia tímu o 2 patenty na metódu a zariadenie (Obr. 2). „Metóda nanášania povlakov a zariadenie na nanášanie povlakov“. Tieto patenty viedli k vývoju studenej kinetickej depozície a možnosti aplikovania hustého, hrubého, viac spojeného povlaku. [4], [5]



Obr. 2 Prvé zariadenie studenej kinetickej depozície používané na nanášanie kovov a keramicko-kovových kompozitov [5]

Medzi rokmi 1990 až 2000 bolo vydaných niekoľko patentov na zdokonalenie zariadenia ktoré slúžilo na nanášanie, ako dýza a systém dávkovania prášku. V 90tych rokoch sa OCPS (Obninsk Center for Powder Spraying) stalo poprednou spoločnosťou vyrábajúcou

plynové nanášanie zariadenie DYMET. Hlavní vynálezcovia spojení s OCPS boli A.I. Kashirin, O.F.Kljuev, A. Shkodkin a T.V. Buzdygar. V roku 1994 Anatoli Papyrin predstavil technológiu studenej kinetickej depozície v USA, kde vykonával základné štúdie. [4]

Následne Albert Kay, prezident spoločnosti ASB industries odkúpil licenciu na výrobu systémov pomocou studenej kinetickej depozície a použil ich na dodávanie pracovných povlakov. Následne sa táto technológia rozšírila do celého sveta. [4], [5]

Heinrich Kreye z Univerzity nemeckých ozbrojených síl v Hamburgu vypracoval štúdiu o všetkých aspektoch procesu studenej kinetickej depozície vrátane teórie, modelovania, dizajnu a vývoja pištolí a dýz, príprave a charakterizácie povlakov, vývoj nanášania povlakov. Priemysel nemeckého letectva tiež začal s výskumom, ktorý bol smerovaný na ochranné povlaky a na hromadnú výrobu. [4]

Počas tohto obdobia boli vyvinuté rôzne diagnostické techniky na pochopenie a zvýšenie výkonu tohto procesu. Nemecko si uvedomilo významnosť spoľahlivého systému na výrobu povlakov a preto sa rozhodli na univerzite ozbrojených síl v Hamburgu spojiť materiálové vedy, plynové technológie a zariadenia na riadenie procesov v snahe vyvinúť Cold Spray system Kinetic 3000. Uskutočnilo sa veľké množstvo experimentov striekaním za studena, ktoré vyústili do mnohých priemyselných aplikácií vrátane prvej hromadnej výroby procesu striekania za studena na svete. [4], [5]

V súčasnosti, je metóda studenej kinetickej depozície uznávaná poprednými svetovými vedcami a špecialistami. V mnohých výskumných centrách a spoločnostiach v mnohých krajinách sa vykonáva široké spektrum výskumov na výrobu ochranných povlakov, vrstiev zvyšujúcich výkon, ultra hrubých povlakov.[4], [5]

2 Princíp metódy studenej kinetickej depozície

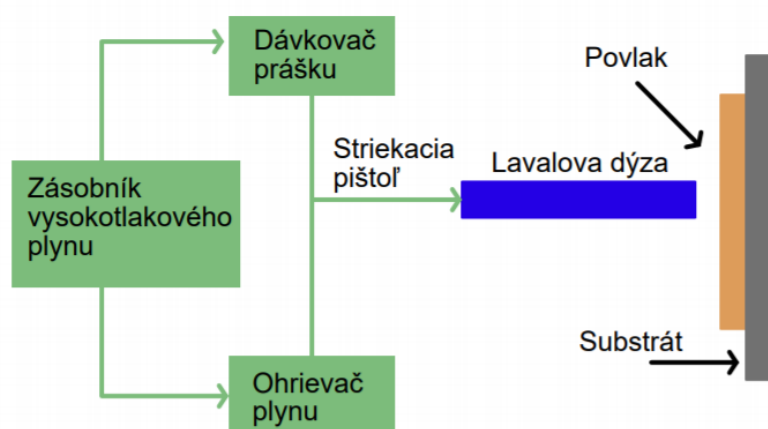
Proces studenej kinetickej depozície je moderná technika nanášania. Častice v práškovej forme podliehajú pri náraze na substrát výraznej deformácii, čím vytvárajú povlak. Kvalita povlaku závisí od typu prášku a substrátu, parametrov, aký je tlak a typ plynu, teplota plynu, odstupová vzdialenosť a rýchlosť častíc. Ako je znázornené na obrázku (Obr. 3) tento proces studenej kinetickej depozície vypadá veľmi jednoducho. Najskôr je vysokotlakový prívod plynu dusíka, hélia alebo ich zmesí stlačený na 1,0-4,0 MPa a prúdi cez systém v dvoch odlišných smeroch. [6]

Prvý smer prechádza dávkovačom prášku s cieľom premiestnenia častíc do pištole. Typická pištoľ používaná pri studenej kinetickej depozícii je vybavená Lavalovou dýzou, ktorá umožňuje plynu a časticam dosiahnuť nadzvukovú rýchlosť. Druhý smer vedie cez ohrievač plynu, ktorý je predhriaty na teploty 100-800°C. Toto poskytuje ďalšie dodatočné zvýšenie rýchlosti plynu a v dôsledku toho zvyšuje aj rýchlosť častíc.

Tieto dve cesty sa zbiehajú v blízkosti vstupu do dýzy.[6]

Nakoniec práškový materiál vychádzajúci z pištole dýzy dosahujúci veľkej rýchlosti sa zráža s podkladom a vytvorí povlak. Aj keď je prívod plynu predhriaty na vysoké teploty, častice zostávajú v tuhom skupenstve, pretože doba kontaktu medzi vysokoteplotným plynom a časticami je relatívne krátka. Teplota plynu je tiež často oveľa nižšia ako teplota topenia prášku. [6]

Okrem toho sa teplota plynu významne znižuje, keď dochádza k rozšíreniu v dýze pištole. Aj keď je princíp studenej kinetickej depozície jednoduchý, riadenie procesu kvôli mnohým faktorom pôsobí zložito. [6]



Obr. 3 Schéma procesu studenej kinetickej depozície (Prevzaté a upravené z [6])

Čo sa týka komerčných účelov, v súčasnosti sú k dispozícii dva systémy studenej kinetickej depozície. V závislosti od spôsobu vstrekovania striekaného materiálu do dýzy sa rozlišujú systémy vysokotlakového striekania za studena a nízkotlakového striekania za studena. Dva hlavné rozdiely týchto dvoch systémov sú v použití stlačeného plynu. V nízkotlakovom striekaní stačí 5 až 10 barov, pričom vo vysokotlakovom procese sa používa 25 až 30 barov. [4]

Podľa obrázku nízkotlakového striekania sa dá povedať že ide o radiálne vstrekovanie. Systém vysokotlakového striekania využíva axiálne vstrekovanie. Na obrázku (Obr. 6) je možné vidieť patent Heinricha. P s ostatnými členmi, ide o de Lavalovu dýzu s práškovou trubicou, ktorá umožnila axiálne vstrekovanie do rozšírenej oblasti. Tento dizajn dýzy je možné použiť v nízkotlakovom striekaní s výhodou vstrekovania častíc priamo do stredu prúdu plynu axiálne. [4]

2.1 Vysokotlakové striekanie za studena – HPCS

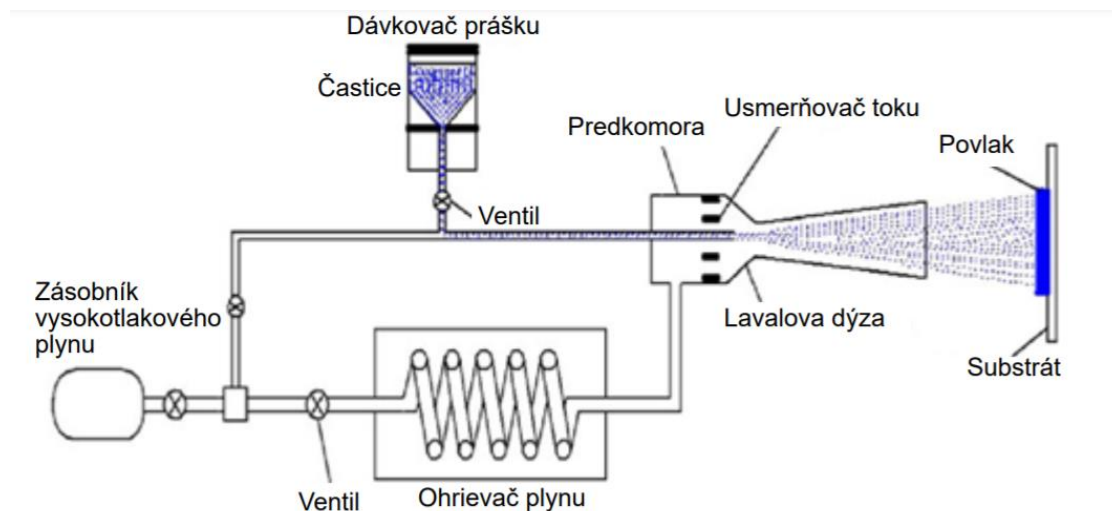
Pri vysokotlakovom striekaní za studena dochádza k prúdeniu v dvoch smeroch. V jednom smere plyn ako hélium alebo dusík, ktorý prechádza cez ohrievač plynu zahrieva pri vysokom tlaku 25-30 barov až na 1000 °C, aby sa optimalizovali aerodynamické vlastnosti, a potom sa pretláča cez Lavalovu dýzu. V dýze vedie rozšírenie plynu k premene entalpie na kinetickú energiu, ktorá urýchljuje tok plynu do vysokorýchlostného režimu až 1200 m/s a zároveň znižuje jeho teplotu. [4]

V druhom smere sa pohonný plyn v predkomorovej zmieša s časticami, ktoré putujú z dávkovača prášku. Následne vstupujú axiálne smerom ku konvergentnej časti dýzy pri vyššom tlaku, aby sa zabránilo spätnému toku nosného plynu do dávkovača prášku, ako je znázornené na obrázku (Obr.4). [4]

Častice pôsobiace na substrát s dostatočnou kinetickou energiou do 1200 m/s vytvoria mechanickú alebo metalurgickú väzbu. Účinnosť postreku v tomto systéme je veľmi vysoká a dosahuje až 90 % v porovnaní s 50 % v nízkotlakovom systéme. Plyny, ktoré majú aerodynamické vlastnosti sa zvyčajne pri tomto procese nanášania vrstvy používajú na pohon práškových častíc. Napríklad hélium, dusík, zmes dusíka s héliom a suchý vzduch (79 % dusík a 21 % kyslík). [4]

V praxi je hlavná výhoda vysokotlakového striekania oproti nízkotlakovému v podobe väčšieho výberu materiálu a vyššia kvalita nástreku a to kvôli dosiahnutiu vyššej teploty

a tlaku po dlhšiu dobu. Okrem toho môže byť systém vysokotlakového striekania efektívnejší s väčším prietokom plynu a rýchlosťou dávkovania prášku. [6]



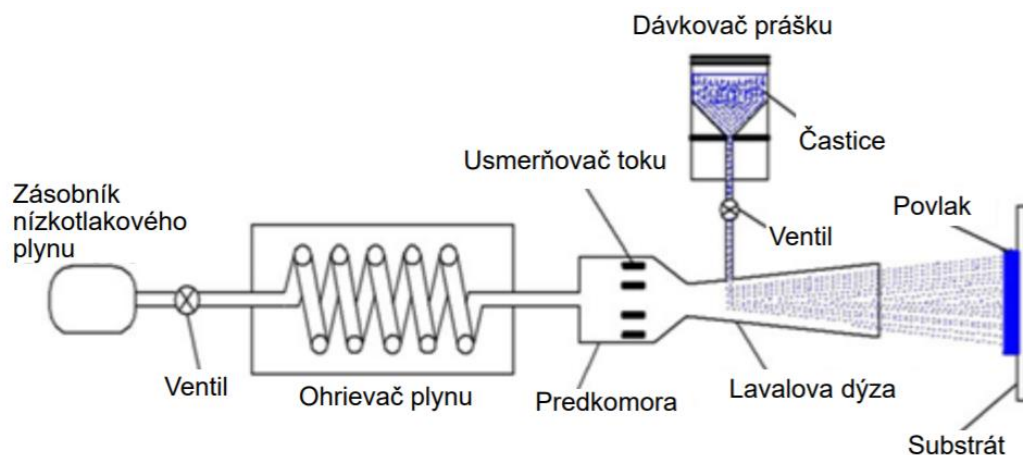
Obr. 4 Schéma vysokotlakového zariadenia (prevzaté a upravené z [4])

2.2 Nízkotlakové striekanie za studena- LPCS

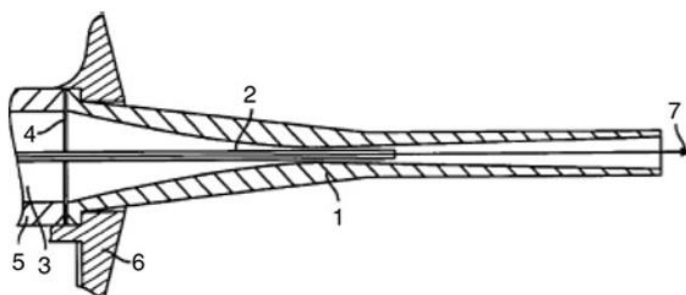
Pri nízkotlakovom striekaní za studena je plyn, ktorý prúdi len v jednom smere pri relatívne nízkom tlaku 5–10 barov predhriaty na 550 ° C v ohrievači plynu, potom je pretlačený cez Lavalovu dýzu alebo podobnú konvergentno-divergentnú dýzu. Na divergentnej strane dýzy sa ohriaty plyn urýchľuje na asi v rozmedzí 300 - 600 m / s. Pomocou dávkovača prášku, pevné častice radiálne vstupujú cez trubicu do Lavalovej dýzy, kde s veľkou rýchlosťou smerujú k substrátu, ako je znázornené na obrázku (Obr.5). [4]

Z dôvodu nevyužitia vysokotlakového dodávacieho systému v nízkotlakovom systéme sa však zvyšuje prevádzková bezpečnosť, systém je prenosnejší a náklady na postrek sa tiež výrazne znížili ako v prípade systému vysokotlakového systému striekania za studena. Účinnosť usadzovania striekaného materiálu u tohto systému ale obvykle nepresahovala 50 %. Aj keď v tomto systéme dochádza k dlhšej životnosti dýzy, pretože opotrebovanie stien kvôli práškovým časticiam nastáva iba v Lavalovej časti. V nízkotlakovom systéme častice prášku putujú cez trubicu priamo do Lavalovej dýzy, na rozdiel od

vysokotlakového systému. Systém nízкотlakového striekania je ale navyše kompatibilnejší s mnohými zmenami systému. [4]



Obr. 5 Schéma nízкотlakového zariadenia (prevzaté a upravené z [4])



Obr. 6 Nízкотlaková axiálna injekčná dýza na prášok [4]

2.3 Typy využívaných plynov

Dnešné systémy studenej kinetickej depozície vstreknú kovový prášok do stlačeného a zahriateho inertného prúdu plynu (hélium alebo dusík) a zrýchľujú dvojfázový tok cez de Lavalovu trysku. [7]

Pri pracovaní s vysokotlakovým studeným postrekom sa všeobecne používa hélium alebo dusíkaté plyny. Obrázok (Obr.7) ukazuje klasické zariadenie na dodávanie hélia a dusíka, potrebného na proces studenej kinetickej depozície. Hélium je dodávané na vysokotlakovom rúrovitom prívese a dusík sa odoberá z nádrže na kvapalný dusík,

natlakuje sa kryogénnym čerpadlom a splyňuje sa vo vysokotlakovom odparovači. Tradičné nádrže s tekutým dusíkom môžu mať veľkosť od 5700 do 75700 litrov. [5]



Obr. 7 Systémy dodávky plynu potrebné pre proces studenej kinetickej depozície. Hélium (vľavo) a Dusík (vpravo) [5]

Nízka molekulová hmotnosť hélia poskytuje prúd plynu s vyššou rýchlosťou, čo zase vedie k zvýšenej účinnosti nanášania a vynikajúcim vlastnostiam povlaku. Pretože je hélium kvôli svojmu výrobnému procesu podstatne drahšie ako dusík, nie je jeho použitie na proces studenej kinetickej depozície veľmi praktické. Dusík je viac preferovaný aj kvôli svojej dostupnosti. Preto sa vývoj technológie studenej kinetickej depozície sústredil na systémy založené na dusíku, ktoré napodobňovali vyššiu rýchlosť prúdu hélia, zvýšením tlaku a teploty prúdu dusíka. Po celom svete je v prevádzke viac ako 100 systémov, ktoré používajú dusík na proces studenej kinetickej depozície. [5]

Napriek tomu sa drahšie hélium občas používa namiesto dusíka kvôli zlepšeniu príľnavosti k povrchu a kvality povlaku zliatin, hliníka, ocele, niklu, titánu atď. Hélium má výhodné tepelné vlastnosti, ktoré privádzajú plyn na vyššie Machové čísla a podľa toho zvyšujú nárazové rýchlosti častíc. Pomer tepla a plynová konštanta hélia sú oveľa

vyššie ako u dusíka. Zlepšuje sa pórovitosť a pevnosť povlakov, keď sa kinetická energia častíc pri náraze zvýši na dostatočné úrovne. [7]

Hélium je ľahší plyn a počas procesu studenej kinetickej depozície sa spotrebuje rýchlejšie ako dusík. A preto sa čím ďalej zvyšujú prevádzkové náklady a zníženie prístupného času striekania, čo by znížilo prípustnú hrúbku povlaku, na ktorú je možné striekať len raz. [7]

V prípadoch, keď je potrebné hélium, nemusí byť dusík nahradený úplne. Zmes hélia v dusíku môže byť postačujúca na striekanie vysoko kvalitných kovových zliatin, ktoré poskytujú husté a odolné povlaky. [7]

Táto zmes môže taktiež zvýšiť pomer tepla a plynovú konštantu striekaného plynu v porovnaní so samotným dusíkom. Kovové časti majú dostatočnú podporu na to, aby prekročili kritickú rýchlosť stanovenú výskumníkmi, ktorá je nevyhnutná pre spájanie väzieb. Upravenie namiešaného pomeru dusíka a hélia pomocou vhodných kombinácií tlaku a teploty môže pomôcť ušetriť zásoby hélia, čím sa zníži cena na prevádzkovanie stroja a to poskytne dlhší čas striekania. [7]

Cena plynu pre koncového užívateľa nie je na celom svete jednotná, pretože náklady závisia od dostupnosti trhu, jeho distribúcie a skladovania na mieste. Množstvo, spotrebované na mieste je hlavným faktorom, pretože to ovplyvní spôsob skladovania a frekvenciu dodania, čo bude mať významný vplyv na celkové náklady. [8]

3 Porovnanie metódy studenej kinetickej depozície s metódou tepelného striekania

Studená kinetická depozícia má veľa podobností s procesom tepelného striekania. Existujú však aj dôležité a zásadné rozdiely, ktoré robia proces studenej kinetickej depozície a materiály striekané za studena oveľa jedinečnejšie. V niektorých využitíach, vlastnosti studenej kinetickej depozície ponúkajú značné výhody, ktoré prekonávajú základné obmedzenia procesov pomocou metódy tepelného striekania. Na identifikáciu najlepších využití studenej kinetickej depozície, je dôležité porozumieť podobnostiam a rozdielom v porovnaní s metódou tepelného striekania. [8]

V nasledujúcich podkapitolách bude poskytnutý prehľad o charakteristike procesu tepelného striekania, následne sa bude rozoberať odlišnosť týchto dvoch technológií popísaním ich výhod a nevýhod.

3.1 Charakteristika tepelného striekania

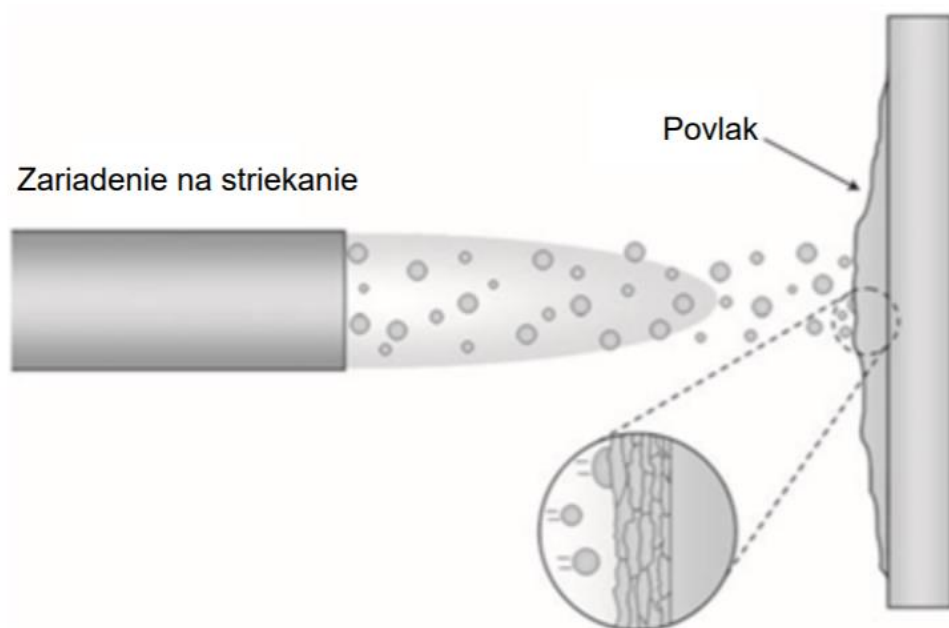
Vo všeobecnosti, pri tepelnom striekaní dochádza kvôli tepelnému ovplyvňovaniu materiálu ku zmenám štruktúry a má to vplyv na mechanické vlastnosti materiálu ako je napríklad pevnosť, tvrdosť a húževnatosť. Tým pádom dochádza k nataveniu vrstvy, lebo teplota striekaného materiálu pomocou plazmy sa pohybuje od 10 000 °C do 30 000 °C a pomocou elektrického oblúka okolo 4000 °C.

Pri procese tepelného striekania sa elektrická alebo chemická energia používa na vytvorenie malých roztavených kvapôčok o veľkosti 10-100 mikrónov. Tieto kvapôčky môžu byť vytvorené z prášku, kovového drôtu alebo tyče. Sú poháňané na povrch obrábaného kusu materiálu buď nízkorýchlostným alebo vysokorýchlostným prúdom plynu pri rýchlostiach od niekoľko desiatok metrov za sekundu až po 1000 metrov za sekundu. Po dopade sa každá kvapka rozptýli a rýchlo stuhne pri rýchlosti ochladzovania 104–108 K/s (kelvin za sekundu). Následne sa týmto vytvorí základná mikroštruktúrna jednotka nanášaného materiálu striekaním. [8]

Kvôli veľmi vysokej rýchlosti ochladzovania, každá jednotlivá kvapka zvyčajne stuhne skôr, ako na ňu dopadne ďalšia kvapka. [8]

Kvapôčky sa náhodne ukladajú na seba a vytvárajú vrstvenú mikroštruktúru, ktorá je špecifická pre väčšinu materiálov nanášaných tepelným striekaním. Metalografický

prierez videný na obrázku (Obr.8) zobrazuje vrstevnú mikroštruktúru typického tepelne striekaného povlaku. Kvalitu prepojenia medzi spevnenými časťami, silne ovplyvňujú fyzikálne a mechanické vlastnosti striekaného materiálu. Rýchlosti usadenia sa líšia kvôli rôznym procesom a materiálom, ale môžu sa pohybovať až ku kilogramom za hodinu. [8]



Obr. 8 Proces tepelného striekania (Prevzaté a upravené z [8])

Proces tepelného striekania môže byť rozdelený do dvoch hlavných kategórií, tie ktoré využívajú elektrickú energiu a tie ktoré využívajú chemickú energiu. Procesy s elektrickou energiou používajú elektrický oblúk alebo elektrickú plazmu na ohrev a roztavenie striekaného materiálu. Napríklad pri nástreku elektrickým oblúkom, pomocou koncov dvoch kovových drôtov sa vytvorí elektrický oblúk. Konce sú spojené pod miernym uhlom, na ktorých sa rôzny materiál dokáže roztaviť. Cez konce drôtov prechádza prúd stlačeného vzduchu alebo inertného plynu. Následnou aktivitou sa rozpráši roztavený kov a tak sa vytvorí prúd roztavených kvapiek. Keď sa konce hrotov roztavia, do oblúka sa pridá ďalší drôt, čo umožňuje neustály priebeh procesu. [8]

Zjavným obmedzením tohto procesu je, že sa môže použiť iba na nanášanie materiálov, ktoré môžu byť vyrobené z vodivých kovových drôtov. Tento jednoduchý a ekonomicky

výhodný proces je vhodný na použitie, ako nastriekanie antikorózných náterov na báze zinku alebo hliníka na mosty, paluby lode, kovové nádrže atď. [8]

Plazmové striekanie je ďalší používaný proces pomocou elektrickej energie na metódu tepelného striekania. V tomto procese sa ionizovaný vodivý plyn nazývaný plazma, používa na tavenie a poháňanie práškového materiálu smerom na substrát. Typická plazmová pištoľ sa skladá z dvoch elektród, volfrámovej katódy a valcovitej medenej anódy, ktorá obklopuje katódu. Katóda a anóda sú vodou chladené a navzájom elektricky izolované vhodným izolačným materiálom. Medená anóda slúži tiež ako dýza, ktorá usmerňuje tok prúdu horúcej plazmy. [8]

Procesy tepelného striekania využívajúce chemickú energiu sa vyznačujú nanášaním pomocou plameňa. Spaľovanie kyslíka s rôznymi palivovými plynmi ako napríklad acetylén, propán, propylén, môžu spôsobiť vysoké teploty dostatočné na roztavenie mnohých kovov a polymérov, ako aj niektorých druhov keramiky. Toto zariadenie využíva prúd stlačeného vzduchu na urýchlenie roztavených kvapiek smerom k substrátu, ktoré dosahujú rýchlosti v rozsahu od 50 do 300 metrov za sekundu v závislosti na konštrukcii zariadenia, striekanom materiáli a prevádzkových podmienkach. Zariadenia s menšou rýchlosťou vytvárajú povlaky, ktoré sú viac pórovité, menej husté narozdiel od tých zariadení, čo dosahujú vyššie rýchlosti. Ďalšie procesy využívajúce chemickú energiu môžu byť pomocou vysokorýchlostného nástreku plameňom alebo využívaním detonačného striekania. [8]

3.2 Výhody tepelného striekania

Hlavnou výhodou pri procese tepelného striekania je schopnosť nanášať veľké množstvo materiálov. Prakticky, akékoľvek materiály, ktoré sa dajú roztaviť, je možné nanášať pomocou tepelného striekania. Patria sem napríklad všetky kovy, zliatiny kovov, keramiky, sklá. Niektoré materiály, ktoré sa neroztavia, ako napríklad grafit alebo veľa karbidových, boridových keramik, je možné nanášať spolu s iným striekaným materiálom. Následne vzniká zmiešaná vrstva naneseného materiálu. Schopnosť spoločného nanášania rozličných materiálov na vytvorenie jedinečných kompozitných materiálov so zmiešanými mikroštruktúrami je dôležitou výhodou tepelného striekania. [8]

Ďalšia výhoda je, že množstvo vhodných substrátov je väčší než rozsah striekaných materiálov. Okrem kovov, keramiky, skiel a polymérov sa tepelné nástreky úspešne nanášajú na mnoho ďalších substrátov, vrátane dreva, betónu, alebo dokonca papiera. Často je možné naniest' materiál s vysokou teplotou topenia, napríklad kov, na substrát citlivý na teplotu, ako je drevo alebo polymérny kompozit.[8]

Tento proces disponuje veľmi vysokou rýchlosťou nanášania. Rýchlosti nanášania tepelným striekaním sú zvyčajne rádovo vyššie ako rýchlosti nanášania väčšiny alternatívnych technológií, ako napríklad pokovovanie, kde k nanášaniu dochádza na atomárnej alebo molekulárnej úrovni. To poskytuje príležitosť rýchlo a ekonomicky pokryť veľmi veľké povrchy a vytvoriť silné usadeniny/nánosy v rozmedzí niekoľko milimetrov až centimetrov.[8]

Pri striekaní povrchov, existujú objekty, ktoré sú veľmi veľké alebo náročné na presunutie. Dôležitou výhodou je tiež schopnosť nanášania tepelného postreku prenosným striekacím zariadením, ktoré si pracovník môže dostaviť na pracovisko. V porovnaní s väčšinou alternatívnych technológií nanášania, je relatívne jednoduché kontrolovať a ekologicky odstrániť tekutý odpad, ktorý vzniká pri procesoch tepelného striekania. [8]

3.3 Nevýhody tepelného striekania

Dve dôležité obmedzenia procesov tepelného striekania sú prítomnosť pórovitosti a oxidov v materiáli nanášanom striekaním. Tieto nedostatky v mikroštruktúre nastriekaného povlaku môžu významne degradovať mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti materiálu. Nadmerná pórovitosť môže byť problémom, ak je povlak určený na ochranu substrátu materiálu pred vystavením sa kvapalným alebo plynným časticiam, ktoré môžu spôsobiť koróziu alebo iné problémy. [8]

Naopak, vysoká úroveň pórovitosti môže byť v skutočnosti výhodou v niektorých prípadoch. Napríklad pri zámerne vysokej úrovni pórovitosti môže dôjsť k zníženiu tepelnej vodivosti povlaku a zvýšeniu odolnosti povlaku proti praskaniu alebo odlupovaniu. [8]

Pórovitosť sa líši podľa určitého procesu striekania, materiálu a podmienok nanášania. Z všeobecného hľadiska majú procesy pri nízkej rýchlosti, ako nanášanie pomocou plameňa alebo elektrického oblúka vyššiu úroveň pórovitosti, zvyčajne v rozmedzí 5–15

% objemu. Procesy pri vyššej rýchlosti, ako je striekanie pomocou plazmy, môžu vytvárať povlaky s menšou pórovitosťou, zvyčajne rádovo 3–8 % objemu. [8]

Pri striekaní kovov, vedie reakcia roztaveného kovu s kyslíkom k tvorbe nečistôt oxidu kovu v povlaku. Nadmerné zahrievanie striekaného materiálu môže tiež viesť k odparovaniu prchavejších látok v komplexnej kovovej zliatine, čo spôsobí posun v chemickom zložení nanášaného materiálu. [8]

Rovnako ako pri pórovitosti, množstvo oxidu sa veľmi líši v závislosti od procesu, materiálu a od podmienok postreku. Množstvo oxidu v nastriekaných povlakoch je rádovo niekoľko hmotnostných percent. Procesy, ktoré minimalizujú zahriatie striekaného materiálu, ako napríklad vysokorýchlostný nástrek plameňom, majú zvyčajne za následok nižšie koncentrácie oxidov a minimálne zmeny v chemickom zložení zliatin. Samozrejme, inertná atmosféra vákuového plazmového striekania vytvára počas procesu nanášania veľmi malý alebo žiadny oxid. Avšak napriek tomu môžu nastať určité zmeny v chemickom zložení zliatin v dôsledku relatívne vysokých teplôt v plazmovej dýze a zníženého okolitého tlaku v komore na striekanie. [8]

Ďalším obmedzením tepelného striekania je zvyškové napätie. Keď každá roztavená kvapka tuhne a potom sa ochladí na izbovú teplotu, podrobí sa tepelnej kontrakcii priamo úmernej so zmenou teploty a koeficientom tepelnej rozťažnosti pre tento materiál. Pretože podkladový, už aj stuhnutý materiál má obvykle nižšiu teplotu, výsledkom je, že každá nasledujúca vrstva materiálu je ponechaná v stave ťahového zvyškového napätia a celkové ťahové zvyškové napätie v povlaku stabilne rastie, keď nasledujúce vrstvy materiálu sú pridané. [8]

V skutočnosti to je neustále sa zvyšujúce ťahové zvyškové napätie, ktoré v mnohých prípadoch obmedzuje maximálnu hrúbku tepelného striekania. Ako sa zvyšuje hrúbka povlaku, ťahové zvyškové napätie v povlaku nakoniec stúpa do bodu, že povlak buď praskne, alebo sa oddelí od substrátu. [8]

3.4 Výhody studenej kinetickej depozície

Rovnako ako akékoľvek iné techniky, má proces studenej kinetickej depozície svoje výhody a nevýhody. Hlavnou výhodou studenej kinetickej depozície je, že sa jedná o proces v tuhom skupenstve, ktorý vedie k mnohým jedinečným vlastnostiam. [1]

Pri studenej kinetickej depozícii, kvôli vysokej rýchlosti má dopadajúca častica a aj povrch dostatočnú plastickú deformáciu a vzniká vrstva, čiže nedochádza k nataveniu vrstvy a tým pádom nedochádza ku mechanickým zmenám vlastností materiálu, lebo sa nemení štruktúra na rozdiel od tepelného striekania.

Existuje veľa spôsobov ako by sa dali výhody popísať. Nasledujúce časti budú zamerané na konkrétne príklady.

3.4.1 Tuhé skupenstvo prášku

Kľúčovým fyzikálnym rozdielom medzi studenou kinetickou depozíciou a metódami tepelného striekania je, že pri použití studenej kinetickej depozície dochádza ku konsolidácii materiálu v tuhom skupenstve, ktoré vyžaduje dostatok nárazovej energie, na stimuláciu spojenia rýchlou plastickou deformáciou. Preto, aby sa dosiahla väčšia rýchlosť toku plynu v de Lavalovej dýze, je stlačený nosný plyn často predhriaty. Síce teplota môže dosahovať 1000°C alebo viac, doba striekania častíc s horúcim plynom je dosť krátka. Plyn sa rýchlo ochladzuje hneď ako sa rozšíri v divergentnej časti dýzy, teplota častíc ostáva výrazne menšia ako počiatočná teplota predhriateho plynu, teda pod teplotou topenia striekaného materiálu. [1]

3.4.2 Bez oxidácie

Proces oxidácie predstavuje jednu z hlavných obmedzení tepelného striekania, kde počas oxidácii častíc vznikajú vrstvy s povrchovou oxidáciou. Spracovanie materiálov citlivých na kyslík ako hliník, meď, horčík, titán a ich zliatiny, je náročné, pretože zvyšovanie teploty exponenciálne urýchľuje oxidáciu. Studená kinetická depozícia nezahrieva materiál na vysokú teplotu. Počas nárazu častíc pri studenej kinetickej depozícii, jemná vrstva oxidu ktorá pokrýva väčšinu kovových povrchov zaniká, pomocou vysokorýchlostného prúdu plynu. Očistený kovový povrch od oxidov, je pripravený na spojenie s prichádzajúcimi časticami. Oxidácií častíc sa teda v procese studenej kinetickej depozície takmer úplne zabráni. Povlaky striekané pomocou studenej kinetickej depozície majú mierne nižší obsah kyslíka ako počiatočný materiál. [1], [8]

3.4.3 Pevnosť väzieb

Povlaky striekané pomocou studenej kinetickej depozície vykazujú veľmi vysokú pevnosť väzby na mnohých základných materiáloch vrátane kovov (hliník, meď, titán, nikel atď.), zliatin (Inconel, oceľ atď.) a kompozitné materiály (s kovovou maticou,

uhlíkovou matricou atď.). Dokonca aj na sklo môžu byť nanesené niektoré materiály ako napríklad hliník.[8] Kohézna a adhézna pevnosť nánosu patria medzi kľúčové a najužitočnejšie vlastnosti. Vo všeobecnosti, priemerná adhézna a kohézna sila je určená nastriekaním horného povrchu vzorky, potom prílepením nastriekanej časti k príslušnému telesu rovnakej veľkosti a nakoniec ťahaním zostavy až dokým nedôjde k zlyhaniu. Použitím tejto metódy s určitými kombináciami materiálov sa ukázalo, že nánosy môžu zlyhať kohézne a to zlomom vo vnútri nánosu alebo adhézne, zlom na rozhraní nánosu alebo substrátu.[1]

3.4.4 Bez zmeny fáze

Vlastnosti všetkých materiálov sú ovplyvnené chemickým, mikroštruktúrnym a fázovým zložením spracovávaného materiálu. Vo väčšine prípadov sa tieto vlastnosti vytvorili pomocou techník spracovania materiálu, ktoré v určitom okamihu zahŕňali vysokoteplotné fázové zmeny. Pri vysokoteplotných procesoch, ako je plazmové striekanie, môžu roztavené látky reagovať počas krátkej doby letu zo striekacej pištole na substrát. [1]

Ako sa dá očakávať, pri akomkoľvek vysokoteplotnom spracovaní dochádza k oxidácii, rozkladu, tvorbe metastabilných fáz atď. V procese studeného striekania zostávajú častice blízko okolia, a preto nedochádza k fázovým zmenám. [8] Pomocou röntgenovej difrakcie sa potvrdilo, že studená kinetická depozícia nespôsobuje zmeny v chemickom zložení alebo vo fázovom zložení a ani zrnitú štruktúru. [1]

3.4.5 Vysoká tepelná a elektrická vodivosť

Studená kinetická depozícia vytvára povlaky s vysokou hustotou. Povlaky navyše obsahujú fázovú čistotu a inklúzie ako sú póry alebo oxidy sú minimálne alebo dokonca chýbajú. To vedie k vynikajúcim hodnotám tepelnej a elektrickej vodivosti povlakov pri studenej kinetickej depozícii. [8] Elektrická vodivosť je dobrým indikátorom kvality povlaku z hľadiska hustoty materiálu a prítomnosti rozptýlených oxidových fáz. Kvôli výnimočnosti tepelnej a elektrickej vodivosti v kombinácii s komerčným účelom, je med' kľúčovým materiálom v dnešnom industrializovanom svete. [1] Pokusy ukázali, že typický povlak nanosený studenou kinetickou depozíciou vykazuje hodnoty objemovej

vodivosti prevyšujúce 92 %, čo je možné porovnať s asi 40–63 % pri tepelnom striekaní povlakov. [8]

3.4.6 Tlakové zvyškové napätie

Prítomnosť ťahových napätí môže prispievať k tvorbe a šíreniu mikrotrhlín, čo môže urýchliť zlyhanie materiálu. Z dôvodu tepelnej rozťažnosti a kontrakcie počas tavenia a tuhnutia, môžu nánosy vytvárané tepelným striekaním vyvíjať ťahové zvyškové napätia. Výraznou črtou procesu studenej kinetickej depozície je vývoj tlakových zvyškových napätí. Tlakové napätie má opačný účinok na životnosť materiálov. Výskumy ukázali, že proces studenej kinetickej depozície môže vyrábať požadované tlakové napätia, ktoré sú zodpovedné za zlepšenie životnosti určitých materiálov. [1]

3.4.7 Vysoká hustota a nízka pórovitosť

Na vonkajšia časti vrstvenej štruktúry nánosu pomocou tepelného striekania sa ukazujú isté škvrny, ktoré nie sú navzájom dobre viazané a naopak vedú k mnohým pórom vo veľkosti mikrónov. Vysoká úroveň pórovitosti, napríklad 5–15 % pri striekaní plameňom a elektrickým oblúkom a 3–8 % pri plazmovom striekaní, čo znamená, že to môže viesť ku korózii. [1]

Studená kinetická depozícia je proces v tuhom skupenstve. Keď častice narazia na substrát pri rýchlostiach vyšších ako je kritická rýchlosť materiálu, tak sa plasticky deformujú a dôjde k spojeniu. Vysoká rýchlosť deformácie môže viesť k výrobe prúdu pary. Prúd produkuje ukladanie nánosu pomocou pary na materiál a týmto sa vyplnia všetky existujúce póry a praskliny. Navyše, každý prechod striekanej hmoty na podkladové vrstvy, zvýši aj ich hustotu. [1]

3.4.8 Minimálny tepelný príkon v substráte

Pri tepelnom striekaní je substrát ohrievaný plameňom pri rôznych stupňoch. Preto je náročné spracovávať materiály citlivé na teplotu ako napr. horčík, polyméry. Navyše môže prísť k ohýbaniu alebo deformácii substrátu z tepla, keď je hrúbka vzorky malá. V procese studenej kinetickej depozície neexistuje žiadny vysokoteplotný prúd na ohrev substrátu, substrát prijíma iba entalpiu dopadajúcich častíc. Na základe toho je možno použiť studenú kinetickú depozíciu na opravu dielov a komponentov z materiálov citlivých na teplotu. [8]

3.4.9 Odolnosť proti korózií

Procesy tepelného striekania ako sú striekanie plameňom, plazmový nástrek, nástrek elektrickým oblúkom predstavujú niektoré bežné spôsoby nanášania hliníka na oceľ a iné materiály na ochranu proti korózií. Aj keď sú lacnejšie v porovnaní so studenou kinetickou depozíciou, silná oxidácia, fázové premeny, vysoká pórovitosť vedú k relatívne slabej odolnosti proti korózii. [1]

Vysoká hustota, fázová čistota, homogénna mikroštruktúra povlakov striekaných pomocou studenej kinetickej depozície, sú vlastnosti, ktoré poskytujú mimoriadnu odolnosť proti korózií. Následkom toho je studená kinetická depozícia viac preferovanou metódou, ktorá zabezpečuje opravu a ochranu pred koróziou. Môže byť použitá vo viacerých oblastiach. Niektoré použitia zahŕňajú odliatky horčíka v letectve alebo automobilovom priemysle. [1]

3.4.10 Výrobné výhody

Rýchlosť vývoja, prijímania nových technológií je často úmerná potrebe nových riešení technických problémov. V súčasnosti, studená kinetická depozícia sa stáva nástrojom, ktorý vzišiel z naliehavosti znížiť negatívny vplyv súčasných výrobných postupov na životné prostredie ako je nadmerné využívanie zdrojov, likvidácia odpadu, kontaminácia alebo emisie skleníkových plynov. Niektoré z výhod studenej kinetickej depozície predstavujú ekologickejšie alternatívy k technológiám ako sú galvanické pokovovanie, spájkovanie alebo maľovanie. [1]

Pri používaní tepelného striekania je maskovanie nevyhnutnosťou, pretože môže dôjsť k prestriekaniu, čo znamená že sa striekaný materiál rozšíri mimo plánovanej časti striekania. Navyše sa častice pri vysokej majú tendenciu lepiť. Maskovanie sa často musí robiť manuálne, čo výrazne zvyšuje výrobné náklady. Ako príklad môže byť uvedená oprava a montáž lopatiek v turbínach, kde sa vyžaduje, aby bola na spodok každej lopatky, kde je lopatka zasunutá do hlavného hriadeľa, nanášaná vrstva hliníka. V opačnom prípade by došlo k významným stratám účinnosti. Tento proces si vyžaduje rozsiahle maskovanie na ochranu zvyšku lopatky pred prestriekaním, čo predstavuje najvýznamnejšiu časť nákladov. [1]

Naopak, studená kinetická depozícia predstavuje ideálny proces, ktorý nepotrebuje maskovanie. Šírka prúdu častíc je riadená priemerom na výstupe z dýzy, ktorý býva úzky. V praxi je možné dýzy upravovať. Typický rozprašovací prúd má priemer asi 10

milimetrov, ale je možné navrhnuť špeciálne dýzy s obdĺžnikovým výstupom a ostrými hranami, ktoré majú priemer 1-2 milimetre. Tieto zmeny významne neovplyvňujú rýchlosť častíc. [1], [8]

Studená kinetická depozícia sa používa taktiež pre široký výber kombinácií povlakov-substrátov. Napríklad hliník na substrát niklu (Al-Ni) , zmesi hliníka s karbidom kremičitým (Al+SiC) a titánu s karbidom kremičitým (Ti+ SiC) na hliníkové a ocelové substráty. Preto spájanie pomocou studenej kinetickej depozície je kombináciou mechanického metalurgického spájania, má podstata substrátu menší význam a preto je možné vytvoriť neuveriteľné množstvo kombinácií.[1]

Možnosť zjednotiť odlišné materiály do výrobkov so špeciálnymi vlastnosťami, je silnou hnacou silou pre objavovanie nových výrobných metód. Napríklad odolnosť proti opotrebovaniu substrátov z hliníkovej zliatiny možno zvýšiť položením vrstvy zliatiny na báze železa. Kvôli nižšej teplote v kombinácii s vyššou rýchlosťou častíc môže proces studenej kinetickej depozície ľahko vytvárať husté povlaky mnohých materiálov, ako je hliník, meď, nikel na rozdielnych substrátoch. Materiály, ako je hliník a meď, môžu byť nastriekané pomocou studenej kinetickej depozície na hladké, nepripravené sklenené povrchy a niektoré polymérne povrchy. Na druhej strane, na substrát z hliníkovej zliatiny Al 7075 je možné nastrikať polymérne materiály, napríklad polyetylén. [1]

Pri vytváraní hrubých usadenín tepelným striekaním dochádza pri zväčšovaní hrúbky k postupnému hromadeniu povrchových ťahových napätí a pevnosť spoja postupne klesá. Pretože sú povlaky striekané za studena tlakovo namáhané, je možné na mnohých podkladoch vytvárať veľmi silné vrstvy bez poškodenia spoja. [8]

Medzi ďalšiu výhodu patrí, že veľmi vysoká účinnosť nanášania môže byť dosiahnutá pri studenej kinetickej depozícii. Pri hliníku, medi a pre ich zliatiny sa hovorí až nad 95 %.[8]

3.5 Nevýhody studenej kinetickej depozície

Podobne ako iné techniky, tak aj studená kinetická depozícia disponuje rôznymi nevýhodami. Na rozdiel od tepelného striekania, ktoré sú schopné nanášať široké množstvo materiálov od kovov po keramiku, je proces studenej kinetickej depozície obmedzený na nanášanie kovov alebo kombinácia materiálov, ktoré budú mať dostatočne nízku teplotu ťažnosti. Hovorí sa o kovoch ako napríklad hliník, meď, titán, striebro a zinok alebo aj zmes týchto kovov s keramikou, kombinácia hliníka s oxidom hlinitým. [1]

Pri studenej kinetickej depozícii musí byť substrát dostatočne tvrdý, v závislosti od nastriekaného materiálu, aby vyvolal dostatočnú plastickú deformáciu prichádzajúcich častíc na vznik prijateľného spojenia. Na jednej strane by materiály s mäkkým podkladom ako napríklad polyetylén spôsobili, že prichádzajúce častice by sa prepadli pod povrch, bez možnosti hromadenia sa na povrchu. Na druhej strane, materiály s krehkým substrátom, ktoré sa ľahko delaminujú, ako napríklad uhlík a pravdepodobne by došlo k erózií prichádzajúcich častíc. Substráty teda musia byť pevné, aby sa bol schopný naniesť povlak. [1]

V závislosti so spotrebou plynu, tak v studenej kinetickej depozícii je oveľa vyššia ako v procesoch tepelného striekania. Hlavnými dôvodmi sú vysoké rýchlosti a prúdenia potrebné na pohon častíc. Medzi hlavné možnosti nosného plynu je hélium, dusík a vzduch. Hlavný rozdiel spočíva v hustote, ktorá je iná. Hélium patrí medzi najžiadanejšie plyny, kvôli jeho schopnosti dosiahnuť vysokej rýchlosti plynu a aj inertnosti. Vysoká rýchlosť plynu prináša aj lepšie výsledky z hľadiska kvality. Hélium je však najdrahší a vzácny plyn, na základe čoho má viac obmedzené použitie. Preto sa za posledné roky, častejšie vyvíjala možnosť studenej kinetickej depozície s obsahom dusíka alebo vzduchu, ktoré sú vhodné pre všetky typy zariadení a aj pre striekané materiály tejto technológie. Tepelné striekanie má od studenej kinetickej depozície výhodu v odstupovej vzdialenosti od substrátu. Studená kinetická depozícia má kratšiu odstupovú vzdialenosť. Preto je náročnejšie striekať materiály na vnútorné povrchy, ako napríklad vnútorný priemer rúr, bez špeciálnej úpravy konštrukcie dýzy.[1]

4 Využitie studenej kinetickej depozície v praxi

Studená kinetická depozícia sa začína vo väčšej miere používať v rozličných odvetviach pre mnoho priemyselných aplikácií. Hovorí sa o opravách na odolnosť proti korózií, obnova povrchu, výroba rozprašovacích terčov, elektrických a tepelne vodivých povlakov. Táto technológia má využitie aj vo fotovoltaiickom priemysle, v stavebníctve, v oblasti medicíny, pri výrobe veternej energie, kde je pomocou studenej kinetickej depozície možnosť zvýšiť vystuženie povrchu v častiach vyrobených z kompozitov s polymérnou matricou. [9],[10]

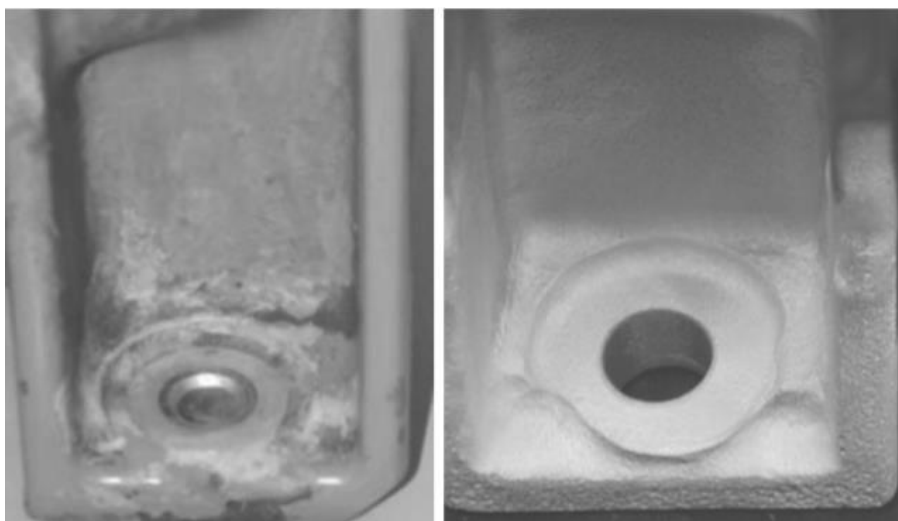
4.1 Letecký priemysel

Studená kinetická depozícia urobila prevrat, čo sa týka opráv komponentov v teréne, mala zásadný vplyv na zníženie nákladov potrebných na údržbu v oblasti leteckého priemyslu vrátane petrochemického a jadrového priemyslu. Letecký priemysel zaznamenal značné problémy spôsobené koróziou a opotrebovanosťou istých materiálov, hlavne zliatin horčíka, ktoré sa používajú na výrobu súčastí lietadiel. Kvôli veľkému množstvu požadovaných testov a overení, trvá tento proces niekoľko rokov. Proces na opravu pomocou studenej kinetickej depozície zahŕňa rozsiahle testovanie a hodnotenie komponentov a zostáv, ktoré si vyžadujú letové skúšky, dôležité z hľadiska bezpečnosti letu. Nakoniec proces postúpi k posúdeniu uskutočniteľnosti a finálne predvedenie a potvrdenie funkčnosti, skôr ako sa to bude dať použiť v praxi. [6], [11]

Nános hliníka a jeho zliatím pomocou studenej kinetickej depozície sa stáva overenou metódou pri poskytnutí obnovy a ochrany pred koróziou pre komponenty vyrobené z horčíka. Prídavok hliníka k horčíku podporuje tvorbu lepších pasívnych vrstiev ako čistý horčík. Preto aplikovanie hliníka pomocou studenej kinetickej depozície na horčík a jeho zliatiny predstavuje spôsob spomalenia korózie vo vodnom prostredí. Schopnosť hliníka, ochrániť horčík sa stáva sľubnou, keďže horčík disponuje silným termodynamickým potenciálom pre oxidáciu. Neexistuje žiadna stratégia galvanickej ochrany, ktorá by bola prijateľná pre horčík, preto hliník nanášaný studenou kinetickou depozíciou prináša potencionálne riešenie [6], [11]

Hlavnou motiváciou v leteckom priemysle počas niekoľko desaťročí bolo, aby boli materiály ľahšie a pevnejšie, aby sa znížila hmotnosť lietadla, čo by znamenalo zvýšenie celkového výkonu. K rozšírenému používaniu horčíka došlo počas Vietnamskej éry, aby

sa zvýšil výkon a znížila hmotnosť. Horčík je približne o 35 % ľahší ako hliník a má mimoriadnu tuhosť a tlmiacu schopnosť. Preto sa zliatiny horčíka používajú na výrobu mnohých komponentov ako sú prevodovky na vrtuľníkoch. Náklady Amerického ministerstva obrany na zmiernenie horčíkovej korózie vo svojich rôznych flotilách lietadiel sa pohybujú v cenovej kategórii niekoľko miliónov dolárov. Okrem problémov s galvanickou koróziou, vytvárajúcou sa na komponentoch z horčíka používaných v lietadlách, sú používané zliatiny horčíka navyše veľmi citlivé na povrchové poškodenia ku ktorým dochádza často pri náraze už počas výrobného procesu alebo pri opravách. Spomínané povrchové poškodenia napríklad v podobe škrabancov sa môžu stať prednostnými miestami pre vznik korózie. Na vyhodnotenie celistvosti nánosu, vytvoreného technológiou studenou kinetickou depozíciou a základného materiálu sa používa elektrónová a optická mikroskopia. Analyzuje sa napríklad hustota, mikroštruktúra a materiálové vlastnosti povlaku. [6], [11]



Obr. 9 Letecká časť vyrobená z horčíka pred (vľavo) a po aplikovaní studenej kinetickej depozície (vpravo) [11]

4.2 Automobilový priemysel

Stále viac je skúmaná aplikácia procesu studenej kinetickej depozície v automobilovom priemysle. Môže byť rozdelená na tri časti: spôsob výroby, 3D tlač komponentov, a ochranné povlaky. Proces studenej kinetickej depozície bol tiež skúmaný ako nová technológia výroby v rôznych priemyselných odvetviach. 3D tlač môže priniesť inovácie vo výrobných procesoch v automobilovom priemysle. Má vysokú potenciálnu hodnotu v studenej kinetickej depozícii, pretože je schopná rýchlo dosiahnuť hromadné nanášanie

s dobrými mechanickými vlastnosťami. Tým že môže hromadne vyprodukovať veľké množstvá hrubého nánosu s dobrými mechanickými vlastnosťami, je táto technológia schopná výrazne skrátiť výrobný čas vynechaním zbytočných procesov. Následkom toho je studená kinetická depozícia vhodnou ako metóda ochranného povlaku pre automobilové komponenty. V prípade procesu tepelného striekania, ktorý sa tiež používa na ochranné povlaky automobilu, tak oxidácia a fázová premena znemožňujú zachovanie pôvodných vlastností materiálu. Navyše, tepelne indukované napätie a zvyškové napätie sa u automobilov veľmi zhoršujú. Na základe toho umožňuje studená kinetická depozícia pokročilejšiu ochrannú vrstvu povlaku ako tepelné striekanie. [5]

V nasledujúcich podkapitolách bude problematika venovať pozornosť studenej kinetickej depozícii v automobilovom priemysle so zameraním na už predtým spomenutým trom využitiam a to 3D tlaču, spôsobe výroby a ochranným povlakom. [5]

4.2.1 3D tlač pre automobilový priemysel pomocou studenej kinetickej depozície

Ešte donedávna, sa rozširovalo využitie práškovej metalurgie vo výrobnom procese, na základe potreby výroby komponentov z krehkých materiálov a vývoja kovových práškov a procesov. Automobilové korporácie hnali dopredu vývoj výrobných procesov zameriavajúce sa na ľahšie komponenty. Avšak proces práškovej metalurgie a spekanie nie je vhodný na výrobu tepelne citlivého materiálu. Vo väčšine prípadov potrebujú komponenty, ktoré sú spekané dodatočne procesy spájania, čo výrobný proces komplikuje. Na druhej strane, je technológia 3D tlače veľmi inovatívna a vyrába komponenty pomocou postupného naniesenia materiálu po vrstvách, na základe informácií o priereze daného komponentu, ktoré sa získajú pomocou návrhového programu napríklad CAD (computer-aided design). Očakáva sa, že technológia 3D tlače prinesie pokrok, ktorý by mohol pomôcť malým spoločnostiam v automobilovom priemysle preraziť na trhu a prekonať bariéru, ktorá vyplýva z technologickej a finančnej medzery. Toto očakávanie môže byť dosiahnuteľné pomocou dvoch faktorov. [5]

Prvý dôležitý faktor je inovácia výrobkov. 3D tlač nemá takmer žiadne obmedzenia čo sa dizajnu výrobkov týka, takže je možné vyrábať rôzne zložité tvary. Druhý dôležitý faktor je zmena zásobovacieho reťazca. Pokiaľ ide o výrobu automobilových komponentov, 3D tlač nevyžaduje dodatočné opracovávanie alebo obrábanie, vyžaduje iba východzí

produkt s vybavením na aditívnu výrobu. Rovnako môžu byť kedykoľvek a kdekoľvek vyrobené automobilové komponenty nízkych až stredných rozmerov, ak je na danom určenom mieste vybavenie pre túto technológiu. [5]



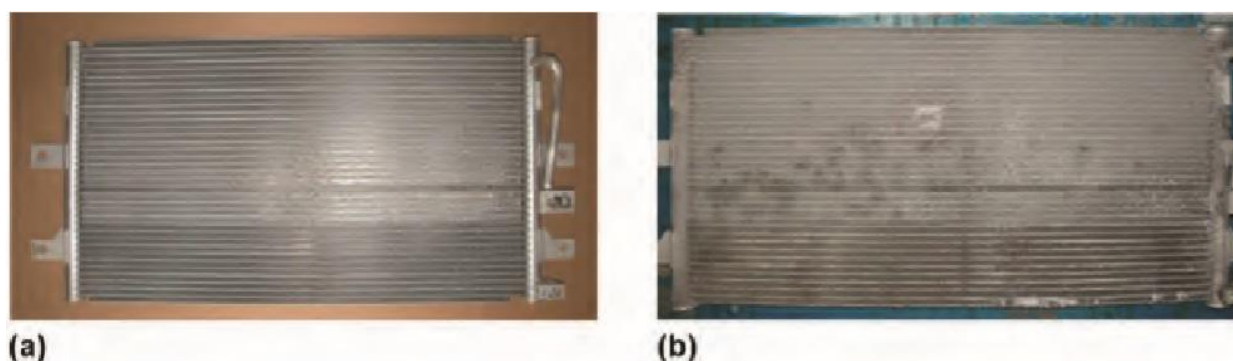
Obr. 10 Príklady 3D tlače využívajúci proces studenej kinetickej depozície : titánová tepelná trubica (vľavo) , komponenty do stroja z titánu (vpravo) [5]

4.2.2 Výroba produktov pre automobilový priemysel pomocou studenej kinetickej depozície

Proces studenej kinetickej depozície je vhodný na výrobu tepelne citlivých materiálov. Táto technológia sa postupne používa v automobilovom priemysle ako výrobná metóda pre výmenníky tepla, snímače krútiaceho momentu pre hriadeľ riadenia a elektricky vodivé cesty. Spomínané výmenníky sa zvyčajne vyrábajú zložitým výrobným procesom, ktorý zahŕňa striekanie, máčanie, tvrdé spájkovanie elektrickým oblúkom. V tomto procese je zinok nastriekaný na hliníkovú spájkovanú rúrku na zlepšenie odolnosti proti korózií pomocou použitia elektrického oblúka a rebrá na rozšírenie povrchovej plochy sú následne pokryté ponorným lakovaním. Potom sa tavidlo, ktoré podporuje väzbu roznesie na hliníkovú rúrku a rebro, aby sa uľahčila montáž pred spájkovaním natvrdo. [5]

Vedci skúmali možnosť použitia studenej kinetickej depozície ako výrobnéj metódy pre hliníkové výmenníky tepla. Zostavy hliníkových rúrkovitých rebier striekaných pomocou studenej kinetickej depozície vykazovali po procese tvrdého spájkovania dobrý stav spojenia. Nedošlo k žiadnej degradácii väzby v porovnaní s bežne vyrábaným hliníkom tepelným výmenníkom. Navyše, táto metóda predstavuje možnosť tvrdého spájkovania bez tavidla, pretože stav spojenia nebol ovplyvnený časťou tavidla vo vrstve povlaku.

Hliníkový výmenník tepla striekaný pomocou studenej kinetickej depozície tiež nevykazuje po 500 hodinovej koróznej skúške žiadny únik ako je znázornené na obrázku (Obr.11). [5]



Obr. 11 Vykonaná skúška tesnosti pri výrobe hliníkového výmenníka tepla pomocou studenej kinetickej depozície a) pred a po b) po 500 hodinách koróznej skúšky. [5]

Následná sekcia sa bude zaoberať hriadel'mi. Magnetostrikcia je indukcia významného namáhania materiálu pri vystavení magnetickému poľu. Vyvíjanie namáhania v magnetostrikčnom materiáli môže zmeniť svoj stav magnetizácie. V automobilovom priemysle sa magnetostrikčný materiál používa ako snímač krútiaceho momentu pre hriadeľ riadenia. Krútiaci moment v hriadeli vytvára napätie v magnetostrikčnom prstenci namontovanom na hriadeli a magnetizácia prstenca sa mení, čo poskytuje informácie o stave krútiaceho momentu v hriadeli riadenia. Vyrobiť snímače krútiaceho momentu s vysokou kvalitou je náročné, lebo vysoko magnetostrikčné materiály, ako napríklad vzácne zeminy, železo, nie sú dostatočne obrábané, aby malo využitie ako napríklad komponent do automobilov. Zatiaľ čo materiály s dobrými mechanickými vlastnosťami ako napríklad ocele, ktoré majú veľmi obmedzenú magnetostrikciu a nízku príľnavosť k hriadeli riadenia. Pomocou procesu studenej kinetickej depozície sa však vysoko magnetostrikčné kompozitné materiály vzácnych zemín a železa dajú úspešne nanášať na požadovaný substrát. Umožňuje to, aby nanesené povlaky slúžili ako súčasť snímačov krútiaceho momentu na hriadeľoch riadenia vyrobených z hliníka alebo ocele v automobile. [5]

4.2.3 Ochranné povlaky pre automobily využívajúce proces studenej kinetickej depozície

Vo všeobecnosti, väčšina automobilových komponentov sú počas prevádzky vystavené tvrdému a drsnému prostrediu. Používanie tepelného striekania na metódu výroby ochrannej vrstvy v automobilovom priemysle má značné nevýhody, ovplyvniť to môže oxidácia, fázová premena východzieho produktu, tepelne vyvolané zvyškové napätie. V porovnaní so studenou kinetickou depozíciou, ktorá dokáže poskytnúť vrstvy povlaku s lepšími mechanickými a chemickými vlastnosťami bez oxidácie alebo fázovej zmeny. Čo sa týka nanášania ochranných vrstiev na automobilové komponenty, vrstvy môžu byť rozdelené do dvoch kategórií: povlaky odolné proti korózií a povlaky odolné proti opotrebovaniu. [5]

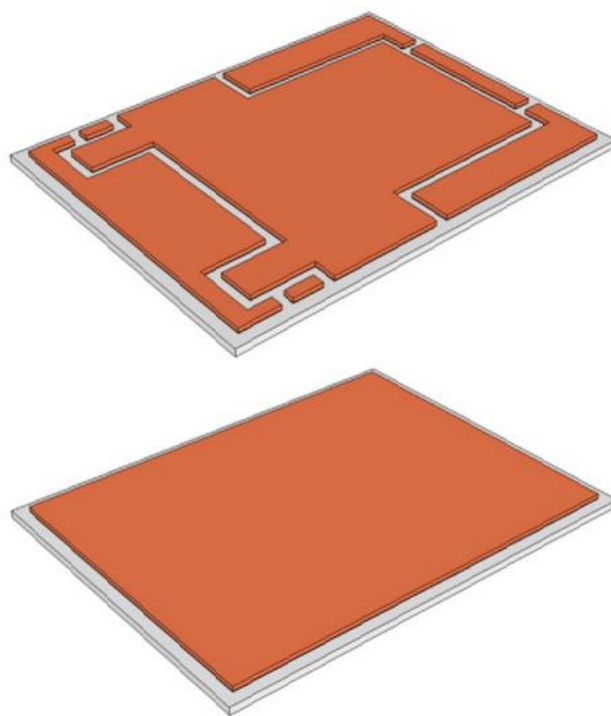
Nedávno, výrobcovia automobilov našli spôsoby, ako znížiť stratu trením a zvýšiť palivovú úspornosť. Jednou možnosťou je použitie ľahšieho materiálu ako napríklad zliatiny hliníka, a to nie len pre svoju malú hmotnosť ale aj pre recyklovateľnosť a spracovateľnosť. Avšak, nechránené zliatiny majú všeobecne vyšší sklon k opotrebovaniu a prostredie okolo motora je pre nich náročné. Ak sa majú použiť v motorových blokoch musia zlepšiť tribologické vlastnosti, čiže trenie, mazanie a opotrebovanie. Vyriešiť to môžu vložené vložky vyrobené napríklad z liatiny, ktoré boli do bloku motora vložené a umožnili, že povrchy boli odolné voči opotrebovaniu. Takéto vložky sa vyrábali vysokoteplotnými technikami ako tepelné striekanie. Zistilo sa, že tieto procesy sú nežiadúce, pretože tepelne vyvolané zvyškové napätie v hliníkovom bloku motora môžu spôsobiť praskliny. Studená kinetická depozícia nanáša častice v tuhom skupenstve pomocou kinetickej a nie tepelnej energie, preto je možné znížiť škodlivé účinky. Výhodou je taktiež zvýšenie pevnosti a tvrdosti väzby po nanosení. [5]

4.3 Metóda výroby dosiek plošných spojov pomocou aplikovania studenej kinetickej depozície

Výkonové elektrické moduly sa používajú v automobilovom priemysle pri spínaní zdrojov napájania, riadiacich jednotkách motora alebo prevodníkoch. Klasický elektronický substrát pre tieto moduly sa skladá z keramickej dosky, zvyčajne Al_2O_3 a obojstranného medeného povlaku, znázornené na obrázku (Obr.12). Hrúbka keramiky môže byť buď 630 μm alebo 380 μm , čo sa týka hrúbky medi tak je to okolo 300 μm . Jeden z najpopulárnejších výrobných technológií substrátov je od 80tych rokov proces

spájania pomocou medi, ktorý si vyžaduje vysokú rýchlosť výroby, vysokú teplotu a taktiež ekonomicky náročné technické investície. Táto technológia využíva eutektikum medzi meďou a kyslíkom pri teplote 1066°C aby sa vytvorila priama väzba s hliníkovým substrátom. Medená vrstva sa následne leptá a vytvoria sa vodivé plochy. Požiadavky na substráty pre aplikácie v mikroelektronike s nízkym výkonom zahŕňajú vysokú spoľahlivosť, tepelnú a elektrickú vodivosť a nízke náklady. Alternatívu metódu predstavuje studená kinetická depozícia, ktorá využíva kinetickú energiu na urýchlenie častíc, a preto je možné získať husté povlaky bez obsahu oxidu. [12]

Nasledujúca sekcia bude zameraná na štúdiu hustých, bezoxidových a dobre priľnavých hliníkovo-medených povlakov, ktoré boli nanosené pomocou studenej kinetickej depozície na elektricky izolačné Al_2O_3 substráty. [12]



Obr. 12 Ukážka substrátu striekaného pomocou studenej kinetickej depozície. [12]

Systém určený na striekanie studenou kinetickou depozíciou Kinetics 3000 s Lavalovou dýzou v spojení s vysokotlakovým dávkovačom prášku Praxair 1264 bol použitý na vytváranie povlakov. Použitým práškom bol hliník a meď a prevádzkové parametre boli teplota plynu 300°C a tlak plynu 28 barov, rýchlosť dýzy bola okolo 0,15 m/s a vzdialenosť striekania 30mm. Procesný a práškový plyn bol dusík. Vodivé plochy boli

urobené pomocou lasera. Minimálna šírka vodivých plôch mala 250 μm . Použité boli keramické dosky RUBALIT 708 S pri veľkosti 137 mm x 190 mm a hrúbke 630 μm s drsnosťou povrchu 0,6 μm . Substráty boli očistené acetónom a etanolom, na zabezpečenie čistého povrchu. Hliníkový povlak bol prispôsobený požadovanej minimálnej hrúbke, kvôli dobrej priľnavosti následne naneseného medeného povlaku a maximálnej požadovanej hrúbky krycej vrstvy. Pomáha to v čo najväčšej miere zvýšiť elektrickú vodivosť, keďže hliník má len 65 % vodivosti medi. Medený povlak bol nanesený s požadovanou hrúbkou 300 μm . Na meranie adhézneho sily sa vykonali ťahové skúšky hliníkového povlaku striekaného pomocou studenej kinetickéj depozície. Testovaný bol hliníkový povlak v stave postreku a po rekryštalizačnom žíhaní na dobu 10 hodín pri 300°C, rovnako ako aj hliníkovo-medený povlak. Všetky varianty povlaku pre ťahové skúšky sa nastriekali na hlinené doštičky a následne sa merala pórovitosť hliníkového povlaku. [12]

Zistila sa priemerná adhézna sila striekaného hliníka, ktorá sa po žíhaní zdvojnásobila. Zvýšenie adhézneho sily žíhaných hliníkových povlakov v porovnaní s nastriekanými bolo vysvetlené vylepšením priľnavosti častíc poslednej nastriekanej vrstvy. Nižšie sily pre hliníkovo-medený povlak môžu byť v dôsledku vnútorného napätia vytvoreného počas striekania. Nakoniec sa zistilo, že zmeraná pórovitosť hliníkovo medeného povlaku bola nižšia ako 1 %. Tiež sa zistilo, že stupeň oxidácie a obsah vody v povlaku je nižší ako v striekanom prášku. Podľa rastrovacieho transmisného elektrónového mikroskopu sa zistilo, že povlak vykazuje dobrú priľnavosť a nie je náznak epitaxiálneho rastu zŕn na substráte oxidu hlinitého. [12]

5 Charakteristika medi, zliatiny a príklady využitia v elektrotechnike

Meď je vynikajúcim vodičom elektriny, tepla a odoláva korózii. Elektrická vodivosť, tepelná vodivosť a odolnosť proti korózii sú jeho najvyužívanějšími vlastnosťami.[24]

Meď vykazuje odolnosť proti atmosférickej korózii a takisto sa jedná o dobre spájkovateľný materiál, či už na mätko alebo na tvrdo. Meď sa môže zväčšať, ale problém môže byť v prípade vysokej tepelnej vodivosti. Ďalšou výhodnou vlastnosťou medi je, že sa celkom jednoducho odplyňuje, kvôli čomu je meď použiteľným materiálom na výrobu elektro vákuových zariadení. Navyše disponuje dobrými mechanickými vlastnosťami, čiže je dobre opracovateľná, ale akonáhle dôjde k presiahnutiu teploty 300°C, dochádza k mäknutiu medi a strate mechanickej pevnosti. [25]

Vysoko vodivá meď obsahuje maximálne 0,04 % nečistôt, aj keď môže obsahovať asi 0,05 % kyslíka. Pri zahrievaní v redukčnom prostredí môže meď krehnúť a preto sa odporúča meď s potlačeným obsahom kyslíka. Meď nie je veľmi pevná čo sa týka procesu žihania, keď sa vyžaduje vyššia pevnosť, môže sa meď spracovávať za studena, čo výrazne zvyšuje napätie na úkor ťažnosti. [26]

Tepelná a elektrická vodivosť môže byť v negatívnom zmysle ovplyvnená jednotlivými prísadami a nečistotami, môže to mať za následok pokles týchto vlastností. Podľa jej chemickej čistoty teda závisí jej merná vodivosť. Okrem vodivosti majú prísady negatívny vplyv aj na pevnostné charakteristiky, tvrdosť a plastickú deformáciu medi. Na základe mechanických vlastností môže byť meď rozdelená na mätkú, ktorá je tvárna ale nepružná a jej medza pevnosti v ťahu sa pohybuje od 200 do 300 MPa. Ťažnosť je v rozmedzí od 10 do 35 %. Uplatnenie má ako vodič na vinutie elektrických strojov, inštalčný vodič alebo silové káble. Nasleduje meď polotvrdá, ktorá disponuje miernou pružnosťou a jej medza pevnosti v ťahu je od 290 do 370 MPa s ťažnosťou približne 3 %. Využitie nájde napríklad v sekundárnych sieťach. Nakoniec existuje meď tvrdá, ktorá má vysoké pruženie pričom medza pevnosti v ťahu sa pohybuje od 370 MPa s ťažnosťou v rozmedzí od 0,8 do 1,8 %. Využitie môže byť uplatnené napríklad pre vonkajšie vedenie, [25]

Zliatiny medi môžu byť rozdelené do niekoľko rôznych kategórií. Bronz je všeobecný výraz pre skupinu zliatin medi, v ktorom hlavným legujúcim prvkom nie je ani zinok ani nikel. Bronz pôvodne popisoval zliatiny s cínom ako jediným alebo hlavným legujúcim

prvkom. Hlavné prvky zliatiny bronzu sú meď a cín, bronz môže obsahovať vo svojom zložení aj zinok a olovo. Simulácia bronzov a ostatných zliatin medi, môže prebiehať v tzv. soľných komorách. [27]

Zliatiny známe ako kremíkový bronz a hliníkový bronz boli tak pomenované, pretože majú veľa podobností s cínovými bronzami, čo sa týka metalurgických vlastností. [26] Cínové bronzы sú veľmi dôležitou súčasťou zliatin medi, pretože samotný cín vykazuje lepšiu chemickú odolnosť medi ako aj jej pevnosť, tvrdosť, ale na druhej strane dochádza k zníženiu elektrickej a tepelnej vodivosti. [25]

Zliatiny medi obsahujúce zinok, obvykle v koncentrácii od 5 % do 40 %, sú známe ako mosadze. Ďalšie prvky sa do zliatin pridávajú na úpravu vlastností ako sú: pevnosť, odolnosť proti korózii a obrobitelnosť. Napríklad pevnosť mosadze sa zvyšuje so zvyšujúcim sa obsahom zinku, aj keď väčšieho zvýšenia pevnosti je možné dosiahnuť pridaním ďalších prvkov. [26] Zlepšenie korozivzdornosti sa dosahuje pridaním hliníka, oteruvzdornosti pomocou mangánu. [25] Mosadze sú najpočetnejšou a najbežnejšie používanou zlatinou medi, hlavne pre ich nízku cenu, ľahkú, lacnú výrobu, obrábanie a relatívnu odolnosť voči agresívnemu prostrediu. [27] Pokiaľ je ale vyžadovaná vyššia pevnosť v ťahu a odolnosť proti korózií, tak sa uprednostňuje využitie bronzu pred mosadzou. [25]

Zliatiny medi a hliníka sú kombináciou vysokej pevnosti s dobrou koróziou používané buď v kovanej alebo liatej forme, hlavne nikel hliník bronz. Antikorózna odolnosť hliníkových bronzov sa všeobecne zvyšuje, keď sa hliník a ďalšie legujúce prímеси zvyšujú. Preto je kombinácia niklu hliníka a bronzu vysoko odolná proti korózii ale je veľmi náchylná na eróznú koróziu v znečistenej morskej vode. [26]

V praxi sa meď využíva v rozličných odboroch ako napríklad v elektrotechnike, kde svoje uplatnenie nachádza prevažne v rozvodoch elektrickej energie a aj ako vodivé jadro v rôznych vodičoch a kábloch. Pri výrobe vodičov sa používa elektrovodná meď. Rovnako má uplatnenie aj pri výrobe dosiek plošných spojov. Zliatiny mede sa vo veľkej miere používajú pri výrobe kontaktov. Drôtové vodiče a káble s kaučukovou izoláciou vyrobené z medi sú pokryté cínovou vrstvou. Vďaka cínu, ktorý je nanesený na medi, sa zlepšuje odolnosť voči korózií spôsobenej sírou, ktorá sa nachádza ako prísada v kaučuku. [25]

6 Charakteristika hliníka, zliatiny a využitie

Hliník je tretím v najväčšej miere dostupným prvkom po kyslíku a kremíku. Výrobný priemysel hliníka je niečo vyše 100 rokov starý, ale nachádza svoje širšie uplatnenie vďaka svojej vysokej zvárateľnosti a vysokému pomeru pevnosti k hmotnosti. Neustály výskum a vývoj vedie k použitiu hliníka v takmer k nekonečnému rozsahu aplikácií. Medzi základné výhody hliníka patria: nízka hmotnosť, trvanlivosť, tvárnosť, zvárateľnosť, vodivosť čo ho robí obľúbeným oproti iným kovom. [28] Medzi najvýraznejšie vlastnosti hliníka patrí jeho univerzálnosť. Rozsah fyzikálnych a mechanických vlastností, ktoré je možné vyvinúť od vysoko čistého hliníka je rozsiahly, pretože vyše 300 zliatinových kompozícií je bežne uznávaných. [29]

Medzi ďalšie vlastnosti patrí veľmi malá hustota hliníka $2,64$ až $2,7 \text{ kg.dm}^{-3}$. Spomínaná nízka hmotnosť umožňuje hliník mechanické opracovanie. Každopádne, kvôli nízkej medze tečenia hliníka nastávajú deformácie. Hliník disponuje nízkou mechanickou pevnosťou, ktorá sa zlepšiť prímiesami ako sú meď, zinok, horčík, kremík, ale stane sa tak úkor chemickej odolnosti. Kvôli kvalitnej elektrickej vodivosti patrí hliník medzi najlepšie vodiče elektrického prúdu v poradí za meď, zlato a striebro. Spomínaná pevnosť a ďalšie mechanické vlastnosti sa vyvíjajú podľa čistoty hliníka. Keď dôjde k zvýšeniu sprievodných prvkov, pevnosť hliníku rastie. Počas nízkych teplôt nedochádza ku krehnutiu, ale medza pevnosti s ťažnosťou sa zvyšuje ako aj pružnosť. Keď hliník naopak dosiahne vysoké teploty, dochádza k strate pevnosti. Vysoko čistý hliník vykazuje odolnosť voči anorganickým kyselinám. [25] Samotná výroba hliníka pozostáva z rúd bauxitu, kryolitu a je veľmi drahá. V porovnaní s meďou má hliník lepšiu ľahkosť, mäkkosť, ohybnosť, ale malú pevnosť. Hliník je možné za tvarovať aj za tepla aj za studena, či už lisovaním alebo valcovaním. [30] Hliník je neferomagnetický materiál, vlastnosť ktorá je dôležitá v elektrickom a elektronickom priemysle. Nie je samozápalný, čo je dôležité pri aplikáciách, pri ktorých dochádza k manipulácii alebo vystaveniu horľavým a výbušným materiálom. Hliník nie je jedovatý a bežne sa používa v nádobách na potraviny a nápoje. [29]

Na druhej strane, pri porovnaní vlastností hliníka s takou oceľou by sa zistilo, že koeficient tepelnej rozťažnosti je približne dvojnásobný ako koeficient ocele, čo môže znamenať neprijateľné ohnutie a deformáciu pri zvarení. [31]

Kompozitný materiál je v podstate kombinácia dvoch alebo viacerých materiálov, ktorá jednotlivo. Kompozity sú kategorizované aj z hľadiska materiálu matrice. Rozlišujú sa na

kompozity s kovovou maticou, kompozity s keramickou maticou a kompozity s polymérnou maticou. Kompozity s kovovou maticou majú oproti iným výhodu kvôli svojej schopnosti odolávať vysokým teplotám, vlhkosti, tepelnej a elektrickej vodivosti a zlepšeným mechanickým vlastnostiam. [32] Kompozity s kovovou maticou na báze hliníka sú veľmi žiadané v leteckom, automobilovom, obrannom priemysle, kvôli vysokej pevnosti, ľahkosti a kvalitným tribologickým vlastnostiam. [33] Výroba týchto kompozitov na báze hliníka sa vykonáva pomocou rôznych metód ako je lisovanie, prášková metalurgia, aditívna výroba atď. [34]

Hliníkové zliatiny môžeme rozdeliť do dvoch hlavných kategórií a to zliatiny určené na odlievanie a tvárnené zliatiny. Veľa zliatin reaguje na tepelné spracovanie na základe fázy rozpustnosti. Tieto spracovania zahŕňajú tepelné spracovanie pomocou roztoku, kalenie, vytvrdzovanie, starnutie a zrážanie. U zliatin na odlievanie a aj tvárnenie sa tieto zliatiny označujú ako tepelne spracovateľné. Tieto zliatiny sú klasifikované do rôznych kategórií v závislosti od legujúcich prvkov. Podľa obchodného združenia Aluminium Association sa tvárnené zliatiny hliníka označujú štvormiestnymi znakmi ako Xxxx (1xxx, 2xxx..9xxx), kde prvá číslica predstavuje hlavnú zložku legovania, druhá predstavuje variáciu pôvodnej zliatiny. Tretia a štvrtá číslica predstavuje variáciu jednotlivých zliatin. Napríklad zliatiny s označením 3xxx majú mangán ako hlavný legujúci prvok, zliatiny 4xxx, majú hlavný legujúci prvok kremík a 5xxx majú horčík. Na druhej strane sú zliatiny hliníka na odlievanie označované ako Xxx.x (1xx.x,2xx.x..9xx.x). Prvá číslica označuje základnú zložku legovania. Druhá a tretia číslica predstavuje konkrétne určenie zliatiny. Desatinná hodnota .0 označuje odliatky a desatinné čísla .1 .2 sa týkajú zloženia ingotu. Variácie sú označené predchádzajúcim písmenom (A,B,C). [28],[29]

Medzi prvú známu zliatinu sa môže považovať kombinácia hliníka a kremíka nazývaná aj ako siluminy. Táto zliatina je jedna z najznámejších a najrozšírenejších a používa sa na odlievanie. Zahŕňa približne 12 % kremíka s možnosťou odlievania jednoduchých a aj zložitých častí, pretože nehrozí riziko vzniku trhlín. Výhodou je, že vzniknuté odliatky majú nízku hmotnosť, čo znamená jednoduchú opracovateľnosť, zvárateľnosť a dobrú odolnosť proti korózii. Využitie vie uplatniť v elektrotechnike, kde slúži na odlievanie rôznych konštrukčných dielov vrátane kostier elektrických strojov, skrine elektromagnetických a meracích prístrojov alebo kryty káblových spojok. [25], [30]

Kombinácia jedinečných základných vlastností ako sú nízka hustota, vysoká tekutosť, relatívna nízka zrážanlivosť, vysoká pevnosť, tepelná odolnosť a odolnosť proti opotrebovaniu, zaistuje vysoký dopyt po silumínoch. [35]

Následné kombinácie predstavujú zliatinu hliníka s niklom, ktoré slúžia pre vysoké teploty v polykomponentných systémoch. Nikel s obsahom 2,5 % dokáže zlepšiť mechanické vlastnosti pri obyčajných a aj vyšších teplotách, rovnako sa podieľa na lepšej odolnosti proti korózii. Ďalej sa rozoznávajú napríklad zliatiny hliníka so zinkom, ktoré disponujú kvalitnou pevnosťou alebo hliníka s horčíkom, ktorý skvalitňuje okolnosti pre tepelné spracovanie a zvyšuje odolnosť proti korózii. Táto kombinácia hliníka s horčíkom sa býva zvyčajne doplnená s mangánom, ktorý zlepšuje spevnenie. [25]

Dural je hliníková zliatina, ktorá zahŕňa prvky ako sú meď s obsahom 4 %, nasledovne horčík a mangán oba obsahujú 0,6 %. Zliatina dural je považovaná ako najstaršie vytvrdzovaná zliatina vynájdená v roku 1906. [36] Dural sa používal na konštrukciu lietadla, trup lietadla, rotor. Má vodivý materiál na teplo a elektriku. [37]

Dural je celkovo ľahký materiál, ktorý má hustotu $2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vyrábané konštrukčné časti z duralu sa môžu spájať mechanicky a to pomocou nitovania a šróbovania. Jedná sa o konštrukčný typ zliatiny, čiže svoj účel vie nájsť v už predtým spomínanom leteckom priemysle. Medza pevnosti v ťahu duralu sa pohybuje v rozmedzí od 180 do 240 MPa a pomocou vytvrdenia sa pevnosť v ťahu dokáže dokonca zvýšiť ma hranicu od 360 do 410 MPa. [30] Podobná alternatíva duralu je superdural, odlišuje sa tým že obsahuje väčšie množstvo horčíka. Keď sa superdural vytvrdí dokáže prekonať hranicu medze pevnosti v ťahu až nad 550 MPa. [25] [30]

Vo všeobecnosti sa dajú rozlíšiť tri typy hliníkových zliatin, ktoré sa hodia na elektrovodné účel a to zliatiny Aldrey, Jereal a Cond-al. Zliatina Aldrey sa obsahuje okrem hliníka aj horčík, kremík a železo. Pomocou tepelného spracovania vytvrdzovaním je možné z tejto zliatiny vyrábať drôty slúžiace na vedenie vysokého napätia, ktoré majú medzu pevnosti 360 MPa. Zliatiny Jareal má takú isté zloženie ako Aldrey, ale obsahuje ešte zinok. Použitie tejto zliatiny môže byť aplikované na vodičoch vonkajšieho vedenia a aj na miestach pri teplotách nepresahujúcich 80° , pretože rekryštalizácia môže spôsobiť poškodenie mechanických vlastností. Posledná elektrovodná zliatina hliníka Cond-al obsahuje zahrňuje okrem samotného hliníka aj horčík a železo. Aplikácie tejto zliatiny je vhodná na vinutie točivých elektrických strojov, transformátorov. [25],[30]

Celkovo sa hliník vo veľkej miere používa v budovách, mostoch vežiach, skladovacích nádržiach aj v automobilovom, leteckom priemysle. Pretože plechy zo stavebnej ocele sú zvyčajne lacnejšie, čo sa týka počiatočných nákladov, hliník sa používa keď sa technické výhody, konštrukčné prvky, nízka hmotnosť, jedinečné architektonické návrhy a odolnosť voči korózii. Hliník sa bežne používa aj v námorníctve vrátane trupov, paluby, okná atď. [29] Elektrotechnický priemysel tiež patrí do tejto skupiny, okrem slúženia ako vodič, je hliník užitočný na produkciu rebrovaných chladičov polovodičových prvkov, na výrobu jednotlivých krytov a odlišných nosných častí prístrojov. [30] Problémom môže byť, keď hliníkový a medený vodič dôjdu do styku, dochádza za vlhka ku vzniku galvanickému článku, ktorý zvyšuje elektrochemickú koróziu. V danom nedokonalom spoji sa začne vytvárať teplo. Možnosťou ako tomu zabrániť je použitie Cupal podložky medzi hliník a meď. [25], [30]

Vlastnosť	měď	hliník
Relativní atomová hmotnost	63,546	26,981
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	8890	2699
Elektronová konfigurace	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	1084.87	660,452
Teplota varu [$^{\circ}\text{C}$]	2595	2520
Molární entalpie tání [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]	13437	10800
Molární entalpie varu [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]	338000	329500
Struktura - mřížka	KPC	KPC
Měrné teplo (20°C) [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,3855	0,900
Součinitel tepelné roztažnosti (20°C) [K^{-1}]	$16,3\cdot 10^{-6}$	$23,8\cdot 10^{-6}$
Tepelná vodivost (25°C) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	394	247
Rezistivita (měrný elektrický odpor) [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	1,72	2,655
Měrná elektrická vodivost [$\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$]	58	37,6
Teplotní součinitel rezistance [K^{-1}]	0,00383	0,0043

Obr. 13 Zoznam vlastností medi a hliníka [25]

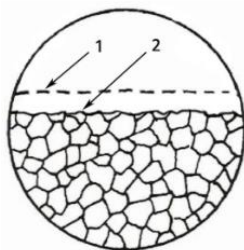
7 Korózia

V prípade nekovových materiálov sa výrazom korózia vždy vyznačuje zhoršením ich vlastností na základe chemických príčin. Pojem korózia kovov zahŕňa všetky interakcie kovov alebo zliatiny s okolitým prostredím, bez ohľadu na to, či úmyselné a prospešné alebo náhodné a škodlivé. Na druhej strane, korózia bola označovaná ako nežiadúce poškodenie kovu alebo zliatiny, čiže interakcia kovu s prostredím, ktoré nepriaznivo ovplyvňuje tie vlastnosti kovu, ktoré sa majú zachovať. Akýkoľvek zásadný postoj k javom korózie musí zahŕňať zváženie štrukturálnych vlastností kovu, povahy životného prostredia a reakcií, ktoré sa vyskytujú na rozhraní kovu s prostredím. Pri kovoch, sú dôležité faktory: zloženie, podrobná atómová štruktúra, ťahové, tlakové a cyklické napätie atď. Faktory pochádzajúce zo životného prostredia pri reakcií kovov zahŕňajú chemickú podstatu, koncentrácie reaktívnych zložiek a škodlivých nečistôt, tlak, teplota, rýchlosť. Rozhranie medzi kovom a prostredím môže záležať od kinetiky oxidácie a rozpúšťania kovov, kinetiky redukcie zložiek v roztoku, povaha a umiestnenie produktov korózie. [13]

7.1 Druhy korózneho napadnutia

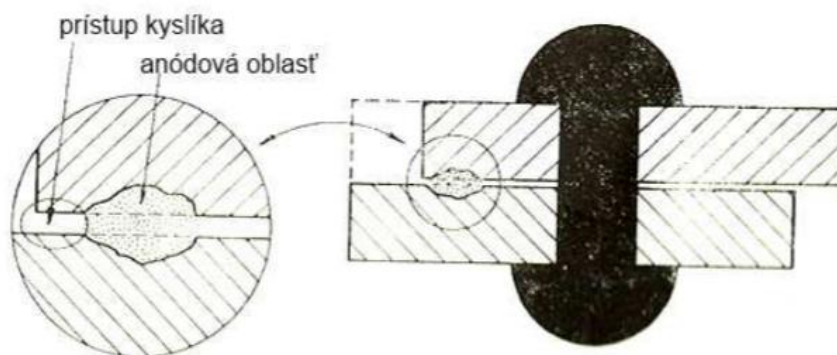
Korózia môže pôsobiť na kov rôznymi spôsobmi, ktoré závisia od jeho povahy a presných prevládajúcich podmienok prostredia a rozsiahle kvalifikácie rôznych foriem korózie. [13]

Pre rovnomernú koróziu (Obr. 14) je charakteristické korózne napadnutie prebiehajúce rovnomerne po celej ploche povrchu alebo na veľkej časti celkovej plochy. Tento typ korózie sa však dá pomerne ľahko predvídať, keďže je možné zaznamenať stratu hmotnosti hrúbky povrchu a zmenu rozmeru vzorky. V mnohých prípadoch je to nežiadúce iba z hľadiska vzhľadu. Zlyhanie ochranných povlakov na konštrukciách často vedie k tejto forme korózie. Zliatiny odolné voči korózii a nehrdzavejúce ocele môžu byť v koróznom prostredí zakalené, stratiť lesk alebo oxidované. Korózia povrchu môže znamenať rozklad ochranného povlaku a malo by dôjsť k podrobnejšiemu preskúmaniu, či nedochádza k pokročilejšiemu napadnutiu. [13], [14]



Obr. 14 Rovnomerná korózia, 1- pôvodný povrch, 2- povrch po napadnutí [44],[45], [46]

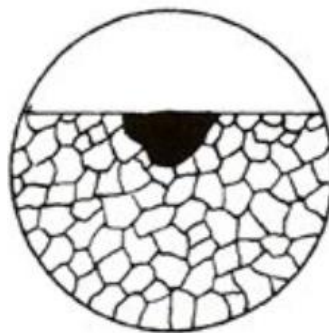
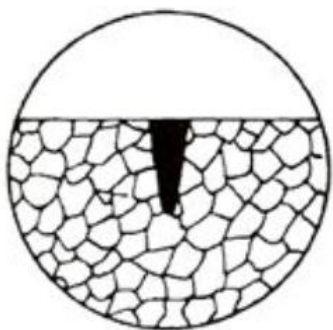
Štrbinová korózia (Obr. 15) je lokálna forma korózie zvyčajne spojená v dôsledku stagnácie. Zvyčajne sa vyskytuje v štrbinách, ktoré sa vytvárajú pod tesneniami, podložkami a izolačným materiálom, kĺbovými spojmi, svorkami, závitmi. Pretože preniknutie kyslíka do štrbiny je obmedzené, má medzi štrbinou a vonkajším povrchom tendenciu vytvárať diferenčný kyslíkový článok. Reakciu katódy na zníženie kyslíka nie je možné udržať v oblasti štrbiny, čo jej dáva anódový charakter v koncentračnom článku. Táto anodická nerovnováha môže viesť k vytvoreniu vysoko korozívnych podmienok v štrbine, čo vedie k ďalšej korózii kovov. Určité oblasti kovového povrchu korodujú rýchlejšie ako iné v dôsledku rôznorodosti v kovu, prostredia alebo v geometrii zloženia ako celku. [13],[14]



Obr.15 Štrbinová korózia [47], [48]

Jamková (Obr. 16) alebo bodová korózia (Obr. 17) je lokálna forma korózie, pri ktorej sa v materiáli vytvárajú dutiny a diery. Sú veľmi podobné a rozdiel je možné zaznamenať len v rozmeroch. Ak je hĺbka menšia než šírka tak hovoríme o bodovej korózii a ak je hĺbka väčšia než šírka hovoríme o jamkovej korózii. [44] Vytvorenie týchto dutín alebo jamiek na kovových povrchoch spočíva v tom, že sú vystavené pôsobeniu vodného

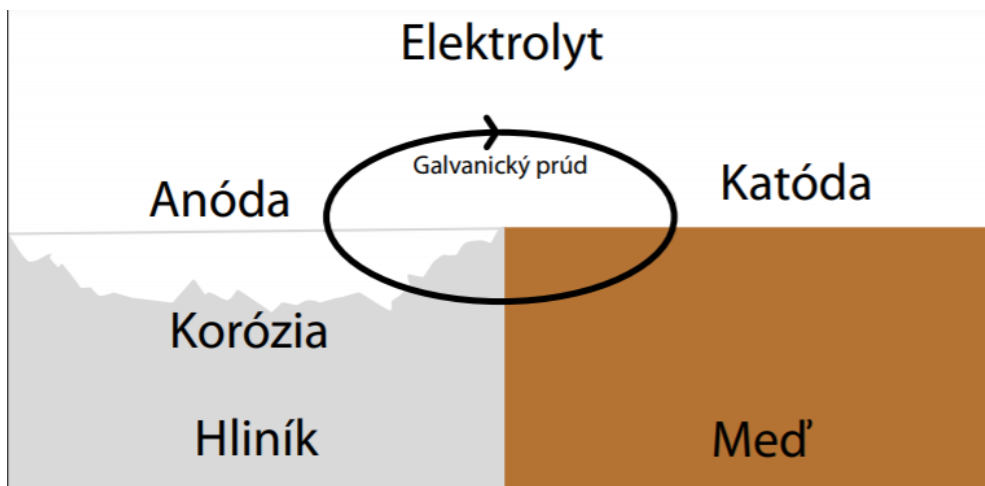
roztoku obsahujúceho agresívne anióny ako sú chlorid a síran. Jedná sa o jednu z najzákernejších foriem korózie, nebezpečnejšia ako je rovnomerné poškodenie koróziou, pretože je náročnejšie ju zistiť a predpovedať. Výrobky s koróziou často zakrývajú tieto jamky, ktoré s minimálnymi celkovými stratami kovu môžu viesť k poruche celého systému. Táto korózia môže mať rôzne tvary. V niektorých prípadoch majú ploché steny, ktoré odhaľujú kryštalickú štruktúru kovu alebo môžu mať úplne nepravidelný tvar. Ku koróziám dochádza keď jednotlivé oblasti materiálu podliehajú rýchlemu napadnutiu, zatiaľ čo väčšina vedľajšieho povrchu ostáva prakticky nedotknutá. [14],[15]



Obr. 16 Bodová korózia [44],[45], [46] Obr.17 Jamková korózia [44],[45], [46]

Široké použitie rôznych kovových kombinácií v mnohých priemyselných aplikáciách najmä v elektrických zariadeniach, budovách a lietadlách, urobilo z galvanickej korózie hliníka a zliatin hliníka v okolitom prostredí zásadný problém v koróznom inžinierstve. Je známe, že ku galvanickej korózii (Obr. 18) dochádza vždy, keď sa rôzne kovy dostanú do kontaktu, pretože galvanická korózia je poháňaná rozdielom potenciálov elektród medzi dvoma kovmi a každý z týchto kovov pôsobí buď ako anóda alebo katóda. [16] Takéto poškodenie sa môže vyskytnúť aj medzi kovmi a zliatinami a inými vodivými materiálmi ako sú uhlík a grafit. Elektrochemický korózný článok je vytvorený z dôvodu rozdielov v koróznom potenciáli odlišných materiálov. Materiál s vyšším koróznym potenciálom sa potom stane katódou korózneho článku, zatiaľ čo materiál s menším je pohltený anódovým rozpúšťaním. Pomer plochy dvoch odlišných materiálov je

mimoriadne dôležitý. Napríklad, ak by sa na oceľové dosky použili hliníkové nity, tieto nity by extrémne rýchlo korodovali. [14]



Obr. 18 Schéma galvanickej korózie

Selektívna korózia môže byť definovaná ako prednostné odstránenie jedného prvku zo zliatiny koróznymi procesmi. Bežným príkladom je odzinkovanie mosadze, pri ktorej sa vytvára pórovitá štruktúra medi. Mosadz sa rozpúšťa so zinkom, ktorý zostáva v roztoku a meďou vylučujúcou sa z roztoku. Ďalším príkladom je grafitizácia šedej zliatiny, pri ktorej po prednostnom rozpustení železa zostáva krehký grafitový základ. [13,14]

Erózna korózia je komplexný jav, ktorý spočíva v interakcii medzi pevnými časticami, koróznou kvapalinou a cieľným materiálom. Dochádza tu súčasne k mechanickej erózii a elektrochemickej korózii. [17] Erózia závisí od niekoľkých parametrov, ako sú napríklad prevádzkové dôvody, vlastností kalu a materiálu. Prítomnosť korózie a spolupôsobenie korózie a erózie tieto javy ešte viac komplikujú. [18] Tento jav je bežným problémom v mnohých odvetviach vrátane ropy a zemného plynu, chemického spracovania, baníctva, hydraulických zariadení, extrakčnej metalurgie a podobne. Vyskytuje sa to v komponentoch ako sú rúry, potrubia, čerpadlá, ventily a miešadlá.[19] Táto forma poškodenia je charakteristická vďaka drážkam, zaobleným hranám a vlnám, na povrchu, ktoré zvyčajne naznačujú smerovosť. Zrážky a dutiny sú špeciálne formy tejto korózie. V prvom prípade spôsobujú poškodenie pohyblivé kvapalné častice, zatiaľ čo nestabilné bubliny spôsobujú povrchové poškodenie v druhom prípade. Do tejto kategórie patrí aj korózia trením, ktorá sa vzťahuje na korózne poškodenie drsnosti

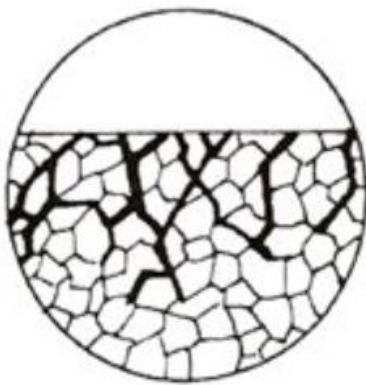
kontaktných povrchov. Toto poškodenie je spôsobené pri záťaži a v prítomnosti opakovaného pohybu na povrchu, napríklad vibráciami. Jamky, drážky a zvyšky oxidu charakterizujú toto poškodenie, ktoré sa zvyčajne nachádza v strojoch, guľôčkových a valčekových ložiskách. Kontaktné plochy vystavené vibráciám počas prepravy sú vystavené riziku korózie trením. [14]

Nakonci 20teho storočia boli identifikované prvé praskliny nazývané ako korózne praskanie pod napätím (Obr. 19). [20] Keďže sa jedná o lokálnu formu korózie, môže dôjsť k rôznym formám praskania a faktory, ktoré k tomu prispievajú sa dajú rozdeliť na už predtým spomínané korózne praskanie pod napätím, korózna únava a vodíkové krehnutie. Korózne praskanie pod napätím je praskanie vyvolané kombinovaným vplyvom ťahového napätia a korozívneho média. Zvyčajne ostáva väčšina povrchu nedotknutá, ale jemné praskliny prenikajú až do materiálu. V mikroštruktúre môžu mať medzikryštalickú alebo transkryštalickú morfológiu. Z makroskopického hľadiska je korózne praskanie pod napätím považované ako katastrofická forma korózie, pretože detekcia takýchto jemných trhlín je veľmi zložitá a nedá sa ľahko predpovedať. Vodíkové skrehnutie sa týka skrehnutia a následného zvýšenia rizika praskania v dôsledku absorpcie vodíka do štruktúry materiálu. Katódová redukcia vody za vzniku vodíka je potenciálnym zdrojom krehnutia.[14] Viacnásobné korózne praskania v konštrukciách ako je trup lietadla, železničná trať ocelový most, ropovod a plynovod sú veľmi nebezpečné a tvoria hrozbu v dôsledku drsných pracovných podmienok. [21] Korózia ocele je hlavnou príčinou zhoršenia kvality betónových konštrukcií. Keď sa na ocelobetónových rozhraniach začne tvoriť korózia, začne sa vyvolávať tlak na materiál, ktorý spôsobuje ťahové napätie v betóne. Pri hromadení korózie sa zvyšuje ťahové napätie a nakoniec presahuje pevnosť betónu v ťahu a dochádza k praskaniu. [22]



Obr. 19 Korózne praskanie pod napätím [44]

Pri medzikryštalickej korózii (Obr. 20), mikroštruktúry kovov a zliatin tvoria zrnitosť a sú oddelené hranicami zrn. Medzikryštalicá korózia je lokálne napadnutie pozdĺž hraníc zrn alebo bezprostredne k hraniciam zrn, zatiaľ čo väčšina zrn zostáva do značnej miery nedotknutá. Tento typ korózie je zvyčajne spojená s účinkami chemického oddelenia alebo špeciálnymi fázami vyvráňanými na hraniciach zrn. Takéto zrážanie môže vytvárať zóny so zníženou odolnosťou proti korózii v bezprostrednej blízkosti. Klasickým príkladom je senzibilizácia nehrdzavejúcich ocelí. Zrážanie na hranici zrn bohaté na chróm vedie k úbytku chrómu bezprostredne susediacim s týmito zrazeninami, čo spôsobuje, že tieto oblasti sú v určitých elektrolytoch náchylné na korózne napadnutie.[14] Medzikryštalicá korózia sa často pozoruje na zliatinách hliníka horčíku a kremíka (Al-Mg-Si) obsahujúce med'. [23]



Obr. 20 Medzikryštalicá korózia [44],[45], [46]

7.2 Korózne správanie medi, hliníka a ich zliatin v morskej vode

V dôsledku toho, že mosadz spolu s bronzom sú najstaršie zliatiny používané v námorníctve, korózia týchto zliatin sa najviac študovala a je lepšie pochopiteľná ako korózia ostatných zliatin. Zliatiny medi patria do skupiny, ktoré majú dostatočnú odolnosť proti korózii v morskej vode. Avšak, za určitých podmienok dochádza ku korózii, napríklad v rýchlo tečúcej morskej vode alebo pri vystavení niektorým znečisťujúcim látkam, ktoré existujú vo vode, tiež vtedy, keď nie sú splnené požiadavky chemického zloženia zliatiny. Zliatiny medi sú zvyčajne náchylné na selektívnu koróziu

ako je odzinkovanie, alebo korózne praskanie pod napätím, eróznou koróziou, jamkovú koróziu, galvanickú koróziu, ktorá sa vyskytuje pri kontakte s ušľachtilou zliatinou. Zliatiny hliníka nemajú vysokú odolnosť proti chloridom, ktoré obsahuje morská voda. Niektoré zliatiny hliníka po zlom tepelnom spracovaní, napríklad zváraním, úplne stratia odolnosť proti korózii. Pri využití zliatin hliníka v morskej vode sa vyžaduje ochranný povlak a katódová ochrana. Zliatiny hliníka podliehajú jamkovej korózii alebo galvanickej korózii, ktorá vzniká podobne ako med' pri kontakte s ušľachtilejšími zliatinami. [38]

Boli vykonané rôzne štúdie korózneho správania v morskej vode napríklad pre kompozity s kovovou maticou zo zliatiny hliníka s prídavkom kremíka vystužené pomocou častíc karbidu kremičitého. Uskutočňovali sa prevažne korózne a elektrochemické testy a následne sa mikroštruktúra skúmala pomocou metalografickej mikroskopie. Boli skúmané elektrochemické vlastnosti, ako napríklad odolnosť proti jamkovej korózii a polarizačný odpor. Tvorba vzniknutých jamiek sa pozorovala pomocou optickej mikroskopie a korózna vrstva bola charakterizovaná röntgenovou fotoelektrónovou spektroskopiou. V morskej vode kompozity s kovovou maticou utrpeli lokálnu formu korózie, kde sú prítomné intermetalické zlúčeniny hliník-med'. Tvorba jamiek formou korózie bola zvýšená obohatením medi v povrchovej vrstve. [39]

Cieľom nasledujúcej štúdie bolo preskúmať účinky hlbokomorského prostredia na koróziu zliatin hliníka, medi a aj železa. Zvýšením tlaku z 1 na 300 sa zvýšila korózia medi, mosadze a zinku. Predpokladalo sa, že zvýšenie rýchlosti korózie tlakom bolo spôsobené zrýchlením katódovej redukcie medi a anodickým zrýchlením procesu mosadznej zliatiny a zinku. Rozdielna náchylnosť k jamkovej korózii u niektorých zliatin hliníka súvisela so zložením a morfológiou oxidačnej vrstvy. Ďalej sa zistilo pre niektoré zliatiny hliníka, že mechanizmus tvorby oxidov na povrchu kovu sa mení v závislosti od hydrostatického tlaku použitého na vzorke. [40] Používanie hliníka v morskej vode je významné kvôli svojej nízkej hmotnosti. Pokiaľ sa dokáže zabrániť galvanickému kontaktu s ušľachtilejšími kovmi, väčšina zliatin hliníka ako napríklad hliník-mangán, hliník-horčík, hliník-horčík-kremík, sú odolné voči korózii v morskej vode. [38]

8 Vodivosť materiálov

Základné rozdelenie vodivých materiálov používaných v elektrotechnike môže byť charakterizované do niekoľkých skupín. Zahrňuje to predovšetkým pevné látky, čiže kovy a ich zliatiny, ale aj kvapaliny a plyny. Medzi najdôležitejšie vlastnosti vodivých materiálov patria elektrické ako napríklad elektrická vodivosť, elektrický odpor, tepelné ako napríklad teplotná vodivosť, teplotná rozťažnosť, magnetické vlastnosti, ktoré sa určia pomocou relatívnej permeability, alebo mechanické vlastnosti. Elektrický odpor patrí medzi najdôležitejšie vlastnosti vodivých materiálov. Značíme ho R a jeho základná jednotka je Ω . Je závislý na teplote a je ho možné vypočítať pomocou merného elektrického odporu, dĺžky a prierezu odporu. Elektrický odpor, ktorý je závislý na teplote, udáva pomocou teplotného súčiniteľa odporu zmenu v počte ohmov daného odporu pri zvyšujúcej sa teplote. Obrátená hodnota elektrického odporu je elektrická vodivosť, ktorá sa značí písmenom G a základná jednotka je S . [25], [30],[41]

Elektrická vodivosť môže byť elektrónová, kde sa pomocou pohybu elektrónov vytvára elektrický prúd, deje sa tak pri kovoch a ich zliatinách alebo iónová, kde je prechod elektrického prúdu sprevádzaný prechodom iónov látky. Do tejto skupiny sa môžu zaradiť elektrolyty. Vodivé materiály sa rozdeľujú podľa využitia na dve časti. Materiály, ktoré majú veľkú elektrickú vodivosť, využitie nájdu ako vodiče pre vinutia elektrických strojov. Príkladom výbornej elektrickej vodivosti je malá hodnota rezistivity, ktorou disponuje ako najmenšou striebro. Napriek tomu sa vodiče zhotovujú najpravdepodobnejšie z hliníka alebo medi. Do druhej kategórie sa zaradujú materiály s veľkým elektrickým odporom, ktoré sa využívajú napríklad na meracie prístroje alebo vlákna žiaroviek. Označujú sa ako odporové materiály, medzi ktoré patria hlavne zliatiny medi, konkrétne manganin a konstantan. Pre túto kategóriu je dôležitá vysoká rezistivita, nízky teplotný súčiniteľ elektrického odporu a dobrá pevnosť vyžadujúca pri zvýšených teplotách. [25], [41]

Pri termoelektrických vlastnostiach je podstatný termoelektrický článok, ktorý pri dotyku koncových bodov dvoch kovových vodičov vytvára v obvode termoelektrické napätie. Miesta ich dotyku sú udržiavané pri rôznych teplotách. Zvyčajne sa termoelektrické články využívajú k meraniu teploty a najvhodnejšou kombináciou je železo alebo meď s konstantanom. Teplotná rozťažnosť sa využíva k meraniu teplôt a so zmenou teploty sa

mení dĺžka vodiča. Dôležitý je teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti, ktorý určuje, o koľko metrov sa zmení dĺžka materiálu pri zvýšení teploty. Jednotka teplotnej rozťažnosti je K (kelvin). Základ pre dobrú teplotnú vodivosť je prítomnosť veľkého množstva voľných elektrónov v kove. Určuje sa podľa súčiniteľa teplotnej vodivosti, ktorý hodnotí množstvo teplota, ktoré prejde za 1 sekundu kockou s hranou 1 meter medzi dvomi protiľahlými stenami, kde je teplotný rozdiel 1 kelvin. Základnou jednotkou je $W.m^{-1}K^{-1}$ (watt na meter kelvin). Najväčšiu tepelnú vodivosť majú kovy s veľkým množstvom elektrickej vodivosti, a vrcholí je striebro za ktorým nasleduje meď, zlato a hliník. [30] [41]

Mechanické vlastnosti kovov sa najčastejšie určujú skúškou ťahom a to konkrétne medza pevnosti, pružnosti, medza sklzu a ťažnosť. Medza pevnosti je najväčšie mechanické napätie, určené pomerom najväčšej sily, ktorá bola dosiahnutá ku prierezu skúšobnej vzorky. Medza pružnosti je mechanické napätie, ktoré nezanechá žiadnu deformáciu, keď je vzorka úplne odľahčená. Určí sa ako mechanické napätie, ktoré sa prejavuje trvalým predĺžením pôvodnej dĺžky. Medza sklzu je považovaná za najmenšie mechanické napätie a spôsobuje nárast deformácie. Stanovené napätie spôsobí predĺženie pôvodnej veľkosti. Ťažnosť určuje trvalé predĺženie vzorky, ktorá je namáhaná ťahom. Označuje sa v percentách pôvodnej dĺžky. Keď ťažnosť materiálu dosiahne menej ako 5 % jedná sa o krehký materiál, v opačnom prípade keď presiahne hranicu 5 % je to húževnatý materiál. [30],[41]

Magnetické vlastnosti sú určené pomocou relatívnej permeability materiálu. Rozlišuje sa niekoľko kategórií a to diamagnetické materiály, ktoré majú hodnotu relatívnej permeability menšiu ako 1, paramagnetické majú hodnotu vyššiu ako 1 a feromagnetické majú hodnotu oveľa väčšiu ako 1. Napríklad taký hliník je paramagnetický a meď je diamagnetická. [30]

9 Experimentálna časť

Z hľadiska zamerania Ústavu elektrotechnologie bolo potrebné zistiť meranie elektrických veličín pri vzorkách vytvorených technológiou studenej kinetickej depozície pri rôznom koróznom napadnutí. V experimentálnej časti sa pomocou zvolených vzoriek bude porovnávať vnútorný a povrchový odpor pred a po korózii, kde sa určí percentuálny rozdiel. Na základe toho sa pomocou elektrónového mikroskopu určí rozsah korózných splođín. Nasledovať bude predstavenie jednoduchého teoretického návrhu nožnej aplikácie pomocou využitia studenej kinetickej depozície.

9.1 Výroba vzoriek

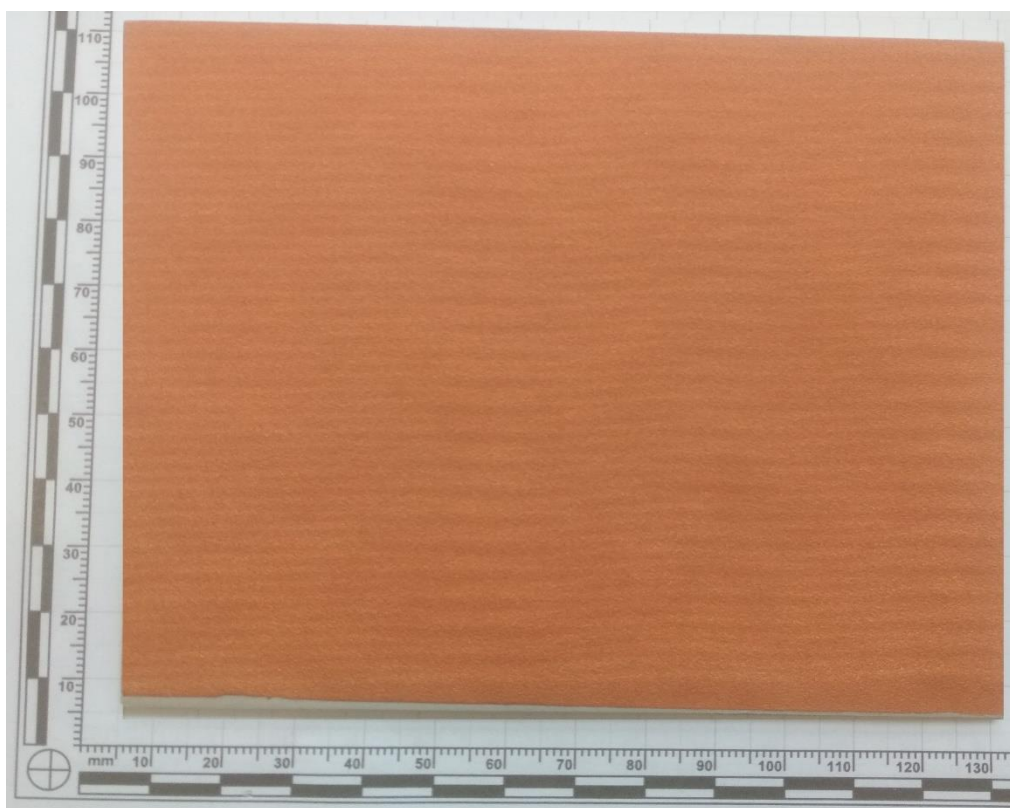
Pri experimentálnej časti bola použitá doska, ktorá mala hliníkový podklad, na ktorý sa nastriekala meď. Striekanie prebehlo pomocou zariadenia Impact Cold Spray System 5/11 a prášok potrebný na striekanie bol dodaný od firmy Safina a.s., obsah medi bol približne 99,9 %. Jednalo sa o zmes dvoch identických práškov Cu. Veľkosť častíc bolo v rozsahu od 38-75 μm . Ako nosný plyn bol použitý dusík, pri tlaku 25 barov a teplote 450°C. Názov trysky, ktorou sa striekalo je OUT1, jej vzdialenosť od vzorky bolo 30 mm a rýchlosť posuvu trysky bolo 450 mm/s.



Obr. 21 Impact Cold spray system 5/11

9.2 Delenie vzoriek

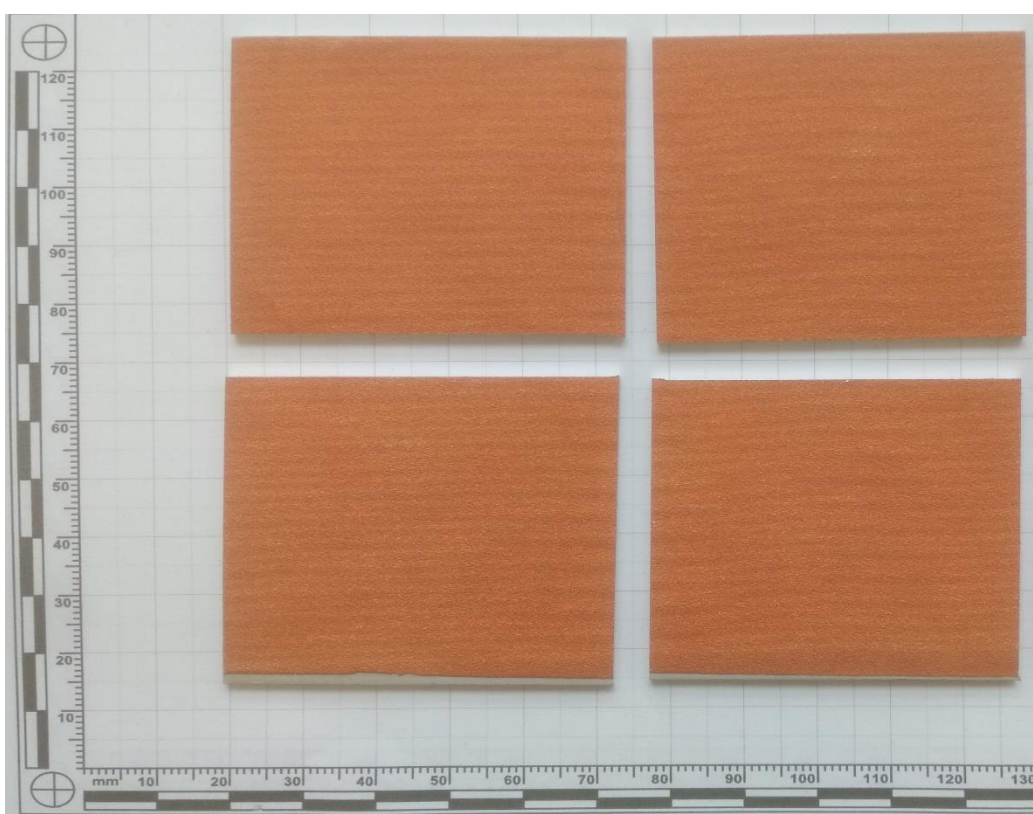
Doska s hliníkovým podkladom a nástrekom medi bola predelená a vznikli 4 menšie vzorky. Daná doska bola delená na zariadení Leco MSX-250 pomocou rezného kotúča 54A25. Rozmer jednotlivej vzorky bolo 5x5 cm. Rýchlosť delenia vzoriek bola 0,5 mm/s. Parameter výbrusu sa určil podľa požadovanej dĺžky vzorku +5 mm rezerva. Keďže rozmer vzorky bol 50x50mm a boli dve vzorky vedľa seba, tak prvý rez bol 100 mm +5mm rezerva, určujúc celkovú dĺžku výbrusu 105 mm.



Obr. 22 Doska s medeným nástrekom pred procesom delenia



Obr. 23 Proces delenia vzorky pomocou rezného kotúča



Obr. 24 Vzorky po rozdelení

9.3 Meranie odporov

Meranie odporov prebehlo pomocou troch vzoriek, ktoré boli predtým predelené. Cieľom bolo zistiť percentuálny rozdiel vnútorných a povrchových odporov vzoriek meraných bez korózie a po korózii pri rôznych teplotách. Na meranie sa používal elektródový systém, konkrétne pri vnútornom odpore nie je pripojená ochranná elektróda, nerieši sa c , čo značí šírku medzery medzi ochrannou a meracou elektródou, takže meranie prebieha medzi meracou a napäťovou elektródou. Pri povrchovom odpore sa nevyužíva hrúbka vzorky h , takže nie je pripojená napäťová elektróda, na základe toho meranie prebieha medzi ochrannou a meracou elektródou.

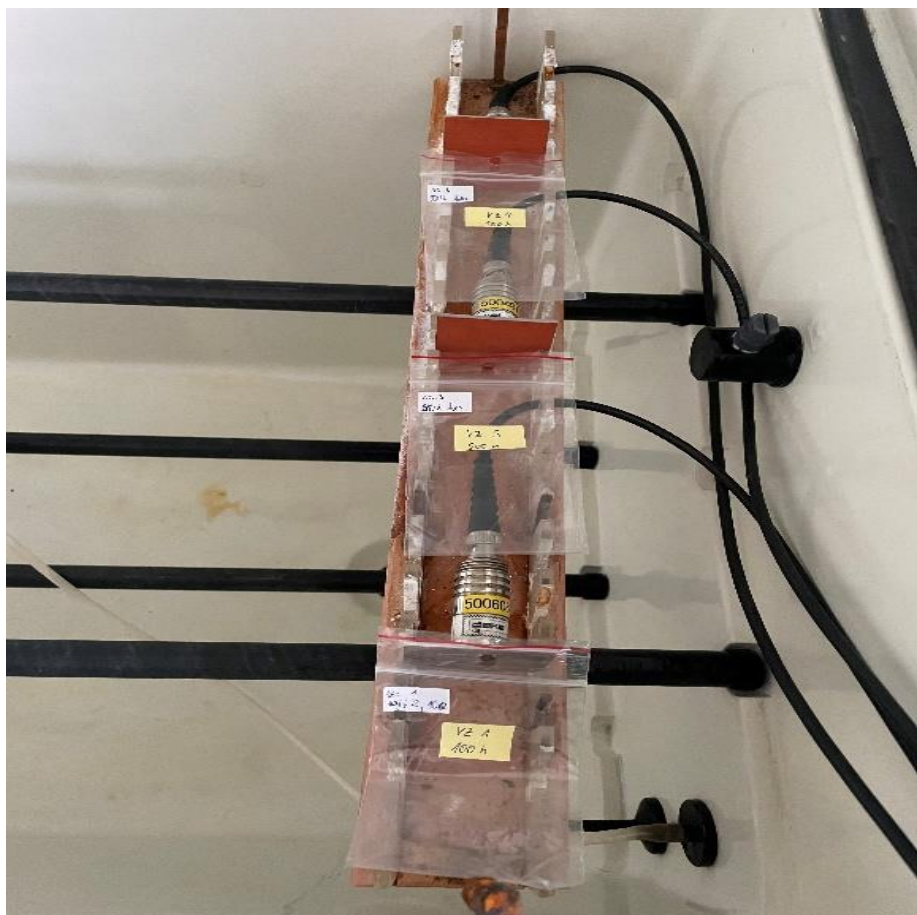
K meraniu vnútorného a povrchového odporu vzoriek slúžil Sterilizátor horkovzdušný Stericell z ktorého viedli vodiče do meracieho prístroja zvaného LCR-meter HP 4284A. Tento prístroj bol potrebný na odčítavanie teplôt zvolených v rozsahu od 20 °C do 80 °C. Výsledky boli uložené v programe Microsoft Excel, kde boli namerané rôzne hodnoty odporu pri frekvenciách v rozsahu od 20 Hz do 10000 Hz. Na porovnanie odporov boli vybraté vzorky č.1, č.3 a č.4. Na týchto vzorkách bol odmeraný vnútorný a povrchový odpor pri teplotách približne 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C.



Obr. 25 Sterilizátor horkovzdušný Stericell a LCR-meter HP 4284A

9.3.1 Soľná komora

Následne boli tie vzorky presunuté do koróznej komory. Ide o degradačnú komoru od firmy Liebish typu S 1000 M-TR. Vzorka č.1 bola v koróznej komore ponechaná po dobu 100 hodín, vzorka č.3 - 200 hodín, vzorka č.4- 300 hodín. Vzorka č.2 nebola umiestnená do koróznej komory, preto bola z experimentu vynechaná.



Obr. 26 Vzorky uložené v soľnej komore



Obr. 27 Stav vzoriek po vybratí zo soľnej komory počas 100, 200, 300h

9.3.2 Meranie odporov po korózii

Následne po ukončení cyklov v soľnej komore bolo potrebné na vzorkách znova premerať vnútorný a povrchový odpor pri stanovených teplotách v rozsahu od 20 °C do 80 °C. Zistilo sa, že vzorky po korózii mali zvýšený odpor na rozdiel od vzoriek meraných pred koróziou. Následne u všetkých troch vzorkách porovnáme a popíšeme percentuálne rozdiely jednotlivých odporov pri daných teplotách a konkrétne určených frekvenciách. Doložené budú vybrané vzory tabuliek a grafických závislostí. Ostatné tabuľky a grafy budú priložené v prílohe.

9.3.3 Vnútorný odpor: porovnanie výsledkov, tabuliek a grafických závislostí

V tejto časti budú z porovnávaných vzoriek č.1, č.3, č.4 zistené percentuálne rozdiely vnútorného odporu pred koróziou a po korózii.

Zistilo sa, že vzorka č.1, ktorá bola umiestnená do koróznej komory po dobu 100 hodín preukázala mierny nárast hodnoty odporu a to konkrétne v rozsahu od 8,6 % do 10,9 %. Pričom najmenšia hodnota 8,6 % bola zaznamenaná pri teplote 20 °C a najväčšia pri

teplote 60 °C a to 10,9 %. Stredné hodnoty boli 9,3 % a 10,5 % a to pri teplotách 40 °C a 80 °C. Porovnávané frekvencie pri tejto vzorke boli 10 kHz po korózii a 20 Hz pred koróziou. Frekvencia 251,678 Hz dosiahla najvyššiu hodnotu odporu a to pred koróziou a aj po korózii.

Vzorka č.3, ktorá bola v koróznej komore po dobu 200 hodín, dosiahla vyšší percentuálny nárast odporu ako pri vzorke č.1 v rozsahu od 15 % do 26 %. Nárast 15 % bol zaznamenaný pri najnižšej teplote 20 °C a hodnota 26 % sa objavila pri teplote 40 °C. Teploty 60 °C a 80 °C neboli ďaleko od maximálneho nárastu, keď dosiahli percentuálne rozdiely 25,5 % a 24,1 %. Porovnávanými frekvenciami boli zvolené 10 kHz po korózii a 20 Hz pred koróziou. Rovnako pri tejto vzorke dosiahla frekvencia 251,678 Hz najvyššiu hodnotu odporu pred koróziou a aj po korózii.

Vzorka č.4 bola v koróznej komore najdlhšie po dobu 300 hodín a bola aj najviac skorodovaná. Percentuálny nárast odporov po korózii s porovnaním pred koróziou sa pohyboval v rozsahu od 28,4 % do 34,6 % Najnižší nárast 28,4 % bol dosiahnutý pri teplote 60 °C a najvyšší pri teplote 20 °C s hodnotou 34,6 %. Pri teplote 40 °C sa nárast pohyboval v rozmedzí maxima hodnotou 34,3 % a pri teplote 80 °C percentuálny rozdiel mierne klesol na 28,8 %. Porovnávané frekvencie boli 251,678 Hz po korózii a 20 Hz pred koróziou. Frekvencia 251,678 Hz bola rovnako aj najvyššie dosiahnutou hodnotou pred a aj po korózii pre túto vzorku.

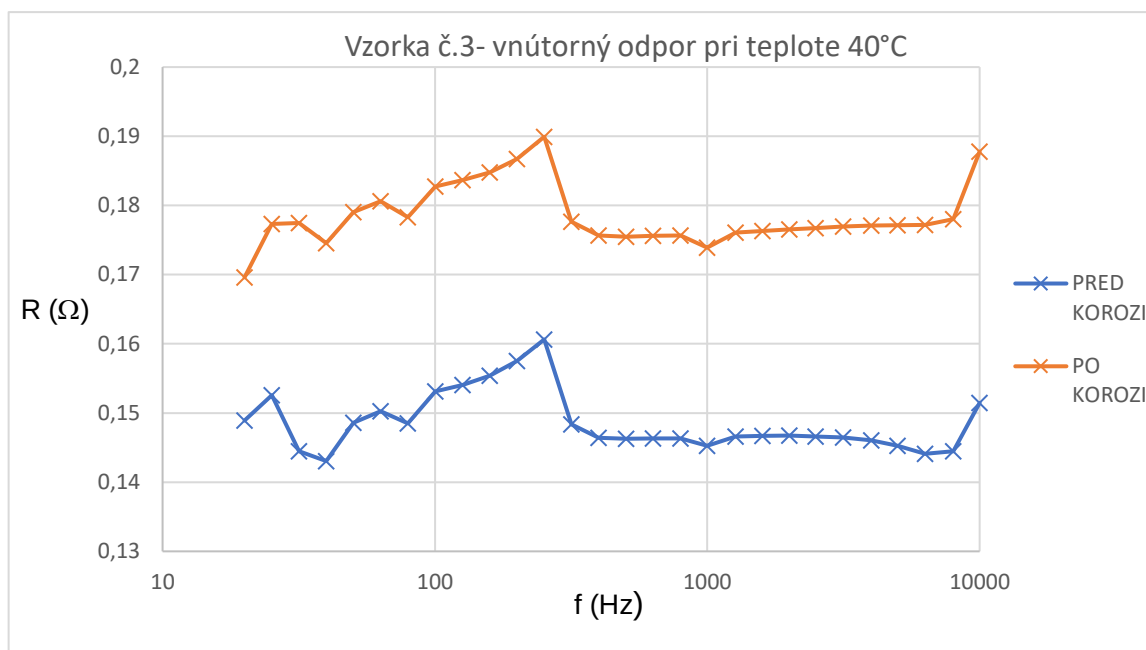
Následne budú priložené tabuľky s hodnotami pred koróziou a po korózii a grafické závislosti kde sú porovnané obe krivky. Ako príklad bude slúžiť vzorka č.3 pre teplotu 40 °C, ktorá dokázala zaznamenať 26 % (Obr. 28) nárast odporu po korózii a aj vzorka č.4 s teplotou 20 °C, ktorá dosiahla najvyšší nárast v hodnote 34,6 % (Obr. 29). Ostatné grafy a tabuľky sú pre ukážku uvedené v osobitnej prílohe.

Vzorka č.3- vnútorný odpor pri teplote 40 °C					
PRED KOROZI			PO KOROZI 200 h		
č.měření	f [Hz]	R [Ω]	č.měření	f [Hz]	R [Ω]
1	20	0,148931	1	20	0,169614
2	25,1783	0,152567	2	25,1783	0,177311
3	31,6991	0,144474	3	31,6991	0,177468
4	39,9106	0,14305	4	39,9106	0,174551
5	50,2344	0,148609	5	50,2344	0,179041
6	63,2378	0,150244	6	63,2378	0,180617
7	79,6178	0,148514	7	79,6178	0,178319
8	100,267	0,153105	8	100,267	0,182731
9	126,263	0,15406	9	126,263	0,183658
10	158,898	0,155392	10	158,898	0,184771
11	200	0,15751	11	200	0,186728
12	251,678	0,160634	12	251,678	0,189932
13	317,259	0,148369	13	317,259	0,177652
14	398,936	0,146411	14	398,936	0,175649
15	503,356	0,146279	15	503,356	0,175486
16	631,579	0,146302	16	631,579	0,17563
17	797,872	0,146319	17	797,872	0,175674
18	1000	0,145248	18	1000	0,173898
19	1271,19	0,146618	19	1271,19	0,176068
20	1595,74	0,146682	20	1595,74	0,176289
21	2000	0,146721	21	2000	0,176552
22	2500	0,146624	22	2500	0,176711
23	3157,89	0,146482	23	3157,89	0,176946
24	4000	0,146035	24	4000	0,177091
25	5000	0,145272	25	5000	0,177143
26	6315,79	0,144104	26	6315,79	0,177191
27	8000	0,144451	27	8000	0,178026
28	10000	0,151479	28	10000	0,187779

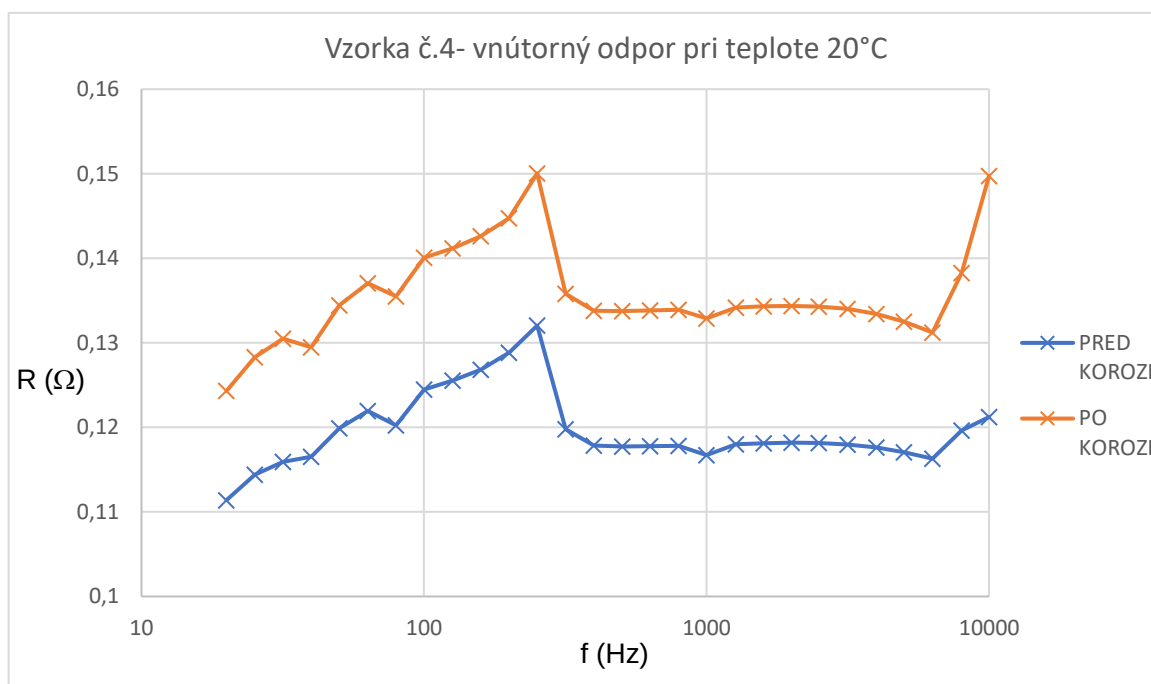
Tab. 1 Vzorka č.3 pre vnútorný odpor pri teplote 40 °C

Vzorka č.4- vnútorný odpor pri teplote 20 °C					
PRED KOROZI			PO KOROZI 300 h		
č.měření	f [Hz]	R [Ω]	č.měření	f [Hz]	R [Ω]
1	20	0,111396	1	20	0,124322
2	25,1783	0,114422	2	25,1783	0,128316
3	31,6991	0,115905	3	31,6991	0,130499
4	39,9106	0,116537	4	39,9106	0,129483
5	50,2344	0,119912	5	50,2344	0,134445
6	63,2378	0,121956	6	63,2378	0,137048
7	79,6178	0,120237	7	79,6178	0,135502
8	100,267	0,124487	8	100,267	0,140084
9	126,263	0,12555	9	126,263	0,141178
10	158,898	0,126822	10	158,898	0,142605
11	200	0,128839	11	200	0,144721
12	251,678	0,132037	12	251,678	0,150038
13	317,259	0,119788	13	317,259	0,1358
14	398,936	0,117853	14	398,936	0,133811
15	503,356	0,117739	15	503,356	0,133743
16	631,579	0,117762	16	631,579	0,133847
17	797,872	0,117804	17	797,872	0,133907
18	1000	0,116721	18	1000	0,132876
19	1271,19	0,11799	19	1271,19	0,134189
20	1595,74	0,118108	20	1595,74	0,134314
21	2000	0,118187	21	2000	0,134357
22	2500	0,118173	22	2500	0,134272
23	3157,89	0,117977	23	3157,89	0,134024
24	4000	0,117625	24	4000	0,133431
25	5000	0,117066	25	5000	0,132492
26	6315,79	0,11631	26	6315,79	0,131217
27	8000	0,11962	27	8000	0,138279
28	10000	0,121227	28	10000	0,14975

Tab. 2 Vzorka č.4 pre vnútorný odpor pri teplote 20 °C



Obr. 28 Vzorka č.3 pre vnútorný odpor pri teplote 40 °C



Obr. 29 Vzorka č.4 pre vnútorný odpor pri teplote 20 °C

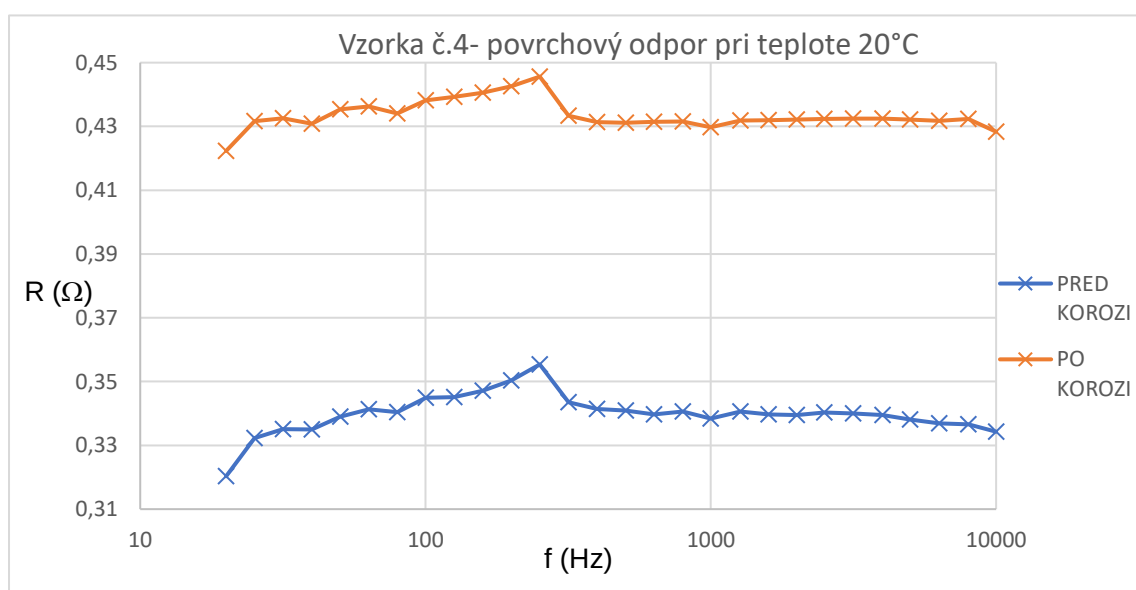
9.3.4 Povrchový odpor: porovnanie výsledkov, tabuliek a grafických závislostí

Rovnaký postup ako pri vnútornom odpore nasledoval aj pri povrchovom odpore a pracovalo sa s rovnakými vzorkami č.1, č.3, č.4, na ktorých sa po vybratí z koróznej komory meral aj povrchový odpor.

Vzorka č.1 zaznamenala mierny nárast odporu v rozmedzí od 3,8 % do 4,8 %. Hodnota 4,8 % bola nadobudnutá pri teplote 80 °C a najnižší nárast odporu 3,8 % sa dosiahlo pri 60 °C. Pri teplotách 20 °C a 40 °C sa dosiahol nárast odporu o 4,1 % a 4,5 %. Porovnávané frekvencie pri vzorku č.1 boli 200 Hz po korózii a 200 Hz pred koróziou.

Pri vzorke č.3 sa podarilo získať namerať nárast hodnôt odporu v rozsahu 20,5 % pri 60 °C a až 29,3 % dosiahnutých pri 20 °C. Percentuálny rozdiel kolísal pri 40 °C, kde bol zaznamenaný nárast odporu o 24,2 % a aj pri teplote 80 °C, kde bol na hranici minimálneho rozsahu tejto vzorky s percentuálnym nárastom 20,6 %. Porovnávané frekvencie boli 10 kHz po korózii a 20 Hz pred koróziou.

Pri vzorke č.4 sa najväčší percentuálny nárast podaril namerať pri 20 °C s hodnotou 33,7 %. Nasledovalo 80 °C kde nárast rovnako presiahol hranicu 30 % s hodnotou 32,1 %. Teploty 40 °C a 60 °C zaznamenali rovnakú hodnotu nárastu odporov 25 %. Porovnávané frekvencie boli 10 kHz po korózii a 20 Hz pred koróziou. Ako príklad grafickej závislosti a tabuľky bude uvedená hraničná maximálna hodnota nárastu odporu vzorky č.4 pri 20 °C (Obr. 30). Ostatné teploty vzoriek sú doložené v osobitnej prílohe.



Obr. 30 Vzorka č.4 pre povrchový odpor pri teplote 20 °C

Vzorka č.4- povrchový odpor pri teplote 20 °C					
PRED KOROZI			PO KOROZI 300 h		
č.měření	f [Hz]	R [Ω]	č.měření	f [Hz]	R [Ω]
1	20	0,320307	1	20	0,422315
2	25,1783	0,332287	2	25,1783	0,431617
3	31,6991	0,335051	3	31,6991	0,432596
4	39,9106	0,334974	4	39,9106	0,430795
5	50,2344	0,339013	5	50,2344	0,43532
6	63,2378	0,341295	6	63,2378	0,43624
7	79,6178	0,340456	7	79,6178	0,434096
8	100,267	0,344914	8	100,267	0,4382
9	126,263	0,345109	9	126,263	0,439277
10	158,898	0,347163	10	158,898	0,440537
11	200	0,35037	11	200	0,442549
12	251,678	0,355381	12	251,678	0,44562
13	317,259	0,343562	13	317,259	0,433323
14	398,936	0,341448	14	398,936	0,431328
15	503,356	0,340862	15	503,356	0,431113
16	631,579	0,339726	16	631,579	0,431443
17	797,872	0,340611	17	797,872	0,431521
18	1000	0,338406	18	1000	0,429703
19	1271,19	0,340649	19	1271,19	0,431819
20	1595,74	0,339751	20	1595,74	0,43199
21	2000	0,33951	21	2000	0,432184
22	2500	0,340331	22	2500	0,432322
23	3157,89	0,340054	23	3157,89	0,432418
24	4000	0,339482	24	4000	0,432486
25	5000	0,338099	25	5000	0,43219
26	6315,79	0,336878	26	6315,79	0,431723
27	8000	0,33655	27	8000	0,432305
28	10000	0,334285	28	10000	0,428328

Tab. 3 Vzorka č.4 pre povrchový odpor pri teplote 20 °C

9.4 Analýza korózie koróznych splodín pomocou elektrónového mikroskopu

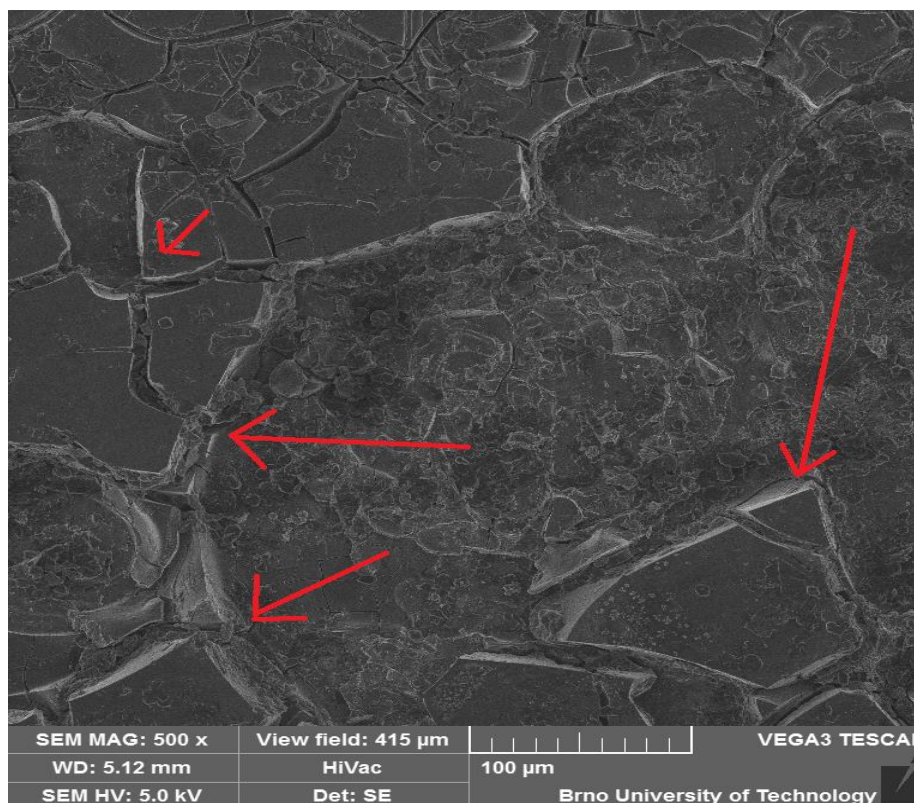
Po ukončení experimentu merania odporov sa nasledujúca časť sústreďí na analýzu korózie troch vzoriek, ktorá mohla byť viditeľná pomocou elektrónového mikroskopu. Jedná sa o nízkovakuový rastrovací elektrónový mikroskop fy. Tescan a.s. Vega XMU s LaB₆ (hexaborid lantanitý) katódou. Pozorovanie prebiehalo vo vákuu pri tlaku približne 10^{-2} Pa v komore vzorku mikroskopu.



Obr. 31 Snímka elektrónového mikroskopu

Na jednotlivých vzorkách č.1 , č.3 a č.4 sa bude analyzovať skúmanie korózie, a to buď na povrchu vzorky alebo následne aj z boku, konkrétne hrana vzorky kde budú viditeľné vrstvy medzi nastriekanou vrstvou medi a podkladom hliníka. Dôležité je skúmať abnormality na povrchu vzorku, či už typ korózie, korózne praskliny alebo kubické kryštáliky. Na hrane vzorky je možné skúmať nie len šírku hrany hliníka alebo medi ale aj šírku vzniknutej medzery medzi hliníkom a vrstvou nastriekanej medi, kde vzniká korózia.

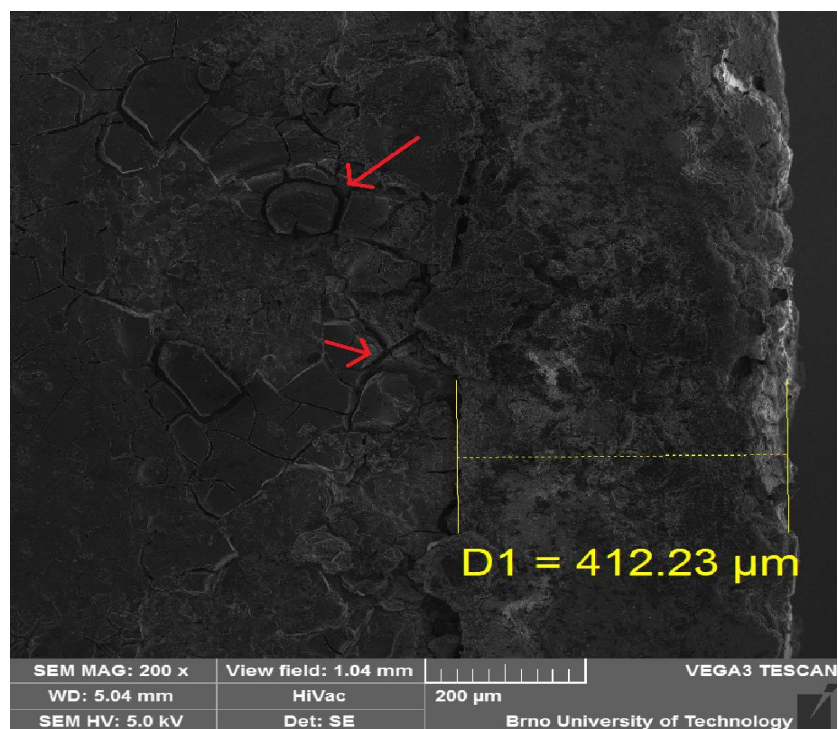
Vzorka č.1 bola v koróznej komore najmenšiu dobu v trvaní 100 hodín, napriek tomu sa už dajú pozorovať mierne náznaky korózie. Na obrázku (Obr. 32) je možné na bočnej hrane hliníka, ktorý slúži ako podkladový materiál pre meď vidieť, že vznikli korózne praskliny, ktoré sú viditeľné na rôznych častiach, z ktorých sú niektoré vyznačené na obrázku. Obrázok vznikol pomocou použitia priblíženia 500x.



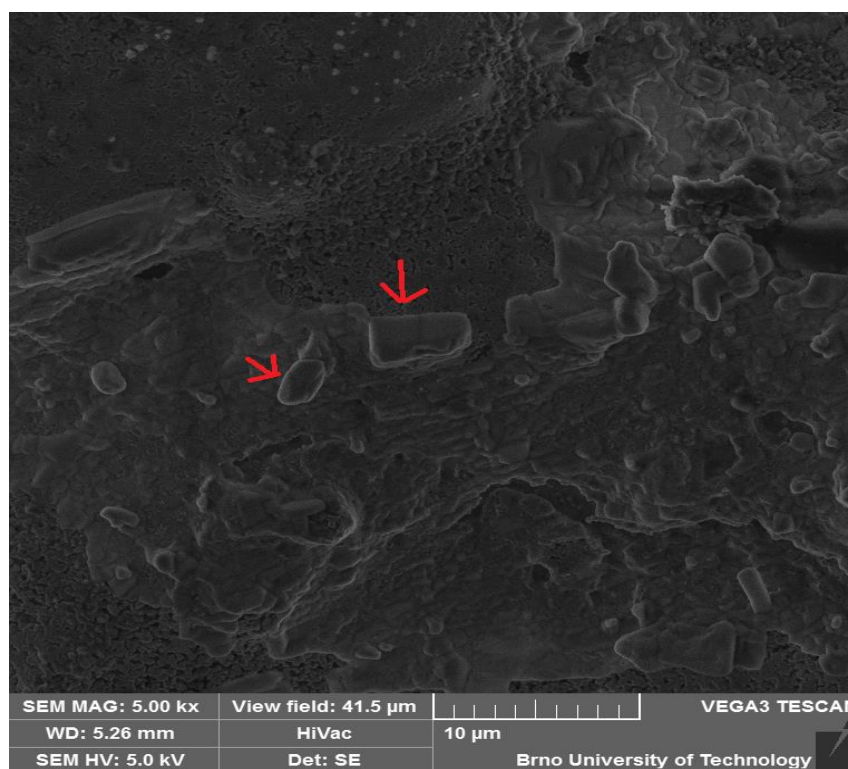
Obr. 32 Hrana podkladového materiálu hliník

Obrázok (Obr. 33) vyznačuje šírku hrany medi s rozmerom 412,23 µm. Vľavo sú šípkami vyznačené praskliny už na vrstve hliníka, ktoré boli spomínané už pri predchádzajúcom obrázku. Je možné vidieť, že 100 hodín nebola dostatočná doba na viditeľné vzniknutie medzery alebo korózneho rozhrania medzi hliníkom a nastriekanou meďou. Použité priblíženie bolo 200x.

Obrázok (Obr. 34) je významný tým, že na povrchu nastriekanej vrstvy medi sú pomocou veľkého priblíženia 5000x viditeľné vzniknuté tzv. kubické kryštáliky.



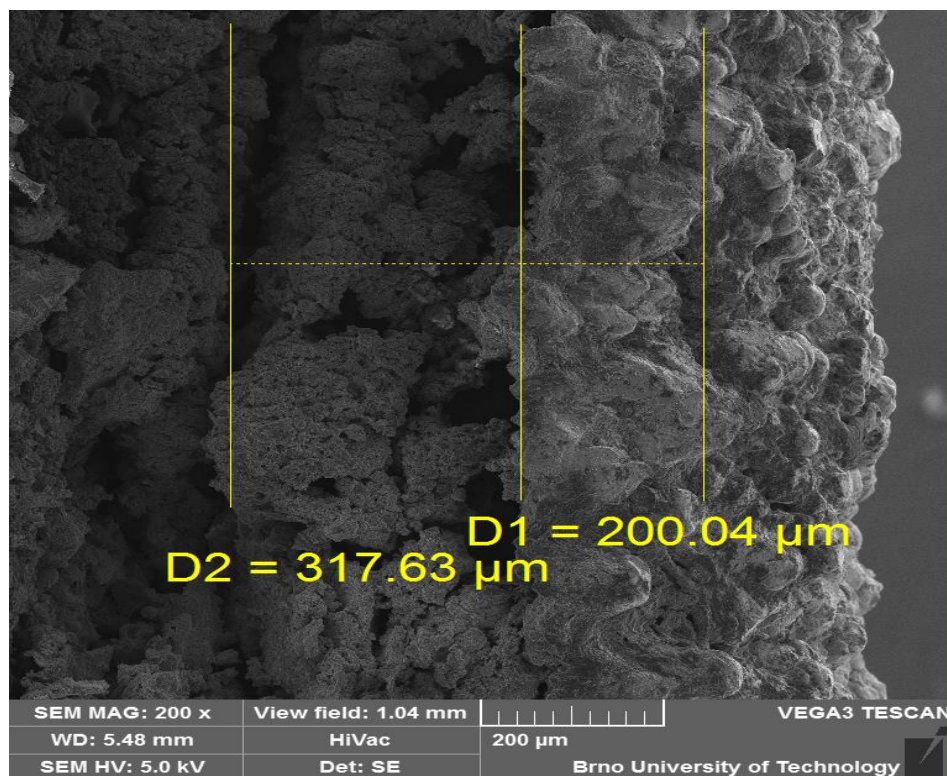
Obr. 33 Šírka hrany nastriekanej medi (vpravo) a šípkami označené korózne praskliny na hliníku (vľavo)



Obr. 34 Povrch medi s priblížením 5000x

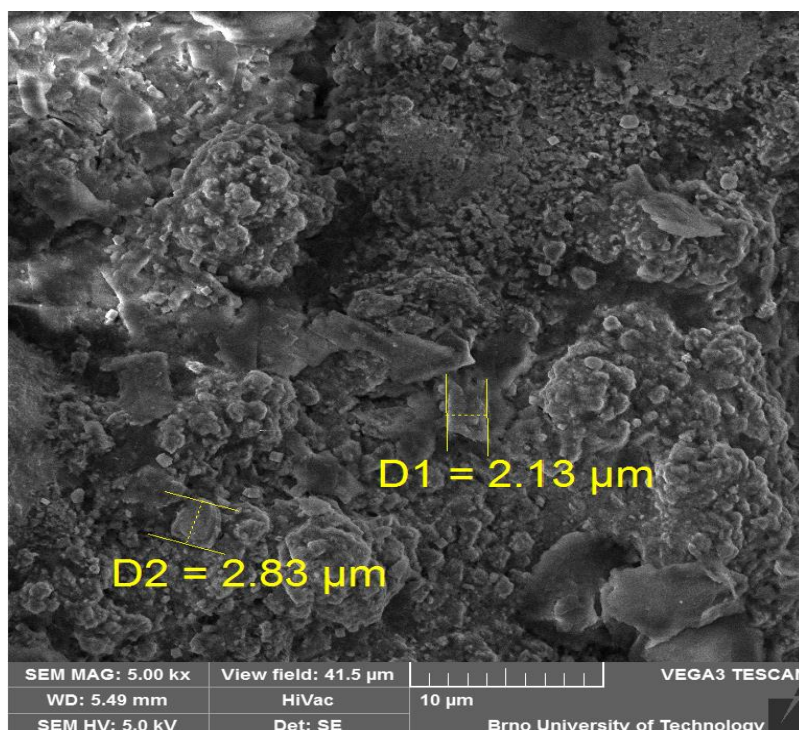
Vzorka č.3 bola v koróznej komore dlhšie a to po dobu 200 hodín. Skúmanie zobrazenia korózie na elektrónovom mikroskope je viac zaujímavejšie, kvôli výraznejšej možnosti nájsť abnormalitu na povrchu či bočnej hrane vzorky.

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 35) pomocou priblíženia 200x je možné vidieť ako vzorka č.3 skorodovala a rozdelila vrstvy na časti. Šírka nastriekanej medi má hodnotu 200,04 μm . Na rozdiel od vzorky č.1 pri 100 hodinách môžeme vidieť, že pri vzorke č.3 sa vytvorilo tzv. korózne rozhranie, ktoré má šírku 317,63 μm , je to začiatok vznikajúcej medzery, ktorá sa vytvorila koróziou medzi nanesenou medťou a podkladom hliníka. Hliník je možné spozorovať úplne na ľavej nevyznačenej strane na obrázku. Keďže snímač snímal trochu do šikmej strany, tak úplne na pravej nevyznačenej strane je možné vidieť začínajúcu časť povrchu medi.



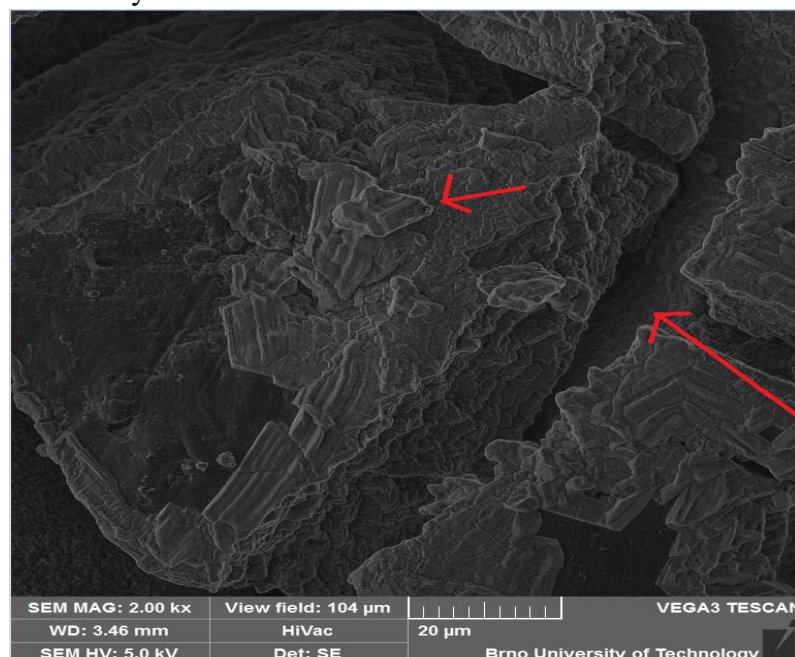
Obr. 35 Prechod hrany medzi hliníkom a medťou

Následne na obrázku (Obr. 36) je možné pomocou veľkého priblíženia 5000x spozorovať vzniknuté kryštáliky, ktoré vznikli pomocou skorodovania vzorky a ich šírka je vyznačená rozmermi 2,83 μm a 2,13 μm .



Obr. 36 Hrana medi vzorky č.3

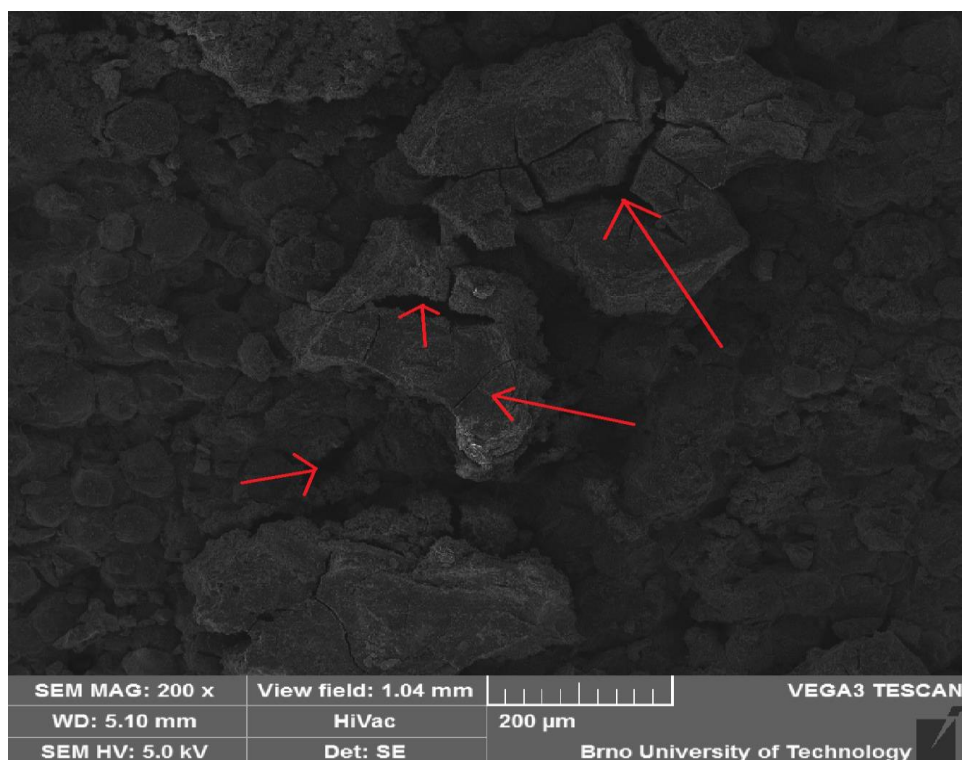
Na ďalšom obrázku (Obr. 37) je možné pomocou výrazného priblíženia 2000x spozorovať na povrchu medi vyznačené vzniknuté korózne praskliny a rovnako aj tvar v podobe kubického kryštáliku.



Obr. 37 Povrch medi vzorky č.3

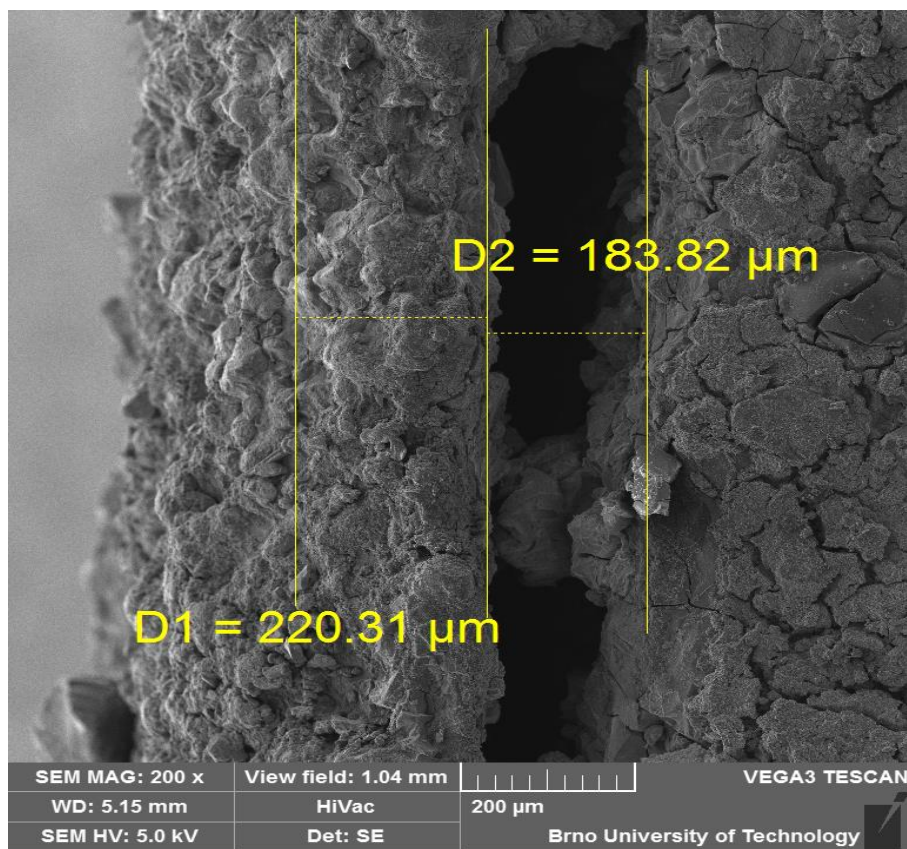
Vzorka č.4, ktorá bola v koróznej komore po dobu 300 hodín bola najviac zasiahnutá koróziou a ponúkla najzaujímavejšie výsledky na pozorovanie mikroskopom v porovnaní so vzorkou č.1 a č.3. Súčasťou tejto práce bolo aj sledovať a určiť hraničné limity a táto vzorka bola pri meraní povrchového odporu tak skorodovaná, že sa skoro rozpadla. Na obrázku nižšie bude viditeľná veľká medzera medzi podkladom hliníka a striekanou vrstvou medi.

Na obrázku (Obr. 38) je možné na povrchu vzorky medi spozorovať vzniknuté praskliny na rôznych abnormálnych tvaroch vytvorených pôsobením korózie. Bolo použité priblíženie 200x.



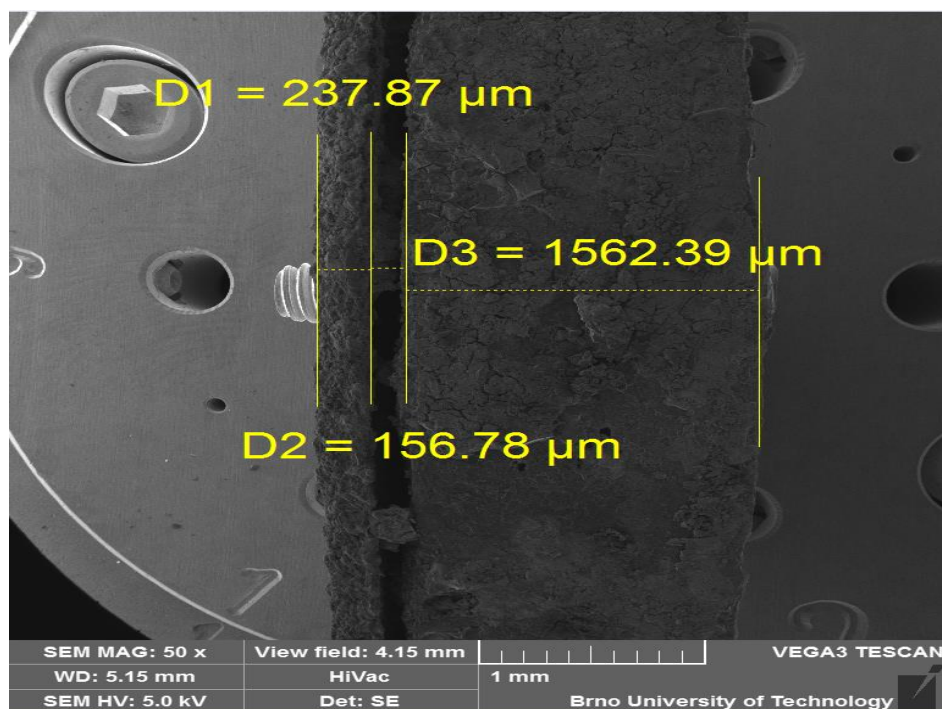
Obr. 38 Povrch medi vzorky č.4

Obrázok (Obr. 39) vyznačuje už vopred spomínanú vytvorenú medzeru medzi podkladom hliníka, ktorý sa nachádza napravo a vrstvou medi označenej vľavo so šírkou 220,31 µm. Vzniknutá medzera so šírkou 183,82 µm je výsledkom korózie a aj časom stráveným v koróznej komore po dobu 300 hodín. Na týchto hranách vzoriek je možné postupne vidieť, že s pribúdajúcimi hodinami v koróznej komore od vzorky č.1 po vzorku č.3 sa medzera zväčšovala a bola výraznejšia.

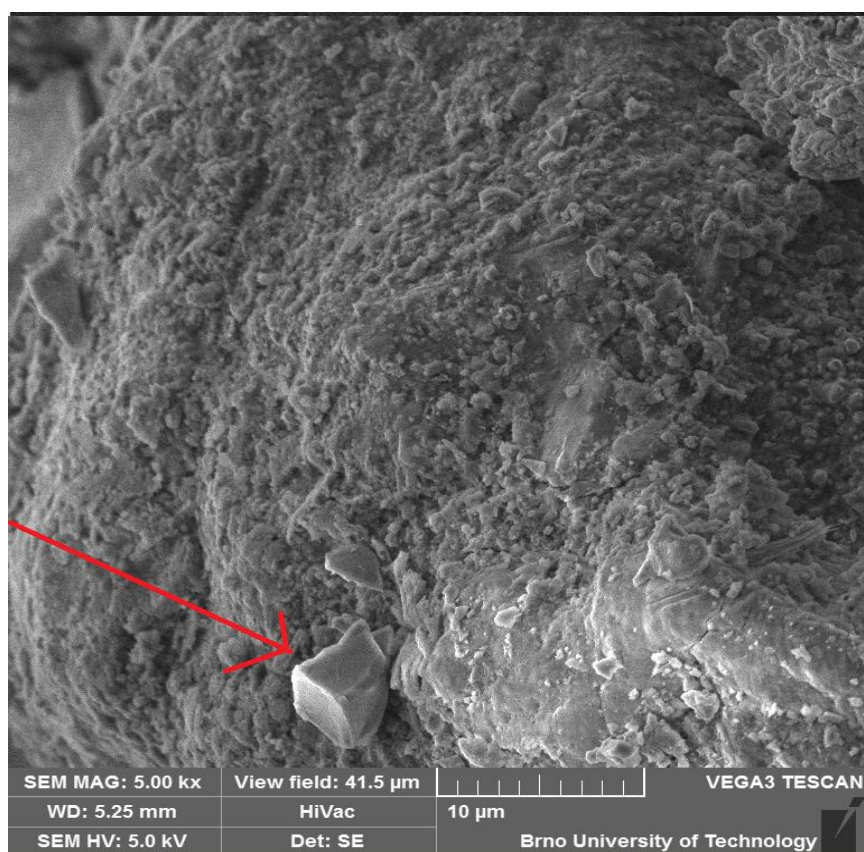


Obr. 39 Prechod hrany medzi hliníkom a meďou priblíženie 200x

Nasledujúci obrázok (Obr. 40) ukazuje danú hranu hliníka a medi z väčšej vzdialenosti. Šírka hliníka je 1562,39 μm, šírka koróznej medzery je 156,78 μm a vrstva medi má 237,87 μm. Pri mnohonásobnom priblížení 10000x tejto hrany hliníka a medi, ktorá bola popisovaná, sa pomocou mikroskopu podarilo zachytiť dokonalý úkaz kubického kryštálika viditeľného a označeného na obrázku (Obr. 41).



Obr. 40 Prechod hrany medzi hliníkom a med'ou približenie 50x



Obr. 41 Prechod hrany medzi hliníkom a med'ou približenie 10000x

9.5 Návrh aplikácie studenej kinetickej depozície

Rozhodnutie o technickej skladbe celého navrhovaného solárneho systému ovplyvnila skutočnosť ponúknuť produkt s vyššou kvalitatívnou úrovňou. Kvalitu produktu zabezpečuje nielen voľba jadra samotného solárneho panelu, ale aj kvalitatívne vyhotovenie kovovej časti rámu. Tieto časti vyhotovené z kovu ovplyvňujú vo výraznej miere životnosť a návratnosť celej investície. Na základe týchto skutočností vznikol návrh upraviť povrch studenou kinetickou depozíciou, otázka znela v akom rozsahu.

Rozsah povrchovej úpravy vo výraznej miere ovplyvňuje cenu produktu. Najviac namáhanou časťou rámu v dôsledku poveternostných podmienok sú práve miesta zvarov, ktoré bývajú technologickým procesom spájania oslabené. Táto povrchová úprava, v najviac oslabených miestach, by predĺžila na dlhšie obdobie životnosť produktu. Rozhodli sme sa upraviť produkt na kvalitatívne vyššiu úroveň s pomocou povrchovej úpravy celého rámu. Tým sa mierne zvýši vstupná investícia, ale získame tým benefit v podobe produktu, ktorého životnosť je výrazne vyššia.

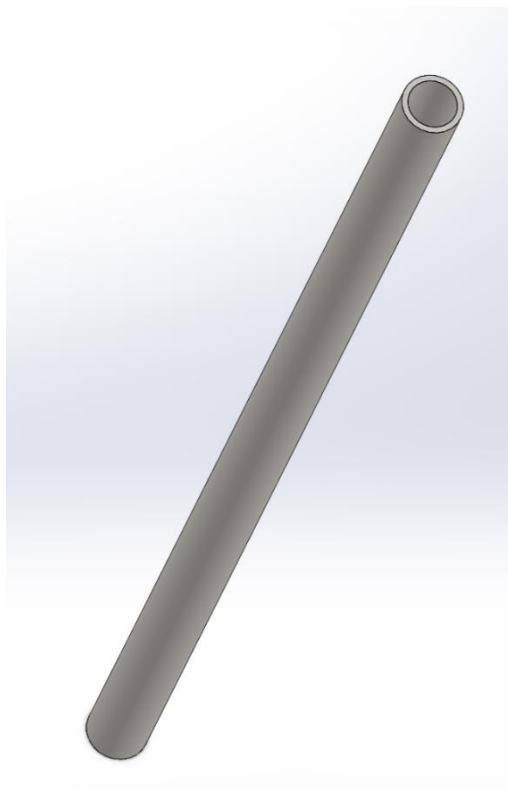
Benefit spočíva v tom, že po dobu životnosti aplikovanej povrchovej úpravy, nebude potrebný servisný zásah na rekonštrukciu rámu, v dôsledku korózie. Takéto servisné zásahy si vyžadujú nielen finančné prostriedky ale aj čas, ktorý je potrebný na uvedený úkon vyčleniť, ďalej povinnosť umožniť servisným technikom vstup do objektu, prípadne na strešné konštrukcie a krytiny. Na základe týchto skutočností, návrh ponúka výrazne vyššiu kvalitu produktu aj napriek mierne vyšším vstupným nákladom. Užívateľ za to získa prevádzku solárneho systému bez potreby rám udržiavať, rekonštruovať.

Keďže solárny panel je vyrábaný ako celok, aj napriek funkčnému jadrú kolektora dochádza po skorodovaní kovových častí k jeho celkovej výmene. Práve kvalitnejší výrobok v dôsledku kvalitnej povrchovej úpravy jeho kovových častí z dlhodobého hľadiska pri plnej funkčnosti zabezpečí návratnosť celej investície aj po finančnej stránke a zabezpečí užívateľovi komfort vo forme menšej údržby.

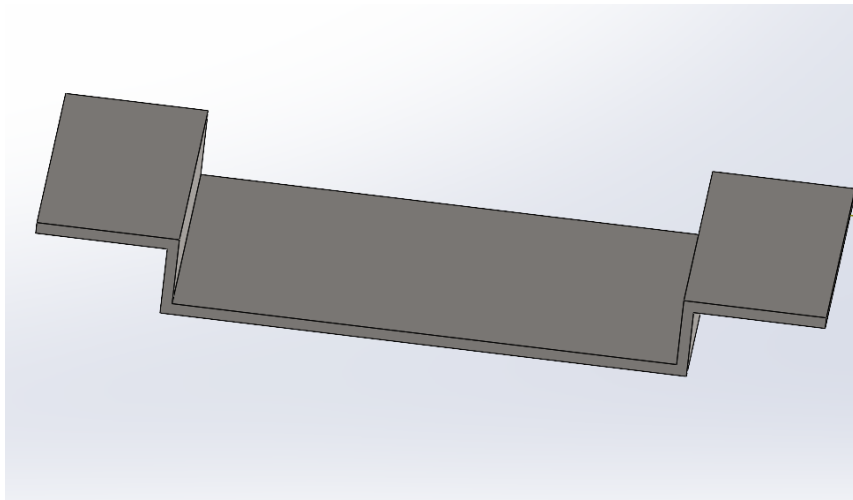
Z vedeckého hľadiska môžeme polemizovať ohľadne ekonomického aspektu ceny nástreku solárneho panelu pomocou studenej kinetickej depozície, k pomeru predĺženia životnosti rámu. Životnosť solárnych panelov sa môže pohybovať v rozmedzí od 10 do 25 rokov. Navrhovaný rám má obvod približne 3,2 metra. Cena striekania na 1 meter by sa mohla odhadovať približne na 10 000 Kč , takže cena celkového nástreku rámu by sa

pohybovala okolo 32 000 Kč. Studená kinetická depozícia poskytne kvôli lepšej povrchovej ochrane a odolnosti voči korózii zvýšenú životnosť minimálne o 10 rokov a tým pádom aj návratnosť investície.

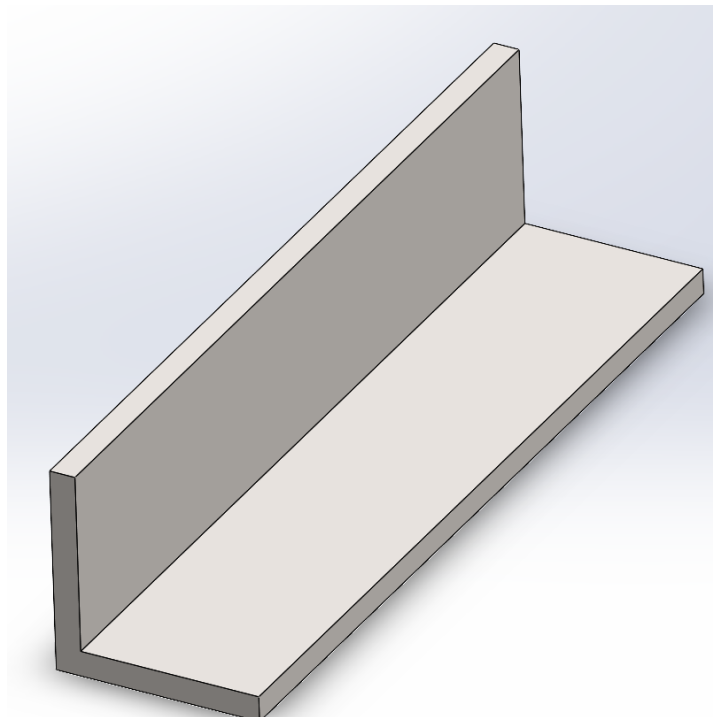
Jedná sa o jednoduchú teoretickú ukážku možnej aplikácie. Samotný návrh je viditeľný na nasledujúcich obrázkoch v práci. Prvé obrázky poukazujú na diely, z ktorých bola zhotovená konštrukcia pre solárny panel. Následne po obrázku (Obr. 45) konštrukcie, je viditeľný návrh solárneho panelu a aj vrstvy častí, z ktorých sa solárny panel skladá. Na obrázku (Obr. 48) je zobrazená finálna zostava konštrukcie so solárnym panelom. Technológia studenej kinetickej depozície sa bude aplikovať na rám solárneho panelu ako poukazuje obrázok (Obr. 49). Posledné obrázky obsahujú výkres, na ktorom je možné vidieť návrh zobrazený z rôznych strán a aj technické parametre.



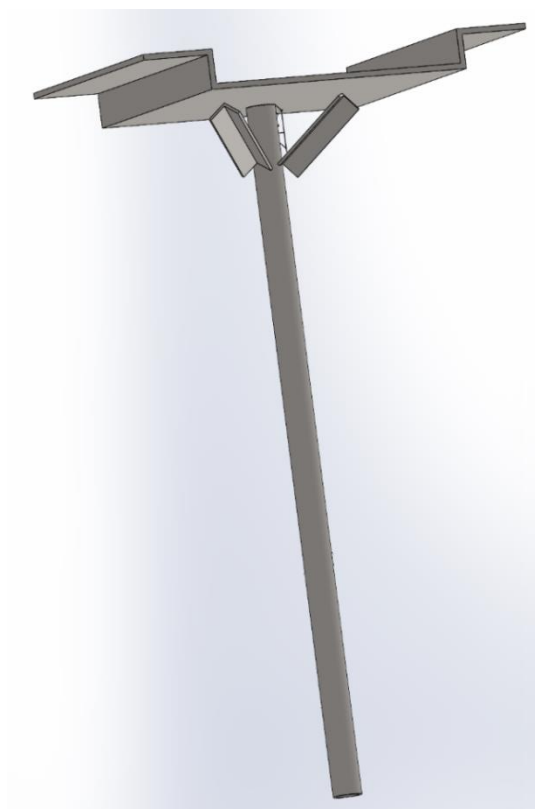
Obr. 42 Prvý diel určený na konštrukciu



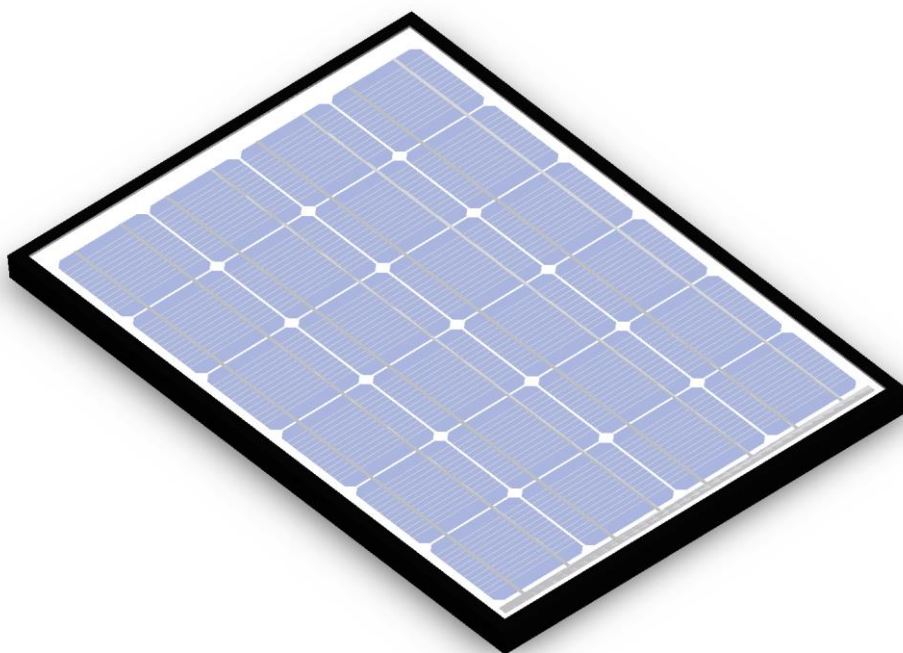
Obr. 43 Druhý diel určený na konštrukciu



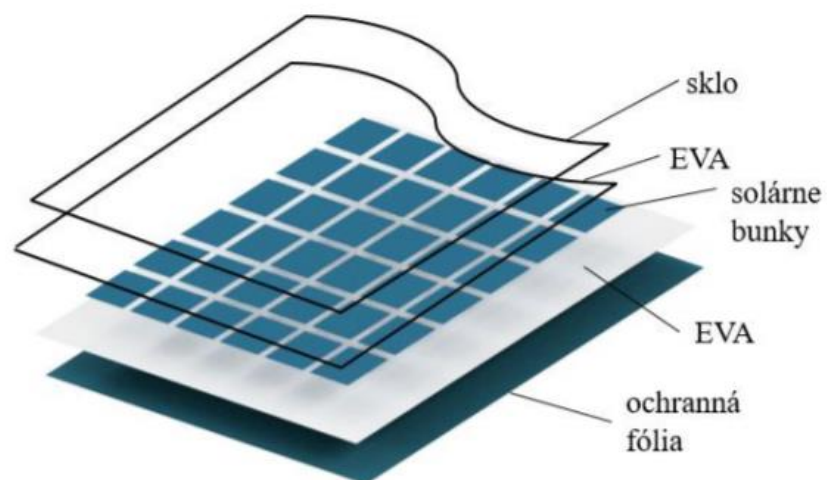
Obr. 44 Tretí diel určený na konštrukciu



Obr. 45 Návrh zostavy konštrukcie



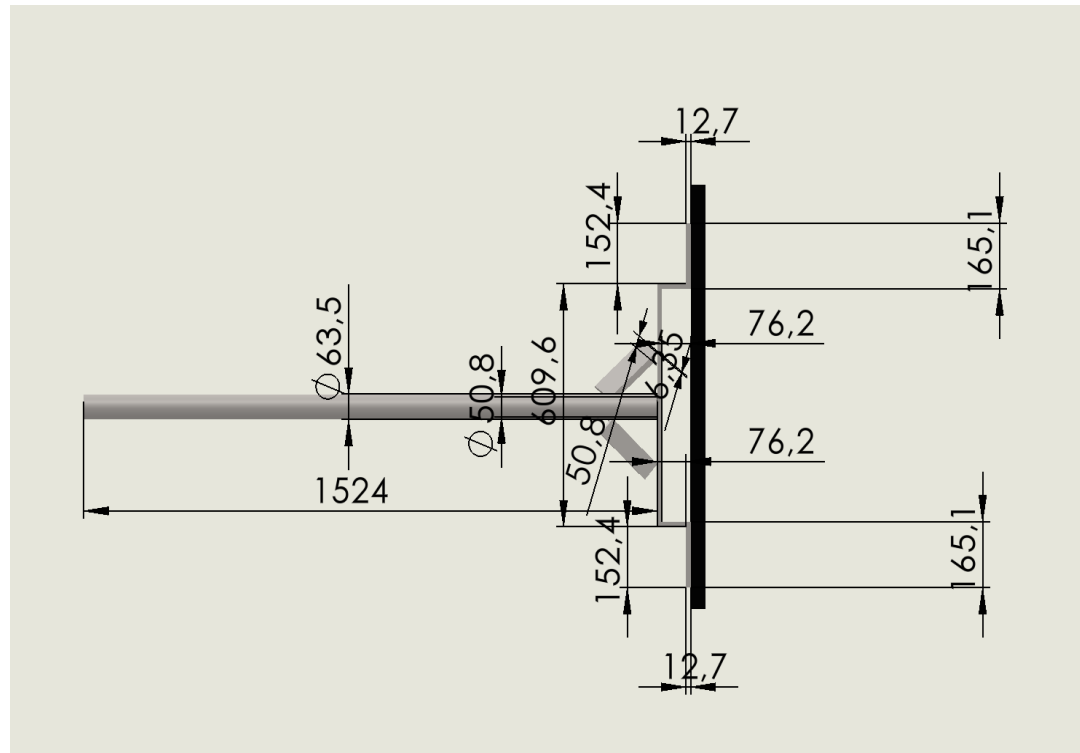
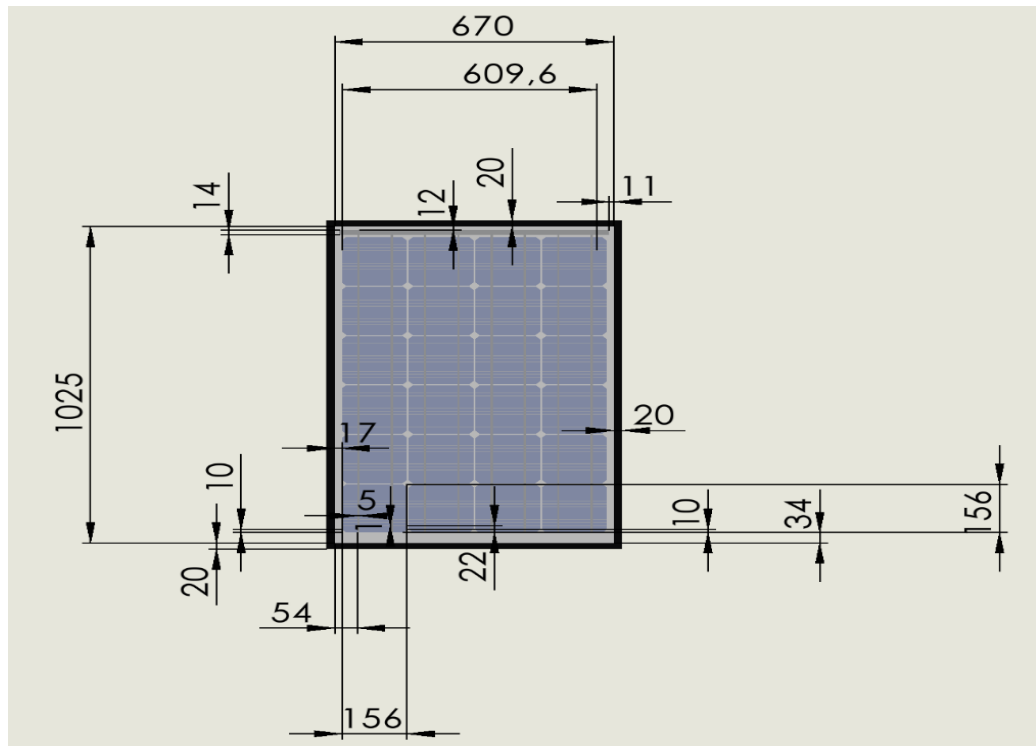
Obr. 46 Návrh solárneho panelu



Obr. 47 Vrstvy solárneho panelu [42], [43]



Obr. 48 Návrh finálnej zostavy konštrukcie so solárnym panelom



10 Diskusia k výsledkom

V soľnej komore sme nechali skorodovať tri vzorky č.1, č.3, č.4. Z elektrónového mikroskopu sa preukázal najväčší vplyv korózneho napadnutia v soľnej komore pri vzorke č.4, ktorá bola v koróznej komore 300 hodín. Obrázok (Obr. 39) poukazuje na vzniknutú koróznú medzeru, ktorá má šírku 183,82 μm a je viditeľná medzi nástrekom medi a podkladom hliníka. To mohlo mať za následok zmenu odporu v podobe percentuálneho nárastu vnútorného odporu po korózii, ktorý dosiahol hodnotu 34,6 % pri teplote 20 °C (Obr. 29) a rovnako aj povrchového odporu po korózii s percentuálnym nárastom 33,7 % pri teplote 20 °C (Obr. 30).

Vzorka č.1, ktorá bola v koróznej komore oveľa kratšiu dobu v podobe 100 hodín zaznamenala na rozdiel od vzorky č.4 úplne opačný výsledok. Na obrázku (Obr. 33) je možné vidieť, že sa korózna medzera medzi nanosenou medťou a hliníkom ešte nestihla vytvoriť a 100 hodín bolo teda príliš krátka doba. Viditeľné môžu byť akurát vzniknuté mierne korózne praskliny na hrane hliníka (Obr. 32). Malo to za následok nízky percentuálny nárast vnútorného odporu, pričom najväčšia hodnota 10,9 % bola zaznamenaná pri 60 °C. Povrchový odpor zaznamenal ešte nižší nárast, kde bolo nameraných 4,8 % pri 80 °C.

Vzorka č.3, ktorá bola v koróznej komore po dobu 200 hodín sa z časti priblížila vzorke č.4, pretože obrázok (Obr. 35) už naznačuje začiatok vznikajúcej korózne medzery alebo tzv. rozhrania so šírkou 317,63 μm medzi hliníkom a medťou. Odzrkadlilo sa to na percentuálnom náraste, kde pri vnútornom odpore bol zaznamenaný nárast 26 % pri 40 °C a pri povrchovom 29,3 % pri teplote 20 °C.

Záver

Cieľom diplomovej práce bolo využiť technológiu studenej kinetickej depozície a navrhnúť teoretickú aplikáciu tejto technológie v praxi, ktorá by mala lepšiu odolnosť voči korózii. Následne na vytvorenej experimentálnej vrstve bolo potrebné vyhodnotiť vlastnosti a zistiť hraničné limity povlaku na vzorke pri koróznom napadnutí.

Na experimentálnu časť bola použitá doska s hliníkovým podkladom, na ktorý bola nastriekaná meď pomocou spomínanej studenej kinetickej depozície. Vzorka bola predelená na menšie časti z dôvodu použitia rôznych časových cyklov v koróznej komore.

Prvá skúška bolo meranie vnútorného a povrchového odporu pred koróziou a následne po korózii, pri rôznych teplotách od 20 do 80 °C, kvôli určeniu percentuálneho rozdielu odporu. Vzorky boli vložené do koróznej komory, aby sa zistil hraničný limit vytvorenej vrstvy povlaku.

Vzorka č.1 bola umiestnená v koróznej komore po dobu 100 hodín, vzorka č.3 200 hodín a vzorka č.4 300 hodín. Zistilo sa, že u vzoriek po korózii sa zaznamenal percentuálny nárast odporu, ktorý stúpal v závislosti od času vzorky ponechanej v koróznej komore. Najmenší nárast zaznamenala vzorka č.1, ktorá sa pri vnútornom odpore pohybovala v rozsahu od 8,6 % do 10,9 % a pri povrchovom odpore iba od 3,8 % do 4,8 %.

Vzorka č.3, ktorá strávila v koróznej komore 200 hodín, zaznamenala pri vnútornom odpore značný nárast odporu o 26 % a pri povrchovom dokonca 29,3 %.

Vzorka č.4 bola v koróznej komore ponechaná 300 hodín. Časová doba 300 hodín je považovaná za kľúčovú, pretože nárast pri vnútornom odpore dosiahol maximálnu hranicu 34,6 % a pri povrchovom sa maximálny nárast dostal na 33,7 %.

Rozsah vzniknutej korózie bol následne analyzovaný pomocou elektrónového mikroskopu, na základe toho sú v práci doložené obrázky na ktorých je viditeľný rozsah vzniknutých prasklín (Obr. 38), rôzne abnormálne tvary v podobe kubických kryštálikov (Obr. 41) .

S pribúdajúcim časom sa začala na hranách vzoriek medzi nastriekanou meďou a podkladom hliníka vytvárať korózna medzera. Pri 100 hodinách medzera nebola spozorovaná, pri 200 hodinách je možné vidieť náznak vzniknutej medzery a pri 300 hodinách je možné potvrdiť, že hraničný limit vytvoreného povlaku po pôsobení korózie je 300 hodín, keďže vzorka bola úplne skorodovaná. Na obrázku (Obr. 39) je možné

vidieť vzniknutú veľkú medzeru, ktorá oddelila podkladový materiál hliníka od nanesenej medi.

Týmto sa studená kinetická depozícia považuje za vhodnú technológiu, ktorá dokáže poskytnúť kvalitnú povrchovú ochranu a odolnosť proti korózii rôznym výrobkom. Teoretický návrh aplikácie technológie v praxi, na rám solárneho panelu, poskytne produktu vyššiu kvalitatívnu úroveň z hľadiska predĺženia životnosti produktu, čo by znamenalo ekonomickú návratnosť vstupných nákladov.

Literatúra

1. VILLAFUERTE, Julio, ed. Modern cold spray: materials, process, and applications. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-16771-8.
2. MAEV, R. G. a Volf LESHCHYNSKY. Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray: Physics & Technology. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2008. ISBN 978-3-527-40659-3.
3. PAPYRIN, A. N. Cold spray technology. London: Elsevier, 2007. ISBN 0080451551.
4. SINGH, Harminder, T. S. SIDHU, S. B. S. KALSI a J. KARTHIKEYAN. Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 2013, 35(3), 231-245 [cit. 201904-15]. DOI: 10.1007/s40430-013-0030-1. ISSN 1678-5878. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40430-013-0030-1>
5. KAY, C. M. a J. KARTHIKEYAN. High pressure cold spray: Principles and applications. Materials Park, OH: ASM International, [2016], 324 s. ISBN 978-1-62708-096-5.
6. Cold Spray Coatings: Recent Trends and Future Perspectives”, Edited by P. Cavaliere. Chapter:19 “Cold Spray Coatings for Biomedical Applications” S.Dosta, N.Cinca, A.M.Vilardell, I.G.Cano,J.M.Guilemany Springer International Publishing . ISBN 978-3-319-67182-6. Switzerland. (2017).
7. WIDENER A. Christian. OZDEMIR, Ozan C., , Dennis HELFRITCH a Fereidoon DELFANIAN. Estimating the Effect of Helium and Nitrogen Mixing on Deposition Efficiency in Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2016, 25(4), 660-671 [cit. 2020-11-26]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-016-0394-8
8. CHAMPAGNE, V. K. (ed.). The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. Cambridge, England, 2007, vyd. Woodhead Publishing, 376 str., ISBN 978- 1-84569-181-3
9. MORIDI, Atieh. *Powder Consolidation Using Cold Spray* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2021-02-10]. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-3-319-29961-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-29962-4
10. VILLAFUERTE, Julio. Recent trends in cold spray technology: looking at the future. *Surface Engineering* [online]. 2013, 26(6), 393-394 [cit. 2021-02-10]. ISSN 0267-0844. Dostupné z: doi:10.1179/026708410X12687356948715
11. MAEV, Roman Gr a Volf LESHCHYNSKY. *Cold gas dynamic spray*. Boca Raton: CRC Press, [2017]. ISBN 978-1-138-41143-2.
12. WIELAGE, B., T. GRUND, C. RUPPRECHT a S. KUEMMEL. New method for producing power electronic circuit boards by cold-gas spraying and investigation of adhesion mechanisms. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2010, 205(4), 1115-1118 [cit. 2021-02-15]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2010.06.020

13. *Corrosion* [online]. Elsevier, 1994 [cit. 2021-02-17]. ISBN 9780080523514.
Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-24066-9
14. ROBERGE, Pierre R. *Handbook of corrosion engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2012. ISBN 978-0-07-175037-0.
15. BENSALAH, Nasr, ed. *Pitting Corrosion* [online]. InTech, 2012 [cit. 2021-02-17]. ISBN 978-953-51-0275-5. Dostupné z: doi:10.5772/1849
16. KOSABA, Takumi, Izumi MUTO a Yu SUGAWARA. Effect of anodizing on galvanic corrosion resistance of Al coupled to Fe or type 430 stainless steel in diluted synthetic seawater. *Corrosion Science* [online]. 2021, 179 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2020.109145
17. LIU, Yufa, Yanlin ZHAO a Jun YAO. Synergistic erosion–corrosion behavior of X80 pipeline steel at various impingement angles in two-phase flow impingement. *Wear* [online]. 2021, 466-467 [cit. 2021-02-18]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2020.203572
18. LAUKKANEN, A., M. LINDGREN, T. ANDERSSON, T. PINOMAA a M. LINDROOS. Development and validation of coupled erosion-corrosion model for wear resistant steels in environments with varying pH. *Tribology International* [online]. 2020, 151 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106534
19. LIU, Yu, Akram ALFANTAZI, Rebecca Filardo SCHALLER a Edouard ASSELIN. Localised instability of titanium during its erosion-corrosion in simulated acidic hydrometallurgical slurries. *Corrosion Science* [online]. 2020, 174 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2020.108816
20. VOLGINA, Natalya, Aleksander SHULGIN a Svetlana KHLAMKOVA. Possibilities of diagnosis of stress corrosion cracking of main gas pipelines from the point of view of microbiology. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-02-21]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.224
21. YU, Yating, Yanbin LI, Hong QIN a Ximeng CHENG. Microwave measurement and imaging for multiple corrosion cracks in planar metals. *Materials & Design* [online]. 2020, 196 [cit. 2021-02-20]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.109151
22. ZHAO, Y.X., Y.Z. WANG a J.F. DONG. Prediction of corrosion-induced concrete cracking under external loading and stirrup constraint. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 266 [cit. 2021-02-21]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121053
23. ZHOU, Y.T., Y.N. ZAN, Q.Z. WANG, B.L. XIAO, Z.Y. MA a X.L. MA. Grain boundary segregation of alloying Cu induced intergranular corrosion of B4C-6061Al composite. *Materials Characterization* [online]. 2021, 173 [cit. 2021-02-23]. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2021.110930
24. *Extractive Metallurgy of Copper* [online]. Elsevier, 2002 [cit. 2021-02-24]. ISBN 9780080440293. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-044029-3.X5000-X
25. DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.

26. FRANCIS, Roger. *The corrosion of copper and its alloys: a practical guide for engineers*. Houston, Tex.: NACE International, c2010. ISBN 978-1-57590-225-8.
27. DE FIGUEIREDO JUNIOR, João Cura D'Ars, Vanessa DE FREITAS CUNHA LINS a Vito Modesto DE BELLIS. Surface characterization of a corroded bronze-leaded alloy in a salt spray cabinet. *Applied Surface Science* [online]. 2007, 253(17), 7104-7107 [cit. 2021-02-24]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2007.02.053
28. VERMA, Rajesh P. a Manish KUMAR LILA. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021 [cit. 2021-02-26]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.01.447
29. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* [online]. ASM International, 1990 [cit. 2021-02-26]. ISBN 978-1-62708-162-7. Dostupné z: doi:10.31399/asm.hb.v02.9781627081627
30. VAVŘIŇÁK, Petr. *ELEKTROTRCHNICKÉ MATERIÁLY* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: [www.sse-najizdarne.cz › elektrotechnicke_materialy](http://www.sse-najizdarne.cz/elektrotechnicke_materialy)
31. MATHERS, Gene. *The welding of aluminium and its alloys* [online]. North America: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press, 2002 [cit. 2021-02-28].
32. RANGREJ, Shyam, Shaileshkumar PANDYA a Jyoti MENGHANI. Effects of reinforcement additions on properties of aluminium matrix composites – A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-03-05]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.604
33. KUMAR, Naveen, Ajaya BHARTI a Kuldeep K. SAXENA. A re-investigation: Effect of powder metallurgy parameters on the physical and mechanical properties of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021 [cit. 2021-03-05]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.12.351
34. CHAKRAPANI, P. a T.S.A. SURYAKUMARI. Mechanical properties of aluminium metal matrix composites-A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-03-05]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.09.247
35. KUZ'MIN, M.P., M. Yu. KUZ'MINA a P.B. KUZ'MIN. Possibilities and prospects for producing silumins with different silicon contents using amorphous microsilica. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2020, **30**(5), 1406-1418 [cit. 2021-03-06]. ISSN 10036326. Dostupné z: doi:10.1016/S1003-6326(20)65306-7
36. BRUNET, Magali, Benoit MALARD, Nicolas RATEL-RAMOND, et al. Precipitation in original Duralumin A-U4G versus modern 2017A alloy. *Materialia* [online]. 2019, **8** [cit. 2021-03-08]. ISSN 25891529. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtla.2019.100429
37. VAIRAMUTHU, J., B. STALIN, V. Ananda NATARAJAN, B. Mohmed FAZIL a R. BALAJI. Material synthesis and spark erosion behavior of tantalum carbide based duralumin metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-03-08]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.09.348
38. Féron, D.. (2007). *Corrosion Behaviour and Protection of Copper and Aluminium Alloys in Seawater*. Elsevier. Retrieved from

- <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCBPCAAS4/corrosion-behaviour-protection/corrosion-behaviour-protection>
39. GNECCO, F. a A.M. BECCARIA. Corrosion behaviour of Al–Si/SiC composite in sea water. *British Corrosion Journal* [online]. 2013, 34(1), 57-62 [cit. 2021-03-14]. ISSN 0007-0599. Dostupné z: doi:10.1179/bcj.1999.34.1.57
 40. PAOLA, Letardi, Traverso PIERLUIGI a Belsanti LUCREZIA. *Corrosion Behaviour of Al, Cu, and Fe Alloys in Deep Sea Environment* [online]. Italy, 2013 [cit. 2021-03-14].
 41. MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I.* [online]. 2016 [cit. 2021-03-27]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/Cover.html>
 42. HORVÁTH, R. *Návrh skladby zdrojů pro síťovou nezávislost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..
 43. *GREEN TECHNOLOGY: Fotovoltaika* [online]. © 2007–2021 [cit. 2021-05-13]. Technologie výroby. Dostupné z WWW: <http://www.green-t.cz/fotovoltaika/>
 44. "Hodnotenie korózneho napadnutia", Katedra materiálového inžinierstva. [Online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/02/Korozne-napadnutie_teoria.pdf
 45. B. NĚMCOVÁ and B. PACAL, "Korozní zkoušení kovových materiálů", 2010. [Online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/oporakoroze4/k2.html>
 46. MINDA, J. Elektrochemické charakteristiky hořčíkových slitin AZ31 a AZ61 v Hankových roztocích. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Tkacz, Ph.D..
 47. DRÁBIKOVÁ, J. Perspektivní povrchové úpravy hořčíkových slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Zmrzlý, Ph.D.
 48. ČERNÝ, M. Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1 984. 264 s.

Zoznam skratiek

CAD	Computer-aided design
HPCS	Vysokotlakové striekanie za studena / High-pressure cold spray
LPCS	Nízkotlakové striekanie za studena / Low-pressure cold spray
OCPS	Obninsk Center for Powder Spraying