

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DISERTAČNÍ
PRÁCE**

2023

**MICHAL
ZOUBEK**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



DISERTAČNÍ PRÁCE

Nátěrové systémy s vysokými užitnými vlastnostmi

Autor: Ing. Michal Zoubek

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Školitel specialista: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Praha 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma *Nátěrové systémy s vysokými užitnými vlastnostmi* vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Viktora Kreibicha, CSc. a školitele specialisty Ing. Jana Kudláčka, Ph.D.

Použité literární zdroje a další podklady pro vypracování práce jsou uvedeny v příložených seznamech.

Disertační práce byla částečně řešena v rámci projektu Centra kompetence – Centrum výzkumu povrchových úprav (č.p. TE0200011).

V Praze dne 23. 2. 2023

.....

Ing. Michal Zoubek

Poděkování

Na tomto místě děkuji školiteli doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. a školiteli specialistovi Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za vedení mé disertační práce a odborný dohled. Děkuji kolektivu pracovníků Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze za vytvoření podmínek pro realizaci disertační práce a využití laboratorního a přístrojového vybavení. Poděkování patří také prof. Ing. Tomášovi Jiroutovi, Ph.D. z Ústavu procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze za cenné rady, podněty a data z teorie míchání a za zapůjčení technického vybavení pro experimenty a přípravu nátěrových hmot. Také bych rád poděkoval Ing. Martinu Chvojkovi za snímky povlaků antistatický nátěrů pomocí SEM elektronového mikroskopu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za nesmírnou podporu během celého studia.

Anotace

Vysoká škola:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Název disertační práce:	Nátěrové systémy s vyššími užitnými vlastnostmi
Akademický rok:	2022/2023
Autor:	Ing. Michal Zoubek
Školitel:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Školitel specialista:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Klíčová slova:	Nátěrové hmoty, míchání, dispergace, pigmenty, plniva, nanomateriály, funkční povlaky, antistatické nátěry, ošetruvzdorné nátěry, koroze a protikorozi ochrana.
Počet stran:	145
Počet obrázků:	62
Počet tabulek:	6
Počet grafů:	11
Počet příloh:	1

Annotation

University:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Study program:	Mechanical engineering
Field of study:	Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Title of doctoral thesis:	Coating Systems with High Value in Use
Academic year:	2022/2023
Author:	Ing. Michal Zoubek
Professor:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Associate Professor:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Keywords:	Coatings, coating systems, mixing, dispersing, pigments, fillers, nanomaterials, functional coatings, antistatic coatings, anti-abrasive coatings, corrosion and corrosion protection.
Number of pages:	145
Number of images:	62
Number of tables:	6
Number of graphs:	11
Number of attachments:	1

Abstrakt

Disertační práce *Nátěrové systémy s vysokými užitnými vlastnostmi* se věnuje možnostem využití moderních typů nanomateriálů jako pigmentu (plniva) tekutých nátěrových hmot a vlivu použitých metod a způsobů dispergace těchto materiálů na finální funkční a ochranné vlastnosti povlaků.

Cílem práce bylo ověření vhodnosti jednotlivých typů nanomateriálů v různých typech nátěrových hmot (z hlediska pojivové báze) a sledování vlivu použitých metod a způsobů dispergace použitých nano a mikro částic na specifické funkční a ochranné vlastnosti výsledných povlaků.

V rámci výzkumných aktivit souvisejících s disertační prací byly vyvíjeny nové typy nátěrových hmot pro tvorbu povlaků antistatických, ořeruvzdorných a antikoročních. Při výzkumu přípravy jednotlivých typů nových nátěrových hmot byl kladen důraz na volbu vhodné metody a parametrů dispergace a jejich následnou optimalizaci za účelem redukce potřebného množství použitého pigmentu (plniva) pro dosažení požadovaných vlastností finálního povlaku a snížení surovinových a výrobních nákladů. Současně bylo provedeno komplexní hodnocení jednotlivých parametrů vytvořených nátěrů a nátěrových systémů dle technických norem a zkušebních postupů z oboru povrchových úprav za účelem objektivního zhodnocení vlivu použitého plniva, jeho množství a způsobu dispergace na výsledné funkční a ochranné parametry povlaků.

Klíčová slova

Nátěrové hmoty, nátěrové systémy, míchání, dispergace, pigmenty, plniva, nanomateriály, funkční povlaky, antistatické nátěry, ořeruvzdorné nátěry, koroze a protikoroční ochrana.

Abstract

The doctoral thesis Coating Systems with High Value in Use is focused on to the potential use of modern nanomaterials as pigments (fillers) in liquid coatings and the effect of the methods and ways of dispersing these materials on the final functional and protective properties of coating materials.

The aim of the research was to verify the suitability of individual types of nanomaterials in different types of coatings (from the point of view of the binder base) and to monitor the influence of the used methods and ways of dispersing nano and micro particles on the specific functional and protective properties of final coatings. The research activities related to the thesis led to new types of coating materials with antistatic, anti-abrasion and anti-corrosive properties.

As a part of the research into the preparation of individual coatings, great emphasis was put on the choice of a suitable dispersion method and parameters and their later optimization to reduce the amount of used pigment (filler), achieve the required properties of the final coating, and reduce material and production costs. At the same time, a comprehensive evaluation of the individual parameters of the produced coatings and coating systems was carried out in compliance with technical standards and test procedures in the field of surface treatment to evaluate the effect of the used filler, its quantity, and the method of dispersion on the resulting functional and protective parameters of the coatings objectively.

Key words

Coatings, coating systems, mixing, dispersing, pigments, fillers, nanomaterials, functional coatings, antistatic coatings, anti-abrasive coatings, corrosion and corrosion protection.

Seznam použitých zkratek a symbolů

ASEAN – Association of South East Asian Nations (Sdružení národů jihovýchodní Asie)

PVD – Physical Vapour Deposition (fyzikální depozice par), metoda povlakování

VOC – Volatile organic compound (těkavá organická látka)

UV – Ultra Violet (ultrafialové záření)

NH – nátěrová hmota

PVC – Pigment Volume Concentration (objemová koncentrace pigmentu)

CPVC – Critical Pigment Volume Concentration (kritická objemová koncentrace pigmentu)

OKP – objemová koncentrace pigmentu

KOKP – kritická objemová koncentrace pigmentu

CNT – Carbon nanotubes (uhlíkové nanotrubky)

SWCNT – Single Wall Carbon Nanotubes (jednostěnné uhlíkové nanotrubky)

MWCNT – Multi Wall Carbon Nanotubes (vícestěnné uhlíkové nanotrubky)

Mg – hořčík

Zn – zinek

TiO₂ – oxid titaničitý

ČSN – Česká technická norma

ESD – Electrostatic Discharge (elektrostatický výboj)

BAT – Best Available Technique

DFT – Dry film thickness (tloušťka suchého filmu)

WFT – Wet film thickness (tloušťka mokrého filmu)

HVLP – High Volume Low Pressure (vysoký objem, nízký tlak)

LVLP – Low Volume Low Pressure (nízký objem, nízký tlak)

°C – Celsiusův stupeň (jednotka teploty)

Ω.m – Ohm metr (jednotka měrného elektrického odporu – rezistivity)

Ω – Ohm (jednotka elektrického odporu – rezistance)

g – gram (jednotka hmotnosti), 1 g = 0,001 kg

m – metr (jednotka délky)

mm – milimetr (jednotka délky), 1 mm = 0,001 m

nm – Nanometr (jednotka délky), 1 nm = 0,000 001 m

Pa – Pascal (jednotka tlaku), 100 000 Pa
= 100 kPa = 1 bar

l – litr (jednotka objemu), 1 l = 1 000 ml

GU – gloss unit (jednotka lesku)

m.s⁻¹ – metr za sekundu (jednotka rychlosti)

min – minuta (jednotka času)

µm – mikrometr (jednotka délky)

pH – potenciál vodíku (potential of hydrogen), též vodíkový exponent

ot.min⁻¹ – otáčky za minutu

kJ – kilojoule (jednotka energie)

W – Watt (jednotka výkonu)

hm. % – hmotnostní koncentrace
v procentech

V – Volt (jednotka elektrického napětí)

Obsah

1. Úvod.....	13
2. Současný stav poznání a trendy ve formulaci a přípravě antistatických nátěrových hmot.....	19
2.1 Antistatické nátěrové hmoty	20
2.1.1 Formulace antistatických nátěrových hmot	21
2.1.2 Proces míchání nátěrových hmot	31
2.2 Elektrostatika	42
3. Cíle práce	48
4. Experimentální část	50
4.1 Volba vhodných matric nátěrových hmot.....	50
4.2 Formulace a vlastnosti jednotlivých hmot	51
4.2.1 Nátěrové hmoty na bázi epoxidových pryskyřic.....	51
4.2.1.1 Antistatické nátěrové hmoty.....	51
4.2.1.2 Otěruvzdorné nátěrové hmoty	58
4.2.1.3 Antikorozní nátěrové systémy.....	71
4.2.2 Nátěrové hmoty na bázi polyuretanu	79
4.2.2.1 Otěruvzdorná nátěrová hmota na bázi polyuretanu.....	79
4.2.3 Vodou ředitelné nátěrové hmoty.....	86
4.2.3.1 Vodou ředitelné antistatické nátěrové hmoty.....	86
4.3 Popis parametrů dispergace a jejich vlivu na finální vlastnosti povlaků	103
4.4 Vytvořené funkční nátěrové systémy.....	105
4.4.1 Antistatické nátěrové hmoty	105
4.4.1.1 Antistatická nátěrová hmota na bázi epoxidové pryskyřice.....	105
4.4.1.2 Antistatická nátěrová hmota na bázi epoxidové pryskyřice s příměsí grafitu.....	106
4.4.1.3 Vodou ředitelná nátěrová hmota pro tvorbu elektricky vodivých a antistatických povlaků.....	107
4.4.1.4 Vodou ředitelná nátěrová hmota pro tvorbu antistatických povlaků	108
4.4.2 Antikorozní nátěrové hmoty	109
4.4.3 Otěruvzdorné nátěrové hmoty.....	110
5. Závěr.....	112
6. Splnění cílů disertační práce	113
7. Přínosy pro vědu a praxi	117
8. Seznam použité literatury.....	118
9. Publikace autora.....	129
9.1 Publikace autora související s disertační prací	129
9.2 Publikace autora přímo nesouvisející s disertační prací.....	133
9.3 Aplikované výstupy související s disertační prací	138
9.4 Aplikované výstupy přímo nesouvisející s disertační prací	138

10. Seznam obrázků	139
11. Seznam tabulek.....	143
12. Seznam grafů	144
13. Seznam příloh	145

1. Úvod

Nátěrová hmota je normou ČSN EN ISO 4618:2018 definována jako „*Produkt v kapalné, pastovité nebo práškové podobě, který po nanesení na podklad vytváří nátěrový film mající ochranné, dekorativní a/nebo jiné specifické vlastnosti* [1 p. 23].“ Nátěrový systém je pak výše uvedenou normou definován jako „*Souhrn všech vrstev nátěrových hmot, které mají být nebo byly naneseny na podklad.*“ Přičemž nátěrový systém může být charakterizován počtem vrstev nátěru, kdy nátěrem se s odkazem na uvedenou normu rozumí „*Povlak vytvořený jedním nebo více-násobným nanesením nátěrové hmoty na podklad.*“ [1 p. 23, p. 24].“

Povlaky zhotovené pomocí nátěrových hmot představují nejstarší a nejrozšířenější způsob ochrany kovových a nekovových materiálů. Rozšíření tohoto způsobu povrchových úprav je dáno především snadnou tvorbou povlaků, cenovou dostupností vybavení pro jejich tvorbu, vysokou odolností vůči vlivům korozních prostředí a možností tvorby povlaků se specifickými funkčními vlastnostmi. [2 p. 1, 3 p. 3, p. 12 , 4 p. 240]

Povlaky specifických funkčních vlastností se rozumí takové, jenž neplní pouze bariérovou ochranu povlakovaného materiálu (tedy primární funkci nátěrů), ale umožňují například zajistit elektrickou vodivost povrchu povlakovaného předmětu, zvýšit jeho oteruvzdornost, zajistit samočisticí schopnost a antibakteriální účinek povrchu či snížit jeho světelnou odrazivost atd. Řady specifických funkčních vlastností povlaků nátěrových hmot lze docílit použitím nanotechnologií a nanomateriálů.

Pro dosažení specifických vlastností se upravuje složení nátěrové hmoty. Finální funkční vlastnosti povlaku ovlivňuje nejen výběr vhodného pojiva a aditiv, ale především typ a množství pigmentů a plniv a jejich způsob a parametry dispergace [2 p. 19, p. 91, p. 185, 5 p. 29, p. 47, 6].

Hlavním cílem při tvorbě nových typů nátěrových hmot a ochranných nátěrových systémů je především nalezení způsobu dosažení konečných požadovaných vlastností povlaku, správnou formulací (složením) nátěrové hmoty, s ohledem na výrobní náklady, aplikovatelnost a výsledné ochranné a funkční vlastnosti. Správnou technologií přípravy nátěrové hmoty, tj. dispergací v systémech kapalina – kapalina a kapalina – pevná fáze lze pak docílit nejen snížení podílů složek potřebných pro dosažení funkčních parametrů

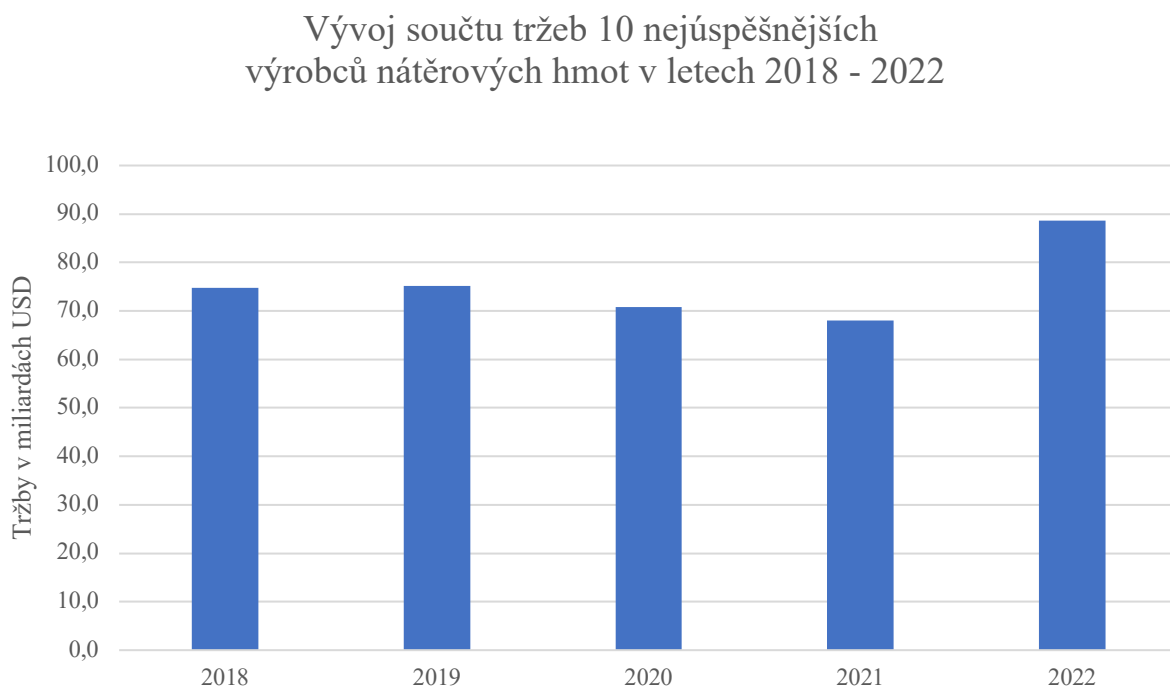
povlaku, a tím i z hospodárnit celý proces výroby, ale i dosáhnout lepších konečných vlastností povlaku [2 p. 286, 3 p. 13, 14].

Samotná výroba a spotřeba nátěrových hmot je úzce spjata s ekonomickým růstem a hospodářskými cykly. [7 p. 2, 3] V roce 2020 byl objem tržeb na trhu s nátěrovými hmotami 167,6 miliard \$ [8]. Rok 2020 byl navíc ovlivněn dopady pandemie COVID-19 a celkově došlo k propadu tržeb o 1 %. Současně v roce 2020 došlo k poklesu zájmu po průmyslových nátěrech (o 6,8 %), avšak došlo k nárůstu nátěrů do stavebnictví (o 5,2 %) a 4 až 5ti-násobnému zvýšení poptávky po antivirových a antibakteriálních nátěrech (tedy nátěrových hmotách vyšších užitných vlastností) [8].

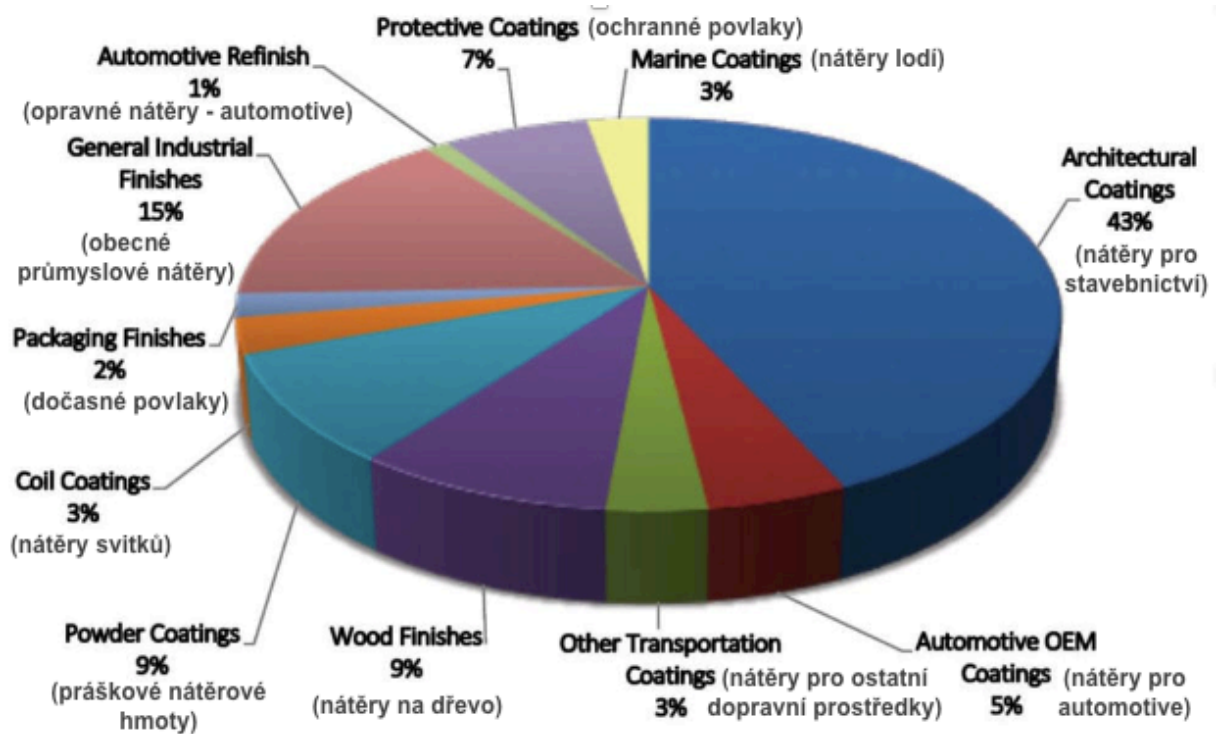
Nejrychleji se rozvíjejícím trhem a z pohledu výrobců nátěrových hmot i nejlukrativnějším je asijsko-pacifický region, kde na tomto regionálním trhu dominuje Čína. V roce 2022 celkový prodej nátěrových hmot v Číně překročil 45 miliard \$ [9]. V dalších letech se předpokládá nárůst spotřeby těchto materiálů především v regionech Číny, Indie a v oblasti Sdružení národů jihovýchodní Asie (ASEAN).

Součet tržeb deseti nejúspěšnějších výrobců nátěrových hmot v posledních pěti letech je na základě údajů uvedených v [8, 9, 10, 11, 12] vyneseno do grafu 1.

Graf 1 – Přehled součtu tržeb 10 nejúspěšnějších výrobců nátěrových hmot v období 2018 – 2022 [8, 9, 10, 11, 12]

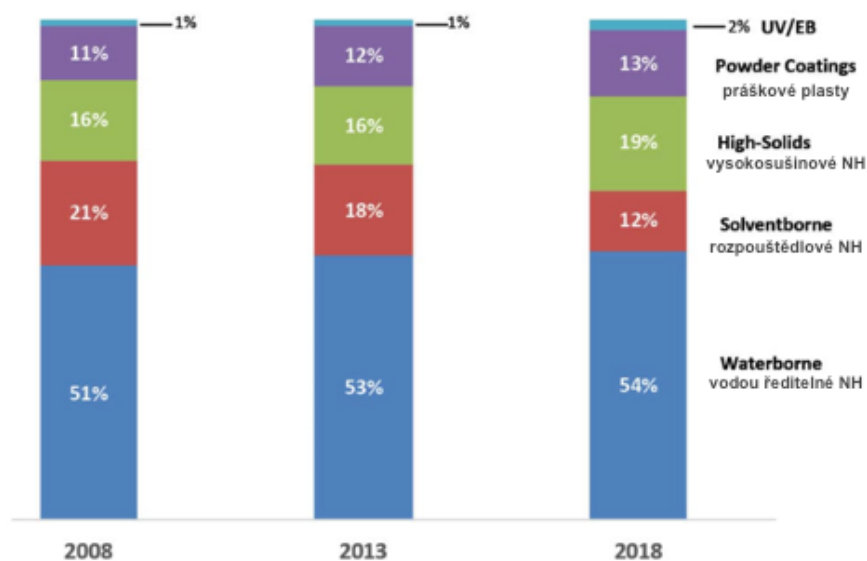


Rozdělení trhu v oblasti jihovýchodní Asie podle objemu spotřeby nátěrových hmot v oblasti jihovýchodní Asie předkládá graf na obrázku 1 níže.[13]



Obrázek 1 – Segmentace trhu v Asijsko-pacifickém regionu dle objemu spotřeby nátěrových hmot v roce 2018 [13]

Naproti tomu vývoj spotřeby a trendy v oblasti jednotlivých typů nátěrových hmot je zobrazen v grafu na obrázku 2 [13]. Zde stojí za povšimnutí jasný trend ve snižování objemu spotřeby rozpouštědlových hmot (důraz na snižování podílu VOC – těkavých organických látek), kdy jejich náhradou jsou nátěrové hmoty vodou ředitelné, s vysokým podílem sušiny, práškové nátěrové hmoty a hmoty vytvrditelné UV zářením či elektronovým paprskem (například u technik tisku v obalovém průmyslu).

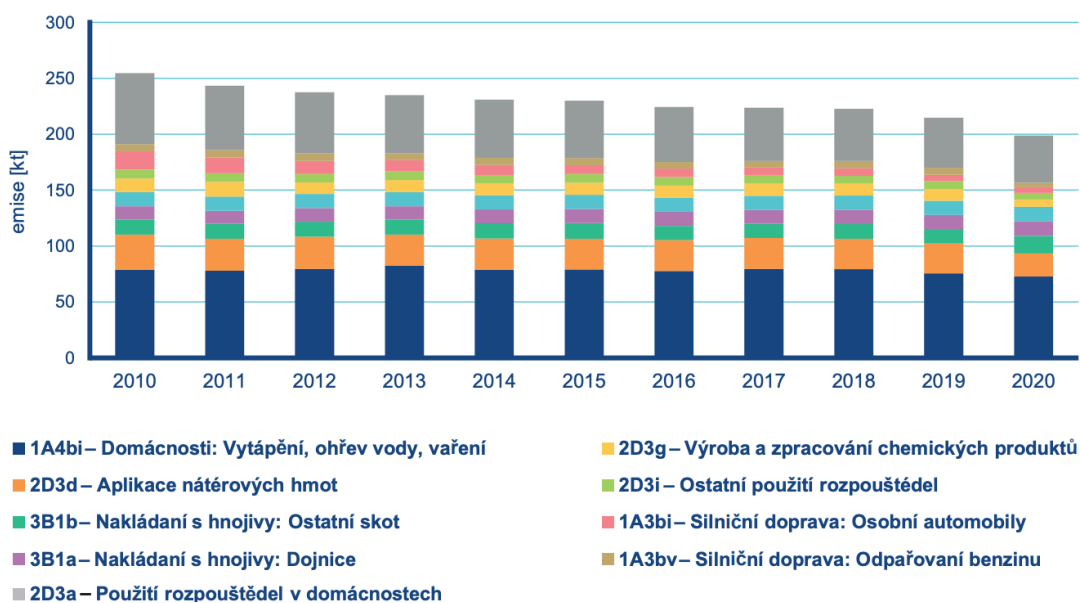


Obrázek 2 – Celkové rozdělení typů nátěrových hmot v Asijsko-pacifickém regionu podle objemu spotřeby v letech 2008, 2013 a 2018 [13]

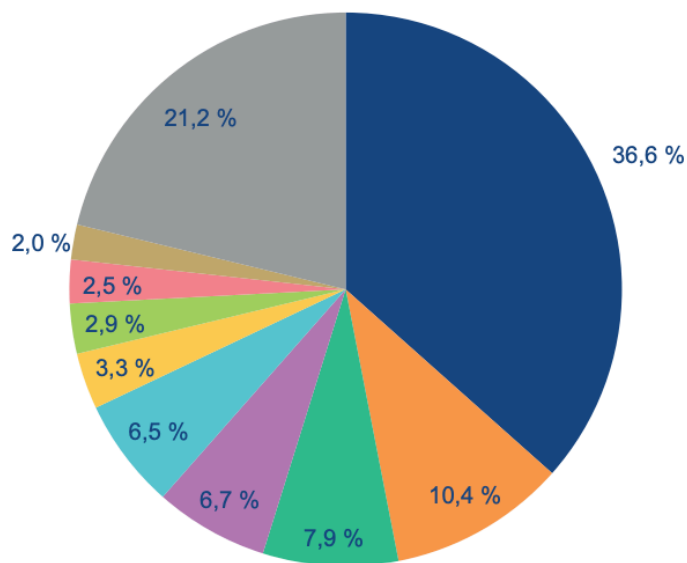
Jak již bylo uvedeno, dlouhodobý růst spotřeby tekutých a práškových nátěrových hmot je nejvýraznější v Asii. Výrazně se liší spotřeba jednotlivých typů nátěrových hmot v rozvojových a vyspělých zemích, a to především z důvodů rozdílné legislativy s ohledem na ekologická a zdravotní rizika. [14 p. 86]. Obecně platí, že legislativní předpisy jsou přísnější především ve vyspělých zemích, přičemž v současné době výrazně narůstá v průmyslových aplikacích těchto států užívání vodou ředitelných nátěrových hmot a práškových nátěrových hmot, a to především z důvodů nízké toxicity, nízkého obsahu VOC (těkavé organické látky – volatile organic compound) a legislativních opatření týkajících se samotných provozů. [14]

Platný zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší [15], definuje VOC jako: „*jakoukoliv organickou sloučeninu nebo směs organických sloučenin, s výjimkou methanu, která při teplotě 20 °C má tlak par 0,01 kPa nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití.*“ [15 p. 2] Charakter vodou ředitelných hmot, možná úskalí spojená s jejich aplikací (např. smáčivost, rizika bleskové koroze) a odlišný způsob zasychání může v současnosti být jedním z důvodů, proč maloodběratelé a laická veřejnost dává do jisté míry přednost nátěrovým hmotám rozpouštědlovým a vysokosušinným [16 p. 10, 11]. Vývoj emisí VOC v ČR dle dat Českého hydrometeorologického ústavu (CHMÚ) uvádí graf na obrázku 3. Z grafu uvedeného v grafické ročence CHMÚ vyobrazeném níže na obrázku 4, lze odečíst dopad oboru povrchových úprav na množství emisí VOC. Aplikaci nátěrových

hmot připadal v roce 2020 podíl na celkových emisích nemetanových těkavých organických látkách 10,4 % [17 p. 94].



Obrázek 3- vývoj emisí VOC v ČR v letech 2010 až 2020 [17]



Obrázek 4 – podíl sektorů uvedených na obrázku 3 na celkových emisích nemetanových těkavých organických látek (NMVOC) [17]

O současných trendech v oblasti organických nátěrových hmot hovoří například dokument Ministerstva životního prostředí – Těkavé organické látky (VOC) – procesy a odstraňování (Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách u stacionárních zdrojů

nespadajících pod BREF)[18], kde jsou jako primární BAT (Best Available Technique – nejlepší dostupná technika) uvedeny nátěrové hmoty vodou ředitelné, případně vysokosušinné s nízkým obsahem VOC a nátěrové hmoty vytvrzované pomocí záření (např. UV vytvrditelné laky) [18 p. 32, 42, 114].

Zvýšený zájem o nátěrové hmoty vyšších užitných vlastností je tedy dán nejen zvýšenými nároky na životnost povrchových ochran [19 p. 12] či ekologické aspekty a zpřísněnou legislativou [18] v oblasti práce s nátěrovými hmotami, ale také novými materiály, kompozity a aditivními technologiemi výroby v kombinaci s reakcí na uspokojení poptávky po nátěrech specifických funkcí spojených s globálními jevy (pandemie COVID-19, zintenzivnění zbrojní výroby apod.) [8, 2 p.3] a výrobními trendy (použití nových typů především polymerních materiálů jako náhrady kovů, rozvoj aditivních výrobních technologií apod.) [7 p. 4, 20].

S rozvojem výroby a použití plastových a kompozitních dílů v průmyslových aplikacích, rostou požadavky a nároky na jejich povrchovou úpravu. Plasty, u kterých se lze v případě aplikace nátěrových hmot setkat s celou řadou úskalí (např. nedostatečná smáčivost povrchu, nízká adheze povlaku či odolnost vůči rozpouštědlům, požadavky na speciální předúpravy povrchu apod. [21 p. 39, 41, 43]), představují nedílnou součást celé řady výrobků. Povlaky vytvořené pomocí nátěrových hmot dodávají plastovým dílům mimo ochranné funkce především dekorativní, estetické a funkční vlastnosti (např. samočistící schopnost, odrazivost, elektrická vodivost, antistatické vlastnosti, antibakteriální účinek a další.) [30 p. 13].

Dericiler a kol. [22 p. 625] na příkladu automobilu uvádí, že plastové díly v automobilu tvoří 50 % objemu, avšak k celkové hmotnosti vozu přispívají pouze 10 %. Dále autoři zmiňují poměrně významný trend na snižování hmotnosti vozů vyvolaný především zvýšenými legislativními nároky na emise CO₂ spojenými s klimatickou strategií Evropské unie. Tímto se tak otevírá další potenciál pro využití kompozitních a polymerních materiálů a jejich povlakování funkčními povlaky.

2. Současný stav poznání a trendy ve formulaci a přípravě antistatických nátěrových hmot

Rozvoj v oblasti polymerních materiálů a jejich rapidní nárůst použití v celé řadě aplikací za posledních 100 let má výrazný vliv na nárůst četnosti negativních projevů statické elektřiny. Z tohoto důvodu byla popsána rizika a problémy související s elektrostatickými jevy a materiály a postupy pro jejich potlačování [23 p. 8]. Problematice elektrostatiky a elektrostatických jevů se věnuje norma ČSN IEC/TR 61340-1 [23], ochraně před účinky statické elektřiny ve výbušných prostředích pak norma ČSN CLC/TR 60079-32-1[24].

Tekuté nátěrové hmoty jsou vzhledem ke své povaze ideální k tvorbě nátěrových hmot pro antistatické a elektricky vodivé povlaky. Norma ČSN IEC/TR 61340-1 [24 p. 9] definuje pojmem antistatický jako „*vlastnost materiálu, která brání nebo omezuje triboelektrické nabíjení*“. Vhodně zvolené pojivo nátěrové hmoty může být využito jako matrice do které jsou dispergovány vodivé částice (pigmenty, plniva) za účelem dosažení vodivých vlastností finálního povlaku [1 p. 205, 5 p. 29]. Použití tekutých nátěrových hmot pro tvorbu antistatických povlaků je výhodné i z pohledu jejich uplatnění na trhu a povahy praktických aplikací (nátěry podlah, nábytku, technické aplikace apod.). Výhodou je rovněž možnost použití těchto hmot na různých typech materiálů v různých prostředích [25]. Přidaná hodnota antistatických nátěrových hmot nespočívá pouze v dosažení ochranných a funkčních vlastností povrchu povlakovaného předmětu, ale především v předcházení zbytečných materiálních či lidských ztrát způsobených nežádoucími a neviditelnými elektrostatickými výboji v oborech výroby elektroniky, zpracování hořlavých a výbušných materiálů.

Následující kapitoly popisují současný stav poznání a trendy ve formulaci (složení) a přípravě (míchání a dispergaci) nátěrových hmot pro tvorbu antistatických a elektricky vodivých povlaků.

2.1 Antistatické nátěrové hmoty

Nátěrová hmota se skládá z řady složek, které lze například rozdělit dle těkavosti na netěkavé a těkavé [3 p. 2]. Mezi netěkavé patří filmotvorné látky, pigmenty, plniva, organická barviva, změkčovadla, aditiva a další pomocné látky. Těkavé látky představují rozpouštědla a ředidla. Filmotvorné látky jsou netěkavé složky pojiva, jež mohou být minerálního nebo organického původu, které jsou sami o sobě schopny vytvořit nátěr. Jako takové mohou být rozpuštěny v rozpouštědlech nebo dispergovány. Pojivem se rozumí filmotvorná látka nebo jejich směs včetně změkčovadel a netěkavých aditiv, které vážou dispergované částice (pigmenty, plniva) v nátěru a vytváří jeho spojitou fázi [1 p. 5, 3 p. 10, 4. p. 240]. Jak již bylo uvedeno v úvodní kapitole, je v současné době kladen vysoký důraz na ekologické aspekty výroby a nakládání s nátěrovými hmotami [14, 18]. Těmto trendům se pak i přizpůsobuje formulace nátěrových hmot a volba jednotlivých složek [16 p. 12]. Zásadní pro formulaci nátěrové hmoty jsou také technologické vlastnosti výsledného produktu, mezi které patří např. doba zasychání, kryvost, roztíratelnost, slévavost, stříkatelnost, skladovatelnost atd. [3 p. 10]

Nátěrové systémy se zvýšenou elektrickou vodivostí jsou vhodné díky antistatickým vlastnostem povlaku pro prostředí, ve kterých je potřeba na ošetřených plochách předmětu potlačit negativní důsledky tvorby elektrostatického náboje při zachování protikorozní ochrany základního materiálu. Jedná se především o negativní jevy, kterými je statická přitažlivost (akumulace prachu a nečistot na povrchu vlivem elektrického náboje) a statické vybíjení (elektrické výboje nastávající při vybíjení). Elektrostatický výboj (angl. Electrostatic Discharge – odtud zkratka ESD) představuje v mnohých provozech a prostorách značné riziko, jenž je třeba eliminovat. [23 p. 8, 24 p. 17, 25 p. 22] Jednou z forem eliminace představují antistatické nátěry, které jednak zamezují tvorbě náboje, ale umožňují i jeho odvedení. Tohoto jevu je docíleno změnou rezistance povlaku na hodnotu přibližně v rozsahu 10^5 až $10^{11} \Omega$ [23 p. 10, 24 p. 20, 25 p. 22, 26 p. 34, 27 p. 143]. Široké uplatnění těchto funkčních povlaků lze nalézt např. při povrchových úpravách plastových výrobků, podlah a nábytku v petrochemickém a chemickém průmyslu, povrchových úpravách nádrží, povrchů pro skladování a zpracování explozivních materiálů, na operačních sálech či plochách určených pro montáž a skladování elektrických přístrojů a plošných spojů atd. [23, 24, 28]. Pojmům a problematice elektrostatiky je věnována kapitola 2.2.

Praktickým příkladem využití vodivých povlaků k zamezení negativních dopadů statického náboje na plastovém výrobku může být americký patent US 8,432,658 B1 (A. Heise) [29] vydaný v roce 2013. Uvedený patent se zabývá eliminací a odvodem statického náboje z vnitřního povrchu polymerního výfukového potrubí automobilu. Princip ochrany je založen na opatření vnitřního povrchu potrubí elektricky vodivým povlakem a vodivým spojením ošetřených ploch s kostrou vozidla. Jako vhodné povlaky jsou v patentu uvedeny PVD hliníkový povlak, případně vodivý a žáruvzdorný povlak vytvořený pomocí nátěrové hmoty.

2.1.1 Formulace antistatických nátěrových hmot

Při vývoji nových nátěrových hmot je důležité brát v potaz několik faktorů. Nejprve je nutné definovat výsledné požadavky na nátěrovou hmotu, resp. povlak (např. pro jaké korozní prostředí je určen, jakou technologií se bude aplikovat, jakým způsobem bude probíhat zasychání a jaké má mít funkční a ochranné parametry). Počátkem procesu formulace nátěrové hmoty je volba vhodné kombinace – těkavých a netěkavých složek (pojiva, pigmentu a rozpouštědla). Pigment se vybírá s ohledem na požadovaný barevný odstín či funkční/ochranné vlastnosti, kryvost a index lomu. [2 p. 335, 3 p. 34]. Dalším krokem je pak výpočet objemové koncentrace pigmentu *OKP* (angl. zkratka PVC – Pigment Volume Concentration) [2 p. 336, 3 p. 14], jenž je definován normou ČSN EN ISO 4618 [1] jako: „*Poměr celkového objemu pigmentů a/nebo plniv a/nebo dalších nefiltrovaných pevných částic v daném produktu k celkovému objemu netěkavých látek, vyjádřených v procentech*“ [1 p. 29], potažmo kritické hodnoty objemové koncentrace pigmentu *KOKP* (angl. zkratka CPVC – Critical Pigment Volume Concentration) [3 p. 14], kterou norma ČSN EN ISO 4618 [1] definuje jako „*Hodnotu objemové koncentrace pigmentu, při které je prostor mezi dotýkajícími se pevnými částicemi pigmentu právě zaplněn pojivem a nad kterou se stanovené vlastnosti nátěrové hmoty výrazně mění*“ [1 p. 57, 3 p. 16, 5 p. 39].

Výpočet objemové koncentrace pigmentu [3 p.15, 5 p. 39]:

$$OKP = \frac{V_{pig}}{V_{pig} + V_{poj}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

kde V_{pig} je objem pigmentu a plniva a V_{poj} objem netěkavých složek pojiva.

Již bylo uvedeno výše, že významnou hodnotou pro objemovou koncentraci pigmentu je tzv. kritická objemová koncentrace *KOKP*. Při překročení této objemové koncentrace, již není zajištěno dostatečné pokrytí částic pojivem a může docházet k vytvoření

vzduchových mezer. Je-li koncentrace pigmentu nižší než KOKP, jsou v nátěru dominantní pojiva, která poskytují své významné vlastnosti. Naopak pokud je koncentrace pigmentu nad úrovní KOKP, pojivo již není schopno zaplnit volný prostor mezi pigmentem a nátěr se tak stává porézním a náchylným k řadě defektů a ztrátě funkčních a ochranných vlastností [2 p. 341, 3 p.15, 5 p. 39]. Výpočet KOKP lze provést např. ze znalosti spotřeby oleje (olejového čísla) a hustoty pigmentů a plniv dle vzorce (2) [3 p. 25]:

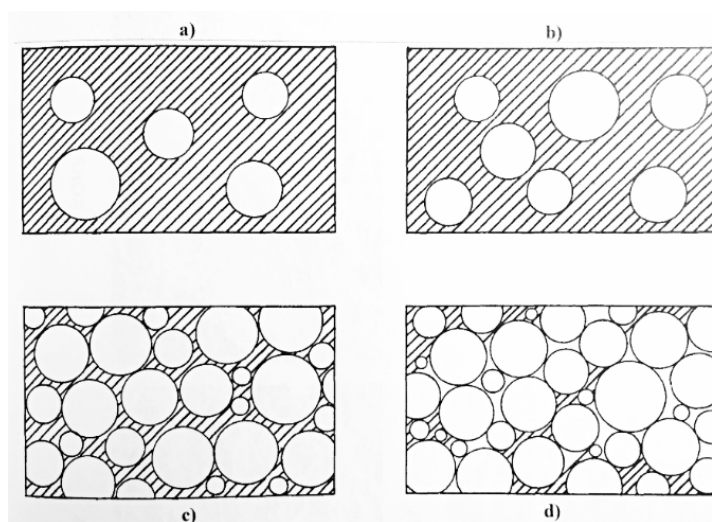
$$KOKP = \frac{10\,000 \cdot \rho_p}{\left(\frac{100}{\rho_p} + \text{o.č.}\right) \cdot 0,93} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Kde, ρ_p představuje hustotu pigmentu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$], o.č. – olejové číslo [$\text{g}\cdot 100\cdot\text{g}^{-1}$] a 0,93 hustotu lněného oleje [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$].

Z hodnot OKP a KOKP lze pak stanovit tzv. kvocient Q, jenž umožňuje formulaci nátěrových hmot založených na konkrétní pojivové bázi při použití různých pigmentů, avšak při zachování stejného poměru OKP / KOKP lze docílit sjednocení většiny jejich vlastností (např. lesk, tvrdost, apod). [3 p. 18]

$$Q = \frac{OKP}{KOKP} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Prostorové uspořádání pigmentu v nátěrovém filmu při různých hodnotách OKP je patrné z obrázku 5.



Obrázek 5 – Poměr objemů pigmentů a pojiva při zvyšování OKP [3 p. 19]

a – nízká hodnota OKP, b – vyšší hodnota OKP, c – hodnota OKP = KOKP, d – hodnota OKP > KOKP

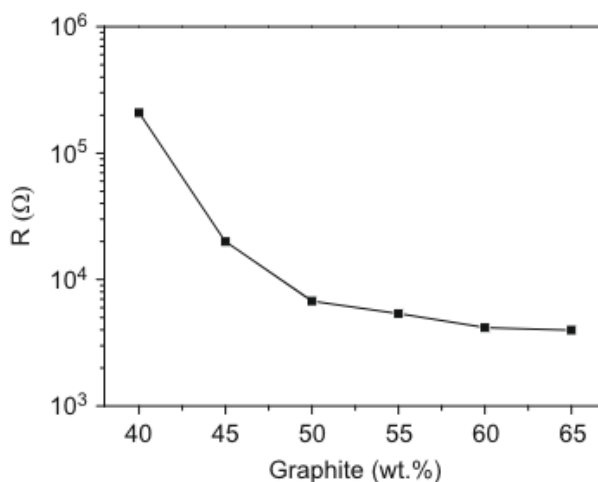
Při vývojových pracích či studiu pojiv a pigmentů, kde nehraje zásadní roli barevný odstín či cena surovin, jsou podstatné pro formulaci důležité parametry, které mají podstatný význam na konečné vlastnosti povlaku. Mezi fyzikální parametry, jenž ovlivňují vlastnost filmu (především s ohledem na ochranu proti korozi), pak kromě OKP a KOPK také uspořádání částic pigmentů a plniv (hustota uskupení), vzájemné působení mezi pigmenty/plnivy a pojivem (dispergovatelnost), efekty na fázovém rozhraní pevných částic a pojiva (difuze vody a elektrolytů nátěrovým filmem) a chování nátěrového filmu pod vlivem změn teploty (cyklické namáhání, vnitřní pnutí) [5 p. 42, 31 p. 14, 32 p. 116].

Většina povlaků zhotovených pomocí nátěrových hmot představuje elektrické izolanty. Obecně jsou možné tři způsoby, kterými lze formulovat nátěrové hmoty pro elektricky vodivé povlaky: využít vodivých polymerů, začleněním vodivých pigmentů do pojiva, případně kombinací obou způsobů [25, 33, 35, 39]. Nátěrové hmoty pro tvorbu antistatických povlaků se připravují zejména začleněním kovových částic do pojiva (matrice). Ve velké části se používají vodivé přísady spolu s epoxidovým polymerem. Optimalizace obsahu pevných látek a objemové nebo hmotnostní koncentrace částic v nátěru se docílí tak, že se mění složení pojiva a množství částic. Pro dosažení minimální hodnoty měrného odporu v povlaku je přidáno dostatečné množství vodivých částic [25 p. 24, 34 p.1]. Jako perspektivní se jeví využití moderních nano-materiálů pro dosažení vodivých vlastností povlaku. Užití vodivých polymerů je značně omezeno především z důvodů ztráty vodivých vlastností vlivem oxidace a dále horší zpracovatelností. K dosažení elektrické vodivosti povlaku je tedy vhodnější využít vodivých částic či hygroskopických materiálů ve formě pigmentu/plniva. V dostupné literatuře jsou jako nejčastěji používané typy vodivých pigmentů uváděny částice kovů (měď, stříbro, železo apod.) a dále alotropy uhlíku (saze, grafit či uhlíkové nano-materiály) [5 p. 389, p. 394, 25 p. 24, 36 p. 1]. Nejpoužívanější jsou pak ve formě nátěrů epoxidových, polyuretanových a vodou ředitelných [16 p. 8, 27 p. 139, 36 p. 1]

Azim a kol. v článku [34] poměrně detailně popisují volbu pojiva a plniva, vztah OKP (objemová koncentrace pigmentu) a elektrického odporu povlaku. Použity byly saze a grafit jakožto pigmenty vnesené do pojiva na bázi modifikovaná epoxidové pryskyřice k dosažení co nejnižšího povrchového odporu výsledného povlaku. Povrchový odpor povlaků byl optimalizován pomocí různých OKP použitých pigmentů a stanovením optimálního poměru mezi grafitem a sazemí (0:10, 87:13, 85:15, 83:17, 80:20, 75:25, 60:40) [34 p. 3]. Jako plnivo byl v první fázi použit grafit o obsahu uhlíku 98 – 99 %, velikosti částic až 50 μm a o hustotě

2,26 g.cm⁻³. V článku je zmíněn problém s dispergací pigmentu při OKP > 55 %. Bohužel zařízení, případně podmínky dispergace v článku nejsou uvedeny. Měrný odpor byl měřen pomocí čtyřbodové metody. OKP se pohybovala od 30 do 60 %. Nejnižšího měrného odporu (rezistivity) $6 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$ bylo dosaženo při 55 % OKP. Nad 55 % OKP byla dispergace pigmentu obtížná. Pro další snížení měrného odporu, byly přidány saze. Saze byly ke grafitu přidávány v různých poměrech. Minimální hodnota měrného odporu, a to $2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$, byla naměřena při použití grafitu a sazí v poměru 85:15 [34 p. 3].

Využitím grafitu jako plniva epoxidové pryskyřice za účelem formulace povlaku s dobrou elektrickou vodivostí a vysokou odolností vůči opotřebení se věnuje Pan a kol. [35]. Dvousložkovou epoxidovou pryskyřici plnili grafitem o velikosti zrna < 10 μm. Jednotlivé kapalné složky byly dispergovány pomocí zubového míchadla při otáčkách 500 rpm po dobu 30 minut. Následně byly do připraveného roztoku vmíchány částice grafitu v hmotnostních podílech 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 45%, 50%, 55% a 60% a pro jejich dispergaci byl použit kulový mlýn. Autoři mimo doby trvání procesu 30 min neuvádějí žádné další parametry [35 p. 1319]. Při podílu 40 hm. % začal být povlak elektricky vodivý s hodnotou povrchové rezistance $2,0 \times 10^5 \Omega$. Průběh závislosti povrchové rezistance na podílu grafitu je vyobrazen v grafu na obrázku 6 níže [35 p. 1320]. S rostoucím podílem grafitu se snižovala přilnavost povlaku k podkladu, kterým byl polyvinylchlorid. Pro 10 až 30 hm. % přilnavosti dle ČSN EN ISO 2409 [37] hodnocena stupněm 1, pro 40 až 50 hm. % stupni 1-2, pro 55 hm. % stupněm 2 a pro 60 hm. % stupni 2-3.[35 p. 1320]. Z výzkumu je tedy patrný pozitivní vliv zvyšujícího se podílu grafitu na vodivost povlaku, avšak s negativním dopadem na jeho přilnavost, a tedy jednu ze zásadních ochranných funkcí.



Obrázek 6 – Průběh povrchové rezistance v závislosti na podílu grafitu v povlaku [35 p. 1320]

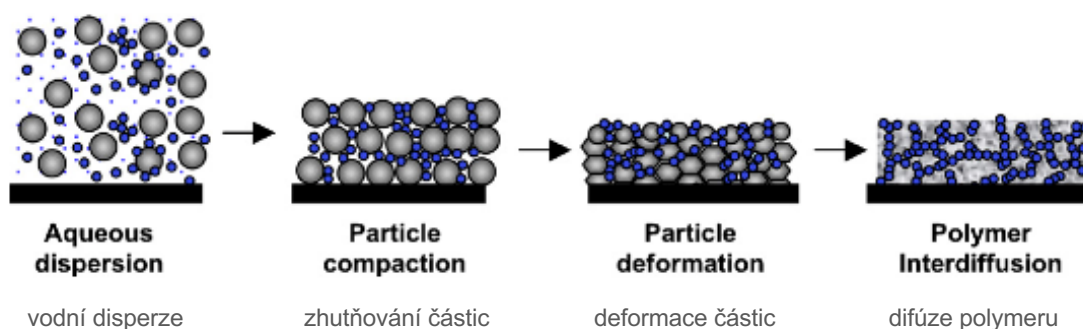
Využitím bioodpadu pro tvorbu antistatických nátěrových hmot se zabývali ve své studii [36] Bhakare a kol., kteří vyvinuli postup na získání pigmentu na bázi uhlíku z kravského trusu, jenž byl následně použit jako vodivý pigment v alkydové pryskyřici (poměr složek 2:1 obj. ve prospěch alkydové pryskyřice) [36 p. 3]. Výsledný povlak vykazoval konduktivitu $6,84 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ a měrný elektrický odpor $1,46 \times 10^{-7} \Omega.m$ [36 p. 7]. Pro stanovení antistatických vlastností povlaku byla použita čtyřbodová metoda [36 p. 4].

Shen a kol. [27], studoval elektrickou vodivost, korozní odolnost, přilnavost a mikrostrukturu povlaků, obsahující vícevrstvé uhlíkové nanotrúbky – MWCNTs (Multi Wall Carbon Nanotubes). Jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice a jako vodivé plnivo byly použity právě MWCNT. Ty měly průměrnou délku 10 μm , střední průměr 11 nm a jejich hustota se pohybovala v rozmezí od 0,015 do 0,03 g.cm^{-3} . Nátěr byl aplikován stříkáním v elektrostatickém poli na uhlíkovou ocel. Postup tvorby nátěrové hmoty spočíval ve smísení MWCNT s epoxidovou pryskyřicí za intenzivního míchání při teplotě 70 °C po dobu 1 hodiny. Vytvořeny byly nátěrové hmoty o podílech 2 hm. %, 4 hm. %, 6 hm. % a 8 hm. % MWCNT, které byly následně nanášeny na uhlíkovou ocel S235JR, jež byla předehřívána na 220 °C po dobu 30 minut [27 p. 140]. Tloušťka vytvořených povlaků se pohybovala v rozmezí 50 – 60 μm . Měrný elektrický odpor byl měřen pomocí čtyřbodové metody. Elektrický měrný odpor čistého epoxidového povlaku byl $1,2 \cdot 10^8 \Omega.m$. Při obsahu dvou hmotnostních procent MWCNT byl odpor povlaku snížen o devět řádů. V článku je zmíněno, že oproti předpokladu nevykazovaly vzorky o 4 hm. % a 6 hm. % MWCNT výrazný rozdíl měrného elektrického odporu. Bylo prokázáno, že s narůstajícím podílem MWCNT byla zlepšena elektrická vodivost. Z hlediska protikorozní ochrany upřednostňují povlak o koncentraci 2 hm. % MWCNT. Tento povlak vykazoval uspokojivé hodnoty měrného elektrického odporu ($7,6 \times 10^{-2} \Omega.m$) a dostatečnou odolnost vůči agresivnímu prostředí. [27 p. 145]

Alternativou k použití epoxidových pojiv pro tvorbu antistatických nátěrů se zabýval Kosiňsky a kol. [38]. Jejich snahou byla modifikace podlahové nátěrové hmoty na bázi polymočoviny a polyuretanu. Pro dosažení antistatických vlastností byla v experimentu porovnávána tři aditiva – tetraalkylamoniová sůl, roztok hexafluorfosforečnanu draselného a iontová kapalina na bázi imidazolia. Aditiva byla do připravené hmoty přidána v procentuálním podílu 2, 4, 6 a 8 obj. % [38 p. 4]. Celkem bylo testováno 13 nátěrů a byly ověřeny jejich antistatické vlastnosti a fyzikálně chemické parametry. Z publikovaných výsledků je zřejmé, že pomocí použitých aditiv lze vytvořit povlaky antistatických,

a dokonce povlaky elektricky vodivých vlastností, které jsou však náchylné na vlhkost vzduchu, kdy při velmi nízké vlhkosti ztrácejí antistatické vlastnosti [38 p. 11]. Jako nejvhodnější se z hlediska funkčních a ochranných parametrů jeví použití 2 obj. % iontové kapaliny na bázi imidazolia, kdy je při zachování přijatelných ochranných vlastností dosaženo hodnot rezistance (elektrického odporu) v řádech $10^5 - 10^6 \Omega$. Autoři rovněž uvádí jednotkovou cenu za kilogram jednotlivých aditiv, která činí v případě tetraalkylamoniové soli 5 €, u roztoku hexafluorofosforečnanu draselného 46 € a 55 € u iontové kapaliny na bázi imidazolia [38 p. 11].

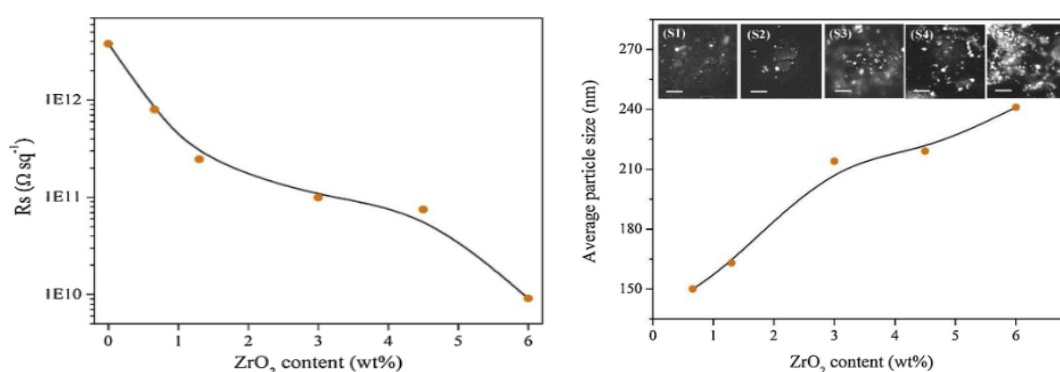
V další práci zaměřené na tvorbu elektricky vodivých povlaků [39] byl zkoumán vliv vodivých částic na vlastnosti nátěrových hmot na bázi vodních disperzí vodivých částic a polymerních částic latexu. Francis a kol. [39] testovali několik typů vodivých částic: saze, antimon-oxid cínu (ATO), indium-oxid cínu (ITO) a jednostěnné nanotrubic (SWCNT) [39 p. 49]. Autoři věnují značnou část zkoumání vlivu velikosti částic použitého plniva, jeho tvaru a případné aglomeraci částic či jejich rozložení v povlaku. Vyjma nanotrubic měla použitá plniva velikost do 20 nm. V případě nanotrubic byl použit průměr do 2 nm a délka 100+ nm. Saze a ATO byly použity sférické, částice ITO byly použity lupínkové. Je patrné, že k dosažení dostatečných vodivých vlastností lze použít velmi nízkých podílů částic ATO a ITO (cca do 0,08 hm. %) [39 p. 53]. V případě uhlíkových nanotrubic byla sledována závislost do 2,5 hm. %. Pro dosažení stejných hodnot vodivosti povlaků v případě polydisperzního latexu bylo použito 2 hm. % SWCNT oproti 4 hm. % nano sazí. Autoři upozorňují na nutnost dostatečné dispergace a celistvosti povlaku. Při necelistvosti povlaku docházelo k neuspokojivým funkčním vlastnostem. Pro stanovení parametrů elektrické vodivosti použili autoři 3 přístroje a sondu pro 4 bodové měření. [39 p. 50].



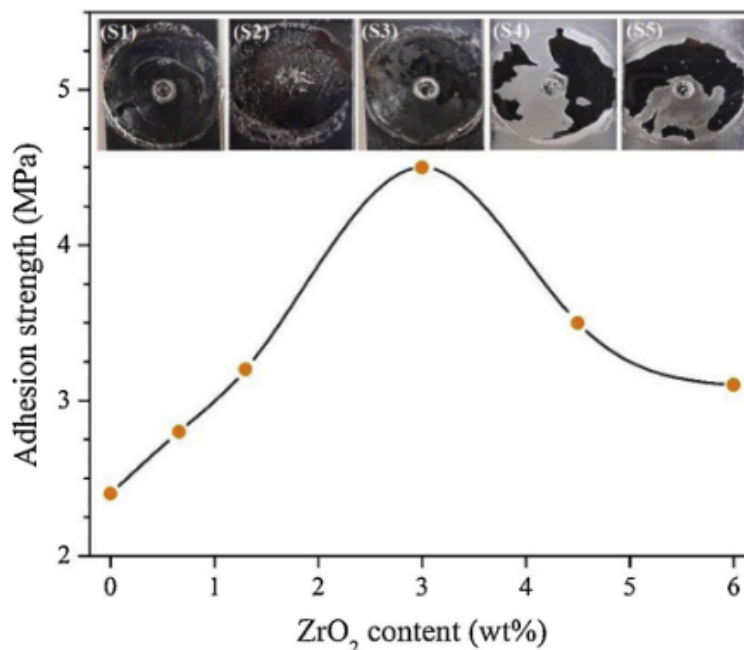
Obrázek 7 – Schéma vývoje mikrostruktury kompozitního povlaku na bázi latexu s vodivými částicemi [39]

Přípravě vodou ředitelného antistatického nátěru za použití vodivých polymerů konkrétně nejstaršího známého vodivého polymeru polyanilínu (PANI) se věnuje Mirmohseni a kol. [33]. Autoři v textu popisují výrobu polyanilínových nanovláken s vysokým poměrem stran (průměr v rozmezí 0,078 – 1,000 μm a délka kolem 12 – 67 μm) [33 p. 995]. Připravený nanokompozit vykazoval konduktivitu 0,025 $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, jenž byla o několik řádů vyšší než konduktivita akrylového latexového filmu ($9,2 \times 10^{13} \text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Stanovení elektrické konduktivity bylo provedeno na principu čtyřbodové metody na autory sestaveném zařízení [33 p. 993].

Přípravě nanokompozitní vodou ředitelné nátěrové hmoty na bázi polyuretanu je rovněž věnována studie [40], kde se Yousefi a kol. věnují možnosti použití nanočástic oxidu zirkoničitého ZrO_2 . Při přípravě hmot byl použit prášek ZnO_2 o velikosti částic 20 – 50 nm. Je popsána modifikace ZnO_2 metodou sol-gel a způsob dispergace částic mechanickým mícháním (typ míchadla není uveden) po dobu 12 hodin při otáčkách 3 000 rpm, s následným použitím ultrazvukového homogenizátoru po dobu 30 minut. Další parametry dispergace za použití ultrazvukového homogenizátoru autoři neuvádí [40 p.2]. Nanesení vytvořených nátěrů na plechy z korozi-vzdorné oceli (AISI 304) bylo provedeno pomocí aplikátoru (natahovacího pravítka). Výsledná tloušťka testovaných povlaků měla $40 \pm 5 \mu\text{m}$. Hmotnostní podíl ZnO_2 se ve vytvořených povlacích pohyboval od 0 do 6 hm. %. [40 p. 2]. U výsledných povlaků byla mimo povrchového odporu a drsnosti povlaku stanovena i přilnavost k základnímu materiálu odtrhovou zkouškou přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41]. V textu je mimo jiné řešena i problematika aglomerace částic a její vliv na výslednou přilnavost a elektrickou vodivost. [40 p. 6]. Z provedených experimentů byl prokázán pozitivní vliv modifikovaného ZnO_2 na změnu povrchového odporu povlaku i přilnavost povlaku. [40 p. 7].



Obrázek 8 – vliv podílu částic ZrO_2 na povrchovou rezistivitu povlaku (vlevo), vliv podílu částic ZrO_2 na jejich průměrnou distribuci (vpravo) [40]

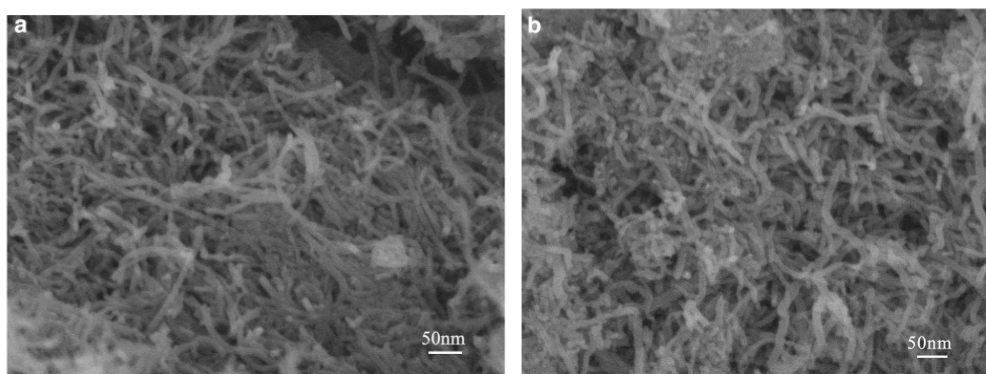


Obrázek 9 – průběh odtrhového napětí (přilnavosti povlaku) v závislosti na podílu částic ZrO₂ v povlaku [40]

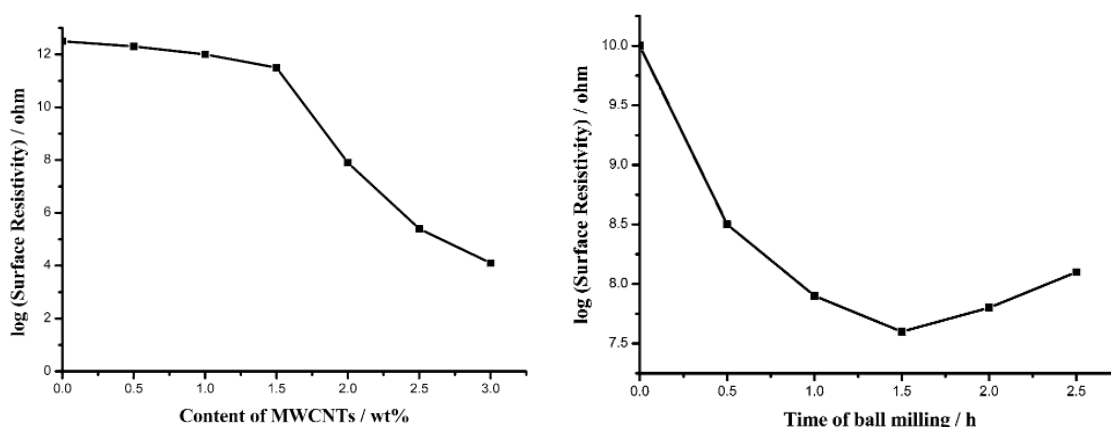
Použití nanočástic stříbra o velikosti pod 100 nm a nanočástic křemíku o velikosti okolo 10 nm se věnují Gornicka a kol. [42], kdy tyto pigmenty byly použity pro dosažení antistatických vlastností polyesterové a polyesterimidové matrice. Podíl částic v matricích byl 1,3 hm. % stříbra a 1,5 hm. % křemíku [42 p. 1]. Pro účely dispergace byla použita speciálně vyvinutá metoda, jenž nebyla autory uvedena. Testováním antistatických vlastností vyhotovených povlaků se ukázalo, že začlenění velmi malého množství nanočástic stříbra do polymerního povlaku může zlepšit schopnost povrchu odvádět náboj, zatímco přidání nanočástic křemíku výrazně zhoršuje antistatické vlastnosti povlaku [42 p. 3].

Úpravě povrchových vlastností panelů z polyvinylchloridu se věnuje Ying a kol. [31]. UV vytvrditelnou nátěrovou hmotu o rezistanci $1,0 \times 10^{12} \Omega$, kterou jsou běžně panely povlakovány, modifikovali pomocí víceštěnných uhlíkových nanotrubic (MWCNT). Autoři popisují poměrně náročný proces úpravy MWCNT, jejich oxidaci a následnou silanizaci pro účely zvýšení adheze na rozhraní MWCNT a UV laku [31 p. 4]. Upravené nanotrubic byly následně použity ve formě disperze MWCNT/etanol. Pro přípravu disperze byl použit ultrazvukový homogenizátor. Smísení MWCNT a UV vytvrditelného laku pak probíhalo v kulovém mlýnu při rychlosti otáčení achátové nádoby 400 ot.min^{-1} . Autoři rovněž uvádí efekt doby procesu míchání na výsledný povrchový odpor povlaku. Po promísení je provedeno odstranění etanolu pomocí destilace za sníženého tlaku po dobu 30 minut

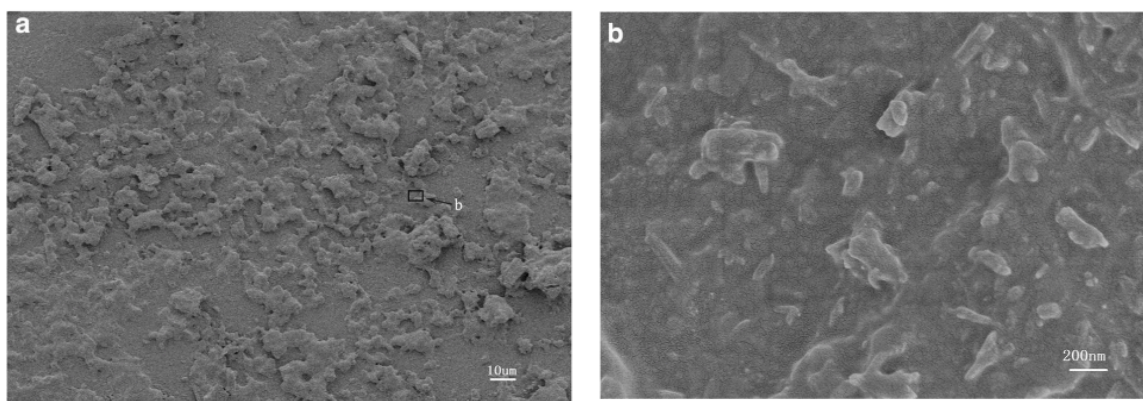
a teplotě 50 °C. Takto byly připraveny nátěrové hmoty s podílem 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 a 3,0 % hm. MWCNT, které byly následně aplikovány o tloušťce WFT 20 μm spirálovým natahovacím pravitkem [31 p. 4]. Výsledná rezistance pro povlak s obsahem 2,0 hm.% MWCNT byla $4,1 \times 10^7 \Omega$. Povlak tak splňuje požadavky na antistatické vlastnosti [31 p. 14]. Měření povrchového odporu bylo provedeno 2 bodovou metodou pomocí ESD přístroje TECMAN TM385 [31 p.6]. Mimo stanovení povrchového odporu autoři rovněž posuzují přilnavost povlaků mřížkovou zkouškou dle ČSN EN ISO 2409 [37], kdy do koncentrace 1,5 hm. % lze výsledek zkoušky klasifikovat stupněm 0 a koncentrace 2,0 až 3,0 hm. % stupněm 1 dle tabulky 1 uvedené v ČSN EN ISO 2409 [37 p. 15].



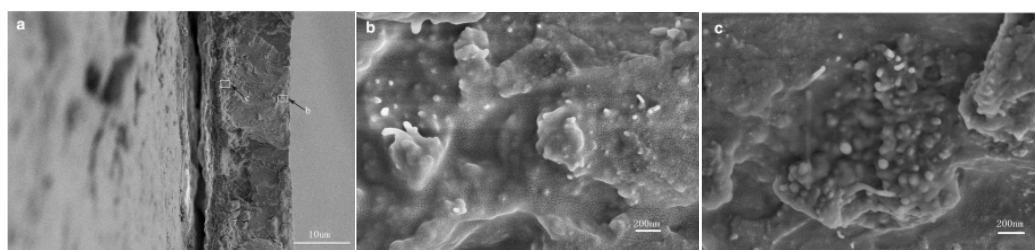
Obrázek 10 – Snímky původních MWCNT (vlevo) a modifikovaných MWCNT (vpravo) pořízené skenovacím elektronovým mikroskopem [31]



Obrázek 11 – Průběh povrchové rezistivity v závislosti na podílu MWCNT v UV vytvrditelném povlaku (vlevo), vliv doby mletí v kulovém mlýnu na výslednou povrchovou rezistivitu povlaku obsahujícího 2,0 hm. % MWCNT (vpravo) [31]



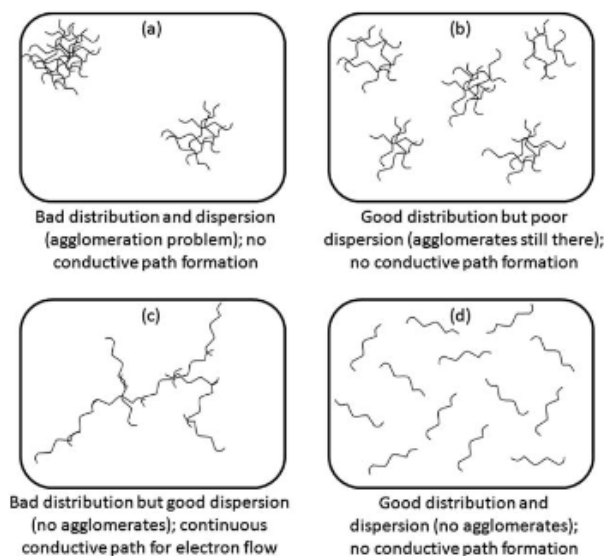
Obrázek 12 – Morfologie povrchu UV vytvrditelného povlaku obsahujícího 2,0 hm.% MWCNT (vlevo), zvětšený detail oblasti b (vpravo) [31]



Obrázek 13 – mikrosnímek části UV vytvrditelného povlaku s podílem 2,0 hm. % MWCNT (vpravo) a přiblížené snímky oblastí b (uprostřed) a c (vpravo) [31]

2.1.2 Proces míchání nátěrových hmot

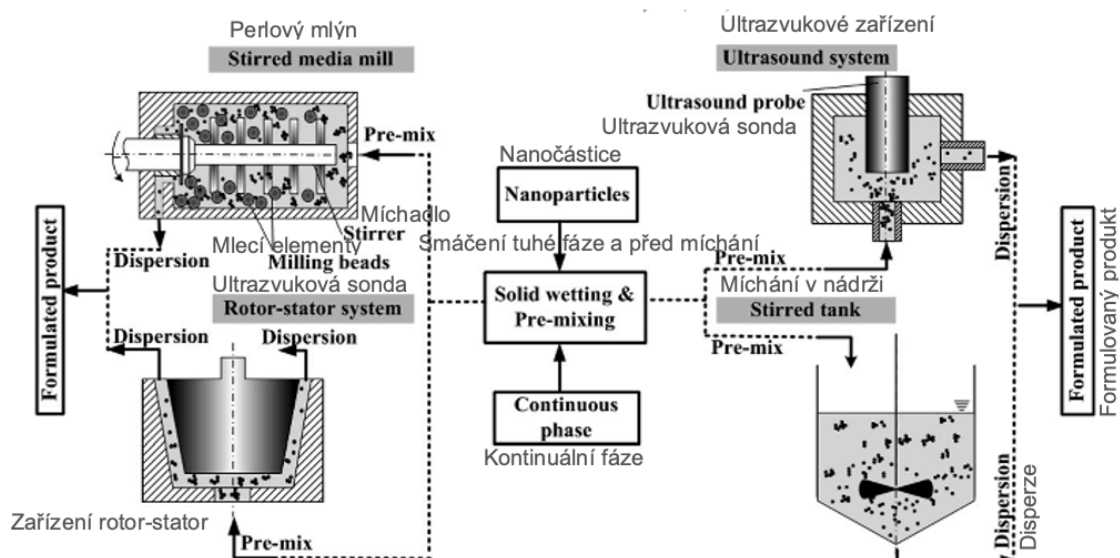
Hlavním účelem míchání při přípravě nátěrových hmot je snížení nehomogenity (koncentrační, fázové, teplotní, aj.) roztoku nebo směsi na požadovanou úroveň. Důvodem pro míchání v jednotlivých fázích přípravy nátěrové hmoty může být homogenizace tj. dosažení rozptýlení určité složky v celém objemu vsádky [6 p. 345, 50 p. 244, 51 p. 66]. V systémech kapalina –pevná fáze (pojivo – pigment/plnivo) je pak míchání zaměřeno na suspendaci, tj. udržení částic ve vznosu v kapalině. Pojem dispergace pak představuje proces, při kterém se mícháním vytvářejí dvoufázové soustavy s velkým mezifázovým povrchem v systémech nemísitelných kapalin a systémech kapalina – plyn. V případě nemísitelných kapalin je dispergována jedna fáze do druhé ve formě kapek. Dle velikosti kapek jsou pak systémy dále děleny na emulze (velikost kapek od 0,1 μm do 100 μm) a kapalinové disperze (nad 10 μm). [43 p. 106]. V případě přípravy tekutých nátěrových hmot dochází v dispergačním procesu ke smáčení pevných částic, deaglomeraci shluků a vytvoření homogenní disperze [47 p. 3]. Pro dosažení požadovaných funkčních vlastností pigmentované nátěrové hmoty je pak zásadní rovnoměrná distribuce pevných a kapalných složek v celém objemu [44 p. 22] a odstranění agregátů a aglomerátů pigmentových částic [47 p. 4]. Procesem dispergace a distribuce vznikne směs látek, kde je jedna látka jemně rozptýlena v druhé. V mnoha aplikacích je třeba, aby byly použité pevné částice v dobře dispergovaném a distribuovaném stavu. Nanočástice mají tendenci tvořit aglomeráty, které je složité oddělit. Snahou je dokonalé rozptýlení a rozdělení shluků nanočástic, aby bylo možné získat jejich plný potenciál. [45, 46] Na obrázku 14 jsou znázorněny možné kombinace dispergace a distribuce částic a dopad jejich uspořádání na elektrickou vodivost matrice [65 p. 8]. Běžně používané postupy dispergace nanočástic ve vodných roztocích jsou pak na obrázku 15.[46 p. 519]. Zcela homogenního rozptýlení tuhé fáze v objemu vsádky však není prakticky možné [47 p. 107].



Překlad textu obrázku:

- a) Špatná distribuce a dispergace (problém aglomerace); žádná vodivá cesta.
- b) Dobrá distribuce, avšak špatná dispergace (stále přítomné aglomeráty); žádná vodivá cesta.
- c) Špatná distribuce, ale dobrá dispergace (žádné aglomeráty); nepřerušená vodivá cesta pro tok elektronů.
- d) Dobrá distribuce a dispergace (žádné aglomeráty); žádná vodivá cesta.

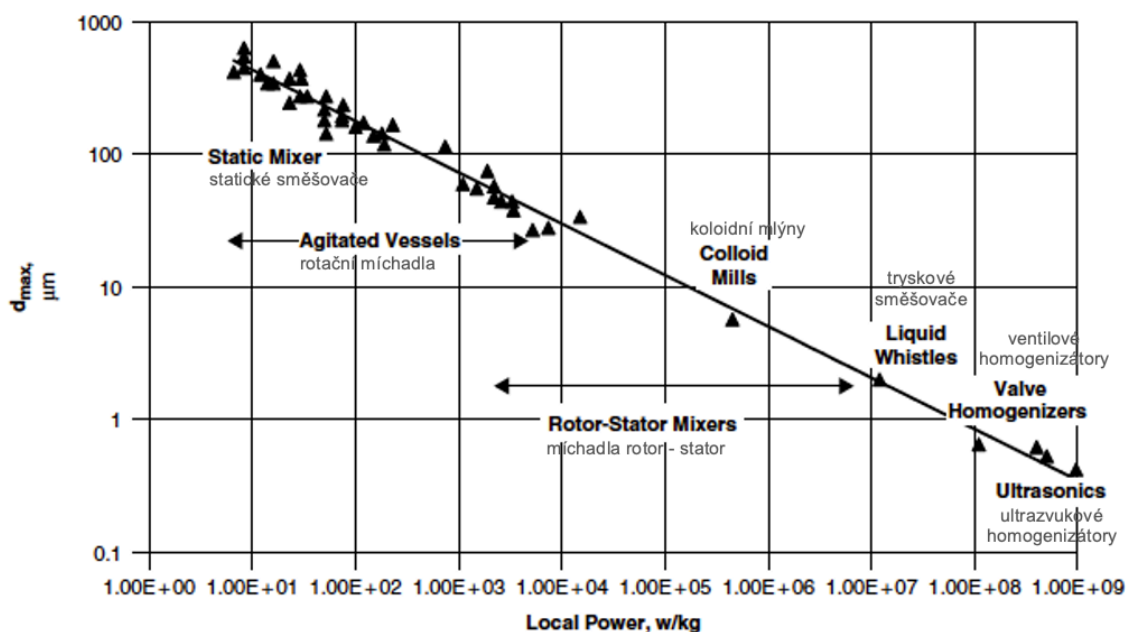
Obrázek 14 – Znázornění dispergace a distribuce plniva v matrici a jejich vliv na elektrickou vodivost povlaku [65 p. 8]



Obrázek 15 – Běžně používané postupy dispergace nanočástic ve vodných roztocích [46 p. 519]

Pro účely míchání nátěrových hmot a jejich složek existuje řada různých zařízení [6 p. 500, 50 p. 246, 247]. Dosažitelná velikost kapek v systému dispergace kapalina – kapalina v závislosti na disipovaném měrném příkonu (nevratná přeměna energie na jinou, zejména

na teplo) vloženého do vsádky pomocí míchadla [47 p. 21, 48 p. 2099] je pro jednotlivá míchadla vyobrazena v grafu na obrázku 16. Z grafu je zřejmé, že pokud je vložena energie, potažmo disipovaný měrný příkon (Local power) vyšší, jsou získány menší velikosti kapek [6 p. 500]. Disipovaný měrný příkon je distribuován do vsádky nerovnoměrně přes dispergační zónu míchadla [49 p. 148].

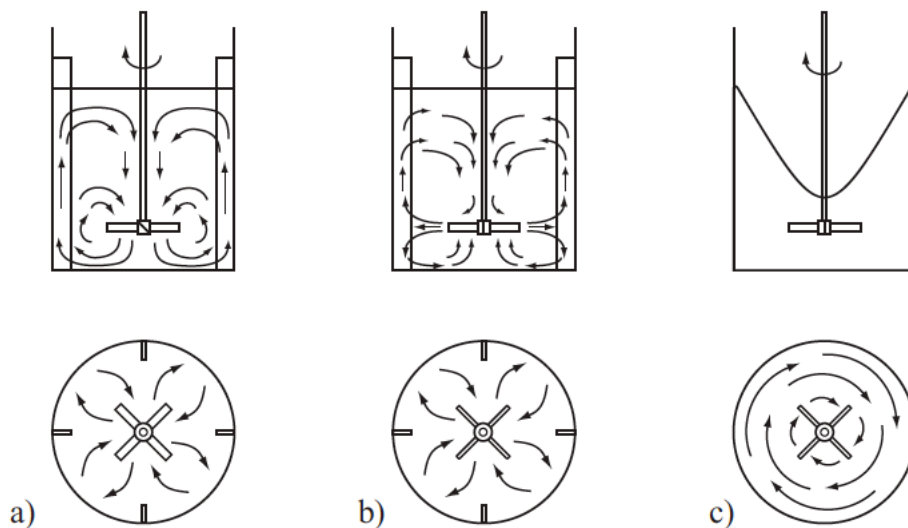


Obrázek 16 – Dosažitelná velikost kapek v systému dispergace kapalina – kapalina v závislosti na disipovaném měrném příkonu jednotlivých míchadel [6 p. 500]

Ner rozpustné tuhá fáze (pigmenty a plniva) mající hustotu větší, než je hustota kapaliny, tvoří vlivem gravitačních sil na dně nádoby sediment. Pro vytvoření vznosu tuhé fáze (pigmentů/plniv) musí být použito vhodné míchadlo, jenž pomocí axiálních složek rychlosti kapaliny rozrušuje vrstvu sedimentu a při optimálních podmínkách (dostatečné intenzitě míchání) dojde k rozptýlení částic do celého objemu kapaliny. Rozptýlení částic lze označit jako vznos tuhé fáze, kdy cílem je dosažení homogenního vznosu v kapalině (tj. kdy objemová koncentrace částic je stejná ve všech místech míchaného objemu. [47 p. 107, 50 p. 262].

Míchání v kapalném prostředí je prováděno čtyřmi základními způsoby, mezi které patří: mechanické míchání, hydraulické míchání, pneumatické míchání a míchání v potrubí [50 p. 245, 51 p. 66]. Nejpoužívanější mechanická rotační míchadla jsou dle frekvence otáčení dělena na pomaloběžná a rychloběžná. Dle charakteru proudění kapaliny v nádobě vyvolané

míchadlem je pak možné jejich dělení na axiální, radiální a tangenciální [47 p. 135, 51 p. 67]. Existují rovněž typy míchadel, jenž kombinují axiálně-radiální proudění [43 p. 107]. Nejstarším typem konstrukce axiálního míchadla je typ lodního šroubu (angl. marine propeller), jenž je často používáno jako míchadlo ve velkých nádržích s bočním vstupem. Nejčastěji je vyráběné jako odlitek, a tak je při velkých rozměrech značným omezením jeho hmotnost. Naproti tomu axiální lopatkové míchadlo se šikmo skloněnými lopatkami sudého počtu pootočenými od roviny kolmé k hřídeli o 10 až 90° (nejčastěji však 45°) pak umožňuje dosažení výrazně menších hmotností při stejném průměru. [6 p. 354, 43 p. 107, 47 p. 123]. Radiální míchadla mohou mít ploché či zakřivené lopatky orientované rovnoběžně s osou hřídele [43 p. 107]. Stejně jako axiální lopatková míchadla jsou vhodné pro použití pro mísení kapalin nízké střední viskozity. Lze je použít pro jakékoliv jedno či víceřádkové míchání, avšak neúčinnější jsou pro disperzní soustavy plyn – kapalina a kapalina – kapalina. [6 p. 356, 43 p. 107, 47 p. 122].



Obrázek 17 – Znárodnění tokových profilu v mechanicky míchaných nádobách [43 p. 107]

- a) axiální (nádoaba s narážkami), b) radiální (nádoaba s narážkami), c) tangenciální (nádoaba bez narážek)

U pneumatických míchadel je do spodní části nádoby přiváděn plyn, který je pak rozptylován do kapaliny ve formě bublin, které následně strhávají kapalinu k pohybu a obsah nádoby se tak promíchává. Hydraulické míchání využívá proud vystupující z trysky ponořené do kapaliny, jenž vytváří víry a v celém objemu kapaliny nastává pak proudění,

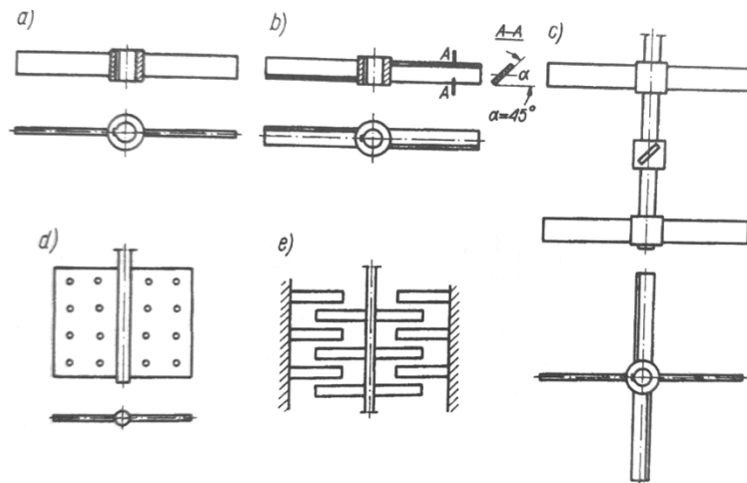
díky čemuž dochází k promíchávání. Při míchání nátěrových hmot se nejčastěji využívají mechanická rotační míchadla [50 p. 244, 51 p. 66,].

Níže jsou blíže popsány charakteristiky mechanických míchadel použitých ve výzkumné části disertační práce.

Lopátkové a vrtulové míchadlo

Lopátková míchadla, která jsou řazena mezi pomaloběžná s tangenciálním charakterem proudění jsou nejčastěji dvoulistá, přičemž poměr průměru míchadla (d) bývá v poměru k průměru nádoby (D) 0,5 až 0,8 [47 p. 144]. V případě konstrukce s kolmými lopatkami na hřídel je nedostatkem jejich malá intenzita míchání, kterou lze zvýšit jejich sklonem pod úhlem 30 až 40° k ose hřídele [47 p. 145, 43 p. 107]. Hlavní výhodou lopátkových míchadel je nízká cena daná jednoduchostí konstrukce. Vzhledem k tangenciálnímu charakteru proudění, kdy kapalina rotuje ve stejném směru jako je směr otáčení míchadla, může docházet při nevhodných parametrech procesu ke vzniku středového víru, který snižuje intenzitu míchání a způsobuje nasávání vzduchu do vsádky. Zabránění tvorbě středového víru lze docílit např. vestavěním zarážek u stěny nádoby nebo u určité vzdálenosti od ní [47 p. 135]. U velkých nádob se z důvodu snížení potřebného příkonu doporučuje použití více lopátkových míchadel na hřídeli nad sebou než jedno míchadlo velkého průměru (viz obrázek 18) [47 p.145].

Vrtulová míchadla jsou vhodná díky svému velkému čerpacímu účinku pro případy, kdy je nutné zajistit intenzivní cirkulaci vsádky při minimální spotřebě mechanické energie. Řadí se mezi rychloběžná míchadla. Hodnota poměru d/D bývá nejčastěji 0,25 až 0,3. Nejdokonalejším vrtulovým míchadlem je míchadlo tvaru lodního šroubu, kdy jedním z nejdůležitějších parametrů je stoupání listu vrtule. Vrtulová míchadla jsou většinou navrhována s konstantním stoupáním, kdy úhel natočení listu se mění (nejmenší je na obvodu, největší u náboje). Se vzrůstajícím stoupáním listu vrtulového míchadla roste tendence k rotaci kapaliny a k tvorbě středového víru. Negativnímu efektu tvorby víru lze docílit opět použitím zarážek umístěným při stěně nádoby [43 p. 106, 47 p. 135], nebo umístěním míchadla mimo osu nádoby, šikmým umístěním míchadla do nádoby, či použitím usměrňovače proudu kapaliny, která vytéká z míchadla v axiálním směru [47 p. 143].



Obrázek 18 – Příklady různého provedení lopatkových míchadel [47 p. 145]

- a) lopatkové míchadlo s kolmými lopatkami
- b) lopatkové míchadlo se šikmými lopatkami
- c) trojnásobné lopatkové míchadlo se skloněnými lopatkami
- d) listové míchadlo
- e) míchadlo s několika lopatkami na jednom hřídeli
a nádoba s radiálními narážkami

Zubové míchadlo

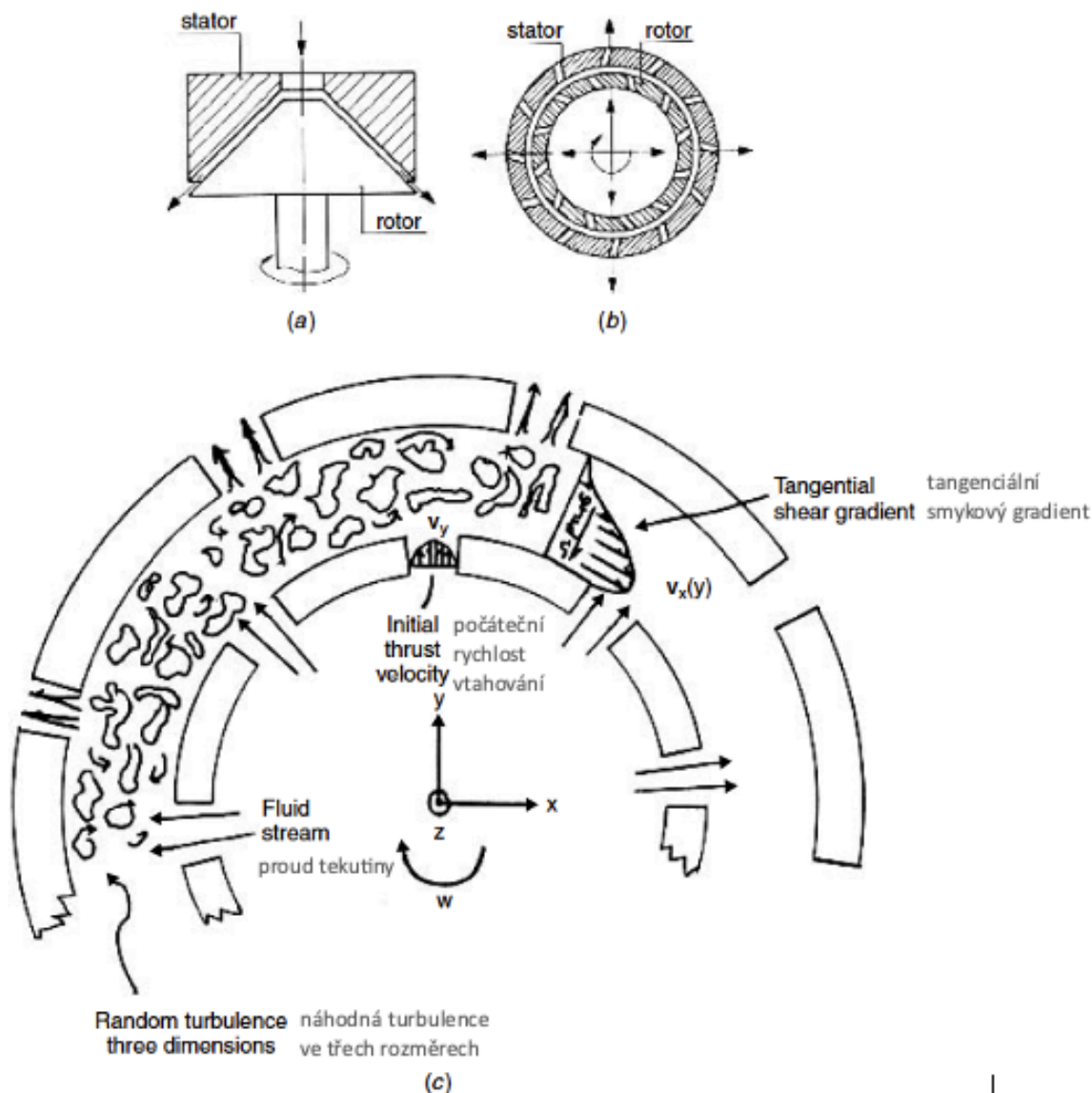
Zubové míchadlo patří mezi rychloběžná dispergační míchadla s radiálním směrem proudění. Konstrukčně se jedná o disk, na jehož konci jsou zuby různého tvaru a velikosti, zahnuté střídavě nahoru a dolů. Vlivem vysokých otáček a vysoké obvodové rychlosti míchadla dochází ke vzniku velkých gradientů rychlosti, a tím i vzniku velkých smykových napětí v dispergační zóně [47 p. 148, 6 p. 358, 50 p. 248, 52 p. 4]. Ostré hrany zubů míchadla navíc přispívají k roztrhávání shluků částic. Výška zubů výrazně ovlivňuje cirkulaci a potřebný příkon. U výšky zubů 0,1 D (průměr disku) je příkon trojnásobný v porovnání s poloviční výškou zubu. [47 p. 35].



Obrázek 19 – Zubové míchadlo [6 p. 358]

Míchadlo rotor – stator

Míchadla rotor – stator jsou konstruována tak, že rotor se otáčí v těsné blízkosti pevného statoru. Míchadla rotor – stator mají relativně malý čerpací účinek, proto se případně doplňují dalšími míchadly, jenž zabezpečují cirkulaci vsádky. Podle geometrického uspořádání je lze dělit do tří skupin, a to na koloidní mlýny, radiální míchadla a axiální míchadla. [52 p. 5]. Koloidní mlýny jsou konstruovány tak, že rotor ve tvaru komolého kužele se otáčí v dutině statorového bloku, která je válcového nebo kuželového tvaru. Shluky částic jsou v koloidních mlýnech rozkládány působením velkého smykového napětí a turbulence [47 p. 50]. Radiální míchadla rotor – stator jsou konstrukčně řešena radiálním míchadlem umístěným uvnitř statického pouzdra se štěrbinami. Otáčením rotoru je suspenze nasávána dovnitř rotoru a dále odstředivou silou vedena na kraje lopatek, kde je podrobena mletí ve štěrbině mezi rotorem a statorem. V další fázi je suspenze vystavena hydraulickým smykovým silám, když je vedena při vysoké rychlosti přes perforace ve stěně statoru. Jednotlivé modely radiálních míchadel rotor – stator se liší především velikostí rotoru a statoru, počtem a tvarem zubů a velikostí štěrbin [66 p. 247]. Axiální míchadla rotor – stator mají jako rotor použité axiální míchadlo jenž míchanou kapalinu vhání do otvorů statoru. Konstrukční uspořádání těchto míchadel může být i dvoustupňové, kdy se jednotlivé stupně liší velikostí otvorů ve statoru. [6 p. 483, 52 p. 8].

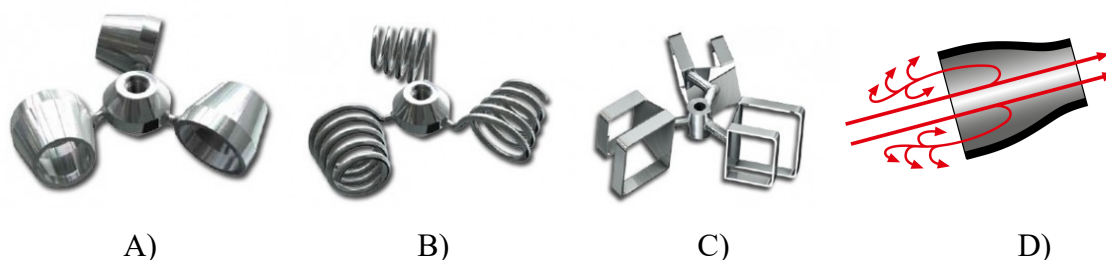


Obrázek 20 – Princip koloidního mlýnu (a), radiální míchadlo rotor – stator (b), schéma hydrodynamických procesů v radiálním míchadle rotor – stator [6 p. 483]

Míchadlo Visco-jet

Jedná se o míchadlo se speciální geometrií míchacích elementů umístěných po obvodu hřídele určené pro míchání, homogenizaci, dispergaci a suspendaci, vyznačující se vysokou účinností a nízkou spotřebou energie. Základním tvarem je komolý kuželový element s otevřenými podstavami (viz A obrázek 21), jenž svým tvarem způsobuje vytvoření dynamického tlaku na vstupu do kuželu a urychlené laminární proudění a zpětnou turbulenci na výstupu z kuželu. Nejčastěji bývají k náboji připevněny dva nebo tři tyto elementy [53, 54]. Ze studie Rahimiho a kol. [54 p. 1378] vyplývá, že ideální poměr vstupního a výstupního otvoru kužele je 0,5. Uzavřené kuželové elementy se používají do střední

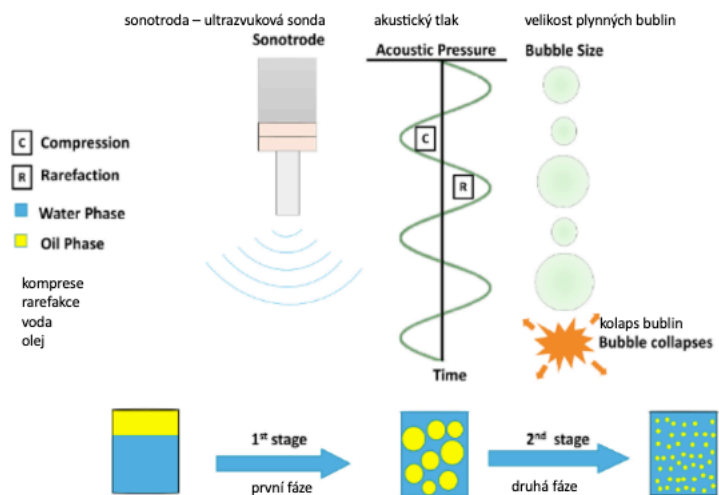
viskozity. Pro vysoce viskózní kapaliny a pasty se používají elementy ve tvaru kuželové pružiny (viz B obrázek 21). Pro dosažení vysokých smykových sil a zamezení nasávání vzduchu do vsádky lze použít elementy Visco Jet Crack [53], jenž mají tvar komolého jehlanu složeného ze čtvercových prstencových podstav spojených jednou stěnou (viz C obrázek 21).



Obrázek 21 – míchadla Visco Jet (A, B, C) a naznačení hydrodynamických procesů při použití kuželového elementu (D) [53]

Ultrazvukový homogenizátor

Ultrazvukové homogenizátory generující ultrazvuk s vysokou intenzitou a amplitudou, který je přenášen do kapaliny pomocí sond, pro dosažení akustické kavitace (způsobené tvorbou a kolapsem vzduchových bublin v kapalině), jenž umožňuje deaglomeraci částic a tvorbu stabilních emulzí a disperzí [46 p. 518, 55 p. 365, 366]. Kolapsem vzduchových bublin dochází k uvolnění velkého množství energie a vytvoření rázové vlny, která má dopad na rozrušení aglomerátů, ale i na fragmentaci částic [56 p. 26357]. Tato disipovaná energie je funkcí hydrostatického tlaku disperze a akustické amplitudy [46 p. 522]. Ultrazvukové homogenizátory jsou vhodná zařízení k získání disperzí jemných nanočástic, jež jsou vzájemně vázány ve velkých a velmi pevných aglomerátech různými vazebnými silami (zejména van der Waalsovými).[46 p. 518]



Obrázek 22 – Schéma tvorby emulze pomocí akustické kavitace ultrazvukového míchadla

[55 p. 36]

2.2 Elektrostatika

V kapitole jsou stručně rozebrány základní pojmy z elektrostatiky, jež jsou významné z hlediska výzkumné části disertační práce.

Normy ČSN EN 61340-2-3 ed.2. – *Elektrostatika část 2-3: Metody zkoušek pro stanovení rezistance a rezistivity tuhých materiálů, používaných k zabránění akumulace elektrostatického náboje* [57] a ČSN EN 61340-5-3 ed. 2:2017 (346440) *Elektrostatika – Část 5-3: Ochrana elektronických součástek před elektrostatickými jevy – Klasifikace vlastností a požadavky na obaly určené pro součástky citlivé na elektrostatické výboje* [28] popisují metody zkoušení pro stanovení rezistance a rezistivity tuhých materiálů používaných pro zabránění akumulace elektrostatického náboje, pro které je naměřená rezistance v rozsahu 10^4 až $10^{12} \Omega$. Této problematice se rovněž věnuje norma ČSN IEC/TR 61340-1 *Elektrostatika – Část 1: Elektrostatické jevy – Principy a měření* [23] a norma ČSN CLC/TR 60079-32-1 *Výbušné atmosféry – Část 32-1: Návod na ochranu před účinky statické elektřiny* [24].

Z hlediska terminologie rozlišují výše uvedené normy materiál na vodivý, disipativní a izolační. Vodivým materiálem se dle definice uvedené v normě [23] rozumí materiál, jehož rezistance je menší než přibližně $10^5 \Omega$ [23 p. 10]. Norma [28] pak za povrchově vodivé materiály považuje takové, jejichž povrchová rezistance je $< 1 \times 10^4 \Omega$ [28 p. 10].

Rezistance představuje poměr stejnosměrného napětí (přiloženého mezi dva body) a ustáleným proudem mezi těmito dvěma body vyjádřený v ohmech [28 p. 4], povrchovou rezistancí (vyjádřenou v ohmech) se pak rozumí rezistance měřená mezi střední kruhovou elektrodou a elektrodou ve tvaru soustředného prstence umístěné na povrchu vzorku [28 p. 4]. Povrchovou rezistancí (povrchový odpor) norma [24] definuje jako odpor mezi dvěma elektrodami, které jsou v kontaktu s měřeným povrchem, vyjádřený v ohmech [24 p. 22].

Disipativním materiálem (elektrostaticky vodivým) se rozumí takový, jenž dovoluje migraci náboje po povrchu (anebo objemem) v čase, který je dostatečně krátký ve srovnání s dobou trvání dějů, které vytvářejí náboje nebo které by mohly způsobit elektrostatický problém. Disipativní materiál má rezistanci přibližně v rozsahu 10^5 až $10^{11} \Omega$ [23 p. 10, 24 p. 20].

Izolační materiál je pak normou [23] popsán jako materiál s velmi malou hybností náboje, takovou, že libovolný náboj zůstane na povrchu po dlouhou dobu [23 p. 11]. Jde o materiál, jehož rezistivita nebo odpor je vyšší, než je rozsah pro materiály disipativní [24 p. 21].

V oboru povrchových úprav se lze setkat s termíny jako antistatická nátěrová hmota (nátěr) [58] či ESD nátěrová hmota (nátěr) [59]. Pojem antistatický je normou [23] definován jako: „*Vlastnost materiálu, která brání nebo omezuje triboelektrické nabíjení.*“ [23 p. 11]. Formulaci těchto hmot, byla věnována kapitola 2.1.1, která popisuje možné způsoby dosažení těchto vlastností. Norma [23] definuje termín antistatická přísada: „*Taková látka nebo proces použití, která sníží schopnost získávat náboj kontaktem nebo třením, nebo urychlí migraci náboje, čímž se sníží jeho schopnost uchovávat náboj při kontaktu se zemí.*“ [32 p. 9]. Zkratka ESD (elektrostatic discharge – elektrostatický výboj) byla vysvětlena v kapitole 2.1. Norma [23] pak elektrostatický výboj definuje jako: „*Přenos náboje přímým kontaktem nebo průrazem z materiálu nebo z předmětu s odlišným elektrickým potenciálem vzhledem k nejbližšímu okolí.*“ [23 p. 10]

V řadě studií uvedených v kapitole 2.1.1 bylo pro popsání vodivých vlastností povlaků zhotovených pomocí nátěrových hmot použito konduktivity, rezistivity, povrchové rezistivity, objemové (vnitřní) rezistivity a objemové (vnitřní) rezistance. Níže jsou vysvětleny tyto jednotlivé pojmy. Konduktivita představuje schopnost látky vést elektrický proud, lze ji vyjádřit jako převrácenou hodnotu rezistivity a její jednotkou je siemens na metr ($S \cdot m^{-1}$) [23 p. 10, 24 p. 20]. Rezistivita neboli měrný elektrický (specifický) odpor umožňuje vzájemné srovnávání různých látek bez závislosti na tvaru vodiče. Jedná se tedy o materiálovou konstantu a její jednotkou je ohmetr ($\Omega \cdot m$) [60 p. 183]. Povrchová rezistivita představuje ekvivalent k povrchové rezistanci čtvercové oblasti, která má elektrody na dvou opačných koncích. Norma [57] upozorňuje, že v soustavě jednotek SI je jednotkou povrchové rezistivity ohm (Ω), ale někdy se používá jednotka ohm na čtverec (Ω/\square) [40], z důvodu rozlišení hodnoty rezistivity od hodnot rezistance. Norma [57] však použití Ω/\square nedoporučuje, jelikož se může plést s rezistancí na jednotku plochy [57 p. 4]. Objemovou rezistancí se pak rozumí rezistance mezi dvěma elektrodami umístěnými na opačných površích vzorku a stanovuje se v ohmech (Ω). Objemová rezistivita je prakticky ekvivalentní k objemové rezistanci jednotkové krychle, která má elektrody na opačných površích. Objemová rezistivita se vyjadřuje jednotkou ohmetr ($\Omega \cdot m$) [57 p. 5]. Pro antistatické povrchové úpravy by objemová rezistivita neměla být větší než $10^5 \Omega \cdot m$ [26 p. 34].

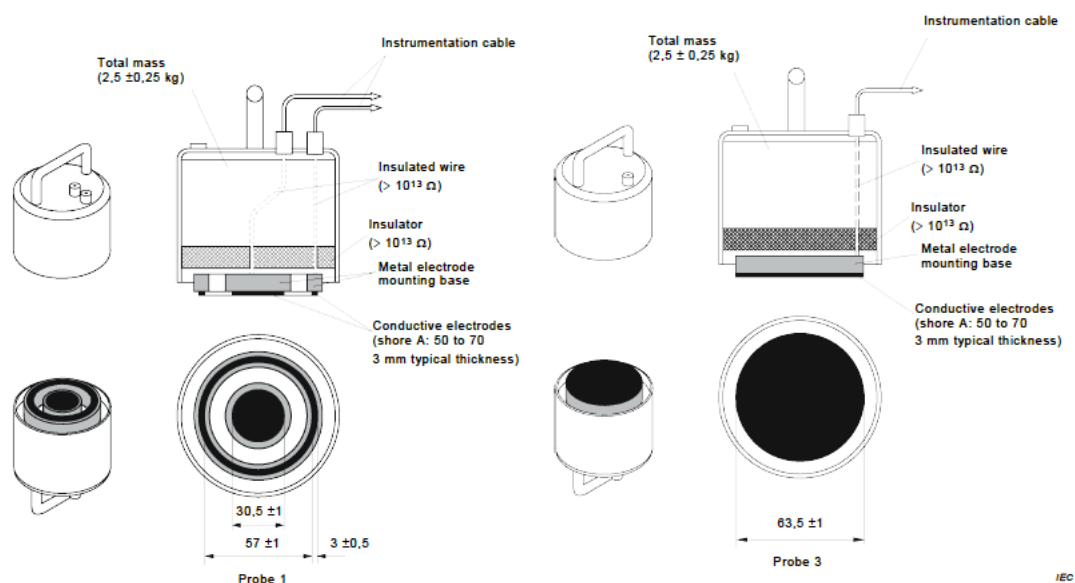
Parametry pro jednotlivé předměty a zařízení určené pro práci ve výbušných atmosférách s ohledem na nebezpečí spojená s účinky statické elektřiny předkládá norma ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24]. Tato norma může rovněž posloužit pro posouzení výrobků, pro něž neexistuje žádná norma na skupinu výrobků nebo konkrétní výrobky [24 p. 16]. Norma

nejen, že definuje klasifikaci jednotlivých povrchů (vodivý, disipativní a izolační) pro různé předměty a aplikace, ale řeší rovněž způsoby a podmínky stanovení těchto hodnot [24 p. 25]. Například pro podlahy a podlahové nátěry je řešena problematika nejen elektrostatické ochrany, ale i ochrana pracovníků před úrazem elektrickým proudem při dotyku s vysoce nabitým vodičem nebo s elektrickou sítí. Vodivá podlaha s vertikálním a/nebo elektrickým svodovým (povrchovým) odporem nižším než $10^5 \Omega$ poskytuje plnou elektrostatickou ochranu za všech podmínek, ale neposkytuje ochranu proti úrazu elektrickým proudem. Naproti tomu podlaha s vertikálním a/nebo svodovým odporem větším než $10^5 \Omega$, ale menším než $10^8 \Omega$ poskytuje antistatickou ochranu ve většině případů. Taková podlaha zároveň zaručuje dostatečnou ochranu proti úrazu elektrickým proudem. Izolační podlaha s vertikálním a/nebo svodovým odporem větším nebo rovným $10^8 \Omega$, nezaručuje antistatickou ochranu, ale poskytuje ochranu proti úrazu elektrickým proudem [24 p. 95, 38 p. 2].

Metody měření rezistance a rezistivity tuhých materiálů k zabránění akumulace elektrostatického náboje jsou popsány v normě ČSN EN 61340-2-3 ed.2 [57]. K samotnému měření vodivých vlastností povlaků jsou nejčastěji používána zařízení využívající tzv. dvoubodovou metodu. Princip měření spočívá v přiložení sondy na hodnocený povrch, připojení vnějšího zdroje proudu do měřicího obvodu a odečítání napětí na vzorku, u kterého chceme zjistit odporovou charakteristiku. Sonda pro stanovení povrchové nebo objemové rezistance může být konstrukčně řešena soustřednými elektrodami válcového a prstencového tvaru – tzv. koncentrické uspořádání elektrod (viz obrázek 23). Styková plocha elektrod je z vodivé pryže o tvrdosti Shore A 50 – 70. Mezera mezi těmito elektrodami by neměla být menší než 10 mm a musí být zajištěn dostatečný přítlak k ploše testovaného materiálu. Z tohoto důvodu by hmotnost sondy měla být $2,5 \pm 0,25$ kg pro měření na tvrdých nepřizpůsobivých površích a $5,0 \pm 0,25$ kg na všech ostatních površích [57 p. 12, 63 p. 9]. Tento typ sondy se dá použít i na měření objemové rezistance při použití druhé sondy na protilehlé ploše (viz obrázek 24). Obdobné parametry mají i sondy pro stanovení odporu mezi dvěma body s tím rozdílem, že uvnitř sondy je instalovaná pouze jedna elektroda o průměru $63,5 \pm 1$ mm. Při měření mezi dvěma body jsou elektrody umístěny do vzdálenosti $300 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ od jejich středů [63 p. 9]. Norma [57] rovněž popisuje konstrukci sond pro měření tvarově složitých a malých předmětů (viz obrázek 25). Sonda je vybavena elektrodami o průměru $3,2 \pm 0,1$ mm, které jsou od sebe vzdáleny 3,2 mm a jsou přitlačovány k povrchu pružinou o síle $4,6 \pm 0,5$ N a zdvíhu $4,3 \pm 0,1$ mm. Styková plocha elektrod je i v tomto případě z vodivé pryže o tvrdosti Shore A 50 – 70.

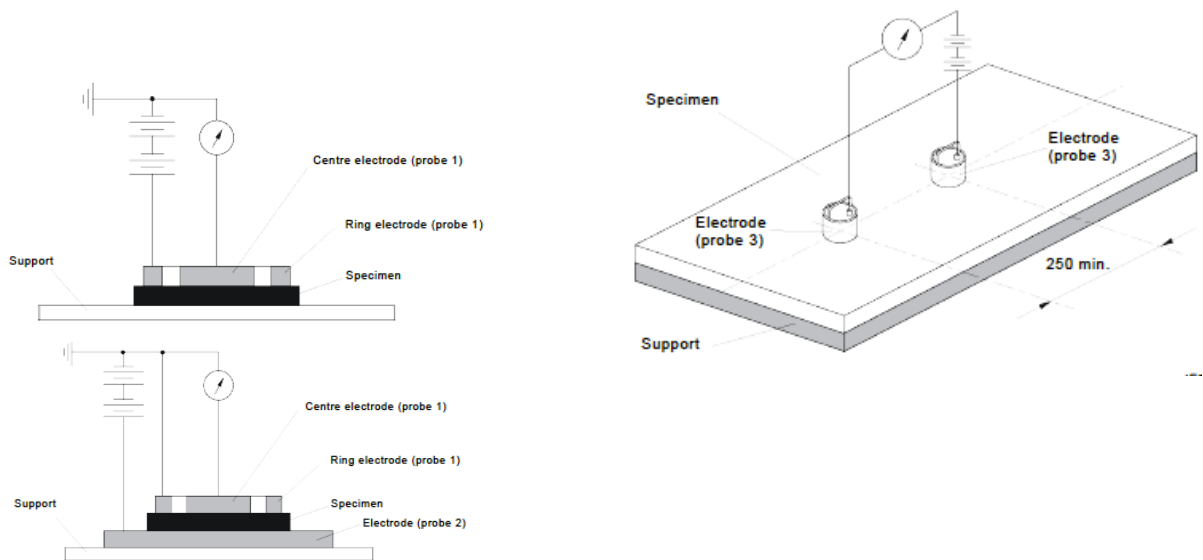
Tvar těla může být proveden libovolně [57 p. 20]. Norma ČSN EN 60079-32-2 *Výbušné atmosféry – Část 32-2: Nebezpečí od statické elektřiny – Zkoušky* [90] předkládá možný způsob měření povrchového odporu pomocí dvou paralelních elektrod (viz obr. 25), jenž mohou být vytvořeny nátěrem barvou ze stříbra pomocí vhodné tužky, páskovými elektrodami z měkké vodivé pryže na pružném kovovém péru nebo pomocí proužků vodivé pěny na izolační podložce. Tento způsob stanovení není vhodný pro nehomogenní materiály, čemuž se lze vyhnout použitím koncentrického uspořádání elektrod [90 p. 14]. Výše uvedené normy zabývající se stanovením povrchového odporu upozorňují na skutečnost, že se snižující se vlhkostí vzduchu se zvyšuje povrchový odpor a je tedy nutné tuto skutečnost zohlednit při měření tím, že bude zajištěna nízká relativní vlhkost (zahrnutí nejhorších podmínek v reálných aplikacích) [57 p. 9, 90 p. 14].

Měřicí aparatura musí mít při zatížení na obvodu napětí v závislosti na měřené rezistanci: 10 V ± 0,5 V pro rezistanci menší než 1,0 x 10⁶ Ω, 100 V ± 0,5 V pro rezistanci mezi 1,0 x 10⁶ a 1,0 x 10¹¹ Ω a 500 V ± 0,5 V pro rezistanci větší než 1,0 x 10¹¹ Ω [63 p. 9].



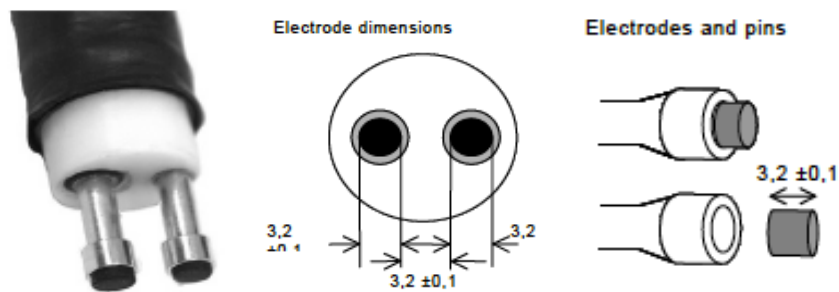
Překlad textu v obrázku: Total mass – celková hmotnost, insulated wire – izolovaný vodič, insulator – izolátor, metal electrode – kovová elektroda, mounting base – montážní základna, conductive electrodes – vodivé elektrody, typical thickness – typická tloušťka. probe – sonda.

Obrázek 23 – Sonda pro stanovení povrchové nebo plošné rezistance (vlevo), sonda pro stanovení odporu metodou mezi dvěma body (vpravo) [57 p. 12, 13]

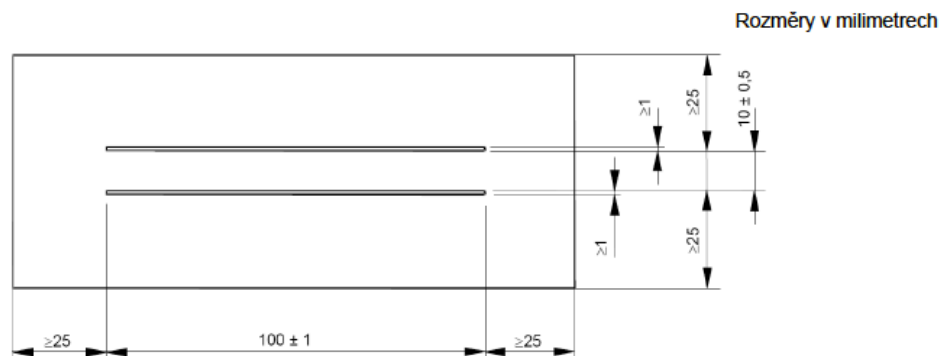


Překlad textu v obrázku: centre electrode – středová elektroda, ring electrode – prstencová elektroda, specimen – vzorek, support – podložka, electrode– elektroda, probe 1, 2, 3 – sonda 1, 2, 3.

Obrázek 24 – Schéma zapojení elektrod při měření povrchové rezistance (vlevo nahoře), objemové rezistance (vlevo dole) a měření mezi dvěma body (vpravo)) [57 p. 14, 15, 17]

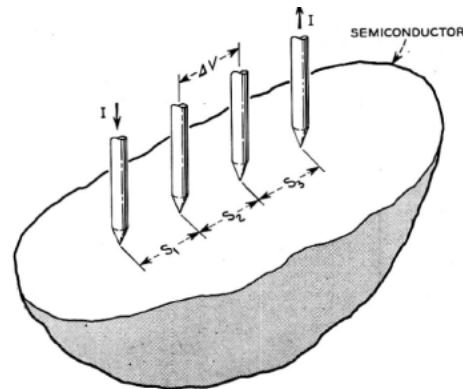


Překlad textu v obrázku: electrode dimensions – rozměry elektrod, electrodes and pins – elektrody a kolíčky



Obrázek 25 – Sonda pro měření tvarově složitých a malých předmětů [57 p. 20] (nahore), zkušební vzorek s přiloženými paralelními elektrodami (dole) [90 p. 14]

V případě mikro a nano struktur je vhodnější měření pomocí tzv. čtyřbodové metody [33 p. 3, 34 p. 3, 36 p. 4, 39 p. 50] používané například pro stanovení měrného odporu polovodičů popsané Uhliřem [61] a Smitsem [62]. Čtyřbodová metoda odbourává chyby měření oddělením proudových a napěťových kontaktů. Dva vnější kontakty jsou použity pro přívod proudu a dva vnitřní kontakty poté měří reálnou hodnotu napětí na dané části obvodu [26 p. 34]. Tabaczyńska a kol. [64 p. 4] popisují měření pružných polymerních folií založené na principu čtyřbodové metody a konstrukci měřícího aparátu a sond.



Obrázek 26 – Zapojení elektrod v případě čtyřbodové metody [61 p. 112]

3. Cíle práce

Formulace nátěrových hmot pro nátěrové systémy s vysokými užitnými vlastnostmi vyžaduje nejen správnou volbu a podíl jednotlivých surovin, ale také správný technologický postup její přípravy pro dosažení co nejlepších vlastností finálního povlaku. Pokud se navíc jedná o tvorbu nátěrových hmot specifických funkčních vlastností (např. antistatických, ošetrivých, protiskluzových), kterých se chce dosáhnout pomocí přídavku funkčních mikro a nano pigmentů (plniv), je zcela žádoucí zaměřit se na proces dispergace a jeho parametry. Proces dispergace navržených nátěrových hmot má totiž v konečném důsledku dopad nejen na finální ochranné a funkční vlastnosti povlaku, ale poměrně významně se podílí na výsledné ceně možnou redukcí potřebného podílu drahých nano částic či snížením doby a energetické náročnosti procesu dispergace.

Při tvorbě antistatických případně elektricky vodivých povlaků nátěrových hmot je možným způsobem pro dosažení vodivých vlastností povlaku zabudování vodivých částic do pojiva nátěrové hmoty. K tomuto účelu je nutné využít znalostí z oboru dispergace v systémech kapalina-pevná fáze a docílit dostatečné homogenity suspenze a správné distribuce částic v povlaku. Důkladným experimentálním rozbořením vlivu parametrů dispergačního procesu pak může být prokázáno, že některá dispergační zařízení nemusí být pro dané funkční složky nátěrové hmoty vhodná (např. vysoké smykové síly deformující použité pigmenty, degradace složek nátěrové hmoty přehříváním vsádky, aj.). V konečném důsledku tak nemusí dojít k dosažení požadovaných specifických funkčních vlastností povlaku, případně je potenciál použitých složek nátěrové hmoty využit jen částečně.

Na základě těchto předpokladů byly stanoveny cíle disertační práce.

Hlavní cíl:

Vývoj nové antistatické nátěrové hmoty splňující parametry povrchového odporu pro disipativní materiály dané normou ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24]. Dále byly stanoveny dílčí cíle, jejich řešení povede k naplnění hlavního cíle disertační práce.

Dílčí cíle:

- Návrh vhodných matic, pigmentů a dispergačních zařízení.

- Návrh podílů jednotlivých pigmentů pro dosažení požadovaných vysokých užitných vlastností funkčních povlaků a nátěrových systémů (antistatické nátěrové hmoty, otěruvzdorné nátěrové hmoty, antikoroziční nátěrové hmoty).
- Výběr vhodného dispergačního zařízení a optimalizace procesu dispergace pro účely snížení potřebného podílu použitých částic či zkrácení dispergačního času při tvorbě nátěrových hmot vyšších užitných vlastností.
- Ověření funkčních a ochranných vlastností vytvořených povlaků nátěrových hmot metodami běžně používanými v oboru povrchových úprav.

4. Experimentální část

4.1 Volba vhodných matric nátěrových hmot

Pro experiment byly ve spolupráci s projektovými partnery Centra kompetence – Centrum výzkumu povrchových úprav (č.p. TE0200011), výrobcí nátěrových hmot, společnostmi Synpo a.s. a VITON, s.r.o., vytypovány vhodné typy matric (nátěrových hmot) pro tvorbu kompozitních funkčních povlaků nátěrových hmot. Konkrétně se jednalo o níže uvedené nátěrové hmoty a epoxidové pryskyřice:

- LV EPS 620 (Synpo a.s),
- CHS – EPOXY 531 (Spolchemie a.s.),
- CHS – EPOXY 210 X 75 (Spolchemie a.s.),
- CHS – EPOXY 222 IX 60 (Spolchemie a.s.),
- CHS – EPOXY 200 V 55 (Spolchemie a.s.),
- CP 55 (VITON s.r.o.),
- CP 05 (VITON s.r.o.).

Dvousložková epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 byla použita pro vývoj nátěrových hmot pro tvorbu antistatických nátěrů [9A, 13A, 14A, 16A, 18A, 27A], ořezuvzdorných nátěrů [15A, 16A, 17A, 19A, 20A, 27A] a antikorozičních nátěrů [15A, 23A, 24A, 25A, 26A]. Epoxidové pryskyřice CHS – EPOXY 531, CHS – EPOXY 210 X 75 a CHS – EPOXY 222 IX 60 pro tvorbu ořezuvzdorných nátěrů [19A, 20A]. Vodou ředitelná epoxidová pryskyřice CHS EPOXY 200 V 55 byla použita pro vývoj antistatických nátěrových hmot [4A, 5A, 8A]. Vodou ředitelná samozákladovací nátěrová hmota CP55 rovněž pro tvorbu antistatických nátěrových hmot [1A, 2A, 3A, 5A, 10A, 11A, 12A, 13A, 14A, 27A] a dvousložková polyuretanová nátěrová hmota CP05 k tvorbě ořezuvzdorných nátěrů [21A] a antikorozičního nátěrového systému [22A]. Technické listy k jednotlivým nátěrovým hmotám jsou součástí přílohy disertační práce – Příloha A – Technické listy.

4.2 Formulace a vlastnosti jednotlivých hmot

4.2.1 Nátěrové hmoty na bázi epoxidových pryskyřic

Formulaci funkčních nátěrových hmot na bázi dvousložkových epoxidových pryskyřic byla věnována značná část experimentů. Pro dosažení specifických funkčních vlastností povlaků byly voleny různé typy pigmentů a plniv.

4.2.1.1 Antistatické nátěrové hmoty

V případě tvorby antistatických nátěrových hmot na bázi LV EPS 620, bylo za účelem dosažení vodivých vlastností použito vodivých částic grafitu [4A, 10A, 13A, 14A, 17A], sazí [9A, 12A, 17A, 18A] a zinku [17A, 18A, 25A, 26A]. V případě grafitu byly formulovány hmoty obsahující grafit jemný (Fichema), od střední velikost částic 25 μm a grafit pufrový (Fichema) o střední velikosti částic 7 μm . Práškový zinek byl použit Zn2N (PK chemie) o velikosti částic 3,4 – 3,9 μm [17A]. V případě vodivých sazí se jednalo o saze CHEZACARB B (AC70) ve tvaru nepravidelných granulí o velikosti 0,5 až 2,5 mm [9A].

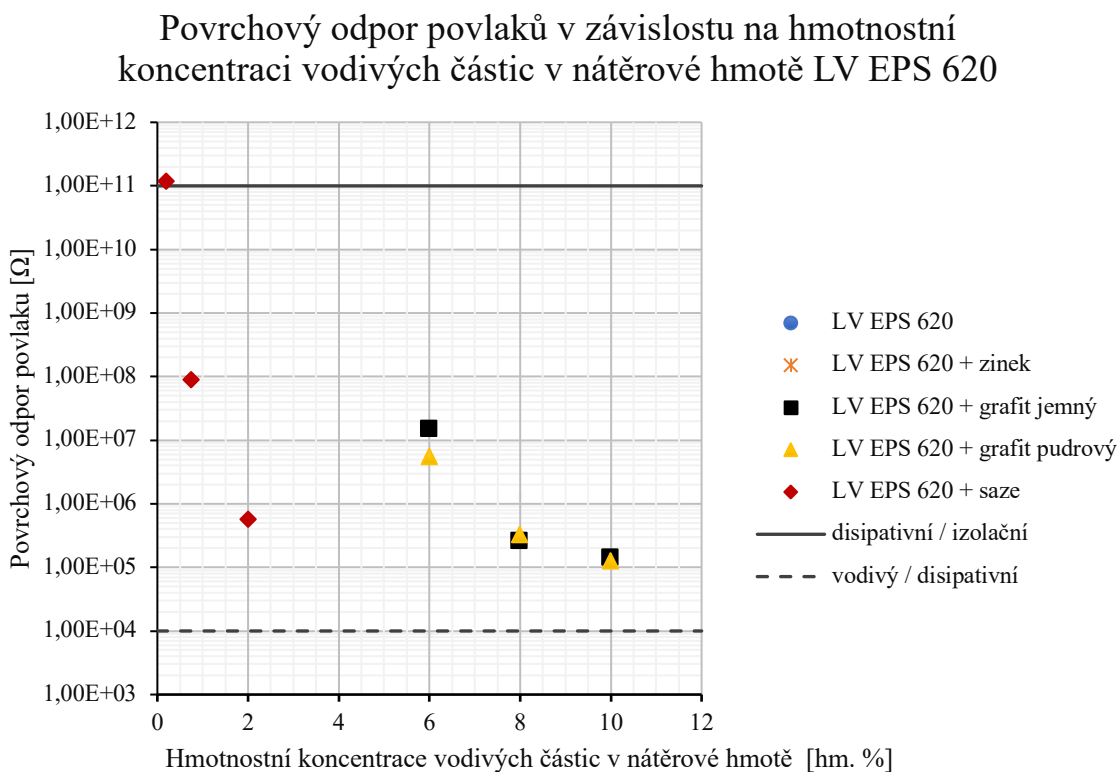
Grafit a zinek byly dispergovány do epoxidové nátěrové hmoty LV EPS 620 v hmotnostním podílu 6 hm.%, 8 hm. % a 10 hm. %. Vodivé saze byly dispergovány do nátěrové hmoty LV EPS 620 v hmotnostních podílech 0,2 hm. %, 0,75 hm. % a 2 hm. %. Cílem bylo nalezení optimální koncentrace vodivých pigmentů v nátěrové hmotě pro dosažení antistatických vlastností při současném zachování ochranných vlastností základního materiálu [17A, 18A].

Pro účely dispergace částic grafitu a zinku v nátěrové hmotě LV EPS 620 o objemu 300 ml bylo použito vrtulového míchadla a ultrazvukového homogenizátoru. Míchání probíhalo v nádobě o průměru 100 mm. Nejprve bylo provedeno mechanické míchání pomocí vrtulového míchadla Dürr PM 504m pro účely přidání pigmentů do pojiva a jejich uvedení do vzhledu. Proces míchání probíhal při frekvenci otáček 560 min^{-1} po dobu 5 minut. Následný proces dispergace na ultrazvukovém homogenizátoru SONOPULS HD 3400 trval 7 minut pro každou konkrétní nátěrovou hmotu při výkonu 200 W, parametrech pulsu 0,8 s ON / 1,0 s OFF a amplitudě 82 μm [17A]. Z důvodu vysoké nasákavosti, velikosti částic a obtížného smáčení vodivých sazí v nátěrové hmotě, byl navržen odlišný postup dispergace, a to za použití zubového míchadla (CVS 69 1038.1) o průměru 50 mm a míchadla rotorstator IKA S 25 N – 25 G o průměru rotoru 17 mm s dvěma zuby a statoru o průměru 25 mm s 12 zuby poháněné jednotkou IKA T25 digital ULTRA TURAX s rozsahem frekvence otáček od 3 000 do 25 000 min^{-1} . Mezera mezi rotorem a státorem činila 0,5 mm. Příprava disperze o objemu 300 ml probíhala rovněž v nádobě o průměru 100 mm. Proces dispergace

varianty obsahující 0,2 hm. % sazí míchadlem rotor-stator probíhal při frekvenci otáček $10\,400\text{ min}^{-1}$ a po dobu trvání 3 minut. Při přípravě varianty obsahující 2 hm. % sazí bylo dosaženo velmi rychle míchadlem rotor-stator vytvoření pigmentové pasty, jež byla z důvodu zhoršených tokových vlastností zředěna na 30 % ředidlem LV PA 600 a následně dále dispergována při frekvenci otáček $20\,000\text{ ot.min}^{-1}$ po dobu 2 minut. Část zmíněné pigmentové pasty posloužila pro vytvoření nátěrové hmoty LV EPS 620 s příměsí sazí o koncentraci 0,75 hm. %. U této varianty bylo provedeno pouze ruční míchání před aplikací nátěrové hmoty, které probíhalo skleněným tyčovým míchadlem o průměru 10 mm po dobu 2 min [9A, 18A].

Nanášení vytvořených nátěrových hmot probíhalo pomocí pneumatického stříkání při tlaku 400 kPa (4 bar) na ocelové kruhové desky $\varnothing 105 \times 1,2\text{ mm}$ z konstrukční oceli S235JRG1. Před samotnou aplikací nátěrových hmot bylo provedeno jejich tužení pomocí tužidla LV BU 45 N v poměru 6:1 objemových dílů ve prospěch nátěrové hmoty. Pro aplikaci byla použita stříkací pistole EST 116 o velikosti tryskové sady 1,8 mm, přičemž nátěrové systémy se zinkovými částicemi bylo nutné ředit (10 obj. %) ředidlem LV PA 600 [9A, 17A, 18A]. Vytvrzení povlaků bylo provedeno volně na vzduchu za pokojové teploty ($\sim 20^\circ\text{C}$) po dobu 48 hodin. Vytvořené povlaky v rozsahu tloušťky suchého filmu (DFT – dry film thickness) 58 až 94 μm (stanoveno metodou 7B.2 dle ČSN EN ISO 2808 [67 p. 33]) byly podrobeny vizuálnímu hodnocení dle ČSN EN ISO 12944-7 [68 p. 12], odtrhové zkoušce přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41] a stanovení povrchového odporu dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 [57]. Cílem odtrhové zkoušky bylo ověření vlivu množství použitých vodivých částic na adhezi povlaku k základnímu materiálu případně posouzení jeho vlivu na jeho kohezní pevnost povlaku [17A]. Významný vliv na adhezi povlaků či na narušení jeho kohezní pevnosti nebyl pozorován [17A]. Hodnoty povrchového odporu povlaků na množství použitých vodivých částic v epoxidové nátěrové hmotě LV EPS 620 jsou vyobrazeny v grafu 2. V grafu je rovněž pomocí rovnoběžných přímků vyznačena disipativní oblast. Z grafu 2 je dobře patrný významný rozdíl v potřebné koncentraci vodivých sazí a grafitu pro dosažení shodných parametrů povrchového odporu povlaku [9A, 17A, 18A].

Graf 2 – Hodnoty povrchového odporu vytvořených povlaků na bázi epoxidové nátěrové hmoty LV EPS 620



Stanovení povrchového odporu pro výše uvedené povlaky bylo provedeno pomocí přístroje pro měření povrchového odporu TESPO 1. Zařízení využívá principu 2 bodového měření v rozsahu 10^4 až 10^{11} Ω , kdy stanovuje odpor povrchu mezi 10 mm dlouhými elektrodami umístěnými rovnoběžně ve vzdálenosti 10 mm na povrchu měřeném povrchu. Hodnoty povrchového odporu samotné nátěrové hmoty LV EPS 620 a LV EPS 620 s příměsí zinku nebylo možné pomocí tohoto zařízení stanovit (jedná se o izolanty) a tedy hodnoty jejich povrchového odporu nejsou vyobrazeny v grafu 2. Mimo již zmiňovaných povlaků obsahující zinek, byly hodnoty povrchového odporu vytvořených povlaků $> 10^4$ Ω a současně $< 10^{11}$ Ω , tedy spadající do kategorie disipativních dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24]. Vyjma povlaku obsahujícího 0,2 hm. % sazí byly povrchové odpory povlaků s částicemi grafitu a sazí $> 10^5$ Ω a současně $< 10^8$ Ω , tj. v rozsahu udávaného svodového odporu pro disipativní podlahoviny. Nejnižšího povrchového odporu hodnoty $1,25 \times 10^5$ Ω , bylo dosaženo u povlaku nátěrové hmoty LV EPS 620 s 10 hm. % grafitu pudrového [9A, 17A, 18A].

Na základě získaných poznatků byla jako nejvhodnější z hlediska antistatických vlastností vybrána nátěrová hmota LV EPS 620 obsahující 2 hm. % sazí CHEZACARB B (AC70).


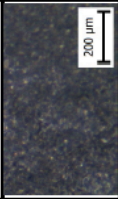

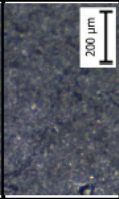
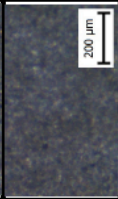
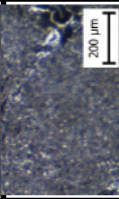
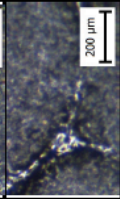
Korozními zkouškami v neutrální solné mlze dle ČSN EN ISO 9227 [73] a oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře dle ČSN EN ISO 22479 *Koroze kovů a slitin – Zkouška oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře (s určeným objemem plynu)* [74] byla zjištěna velmi dobrá protikorozní odolnost povlaku. Vzorky nevykazovaly náchylnost k puchýřkování, prokorodování či jiným typům vad. Přídavkem vodivých sazí tak nedošlo ke zhoršení korozní odolnosti (ochranných vlastností) nátěrového systému LV EPS 620, nýbrž k vylepšení jeho funkčních vlastností (antistatický disipativní nátěr) [9A].



Obrázek 27 – Povlak LV EPS 620 obsahující 2 hm. % sazí – před (vlevo) a po (vpravo) korozní zkoušce oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře, doba expozice 240 hod [9A]

Na základě získaných poznatků z předchozích experimentů byl dále zkoumán vlivu procesu dispergace nátěrových hmot LV EPS 620 příměsí 8 hm. % grafitu pudrového (Fichema) na finální ochranné a funkční vlastnosti. Tento nátěrový systém byl vybrán z důvodu možného potenciálu nejen pro tvorbu antistatických povlaků, ale i potencionálnímu využití jako kluzného povlaku díky vynikajícím tribologickým a lubrikačním vlastnostem grafitu [13A, 16A, 19A, 20A]. Cílem experimentů bylo mimo jiné nalezení vhodného dispergačního zařízení a optimálních parametrů procesu dispergace s ohledem na distribuci částic v povlaku a výsledný povrchový odpor. Použita byla opět stejná dispergační zařízení blíže popsaná v textu na straně 51), tj. zubové míchadlo, míchadlo rotor-stator a ultrazvukový homogenizátor. V případě zubového míchadla byla dispergace provedena při stejných parametrech frekvence otáček, avšak po rozdílnou dobu procesu. U míchadla rotor-stator byly voleny různé časy a různé frekvence otáček míchadla. Dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru probíhala při výkonu generátoru pulsů 300 W a parametrech pulsu (0,8 s ON / 1,0 s OFF). Parametry dispergace nátěrových hmot LV EPS 620 příměsí 8 hm. % grafitu jsou uvedeny v tabulce 1 na straně 55. V tabulce jsou dále uvedeny velikosti disipované energie E_j do míchané vsádky, měrný disipovaný příkon v dispergační zóně ϵ_D a velikost obvodové rychlosti daného míchadla. Tyto parametry slouží pro vzájemné porovnání jednotlivých metod. Tabulka 1 současně předkládá výsledky hodnocení sledovaných funkčních a ochranných vlastností povlaků. [11A, 13A].

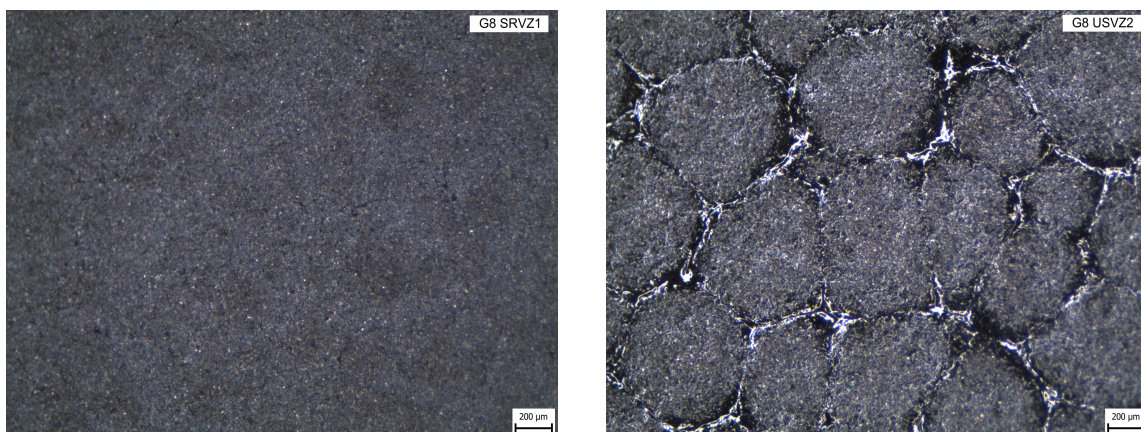
Tabulka 1 – Souhrn parametrů dispergace a výsledků jednotlivých zkoušek povlaků nátěrových hmot LV EPS 620 s 8 hm. % grafitu [13A]

Vzorek označení	Nátěrová hmota			Parametry dispergace						Parametry povlaku				
	matrice	vodivý pigment	podíl pigmentu [hm. %]	metoda dispergace	frekvence otáček [min ⁻¹]	doba dispergace [min]	disipovaná energie E _d [J.kg ⁻¹]	měrný disipovaný příkon ε _D [W.kg ⁻¹]	obvodová rychlost [m.s ⁻¹]	aplikační vlastnosti [-]	odtrhová pevnost [MPa]	tesk [GU]	povrchový odpor [Ω]	rozložení grafitu v povrchové vrstvě
620	LV EPS 620	—	—	ručně	—	—	—	—	—	5	3,624	24,9	—	—
G8Z1	LV EPS 620	grafit	8	zubové míchadlo	3 600	1	2 536	629	9,4	9	3,313	5,2	9,3 × 10 ⁸	
G8Z5	LV EPS 620	grafit	8	zubové míchadlo	3 600	5	14 086	629	9,4	10	3,697	4,9	1,8 × 10 ⁸	
G8SRVZ1	LV EPS 620	grafit	8	rotor stator	12 000	10	30 738	7 148	15,7	7	3,318	4,2	1,5 × 10 ⁵	
G8SRVZ2	LV EPS 620	grafit	8	rotor stator	11 000	5	12 571	5 622	14,4	10	3,994	4,4	7,6 × 10 ⁶	
G8SRVZ3	LV EPS 620	grafit	8	rotor stator	13 000	1,5	5 696	8 915	17,0	5	3,116	4,8	3,8 × 10 ⁶	
G8USVZ1	LV EPS 620	grafit	8	ultrazvukový homogenzátor	—	5	33 208	31 773	—	13	3,576	5,7	4,8 × 10 ⁶	
G8USVZ2	LV EPS 620	grafit	8	ultrazvukový homogenzátor	—	1,5	11 053	31 773	—	12	3,937	9,8	2,0 × 10 ⁸	

V tabulce 1 jsou uvedeny sledované parametry charakterizující vlastnosti nátěrové hmoty a ochranné / funkční vlastnosti výsledných povlaků v závislosti na metodě a parametrech dispergace částic grafitu v nátěrové hmotě LV EPS 620:

- aplikační vlastnosti (vícekriteriálním hodnocením parametrů souvisejících s aplikací nátěrové hmoty pneumatickým stříkáním a výsledného vzhledu mokrého a suchého filmu),
- lesk povlaku (stanovený pod úhlem 60° dle ČSN EN ISO 2813 [69 p. 8]),
- odolnost proti praskání a odlupování, elasticita (ohybem na kónickém trnu dle ČSN EN ISO 6860 [70 p. 7]),
- přilnavost (pomocí odtrhové zkoušky zkušebním tělískem o průměru 20 mm dle ČSN EN ISO 4624 [41]),
- povrchový odpor (měřením dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 [57]),
- rozložení grafitu v povrchové vrstvě (vizuální hodnocení pomocí optické mikroskopie).

Z výsledků provedených zkoušek uvedených v tabulce 1 je patrný zcela zásadní vliv metody a způsobu dispergace na aplikační vlastnosti nátěrové hmoty LV EPS 620 s podílem 8 hm. % grafitu a současně významný vliv na ochranné a funkční vlastnosti výsledných povlaků. Z provedených experimentů je patrné, že nejlepších výsledků z hlediska hodnot povrchového odporu dosahovaly vzorky připravené metodou rotor – stator, kdy dosažený povrchový odpor byl nižší až o 3 řády. Jednotlivé disperze se z pohledu aplikačních vlastností (viskozity, potřeby ředění, stříkatelnosti atd.) rovněž významně lišily a nejlepších vlastností srovnatelných s nemodifikovanou nátěrovou hmotou LV EPS 620 bylo rovněž dosaženo při použití míchadla rotor – stator. Povlaky připravené touto metodou také vykazovaly nejvyšší stupeň homogenity stanovený pomocí hodnot lesku a pomocí vizuálního hodnocení optickým mikroskopem Olympus SZ61 (Infinity 1, Lumenera). U hodnoty lesku se předpokládalo její snižování s vyšším stupněm distribuce a dispergace částic v povlaku. Nejvýznamnější rozdíl mezi hodnotami lesku a morfologií povrchu u povlaků obsahujících grafit byl pozorován u varianty G8SRVZ1 a G8USVZ2 (viz obrázek 28). Z obrázku je patrné, že povlak G8USVZ2 není zcela homogenní a jeho stav povrchu způsobuje zmíněné vyšší hodnoty lesku. Rovněž lze předpokládat, že takovýto povlak bude vykazovat sníženou korozní odolnost. Parametry dispergace nátěrových hmot vzorků jsou uvedeny v tabulce 1 [13A, 14A, 27A].



Obrázek 28 – Vzhled povrchu povlaků různě dispergované nátěrové hmoty LV EPS 620 obsahující grafit: dispergace stator-rotor vzorek G8SRVZ1 (vlevo), dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru (vlevo) [13A]

Hodnota povrchového odporu povlaku s 8 hm. % grafitu ($1,5 \times 10^5 \Omega$) dosažená přípravou hmoty LV EPS 620 [13A] dle parametrů uvedených v tabulce 1 pro G8SRVZ1 je přibližně o 17 % vyšší než hodnota povrchového odporu povlaku nátěrové hmoty LV EPS 620 s 10 hm. % grafitu pudrového [17A]. Současně je hodnota takto připraveného povlaku $1,7 \times$ resp. $2,2 \times$ nižší než hodnoty povlaků připravených vrtulovým míchadlem v kombinaci s ultrazvukovým homogenizátorem (viz strana 51) [9A, 13A, 14A].

Ohybovou zkouškou povlaků dle ČSN EN ISO 6860 pomocí kónického trnu bez opatření povlaku podélnými řezy ve vzdálenosti 20 mm [70 p. 8] LV EPS 620 s 8 hm. % grafitu (uvedených v tabulce 1) vytvořených na ocelových deskách Q-Panel (o rozměrech 76 mm × 125 mm × 0,8 mm, S235JRG1) nebyly zjištěny znatelné rozdíly při zatížení povlaku ohybem. Z výsledků lze konstatovat, že u všech povlaků nedocházelo k viditelnému uvolňování od základního materiálu či praskání povlaku. Rovněž výsledky odtrhové zkoušky přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41] neprokázaly negativní vliv použití grafitu na přilnavost vytvořených povlaků či na jejich kohezní pevnost při srovnání s použitou matricí – nátěrovou hmotou LV EPS 620 [13A].

Popisu parametrů dispergace a jejich vlivu na finální vlastnosti vytvořených povlaků z pohledu poznatků z teorie míchání v systémech kapalina – pevná fáze je věnována kapitola 4.3 na straně 103.

4.2.1.2 Otěruvzdorné nátěrové hmoty

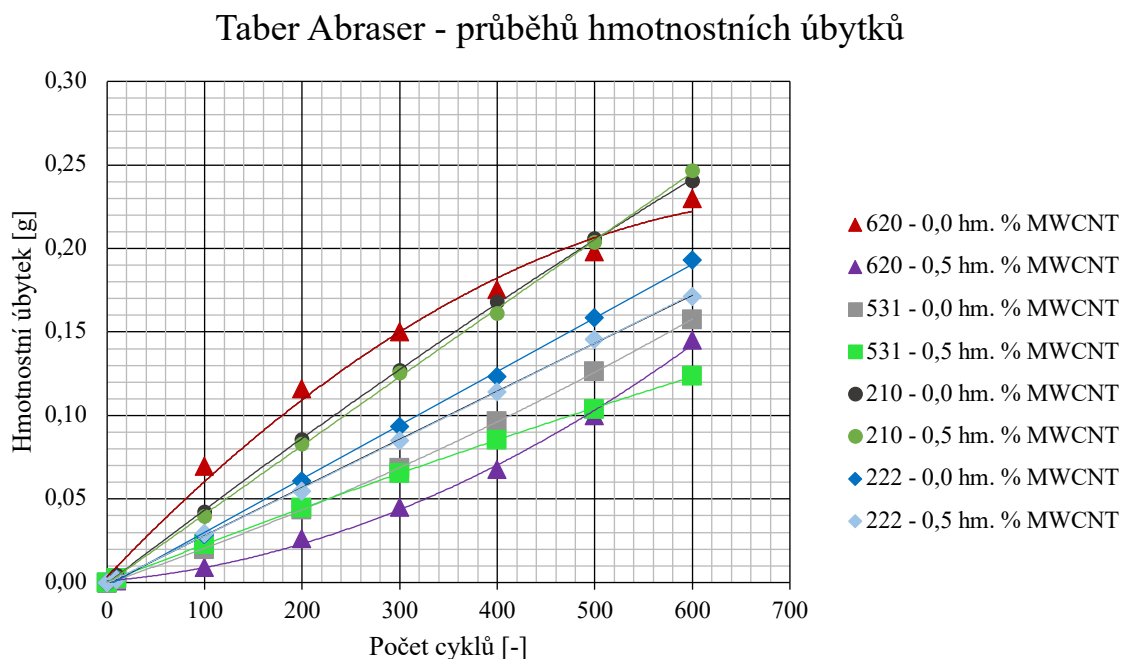
Epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 byla mimo již zmíněné elektricky vodivé částice modifikována i víceštěnými uhlíkovými nanotrubicemi MWCNT (ve formě suspenze EPOCYL XCR 128-06 na bázi bisfenolu A s obsahem 5 hm. % MWCNT belgického výrobce Nanocyl) [14A, 15A, 17A, 19A, 20A]. Ačkoliv jsou MWCNT hojně využívány pro dosažení antistatických parametrů povlaků nátěrových hmot [27, 31, 39], použití disperze nanočástic EPOCYL XCR 128-06 nevedlo k dosažení antistatických vlastností výsledných povlaků, avšak byly zjištěny pozitivní dopady na jejich abrazivní a korozní odolnost [17A]. Technický list produktu EPOCYL XCR 128-06 je uveden v příloze disertační práce – Příloha A – Technické listy.

Formulace nátěrových systémů na bázi epoxidových pryskyřic obsahující MWCNT je popsána v [19A, 20A], korozní a abrazivní odolnost a ochranné funkční vlastnosti v [15A, 17A], výběr vhodné metody dispergace pro dosažení optimálních funkčních a ochranných vlastností těchto povlaků je pak blíže popsán v [14A].

V první fázi byly vytvořeny 4 typy nátěrových hmot na bázi epoxidových pryskyřic s podílem 0,0 a 0,5 hm. % MWCNT (epoxidové pryskyřice CHS – EPOXY 531, CHS EPOXY 210 x 75, CHS EPOXY 222 IX 60 a nátěrová hmota LV EPS 620). Vzhledem k vysoké viskozitě suspenze EPOCYL bylo nutné dispergaci provádět za zvýšené teploty lázně 65°C. Prvotní dispergace částic do výše uvedených matric proběhla pomocí zubového míchadla shodného s míchadlem použitým v kapitole 4.1.1.2. Míchadlo bylo umístěno do nádoby excentricky mimo osu a proces dispergace probíhal po dobu 10 min při frekvenci otáček 2 000 min⁻¹. Následně byla provedena druhá fáze dispergace a to pomocí ultrazvukového homogenizátoru na zařízení Hielscher UP400S (použitá sonda – H7 o průměru 70 mm) po dobu 20 minut a parametrech 0,5 cyklu a 80% amplitudy. Vytvořené nátěrové hmoty byly rovněž nanášeny pneumatickým stříkáním na ocelové kruhové desky $\varnothing 105 \times 1,2$ mm z konstrukční oceli S235JRG1. Před aplikací nátěrových hmot bylo provedeno jejich natužení příslušnými tužidly v daném mísícím poměru (viz Příloha A – Technické listy). Vytvořené filmy byly vytvrzovány volně na vzduchu po dobu 24 hodin a následně dovytvrzeny v peci za teploty 60°C rovněž po dobu 24 hodin. Vytvořené povlaky byly testovány z hlediska odolnosti vůči abrazi na zařízení Taber Abraser v souladu s ČSN EN ISO 7784-2 [71 p. 2]. Ke zjištění odolnosti nátěru vůči abrazivnímu opotřebení bylo použito zařízení Taber – Abraser a brusných kotoučů Taber Industries H-18 přitlačovaných na vzorek závažím o hmotnosti 500 g. U jednotlivých vzorků byl sledován

hmotnostní úbytek po 100 zátěžových cyklech až do hodnoty 600 cyklů. K stanovení hmotnosti vzorků bylo použito digitálních vah Ohaus Explorer Pro sloužících k předvážení a analytických vah Mettler H64 ke stanovení přesné hmotnosti. Průběh hmotnostních úbytků v závislosti na počtu zátěžných cyklů je vyobrazen pro jednotlivé povlaky obsahující 0,0 a 0,5 % MWCNT v grafu 3 [19A].

Graf 3 – Průběhy průměrných hmotnostních úbytků jednotlivých povlaků na bázi epoxidových pryskyřic obsahujících 0,0 a 0,5 hm. MWCNT [19A]

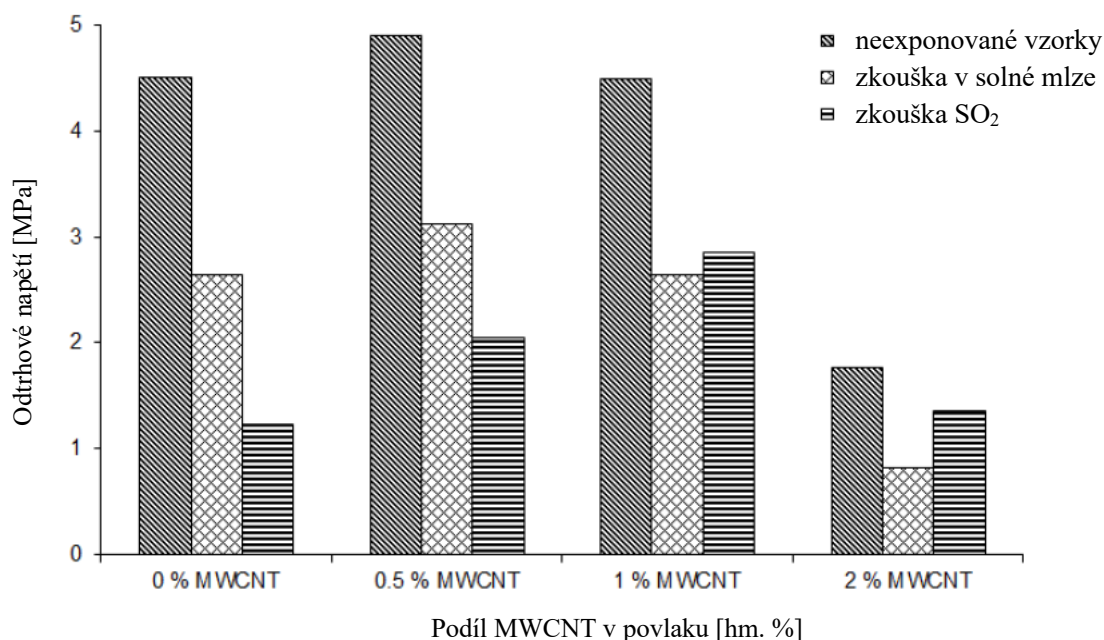


Poznámka k legendě grafu: 620 = LV EPS 620, 531 = CHS EPOXY 531, 210 = CHS EPOXY 210 x 75 a 222 = CHS EPOXY 222 IX 60.

Z grafu 3 je patrný významný vliv použité disperze MWCNT EPOCYL XCR 128-06 na abrazivní odolnost především povlaku na bázi LV EPS 620, jehož otěruvzdornost vlivem použité disperze byla navýšena o 37 % [20A]. U povlaků CHS – EPOXY 531, CHS EPOXY 210 x 75 a CHS EPOXY 222 IX 60 obsahujících 0,5 hm. % MWCNT byl navíc zjištěn pomocí odtrhové zkoušky přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41] 100% nárůst adheze k ocelovému podkladu hladkému i tryskanému (ocelovou drtí odpovídající profilu B N9a dle komparátoru drsnosti Rugotest No. 3 dle ASTM D 4417 metoda A [76]). U povlaků na bázi LV EPS 620 tento nárůst nebyl pozorován a hodnota odtrhového napětí při 100 % charakteru lomu A/B byla pro obě varianty (0,0 hm. % a 0,5 hm. % MWCNT) přibližně stejná [20A]. Dalšímu zvyšování podílu disperze MWCNT EPOCYL XCR 128-06

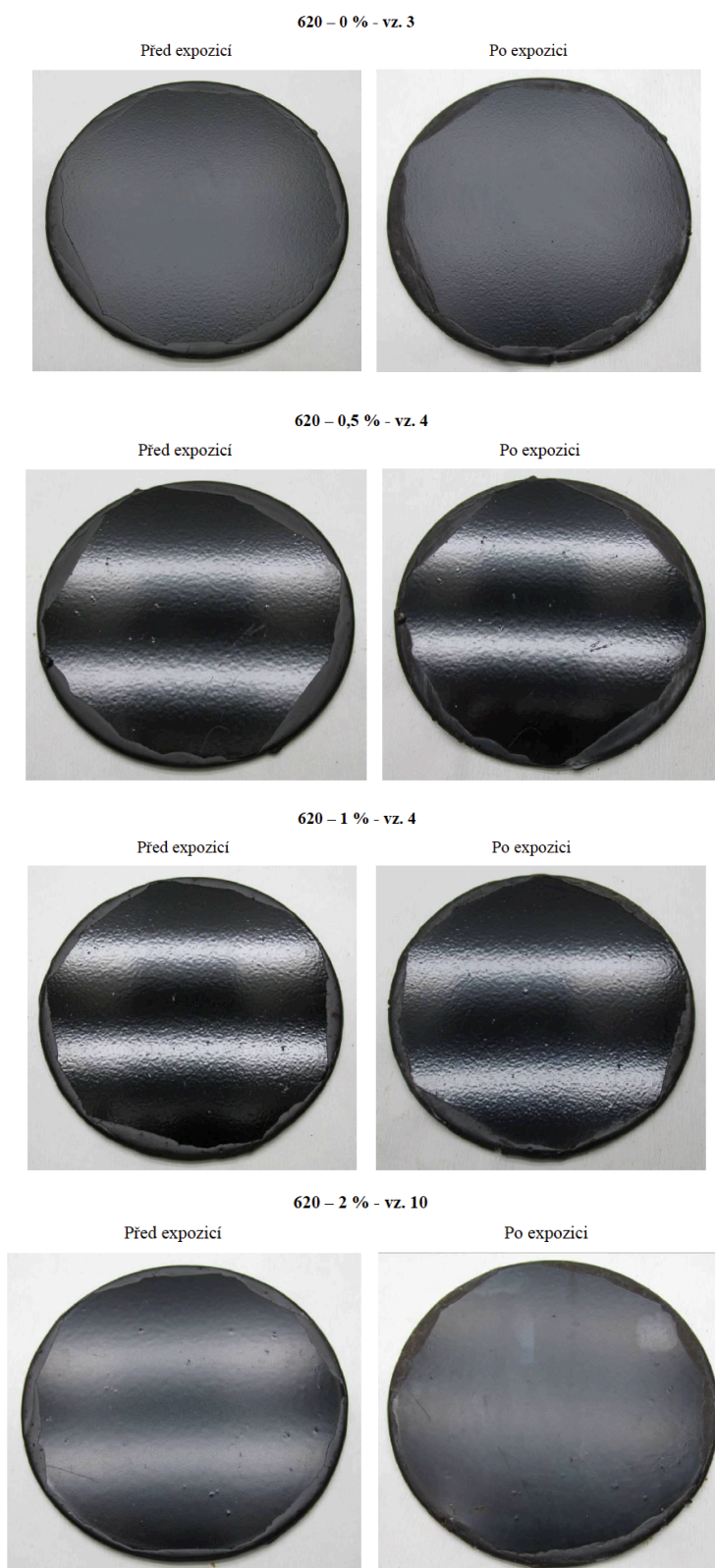
v nátěrové hmotě LV EPS 620 na hodnoty 0,5; 1,0; 2,0 a 3,0 MWCNT se věnuje článek [15A], kde je mimo jiné hodnocena i korozní odolnost vytvořených povlaků. V případě koncentrací 2,0 a 3,0 hm. % MWCNT v nátěrové hmotě LV EPS 620 vysoký podíl EPOCYL XCR 128-06 negativně ovlivňoval proces vytvrzení. Povlaky byly nevytvrzené na dotyk (i při vytvrzování v peci) a tyto koncentrace při použití EPOCYL XCR 128-06 byly vyhodnoceny jako nevhodné pro další použití. Výsledky adheze (odtrhového napětí) stanovené dle ČSN EN ISO 4624 [41] po korozní zkoušce v neutrální solné mlze [73] a po korozní zkoušce oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře [74] pro povlaky na bázi LV EPS 620 obsahující MWCNT jsou vyobrazeny v grafu 4. Délka trvání obou zkoušek 240 hodin [15A].

Graf 4 – Hodnoty odtrhového napětí pro jednotlivé povlaky LV EPS 620 obsahující MWCNT v podílech 0,0; 0,5; 1,0 a 1,5 hm. % před a po korozních testech [15A]

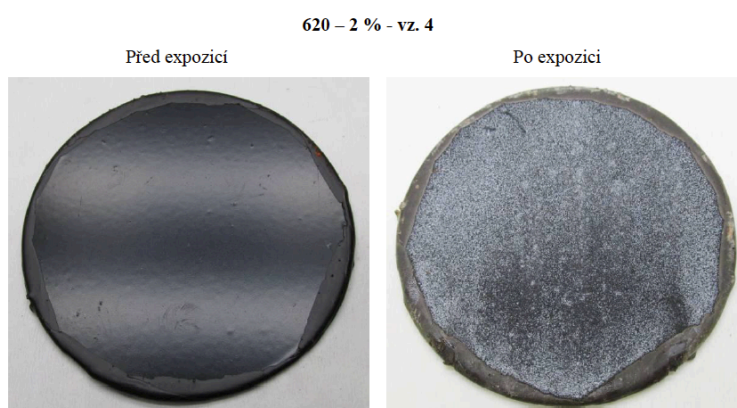
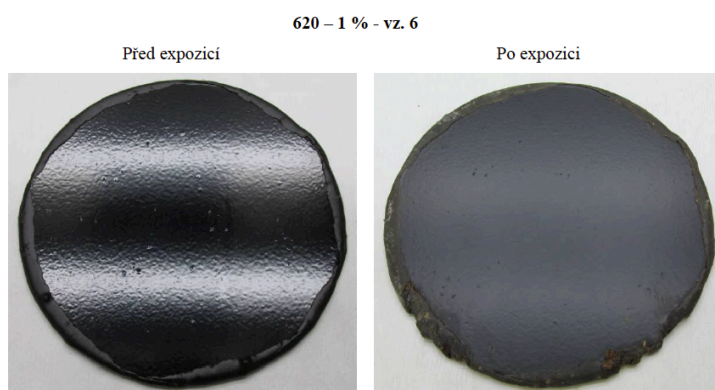
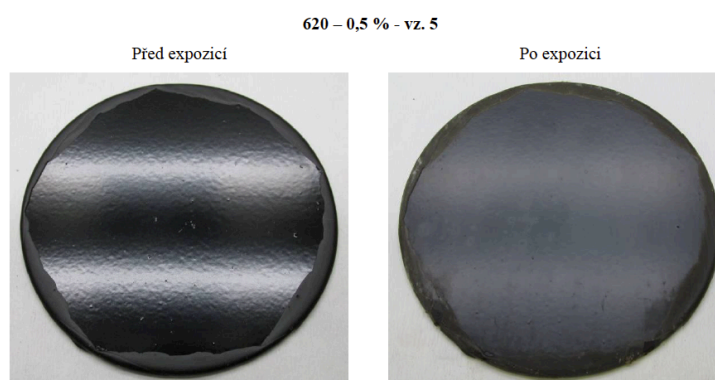
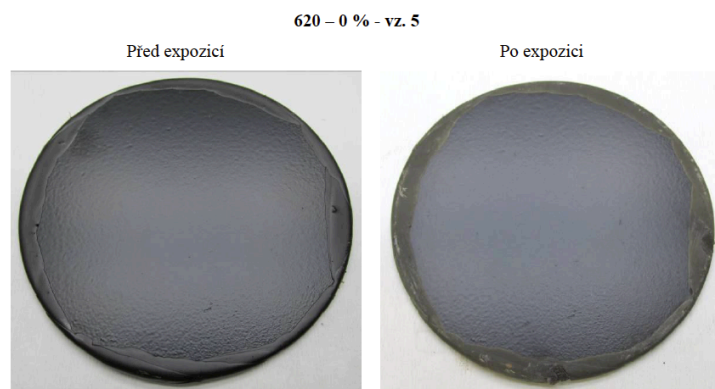


Testované povlaky z grafu 4 s podílem 0,5 a 1,0 hm. % MWCNT prokázaly dobrou odolnost proti delaminaci a prokorodování jak při zkoušce v solné mlze [73], tak při zkoušce v SO₂ [74]. Při zkoušce v SO₂ nebyly u těchto povlaků pozorovány žádné defekty typu puchýřů či jiné vady. V případě zkoušky v neutrální solné mlze byl pozorován vznik malých puchýřů v oblastech s vměstky v povlaku (možné nečistoty ulpělé při nanášení nátěru či nehomogenita aplikované disperze). Jednotlivé povlaky uvedené v grafu 4 byly dále testovány korozní zkouškou Machu test [85], jenž potvrdila dobrou odolnost povlaků s 0,5 a 1,0 % hm. MWCNT proti prokorodování a delaminaci. [15A] Na základě výše uvedených skutečností byl nátěrový systém LV EPS 620 s podílem 1,0 hm. % MWCNT podroben dalším

experimentům sestaveným za účelem sledování vlivu dispergace (použitého zařízení a parametrů procesu) na finální funkční a ochranné vlastnosti povlaku [14A].

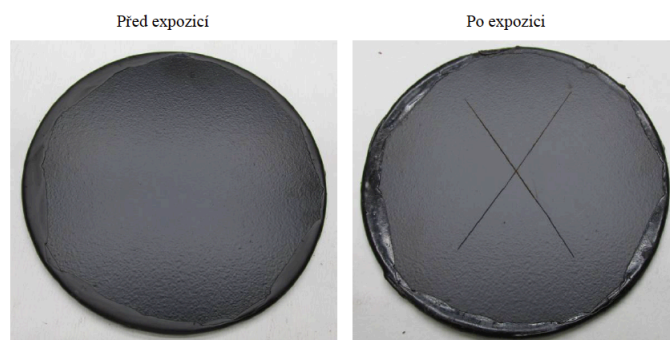


Obrázek 29 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po 240 hodinách zkoušky v neutrální solné mlze [15A]

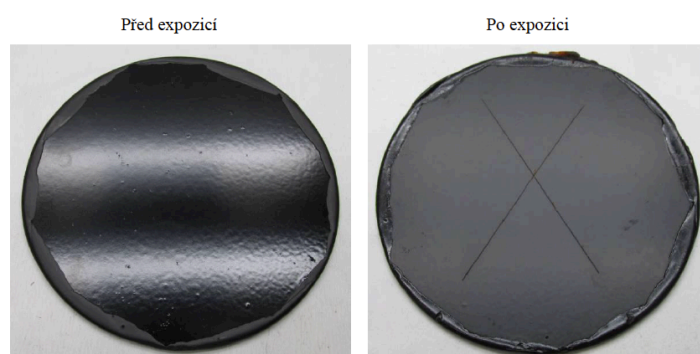


Obrázek 30 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po 240 hodinách zkoušky v oxidem siřičitým s povšechnou kondenzací [15A]

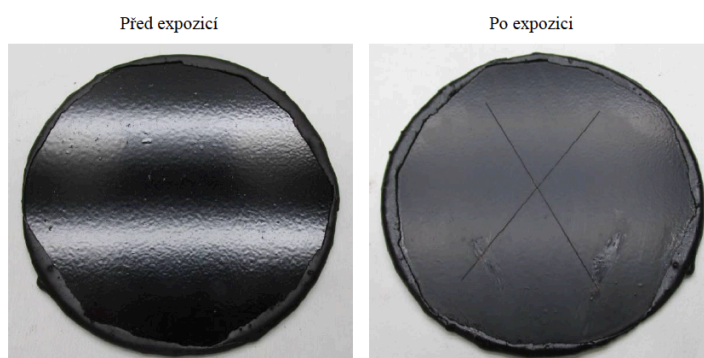
620 – 0 % - vz. 10



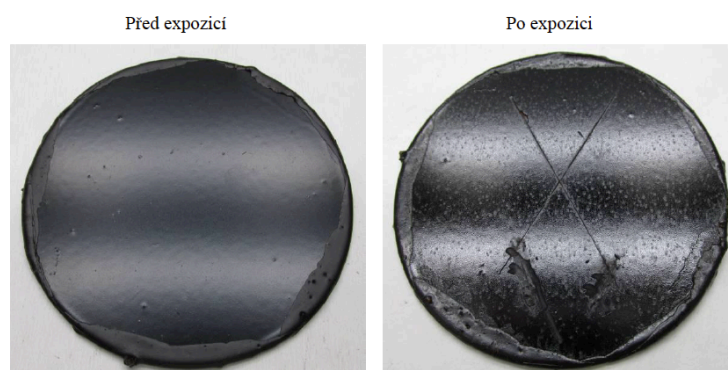
620 – 0,5 % - vz. 8



620 – 1 % - vz. 10



620 – 2 % - vz. 9



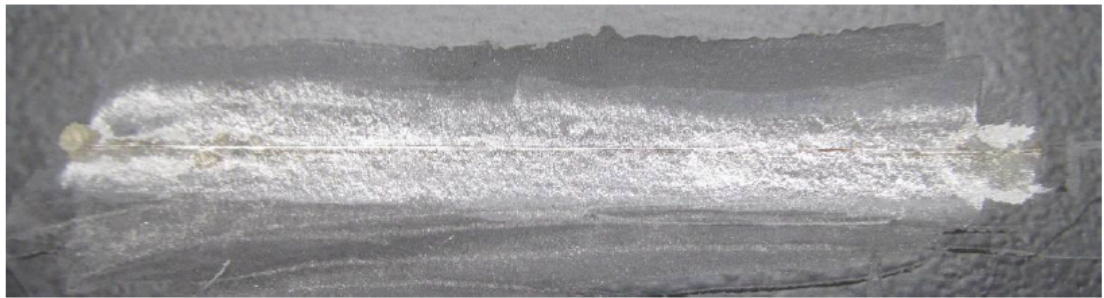
Obrázek 31 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po zkoušce Machu Test

[15A]

Delaminace



Prokorodování



Delaminace



Prokorodování



Obrázek 32 – Delaminace a prokorodování povlaků v okolí umělého defektu po zkoušce v neutrální solné mlze v délce trvání 240 hodin LV EPS 620 (nahore), LV EPS 620 + 2 hm. % MWCNT (dole) [15A]

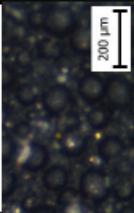
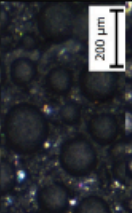
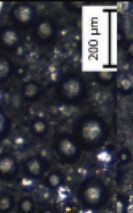
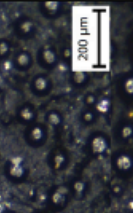
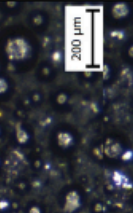
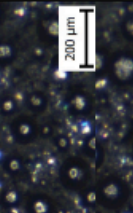
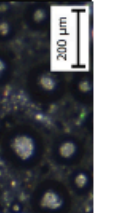
Pro účely posouzení vlivu procesu dispergace na vlastnosti nátěrových hmot LV EPS 620 s podílem 1,0 hm. % MWCNT bylo vytvořeno 6 nátěrových hmot s tímto podílem nanočástic za použití zubového míchadla, míchadla rotor-stator a ultrazvukového homogenizátoru. Byly použity stejné typy míchadel jako v případě optimalizace přípravy antistatické nátěrové hmoty LV EPS 620 s podílem 8 hm. % grafitu [13A] (viz kapitola 4.2.1.1 strana 77). V případě zubového míchadla byly vytvořeny dvě nátěrové hmoty, a to při parametrech dispergace: 1) frekvence otáček 3 600 min⁻¹ po dobu 2 minut a 2) frekvence otáček 3 600 min⁻¹ po dobu 10 minut. V případě míchadla rotor-stator byly vyhotoveny tři nátěrové hmoty, a to při parametrech procesu: 1) frekvence otáček 10 000 min⁻¹ po dobu 10 minut, 2) frekvence otáček 7 000 min⁻¹ po dobu 5 minut a 3) frekvence otáček 10 000 min⁻¹ po dobu 1,5 minuty. V případě ultrazvukového homogenizátoru byl proces dispergace nastaven shodně s přípravou LV EPS 620 s podílem 8 hm. % grafitu tedy varianta 1) 5 minut při výkonu generátoru pulsů 300 W a parametrech pulsu (0,8 s ON / 1,0 s OFF) a 2) 1,5 minuty při shodných parametrech výkonu a pulsů. Veškeré uvedené procesy dispergace probíhaly za zvýšené teploty vsádky 65°C. Po vychladnutí bylo provedeno jejich natužení tužidlem LV BU 45 N a aplikovány na ocelové desky Q-Panel (o rozměrech 76 mm × 125 mm × 0,8 mm, S235JRG1) a kruhové desky ø 105 × 1,2 mm z konstrukční oceli S235JRG1 [13A].

Hodnocení vlivu dispergace MWCNT v nátěrové hmotě LV EPS 620 na finální vlastnosti otěruvzdorného povlaku proběhlo pomocí posouzení:

- aplikačních vlastností (vícekriteriálním hodnocením parametrů souvisejících s aplikací nátěrové hmoty pneumatickým stříkáním a výsledného vzhledu mokrého a suchého filmu),
- lesku povlaku (měřený pod úhlem 60° dle ČSN EN ISO 2813 [69 p. 8]),
- odolnosti proti praskání a odlupování, elasticity (ohybem na kónickém trnu dle ČSN EN ISO 6860 [70 p. 7]),
- stanovením abrazivní odolnosti pomocí přístroje Taber Abraser dle ČSN EN ISO 7784-2 [71 p. 2],
- optickým hodnocením 100% kohezních lomů v povlaku při odtrhové zkoušce přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41].

Parametry dispergace a výsledky jednotlivých zkoušek ochranných a funkčních vlastností povlaků předkládá tabulka 2 níže.

Tabulka 2 – Souhrn parametrů dispergace a výsledků jednotlivých zkoušek povlaků nátěrových hmot LV EPS 620 s 1,0 hm. % MWCNT [14A]

Vzorek	Nátěrová hmota			Parametry dispergace						Parametry povlaku				
	matrice	vodivý pigment	podíl pigmentu [hm. %]	metoda dispergace	frekvence otáček [min ⁻¹]	doba dispergace [min]	disipovaná energie E _d [J.kg ⁻¹]	měrný disipovaný výkon ε _p [W.kg ⁻¹]	obvodová rychlost [m.s ⁻¹]	aplikační viskozita [Pa.s]	odtrhová pevnost [MPa]	lesk [GU]	hmotnostní úbytek (1000 cyklů) [g]	vzhled lomové plochy povlaku
620	LV EPS 620	—	—	ručně	—	—	—	—	—	5	3,624	24,9	0,2564	—
MWCNT Z2	LV EPS 620	MWCNT	1	zubové míchadlo	3 600	2	6 030	629	9,4	8,5	2,781	38	0,1563	
MWCNT Z10	LV EPS 620	MWCNT	1	zubové míchadlo	3 600	10	26 269	629	9,4	11	3,179	42,8	0,0893	
MWCNT SRVZ1	LV EPS 620	MWCNT	1	rotor stator	10 000	10	17 169	4 322	13,09	6,75	3,897	46,9	0,0731	
MWCNT SRVZ2	LV EPS 620	MWCNT	1	rotor stator	7 000	5	3 234	1 615	9,16	7	4,883	63,2	0,1072	
MWCNT SRVZ3	LV EPS 620	MWCNT	1	rotor stator	10 000	1,5	2 726	4 322	13,1	8,5	5,509	70,8	0,0643	
MWCNT USVZ1	LV EPS 620	MWCNT	1	ultrazvukový homogénizátor	—	5	41 005	31 773	—	9,5	4,563	62,7	0,1139	
MWCNT USVZ2	LV EPS 620	MWCNT	1	ultrazvukový homogénizátor	—	1,5	12 163	31 773	—	10,5	4,312	59,8	0,1451	

Z tabulky 2 je patrný vliv použitého zařízení a parametrů dispergace na konečné vlastnosti povlaků LV EPS 620 s 1,0 % hm. podílem vícestěnných uhlíkových nanotrubic MWCNT. Z pohledu vícekritériálního hodnocení aplikačních a vzhledových vlastností byla nejlépe hodnocena (ve vztahu k LV EPS 620 bez MWCNT) varianta za použití míchadla rotor – stator MWCNT SRVZ1 (10 000 min⁻¹, 10 min). Takto vytvořená disperze vykazovala jednolité vzhled a nižší viskozitu v porovnání s ostatními variantami. Použitá disperze nanočástic EPOCYL XCR 128-06 oproti použití grafitu, kdy lesk povlaku LV EPS 620 při vysokém stupni dispergace vykazoval nízkou úroveň lesku [13A] (viz kap. 4.2.1.1. str. 54, 55) zvyšovala hodnotu lesku matrice. Z tohoto důvodu bylo rovněž zvoleno hodnocení lesku povlaku pro posouzení stupně dispergace MWCNT (ve smyslu čím vyšší je hodnota lesku, tím lepší je dispergace a distribuce částic v povlaku). Nejvyšší hodnoty lesku vykazovaly povlaky MWCNT SRVZ3, kdy průměrná hodnota lesku 70,8 GU, stanoveného pod úhlem 60° dle ČSN EN ISO 2813 [69 p. 8]), byla 2,8× vyšší než hodnota lesku povlaku LV EPS 620 bez MWCNT [14A].

Ohybovou zkouškou povlaků dle ČSN EN ISO 6860 [70] pomocí kónického trnu bez opatření povlaku podélnými řezy ve vzdálenosti 20 mm [70 p. 8] vytvořených na ocelových deskách Q-Panel (76 mm × 125 mm × 0,8 mm, S235JRG1) nebyly zjištěny žádné rozdíly mezi jednotlivými variantami. Při zatížení povlaku ohybem nedocházelo k viditelnému praskání povlaku či jeho uvolňování od základního materiálu [14A].

V případě odtrhové zkoušky přilnavosti dle ČSN EN ISO 4624 [41] dosahovaly nejnižších hodnot odtrhového napětí varianty, u kterých byla dispergace provedena pomocí zubového míchadla. Hodnoty odtrhového napětí byly dokonce nižší než hodnoty povlaků nemodifikované nátěrové hmoty. Naopak ostatní metody dispergace přispěly k nárůstu odtrhového napětí, a to téměř až o 2 MPa v případě varianty rotor stator MWCNT SRVZ3. Převážná část lomů modifikovaných povlaků byla kohezního typu v povlaku (70 % A/B a více) [14A].

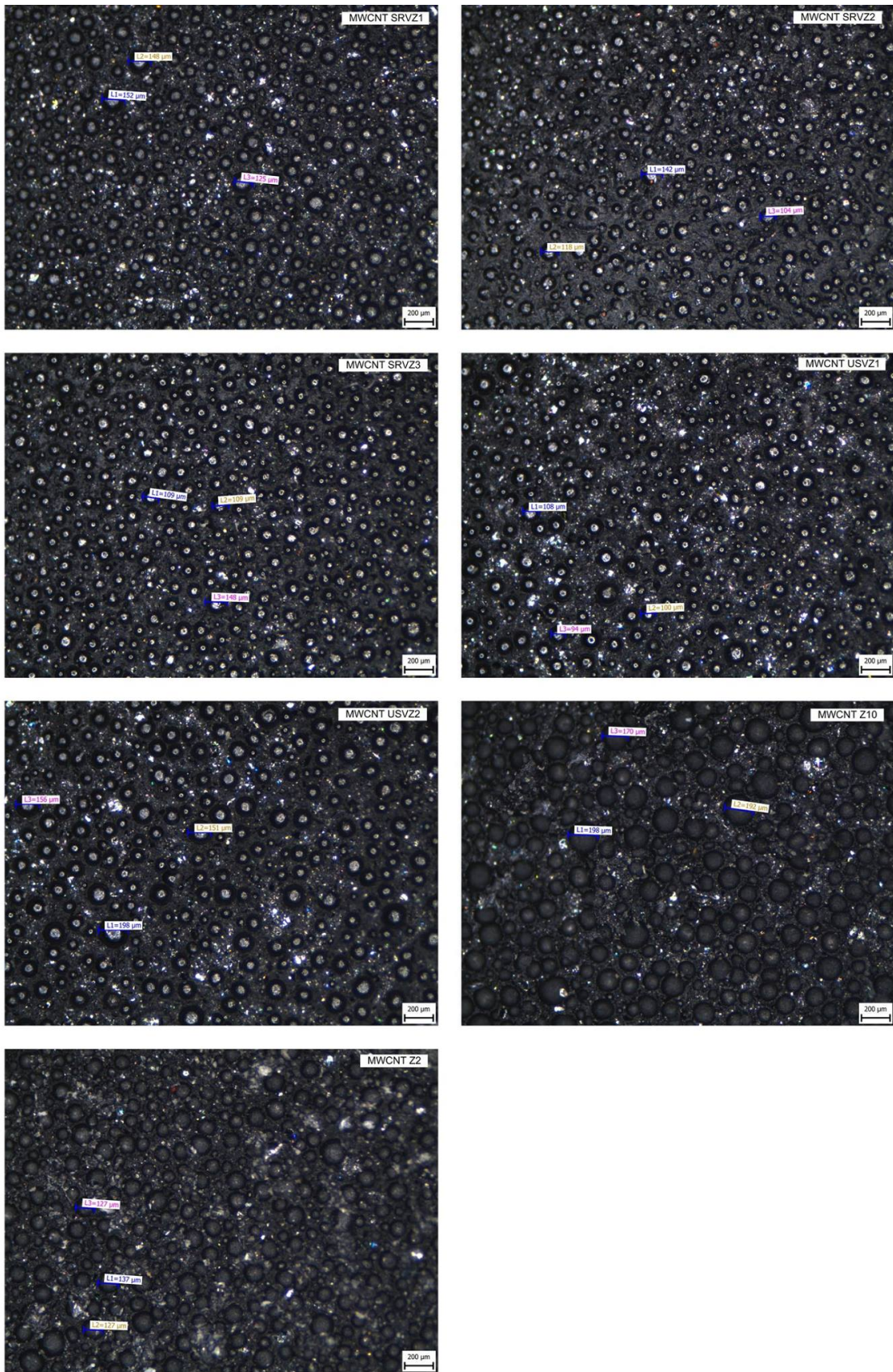
Příčina jevu je patrná z obrázku 33, kde jsou při stejném zvětšení porovnány lomové plochy jednotlivých povlaků. Na snímcích lze pozorovat kulové vrchlíky v lomové ploše povlaku způsobené přítomností plynu. Tímto nežádoucím naplyněním dochází k zeslabení průřezu povlaku, a tedy i k nižším hodnotám kohezní pevnosti. Přítomnost plynu je patrná u všech povlaků s příměsí MWCNT ve formě suspenze EPOCYL XCR 128-06. Největší zeslabení matrice je patrné u snímků povlaků nátěrových hmot připravovaných pomocí zubového

míchadla. Přítomnost plynné složky v povlaku je možné vysvětlit teplotní degradací (odpařováním) některé ze složek vytvořené nátěrové hmoty při procesu dispergace (za zvýšené teploty 65°C) a lokálním přehříváním vsádky v oblasti dispergační zóny. Odpařovat se mohl například Xylen, obsažený v LV EPS 620, či některé z aditiv suspenze EPOCYL XCR 128-06. Dále je možné, že byl plyn při procesu dispergace vmícháván do vsádky, ovšem žádná z nátěrových hmot s příměsí grafitu připravovaných za normálních teplot nevykazuje v matrici přítomnost plynu [13A].

Abrazivní odolnost jednotlivých povlaků uvedených v tabulce 2 byla rovněž stanovena pomocí přístroje Taber Abraser, ovšem za použití brusných kotoučů Taber Industries H-10 přitlačovaných na vzorek závažím o hmotnosti 500 g. U jednotlivých vzorků byl rovněž sledován hmotnostní úbytek po 100 zátěžových cyklech ovšem až do hodnoty 1 000 cyklů. Ke stanovení hmotnosti vzorků bylo opět použito digitálních vah Ohaus Explorer Pro sloužících k předvážení a nastavení analytických vah Mettler H64 pro stanovení přesné hmotnosti. Průběhy hmotnostních úbytků v závislosti na počtu zátěžných cyklů jsou pro jednotlivé povlaky nátěrových hmot LV EPS 620 obsahujících 1,0 hm. % MWCNT vyobrazeny v grafu 5 [14A].

Zvýšení abrazivní odolnosti nátěrové hmoty LV EPS 620 při použití MWCNT ve formě suspenze EPOCYL XCR 128-06 je z grafu 5 patrné. Nejvyšší abrazivní odolnost vykazoval povlak MWCNT SRVZ3 (zvýšení oteruvzdornosti o 74,9 %). Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo i v případě nátěrů MWCNT SRVZ1 (zvýšení oteruvzdornosti o 71,5 %) a MWCNT Z10 (zvýšení oteruvzdornosti o 65,2 %). Nejnižší hodnotu abrazivní odolnosti vykazoval povlak MWCNT Z2, jehož oteruvzdornost byla oproti matrici LV EPS 620 větší o pouze o 39 %. Vzhledem k charakteru zkoušky a morfologii povrchu jednotlivých vzorků (např. rozdílná rovinnost, vzhled pomerančové kůry, přítomnost bublin plynu v povlaku, měrná hmotnost aj.) je důležité při finálním rozhodování o nejvhodnější metodě dispergace přihlídnout i k výsledkům ostatních zkoušek ochranných a funkčních vlastností a nerozhodovat pouze na základě výsledků zkoušky abrazivní odolnosti [14A].

S přihlédnutím na výsledky jednotlivých zkoušek lze za nejvhodnější metodu dispergace systému LV EPS 620 s podílem 1,0 hm. % vícestěnných uhlíkových nanotrubic považovat metodu rotor-stator při frekvenci otáček 10 000 min⁻¹ a době trvání procesu 1,5 min [14A].

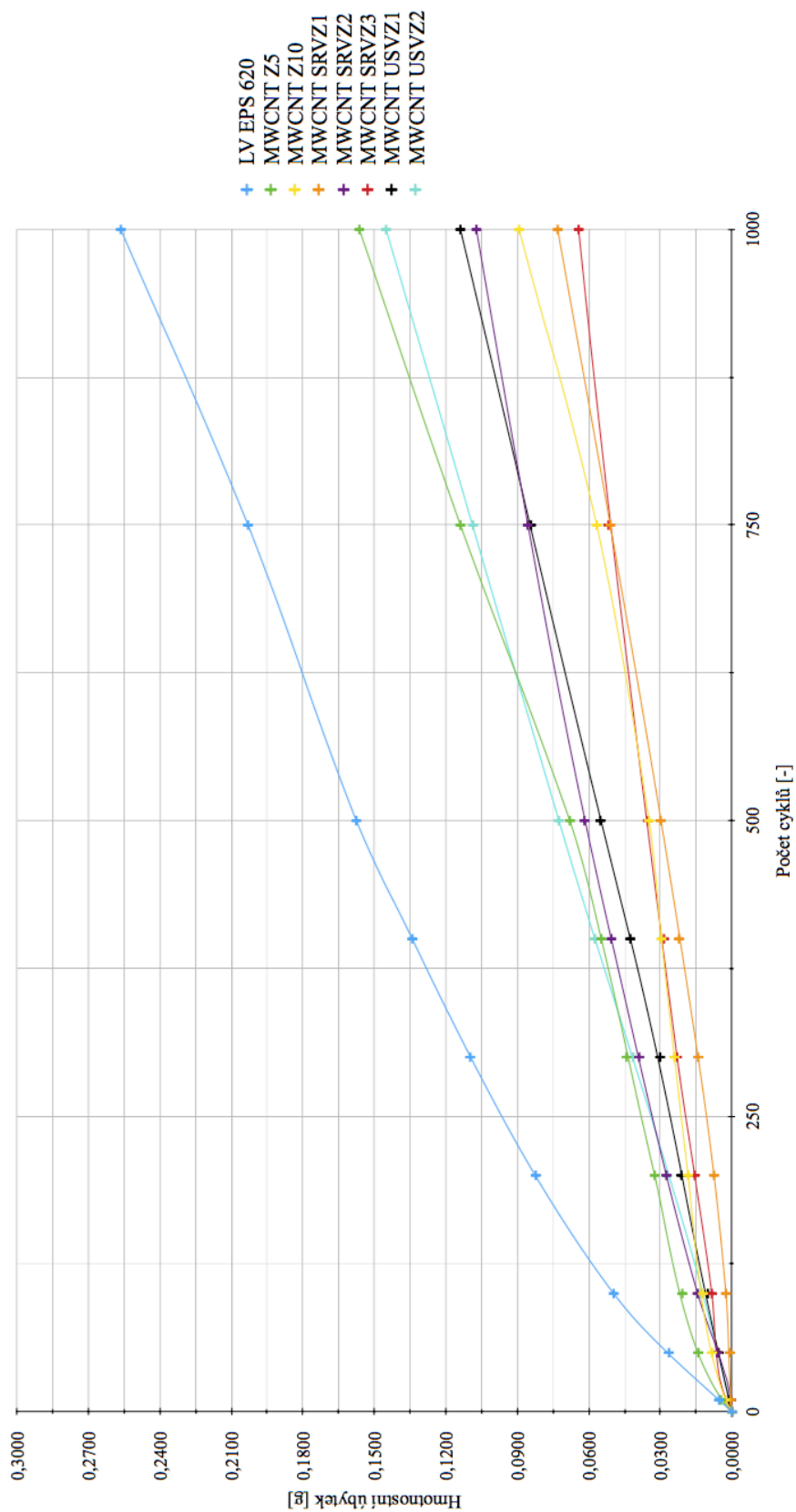


Obrázek 33 – Mikroskopické snímky lomových ploch povlaků LV EPS 620 s příměsí MWCNT 1,0 hm. % (patrná plynná složka v povlaku) [14A]

Graf 5 – Průběh hmotnostních úbytků v závislosti na počtu zátěžných cyklů při zkoušce abrazivní odolnosti povlaku nátěrové hmoty LV EPS 620 a různě dispergovaných nátěrových hmot LV EPS 620 – 1,0 hm. % MWCNT [14A]

Taber Abraser – průběh hmotnostních úbytků jednotlivých povlaků

LV EPS 620 a LV EPS 620 – 1,0 hm. % MWCNT



4.2.1.3 Antikoroziční nátěrové systémy

Nátěrová hmota LV EPS 620 použitá jako matrice pro tvorbu antistatických [9A, 13A, 16A] a otěruvzdorných [15A, 19A, 20A] povlaků vykazuje na základě provedených korozních zkoušek [15A] dobrou korozní odolnost. Z tohoto důvodu byla zvolena jako vhodná matrice pro tvorbu nátěrových systémů s různým obsahem zinkových a hořčíkových částic. Formulace jednotlivých nátěrů byla volena tak, aby bylo popsáno chování jednotlivých povlaků v závislosti na koncentraci použitých částic v povlaku a posouzen jejich antikoroziční potenciál při ochraně kovových [23A] a hliníkových [25A] materiálů.

Princip ochrany ocelových podkladů proti korozi je u povlaků hořčíku obdobný jako u povlaků zinku. Z pohledu elektrochemického potenciálu se ve spojení s uhlíkovou ocelí chovají tyto materiály jako obětovaná anoda [81 p. 1304, 82 p. 265]. V případě ochrany povrchu oceli organickými nátěrovými hmotami s vysokým podílem těchto částic ($OKP \geq KOKP$, jednotlivé částice jsou vodivě spojeny) se jedná o způsob bariérové a dočasné elektrochemické antikoroziční ochrany [5 p. 66, 67]. Povlaky nátěrových hmot s takto vysokou hodnotou OKP jsou porézní a v případě použití částic zinku, popř. hořčíku dochází k zaplnění pórů korozními produkty těchto pigmentů vlivem reakce s kyslíkem, vodou a oxidem uhličitým obsaženým v atmosféře. Při těchto reakcích vznikají v případě zinku produkty oxidu zinečnatého, hydroxidu zinečnatého a uhličitanu zinečnatého. V případě hořčíku se jedná o vznik oxidu hořečnatého reakcí se vzdušným kyslíkem, jenž v reakci se vzdušnou vlhkostí přechází na hydroxid hořečnatý [5 p. 72]. Hydroxid hořečnatý v prostředí atmosféry s vysokou vzdušnou vlhkostí dále podléhá přeměně na uhličitan hořečnatý, který značně zvyšuje ochranné působení hořčíku. Díky malé rozpustnosti hydroxidu hořečnatého je hořčík dobře korozně odolný v alkalických prostředích. V kyselých prostředích naopak vznikají u hořčíku například siřičitany a sírany, případně chloridy a oxichloridy, které nemají ochranné vlastnosti, a navíc jsou hygroskopické, a tím korozi spíše urychlují. Elektrochemický účinek nátěrů s vysokým podílem zinku, popř. hořčíku je časově omezen oxidací použitých částic, díky které se stává elektricky nevodivým. V případě drobného poškození takovýchto typů povlaků je pak možný opětovný proces elektrochemické ochrany povlaku [81 p. 1305, 83 p. 205].

Pro formulaci nátěrových hmot obsahujících hořčíkové částice byly použity dva typy hořčíkových částic. Typ 1 nanočástice hořčíku o velikosti shluků 30 až 200 μm (NANOSHELL LLC) a typ 2 o velikosti 40 až 45 μm (Alfa Alesar) [26A]. V případě zinkových částic, obdobně jako v případě tvorby antistatických nátěrových hmot [17A], bylo použito práškového zinku Zn2N (PK chemie) o velikosti částic 3,4 – 3,9 μm [23A]. Technické listy k jednotlivým produktům jsou součástí přílohy disertační práce – Příloha A – Technické listy.

V případě částic hořčíku typ 1 byly vytvořeny nátěrové hmoty o koncentraci 1,5; 3,0 a 8,0 hm. % Mg. Pro typ 2 pak nátěrové hmoty o koncentraci 3,0; 8,0 a 49 hm. % Mg. Dále byly vytvořeny dvě nátěrové hmoty obsahující částice obou kovů o hm. koncentraci 16 hm. % Mg + 8 hm. % Zn a 16 hm. % Zn + 8 hm. % Mg. V případě těchto hmot bylo použito hořčíkových částic typu 1. Nátěrové hmoty s příměsí zinku byly vytvořeny v koncentracích 1,5; 3,0; 8,0 a 70 hm. % Zn [23A].

V případě LV EPS 620 s příměsí 70 hm. % Zn a 49 hm. % Mg byla dispergace provedena pomocí kombinace ultrazvukové homogenizace a mícháním pomocí čtyřlopatkového míchadla o průměru 50 mm se šikmým sklonem lopatek (WisseStirr HS-D). Ultrazvukový homogenizátor byl i v tomto případě použit Sonopuls HD 3400 osazený sondou VST 200T. Proces dispergace v ultrazvukovém homogenizátoru probíhal po dobu 4 minut při výkonu 300 W a parametrech pulsu (1,0 s ON / 1,0 s OFF). Následně bylo provedeno míchání lopatkovým míchadlem po dobu 30 minut při frekvenci otáček míchadla 500 min^{-1} . Poté byl opakován proces dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru při shodných parametrech [26A]. Zbylé nátěrové hmoty byly připraveny pomocí míchadla rotor-stator dle poznatků získaných z přípravy LV EPS 620 obsahující 1,0 hm. % MWCNT tedy míchadlem IKA S 25 N – 25 G po dobu 1,5 min a při frekvenci otáček $10\,000 \text{ min}^{-1}$. [13A, 23A].

Jednotlivé nátěrové hmoty byly nanесeny na ocelové desky S355J2 [23A] o rozměrech 100 × 150 × 4 mm. Nátěrové hmoty neobsahující částice zinku byly rovněž nanесeny na desky z hliníkové slitiny Al 2024 – T3 [24A] o rozměrech 150 × 100 × 2 mm pneumatickým stříkáním pomocí stříkací pistole EST116 při tlaku 3,8 až 4,5 bar v závislosti na typu nátěrové hmoty. Ocelové desky byly předupraveny tryskáním ocelovou drtí na stupeň čistoty A Sa 2,5 dle ČSN EN ISO 8501-1 [75 p. 7, 8] a drsnost odpovídající dle komparátoru Rugotest No. 3 [76] segmentu B N9a [26A]. Desky z hliníkové slitiny byly tryskány hnědým korundem a drsnost jejich povrchu odpovídala segmentu B 9b zmíněného komparátoru [25A].

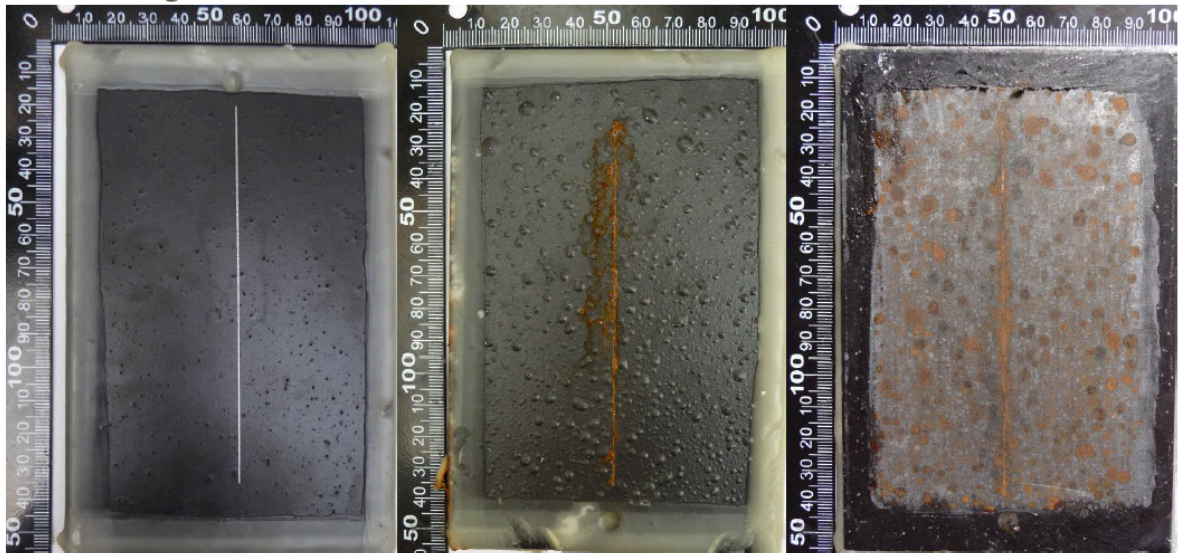
Pro účely posouzení ochranných vlastností vytvořených hmot LV EPS 620 s různým podílem kovových částic Mg a Zn či jejich kombinace byly vytvořeny jednovrstvé nátěry a současně dvou- a třívrstvé nátěrové systémy, ve kterých povlaky obsahující kovové částice plnily funkci základního nátěru. Ve dvouvrstvěném systému plnila funkci vrchního krycího nátěru polyuretanová hmota CP05. U třívrstvého nátěrového systému bylo použito nátěrové hmoty LV EPS 620 jako mezivrstvy a vrchní nátěr byl rovněž zhotoven pomocí CP05. Tloušťka DFT základních nátěrů se dle typu nátěrového systému pohybovala v rozsahu 60 až 190 μm, tloušťka DFT mezivrstev v rozsahu 140 až 160 μm a tloušťka DFT vrchních krycích nátěrů činila 60 μm. [23A, 26A]

Výše popsané nátěrové systémy byly testovány z hlediska korozní odolnosti zkouškou v neutrální solné mlze dle ČSN EN ISO 9227 [73] v délce trvání 1 000 hod (resp. 720 hod v případě hmot obsahujících 49 hm. % Mg a 70 hm. % Zn) a expozicí v prostředí kondenzace vody dle ČSN EN ISO 6270-2 [78] v délce trvání 477 hodin. U nátěrů vystavených působení solné mlhy a prostředí kondenzace vody byl hodnocen stupeň velikosti a množství puchýřků dle ČSN EN ISO 4628-2 [79], stupeň prorezavění dle ČSN EN ISO 4628-3 [88] a v souladu s ČSN EN ISO 4628-8 [80] stupeň delaminace a koroze v okolí řezu. [23A].

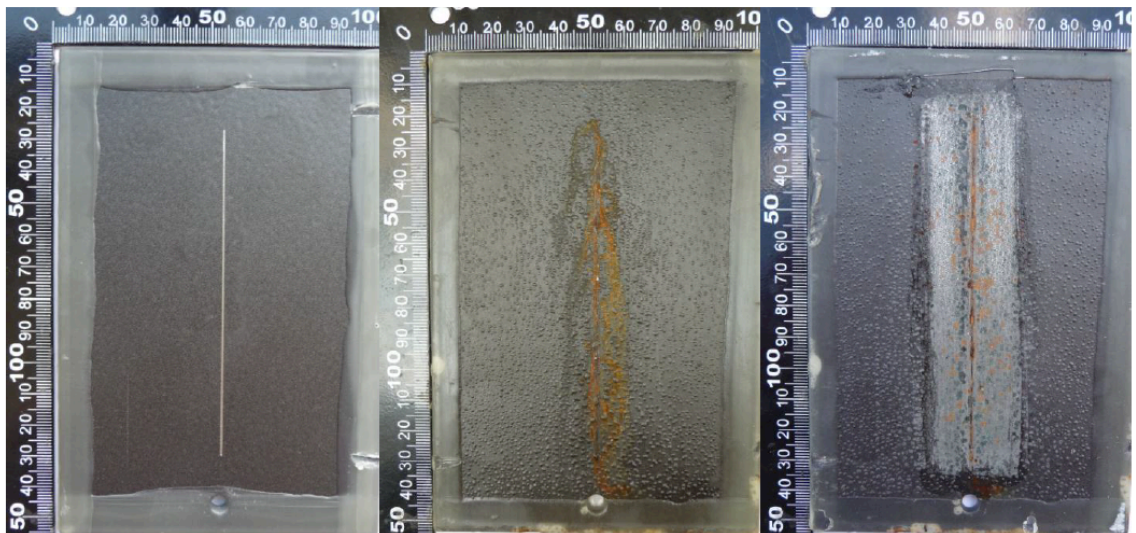
V případě zkoušky v solné mlze docházelo u jednovrstvých nátěrů s nízkým podílem hořčíkových částic (1,5 hm. %, 3,0 hm. % a 8 hm. % Mg) k tvorbě osmotických puchýřků. Tyto defekty vznikaly v prostředí solné mlhy již po 48 hodinách a v prostředí kondenzace vody po 120 hodinách. Mezi jednotlivými typy hořčíkových částic byl pozorován rozdíl v jakosti povrchu povlaku (viditelné shluky částic na povlaku u Mg Typ 1) a ve velikosti osmotických puchýřků, jenž byly menší v případě částic hořčíku typ – 2. V obou případech docházelo v místech výskytu osmotických puchýřků k prorezavění skrz nátěr. U hliníkové

slitiny v případě nátěrů s nízkým podílem hořčíku docházelo v místech puchýřků k bodové korozi základního materiálu. Množství puchýřků se s rostoucím podílem hořčíku zvyšovalo, klasifikace množství 2 až 5 a velikosti S2 až S4 dle ČSN EN ISO 4628-2 [79]. U jednovrstvých nátěrů s nízkým podílem zinku k tvorbě osmotických puchýřků nedocházelo a povlaky vykazovaly dobrou odolnost vůči koroznímu prostředí neutrální solné mlhy. Jednovrstvé nátěry obsahující jak zinkové, tak hořčíkové částice pak vykazovaly obdobné chování a defekty jako nátěry s nízkým podílem hořčíkových částic. Tvorba puchýřů u nátěrů s nízkým podílem hořčíku byla významně snížena v případě dvouvrstevých a třívrstevých systémů. V místech puchýřů navíc nedocházelo k poškození základního materiálu. U těchto vícevrstevých systémů docházelo k tvorbě puchýřků na rozhraní základního nátěru s hořčíkovými částicemi a krycího nátěru. Povlaky s vysokým podílem hořčíku (49 hm.%) nevykazovaly v průběhu expozice vznik koroze v umělém defektu (jednoduchém řezu povlakem na základní materiál v délce 100 mm v případě oceli a řezu v uspořádání do T délky 90 mm a 60 mm pro hliníkovou slitinu v souladu s ČSN EN ISO 17872 [87 p. 9, 10]). I v tomto případě docházelo k tvorbě osmotických puchýřků, avšak ve výrazně menší míře a po delší době (~ 330 hod). Povlaky s vysokým podílem hořčíkových částic vykazovaly zcela odlišné korozní chování ve srovnání s povlaky s nízkou koncentrací. Značně potlačena byla produkce puchýřků, stupeň koroze v řezu a tvorba rzi v řezu. Povlak s vysokým podílem zinkových částí (70 hm. %) vykazoval korozi v řezu a rovněž v průběhu expozice docházelo k tvorbě puchýřků. [25A, 26A]

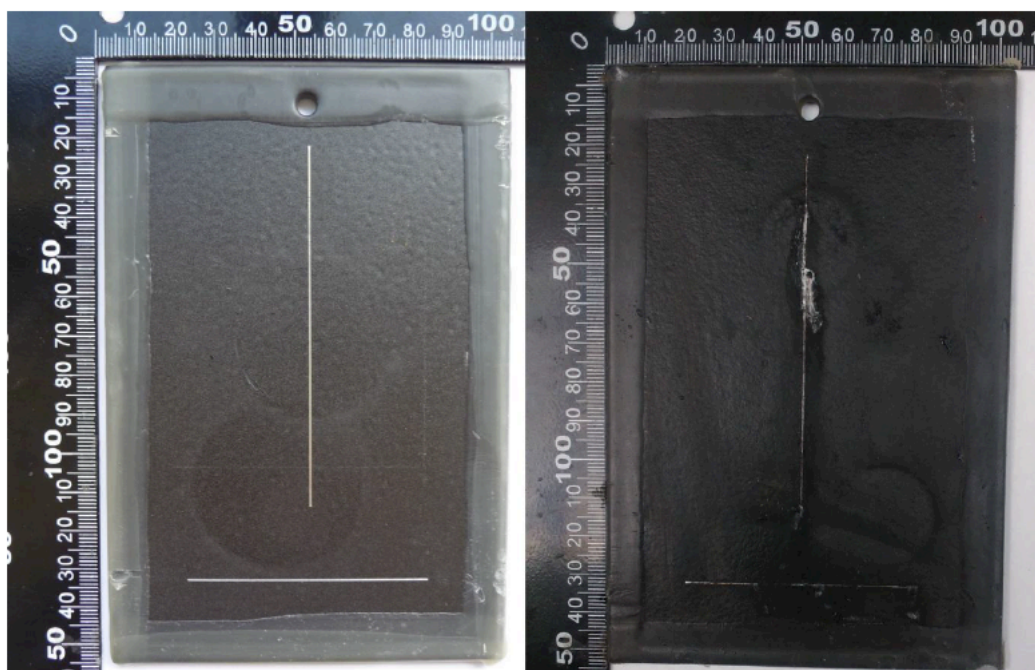
V případě zkoušky v prostředí kondenzace vody dle ČSN EN ISO 6270-2 [78] docházelo u jednovrstvých nátěrů s nízkým podílem hořčíku k tvorbě osmotických puchýřků klasifikace 5(S2) dle ČSN EN ISO 4628-2 [79 p. 8]. Po odstranění povlaků však nebylo pozorováno prorezavění. K tvorbě puchýřků klasifikace 5(S2) docházelo i u vícevrstevých nátěrových systémů, u kterých byl použit základní nátěr s nízkým podílem hořčíku. V tomto případě byla tvorba puchýřků sledována na rozhraní základní nátěr / mezivrstva (krycí nátěr). U povlaků, kde bylo použito jak hořčíkových, tak zinkových částic, bylo puchýřkování klasifikováno stupněm 5(S1). Rovněž u těchto povlaků nedošlo k jejich prorezavění. Vysokou odolnost vůči prostředí kondenzace vody prokázaly povlaky nátěrové hmoty LV EPS 620 a povlaky této nátěrové hmoty s vysokým podílem hořčíkových (49 hm. % Mg) a zinkových (70 hm. % Zn) částic. Tyto povlaky nebyly náchylné k tvorbě puchýřků ani na nich nebyly zaznamenány jiné formy degradace. [25A]



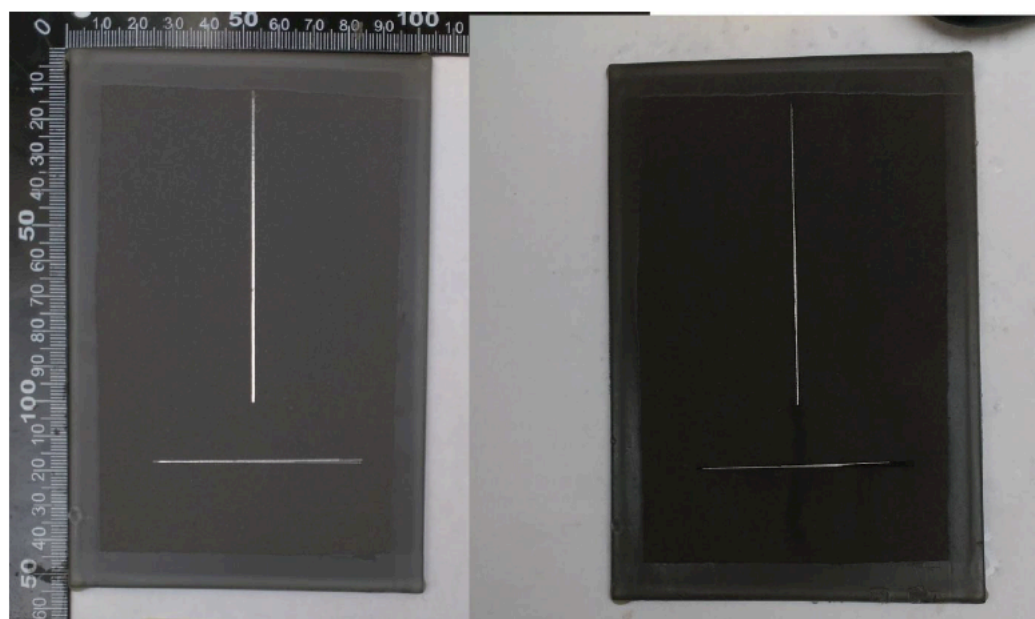
Obrázek 34 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 1 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (uprostřed) a po expozici a odstranění povlaku (vpravo) [25A]



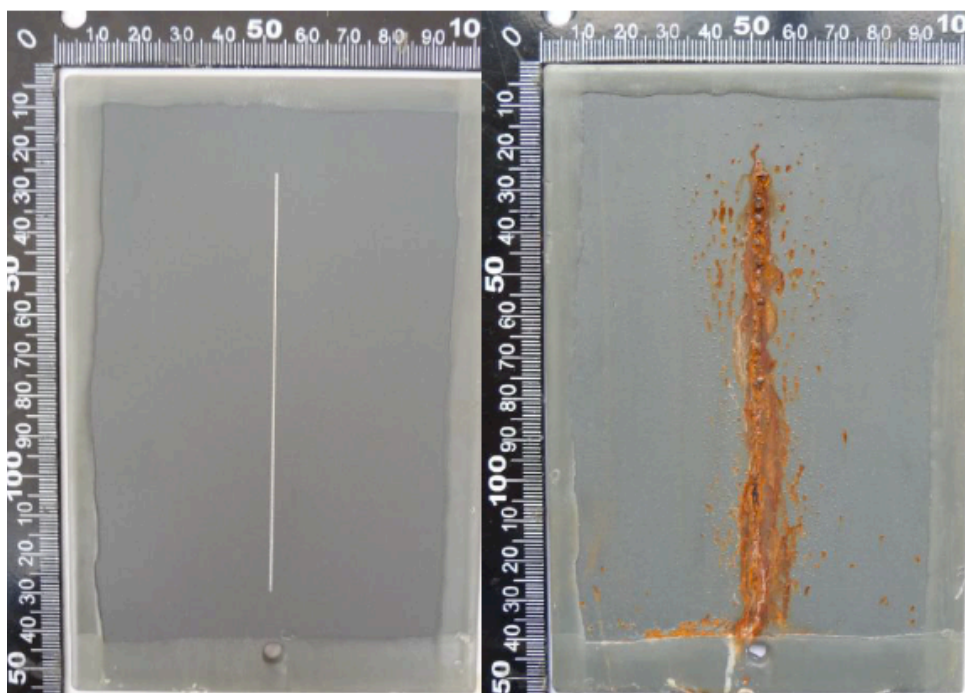
Obrázek 35 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (uprostřed) a po expozici a odstranění povlaku (vpravo) [25A]



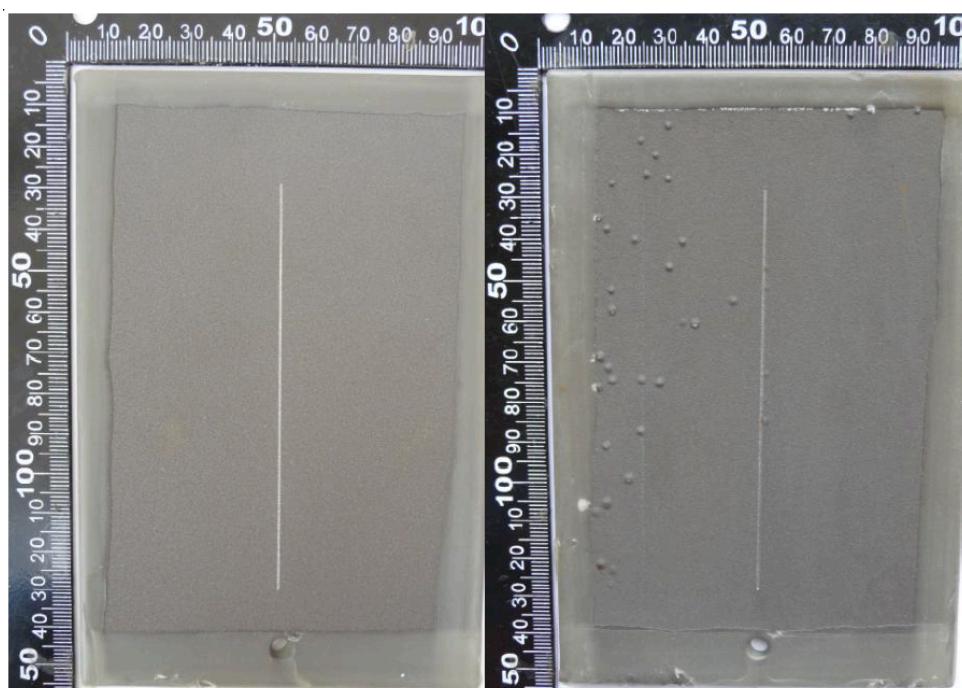
Obrázek 36 – Slitina Al 2024 – T3 opatřená povlakem LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]



Obrázek 37 – Slitina Al 2024 – T3 opatřená povlakem LV EPS 620 + 49 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]

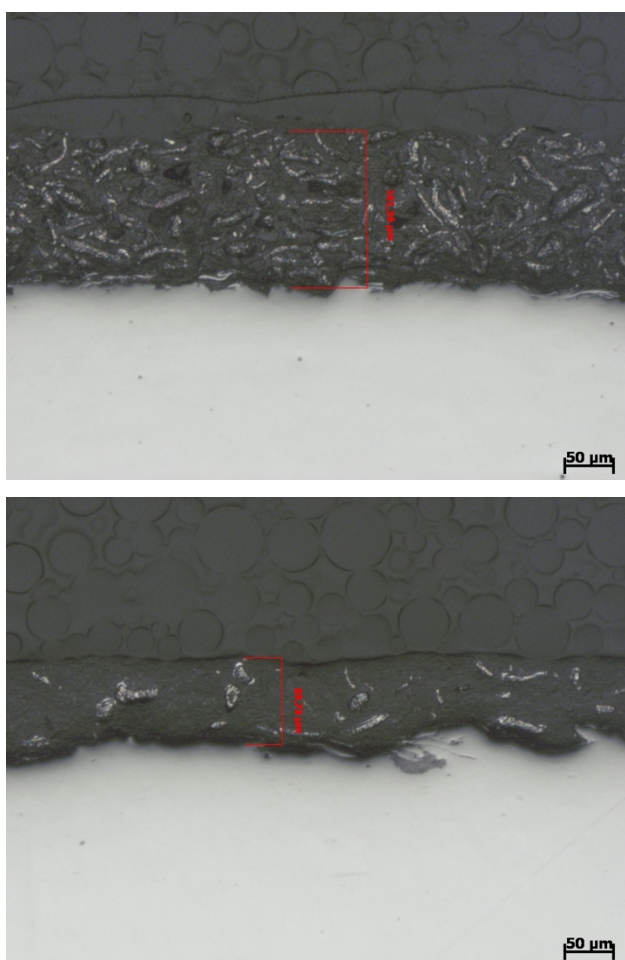


Obrázek 38 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 70 hm. % Zn před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]



Obrázek 39 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 49 hm. % Mg před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]

Provedené korozní testy prokázaly potenciál využití vysokého podílu hořčíkových a zinkových částic jako pigmentu antikoročních povlaků na bázi epoxidových pryskyřic [25A, 26A]. Phatak a kol. [84 p. 365] uvádí, že základní nátěry s vysokým podílem hořčíku mají vynikající korozní odolnost v případě vystavení přirozeným vlivům korozní atmosféry a upozorňuje na nedostatečné podmínky pro tvorbu uhličitanu hořečnatého v prostředí zkoušky v neutrální solné mlze vlivem nízkého obsahu CO₂ v korozní atmosféře zkoušky. I přes tato omezení vykazovaly povlaky LV EPS 620 s podílem 49 hm. % Mg vysokou odolnost vůči agresivnímu prostředí zkoušky v neutrální solné mlze a v prostředí kondenzace vody. Byla prokázána vhodnost těchto povlaků jak pro ochranu konstrukční oceli [23A, 26A], tak hliníkové slitiny Al 2024 – T3 [24A, 25A]. Zvýšení bariérové ochrany vlivem vysokého podílu hořčíkových částic v povlaku je patrné z obrázku 40, příčných řezů (metalografických výbrusů) povlaků LV EPS 620 s podílem 49 hm. % Mg a LV EPS 620 s podílem 8 hm. % Mg.[26A]



Obrázek 40 – Mikroskopický snímek příčného řezu povlakem LV EPS 620 + 49 hm. % Mg (nahore) a LV EPS 620 + 8 hm. % Mg (dole)

4.2.2 Nátěrové hmoty na bázi polyuretanu

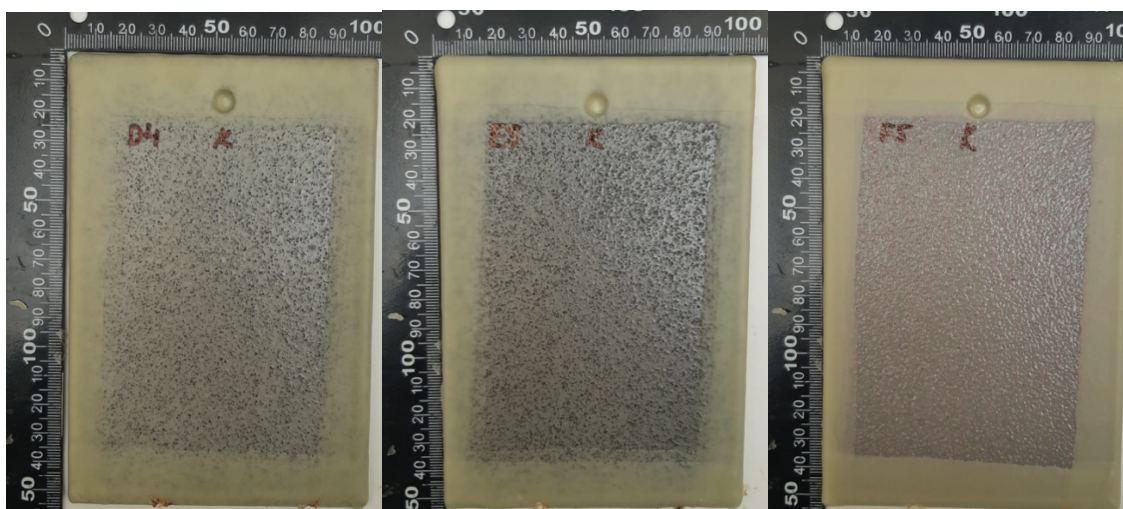
V rámci předchozí kapitoly byla použita dvousložková polyuretanová nátěrová hmota CP 05 pro tvorbu krycího povlaku nátěrových hmot LV EPS 620 a LV EPS 620 obsahující nízký podíl hořčíkových a zinkových částic. Na základě velmi dobrých výsledků korozních zkoušek byla tato hmota použita jako vhodná matrice pro tvorbu otěruvzdorných povlaků na bázi polyuretanu. [21A, 22A]

4.2.2.1 Otěruvzdorná nátěrová hmota na bázi polyuretanu

Hořčíkové částice (NANOSHELL LLC) velikosti 30 až 200 μm , byly použity pro tvorbu otěruvzdorného a protiskluzového povlaku na bázi polyuretanové nátěrové hmoty CP05 (VITON) kvůli specifickému vzhledu a zdrsňenému charakteru povrchu vytvořených povlaků za použití těchto částic (vystupující tvrdé částice z povlaku) [23A, 24A, 25A, 26A]. Pro účely posouzení otěruvzdorných vlastností povlaků obsahujících hořčíkové částice byla rovněž formulována nátěrová hmota CP05 obsahující růžový korund F-60 (Abranova). Pro účely porovnání ochranného efektu vystupujících částic a posouzení odolnosti matrice CP05 vůči mechanickému otěru byly dále testovány komerční dvousložkové epoxidové nátěrové hmoty s vysokou odolností vůči abrazivnímu opotřebení HEMPADUR Multistrength 45753 (Hempel) a HEMPADUR Multistrength GF 35870 (Hempel). Nátěrová hmota HEMPADUR Multistrength GF 35870 obsahuje disperzi skleněných vloček pro zesílení odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. [21A, 22A] Technické listy k uvedeným nátěrovým hmotám jsou součástí přílohy disertační práce – Příloha A – Technické listy.

Z důvodu zamezení významné změny velikosti použitých částic pro modifikaci nátěrové hmoty CP05 byla dispergace provedena pomocí čtyřlopatkového míchadla o průměru 50 mm se šikmým sklonem lopatek (WisseStirr HS-D) [13A, 27A] při frekvenci otáčení 500 min^{-1} po dobu 45 minut. Přibližně 600 ml jednotlivých hmot bylo mícháno v nádobě o průměru 100 mm, přičemž míchadlo bylo umístěno mimo osu nádoby. Tímto způsobem byly připraveny tři nátěrové hmoty jmenovitě CP05 + 5 hm.% Mg, CP05 + 10 hm. % Mg a CP05 + 5 hm. % Al_2O_3 . Povlaky všech výše uvedených hmot byly vytvořeny na ocelových deskách Q-Panel (S235JR) o rozměrech 152 mm \times 102 mm \times 1 mm (resp. 102 \times 102 \times 1 mm opatřených otvorem ve středu o průměru 6 mm pro zkoušku abrazivní odolnosti). Aplikace hmot s příměsí otěruvzdorných částic probíhala pomocí vzduchového stříkání opět stříkací pistolí EST 116, nátěrové hmoty Hempadur byly nanášeny metodou bezvzduchého stříkání pomocí stříkací pistole Graco G40 a zařízení Graco Mini Mercur ES [21A, 22A].

Vytvořené povlaky byly testovány z hlediska abrazivní odolnosti dle ČSN EN ISO 7784-2 [71 p. 2] na zařízení Taber Abraser použitým v kapitole 4.2.1.2 při tvorbě ořeruvzdorných povlaků obsahujících vícestěnné uhlíkové nanotrúbky [14A, 15 A, 19A, 20A]. Korozní odolnost vytvořených povlaků byla testována v neutrální solné mlze dle ČSN EN ISO 9227 [73] v délce trvání 720 h, expozici v prostředí kondenzace vody dle ČSN EN ISO 6270-2 [78] rovněž v délce trvání 720 h a zkouškou Machu test dle specifikace Qualicoat v délce trvání 36 h [85]. Dále bylo sledováno ovlivnění adheze nátěrů přidáním ořeruvzdorných částic pomocí odtrhové zkoušky dle ČSN EN ISO 4224 [41], mřížkovou zkoušku dle ČSN EN ISO 2409 [37] a zkoušku křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [82][21A].

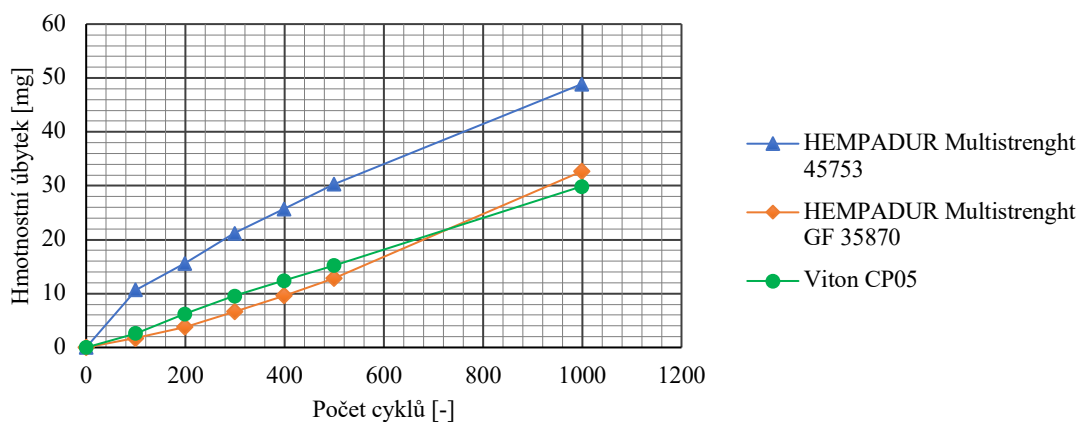


Obrázek 41 – Typický vzhled vytvořených povlaků CP05 obsahujících ořeruvzdorné částice 5 h, % Mg (vlevo), 10 hm. % Mg (uprostřed) a 5 hm. % Al₂O₃ (vpravo)

Způsob zatěžování povlaků na zařízení Taber Abraser a stanovení jejich ořeruvzdornosti byl shodný s postupem uvedeným v kapitole 4.2.1.2 na straně 58, 59, s tím rozdílem, že byly použity abrazivní kotouče Calibrade H-10 a celkový počet zátěžných cyklů byl 1 000 pro všechny typy povlaků. Průběhy hmotnostních úbytků v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro jednotlivé varianty povlaků předkládají grafy 6 a 7.[21A]

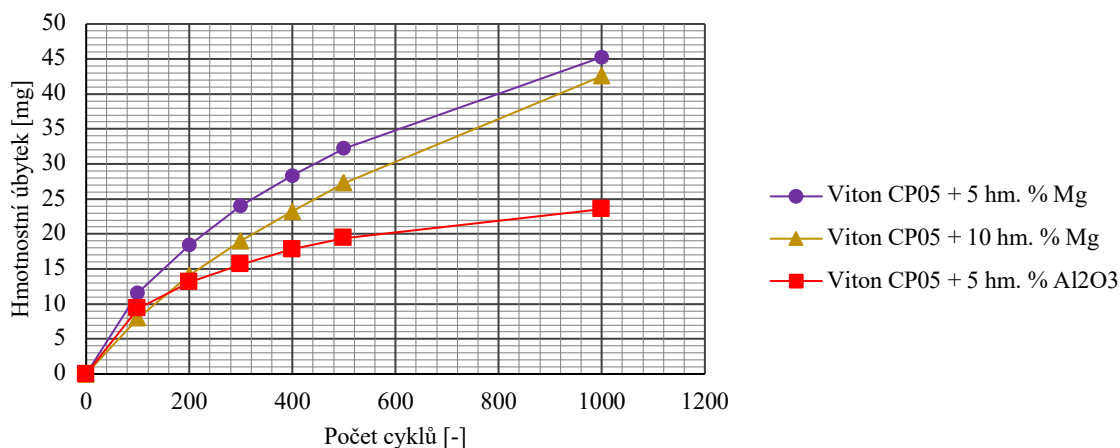
Graf 6 – Průběh hmotnostních úbytků povlaků nemodifikovaných nátěrových hmot [22A]

Závislost hmotnostního úbytku povlaků
na počtu cyklů Taber Abraser - hladké povlaky

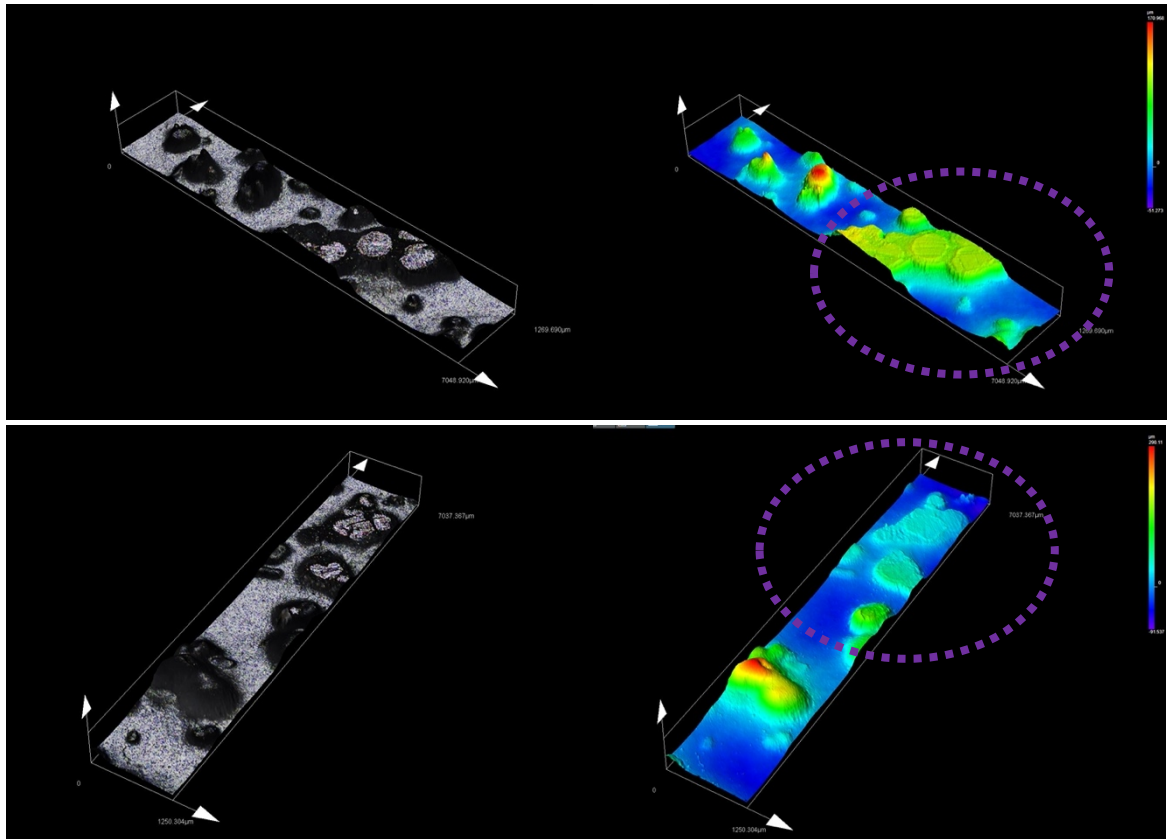


Graf 7 – Průběh hmotnostních úbytků povlaků na bázi CP05 s příměsí Mg a Al₂O₃ [22A]

Závislost hmotnostního úbytku povlaků
na počtu cyklů Taber Abraser - povlaky s částicemi

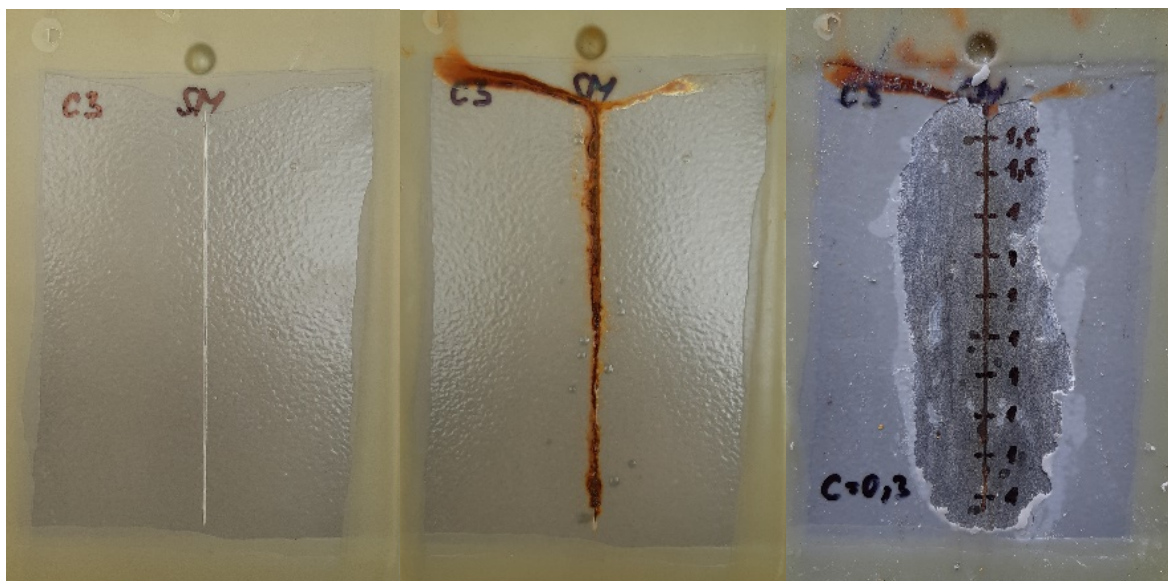


Hodnoty hmotnostních úbytků povlaků neobsahující funkční částice a povlaků s funkčními částicemi byly záměrně zaneseny do samostatných grafů z toho důvodu, že během 1 000 zátěžných cyklů docházelo pouze k úbytkům vystupujících částic z povlaku a zarovnávaní vysoké kontury povrchu nátěrů obsahující Mg a Al₂O₃ (graf 7). Jinými slovy nedocházelo k žádnému úbytku ochranné bariéry tvořené maticí CP05, jejíž průběh hmotnostních úbytků je zanesen do grafu 6. Tento jev je velice dobře patrný ze snímků 3D výškových map profilu povrchu nátěru CP05 s podílem 10 hm. % částic hořčíku (viz obrázek 42), pořízených pomocí konfokálního mikroskopu Olympus Lext OLS 3000 [7A, 21A, 22A].

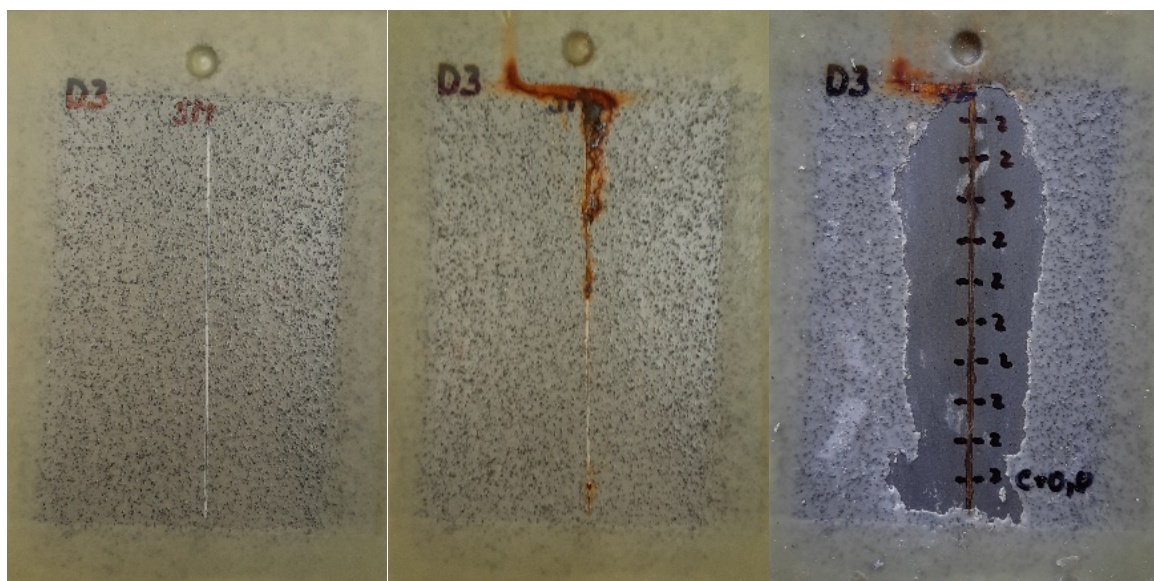


Obrázek 42 – Profil povrchu povlaku CP05 + 10 hm. % Mg nasnímaný pomocí konfokálního mikroskopu po 1 000 cyklech zkoušky abrazivní odolnosti na zařízení Taber Abraser (oblast vyznačená fialovou elipsou)

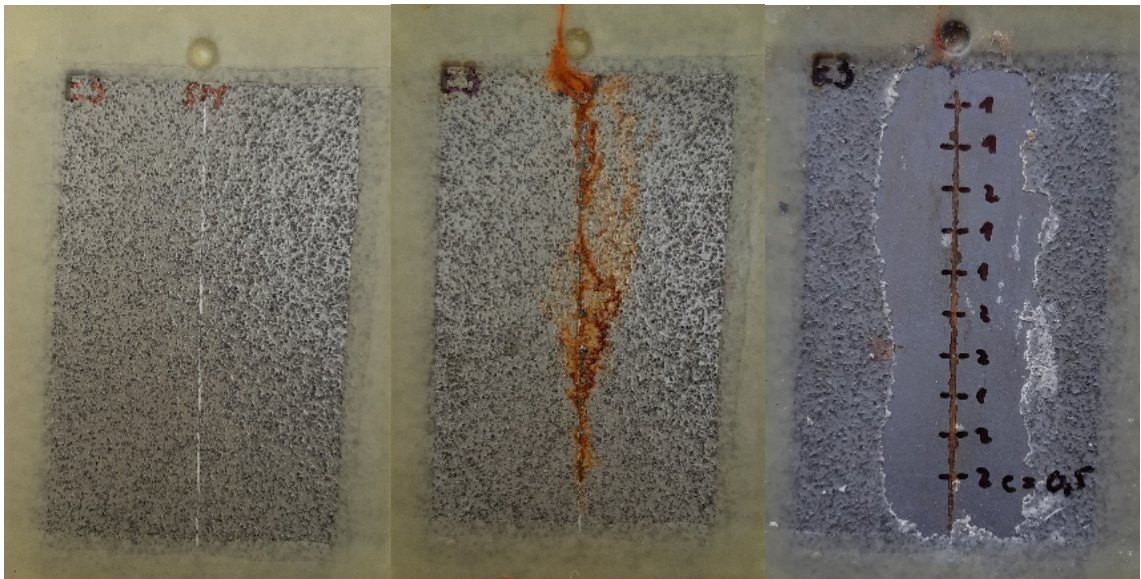
U povlaků polyuretanové nátěrové hmoty CP05 obsahující hořčíkové částice nedošlo k tvorbě puchýřků ani prorezavění v průběhu zkoušky v neutrální solné mlze dle ČSN EN ISO 9227 [73]. Oproti epoxidové nátěrové hmotě LV EPS 620 obsahující nízký podíl těchto částic (viz kapitola 4.2.1.3) vykazovaly povlaky na bázi CP05 s příměsí hořčíku vynikající ochranné vlastnosti. Naopak povlaky CP05 obsahující 5 hm. % Al_2O_3 vykazovaly prorezavění stupně Ri4 dle ČSN EN ISO 4628-3 [88 p. 8]. U povlaků nemodifikované CP05 došlo v průběhu zkoušky k tvorbě puchýřků 2(S3) dle ČSN EN ISO 4628-2 [79] a stupni prorezavění Ri2. U žádného z testovaných povlaků nedocházelo k delaminaci v okolí umělého defektu, ani žádným jiným než výše zmíněným typům vad. Hodnoty koroze v okolí řezu stanovené pro všechny povlaky dle ČSN EN ISO 4628-8 [80] byly nízké a pohybovaly se v intervalu 0,3 až 0,9 mm. Nejvyšší hodnota stupně koroze v řezu byla změřena na vzorku nátěrového systému Hempadur Multi-strength 45753 a to 0,9 mm) [21A, 22A].



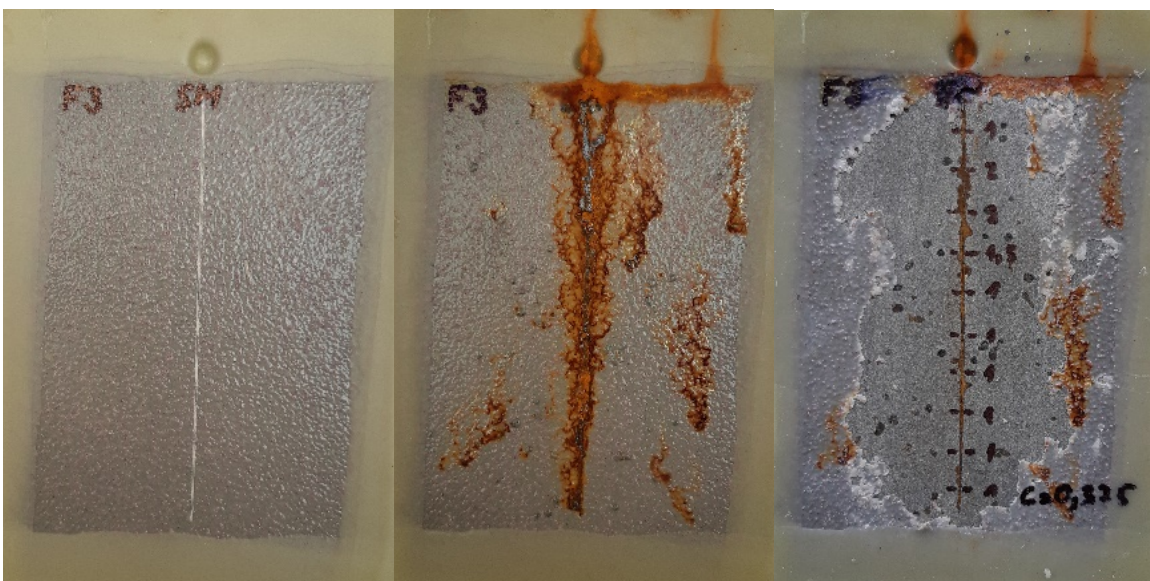
Obrázek 43 – Povlak nátěrové hmoty CP05: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)



Obrázek 44 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 5 hm. % Mg: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)



Obrázek 45 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 10 hm. % Mg: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)



Obrázek 46 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 5 hm. % Al_2O_3 : před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)

V případě povlaků vystavených prostředí zkoušky odolnosti vůči vlhkosti dle ČSN EN ISO 6270-2 [78] v délce trvání 720 h nebylo během ani po skončení expozice zaznamenáno žádných známek jejich degradace nebo jiného poškození. Z pohledu výsledků zkoušky lze odolnost testovaných nátěrů ve vlhkém prostředí posuzovat jako velmi dobrou. [21A]

Přilnavost jednotlivých povlaků na bázi polyuretanové hmoty CP05 k základnímu materiálu byla hodnocena na základě odtrhových zkoušek přilnavosti dle ČSN EN ISO 4224 [41] jako velmi dobrá, kdy vlivem přidání funkčních částic došlo ke snížení hodnoty odtrhového napětí z původní průměrné hodnoty 6,7 MPa maximálně o 1/3. Snížení přilnavosti navíc nebylo prokázáno mřížkovou zkouškou dle ČSN EN ISO 2409 [37] a zkouškou křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [82], jenž byly shodně klasifikovány stupněm 0 pro všechny typy povlaků. Povlaky CP05 vykazovaly dobrou přilnavost i po zkoušce v solné mlze a zkoušce odolnosti ve vlhkém prostředí, kdy klasifikace mřížkové zkoušky a zkoušky křížovým řezem byla opět stupně 0. Povlaky obsahující částice Mg a Al₂O₃ vykazovaly po expozici v těchto atmosférách mírné zhoršení adheze klasifikované stupni 1 a 2 pro výše uvedené zkoušky [22A].

Machu test provedený dle specifikace Qualicoat [85] byl proveden na všech typech nátěrů opatřených řezem tvaru X dle ČSN EN ISO 17872 [87 p. 9]) v délce trvání 36 hodin (udávaný ekvivalent 750 hodin expozice v prostředí solné mlhy). Na základě porovnání výsledků hodnocení jednotlivých nátěrových systémů po expozici v prostředí kyselého roztoku prokázaly největší odolnost vůči tomuto typu prostředí nátěrové hmoty Hempadur Multi-strength 45753 a Viton CP 05 s přídavkem 10 hm. % Mg. Naopak nejnižší odolnost vůči tomuto prostředí vykazovaly povlaky nátěrové hmoty Hempadur Multi-strength GF 35870 u které došlo k úplné delaminaci povlaku a koroznímu napadení základního materiálu. [22A]

Hořčíkové částice o hmotnostní koncentraci 5 hm. % a 10 hm. % se prokázaly jako vhodný způsob modifikace polyuretanové hmoty CP05 pro tvorbu otěruvzdorného, protiskluzového povlaku s vynikající korozní odolností. Naopak povlaky s příměsí 5 hm. % růžového korundu Al₂O₃ vykazující vysokou otěruvzdornost prokázaly nedostatečnou odolnost v prostředí zvýšené koncentrace chloridů zkoušky v neutrální solné mlze a lze je doporučit pouze pro prostředí s nízkou až střední korozní agresivitou atmosféry (bez podstatného vlivu chloridů) dle ČSN EN ISO 9223 [89 p. 17]. [21A, 22A]

4.2.3 Vodou ředitelné nátěrové hmoty

Jak bylo uvedeno v úvodu disertační práce, v současné době je kladen vysoký důraz na ekologické aspekty v oboru nátěrových hmot. Z tohoto pohledu jsou vodou ředitelné hmoty vhodným nástrojem pro snižování emisí VOC v procesu lakování a perspektivním produktem pro výrobce a dodavatele nátěrových hmot [14 p. 86, 16 p. 10, 18 p. 32]. Z tohoto důvodu byly i v rámci praktické části disertační práce formulovány a testovány vodou ředitelné nátěrové hmoty vysokých užitných vlastností pro tvorbu antistatických povlaků.

4.2.3.1 Vodou ředitelné antistatické nátěrové hmoty

V případě formulace vodou ředitelných nátěrových hmot byly jako matrice pro tvorbu antistatických nátěrových hmot použity CP55 (VITON), tedy samozákladující, vodou ředitelná nátěrová hmota [1A, 2A, 3A, 10A, 11A, 13A, 14A, 27A] a CHS EPOXY 220 V 55 – vodná disperze nízkomolekulární epoxidové pryskyřice na bázi bisfenolu A a epichlorhydrinu mléčně bílé barvy, ředitelná vodou [4A, 5A, 8A].

V případě CHS EPOXY 220 V 55 byly pro dosažení vodivých vlastností povlaku použity vícestěnné uhlíkové nanotrubky MWCNT, vnitřně elektricky vodivý polymer PEDOT – Poly(3,4-ethylenedioxythiophene), grafen ve vodní suspenzi (Nano Carbon Sp.) a měď o velikosti částic 8 až 12 μm (Thermo Fisher GmbH). MWCNT byly použity ve formě suspenze AQUACYL 0301 (Nanocyl S.A.) obsahující 5 hm. % těchto nanočástic. Vodivý polymer PEDOT byl použit ve formě vodné suspenze KV 2 (Synpo a.s.) obsahující 2 hm. % vodivého polymeru PEDOT.[4A, 8A]

Bylo vytvořeno celkem 8 nátěrových hmot CHS EPOXY 220 V 55 obsahující vodivý polymer o koncentracích 0,3 hm %, 0,6 hm. %, 0,8 hm. % a 1,0 hm. % PEDOT. Dispergace těchto hmot probíhala na základě zkušeností a poznatků s přípravou antistatických hmot na bázi epoxidové pryskyřice LV EPS 620 [13A, 27A] (viz kap. 4.2.1.1, Tabulka 1) primárně pomocí míchadla rotor – stator S 25 N – 25 G při frekvenci otáček $10\,000\text{ min}^{-1}$ po dobu 2 min. Dále bylo pro porovnání jednotlivých způsobů dispergace použito čtyřlopatkového míchadla průměru 50 mm se šikmým sklonem lopatek v kombinaci s dispergací pomocí ultrazvukového homogenizátoru Sonopuls HD 3400 a pro koncentraci 0,3 hm. % PEDOT i míchadla Visco Jet o průměru 60 mm se dvěma kuželovými elementy. Dispergace vodivého polymeru pomocí lopatkového míchadla probíhala po dobu 5 minut při frekvenci otáčení míchadla 500 min^{-1} po které následovala dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru po dobu 5 minut, výkonu 250 W a parametrech pulsu 1,0 s ON / 1,0 s OFF

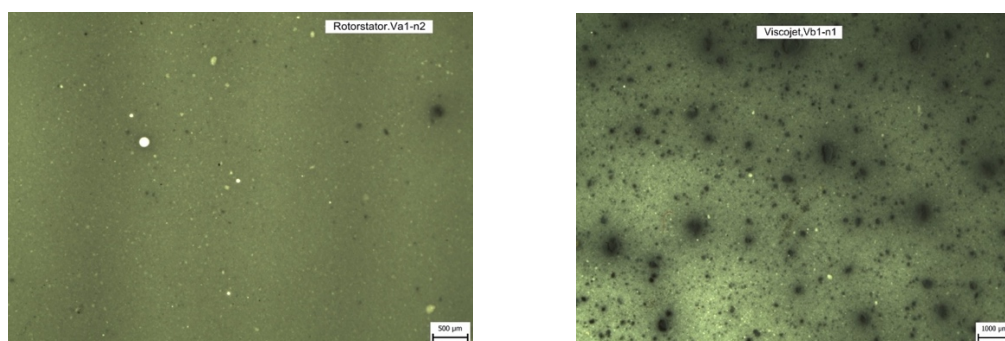
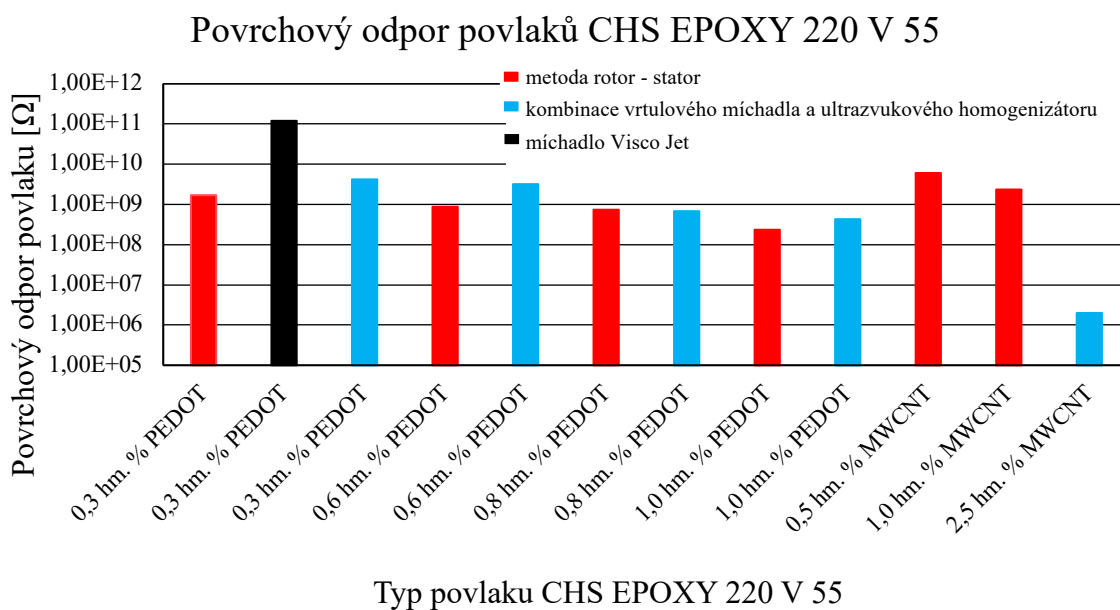
a amplitudě 82 μm . Tímto způsobem byla připravena i nátěrová hmota CHS EPOXY 220 V 55 obsahující 2,5 hm. % MWCNT. Příprava CHS EPOXY 220 V 55 obsahující 0,5 a 1,0 hm. % MWCNT byla provedena pomocí míchadla rotor – stator za stejných parametrů jako příprava této hmoty obsahující vodivý polymer PEDOT. CHS EPOXY 220 V 55 obsahující 5 a 10 hm. % částic mědi a CHS EPOXY 220 V 55 obsahující 0,5 hm. % grafenu byly připraveny pomocí kombinace lopatkového míchadla WiseStirr HS-D a ultrazvukového homogenizátoru Sonopuls HD 3400 za shodných parametrů jako nátěrové hmoty obsahující vodivý polymer PEDOT. [5A]

Vytvořené nátěrové hmoty byly ručně smíchány s aminovým tvrdidlem Tealit 180 a aplikovány na zkušební skleněné desky o rozměrech 500 \times 500 \times 3 mm pomocí aplikátoru – natahovacího pravítka TQC Baker v tloušťce WFT 120 μm . Vytvrzení nátěrů probíhalo po dobu 7 dnů. Následně bylo provedeno stanovení povrchového odporu povlaků dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 [57] a také vizuální hodnocení dispergace a distribuce částic v povlaku pomocí optického mikroskopu Olympus SZ61 (Infinity 1, Lumenera). Povlaky jednotlivých nátěrových hmot byly rovněž zhotoveny na ocelové desky Q-Panel, materiál S235JRG1 o rozměrech 102 mm \times 152 mm \times 0,8 mm pro účely posouzení adheze k základnímu materiálu pomocí mřížkové zkoušky dle ČSN EN ISO 2409 [37], zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [82] a posouzení odolnosti vůči praskání a oddělení od základního materiálu zkouškou hloubením dle ČSN EN ISO 1520 [91]. [4A, 5A]

Z grafu 8, průběhu povrchového odporu povlaků CHS EPOXY 220 V 55, lze konstatovat, že vodivý polymer PEDOT ve formě disperze KV2 umožňuje snížení hodnoty povrchového odporu původně elektricky nevodivého povlaku (izolantu) na hodnotu disipativního materiálu dle definice ČSN EN 61340-2-3 ed.2 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24] i při velmi nízké koncentraci 0,3 hm. %, ale musí být zajištěn vhodný způsob jeho dispergace v nátěrové hmotě. V případě použití míchadla Visco Jet u této koncentrace pigmentu byl stanoven povrchový odpor $1,2 \times 10^{11} \Omega$, a nedošlo tak k dosažení hodnot povrchového odporu pro disipativní materiály, zatímco v případě použití metody rotor – stator při stejné koncentraci byla hodnota povrchového odporu $1,7 \times 10^9 \Omega$, tedy o dva řády nižší a nacházející se bezpečně v disipativní oblasti ($> 10^4 \Omega$ a současně $< 10^{11} \Omega$). Postupným zvyšováním podílu vodivého polymeru v nátěrové hmotě docházelo ke snižování povrchového odporu povlaku, jenž vykazoval při koncentraci 1,0 hm. % PEDOT hodnotu $2,35 \times 10^8 \Omega$ (metody rotor – stator). Z hodnot povrchových odporů v grafu 8 je dále patrná nižší účinnost použitého kombinovaného způsobu dispergace vrtulovým míchadlem

a ultrazvukovým homogenizátorem oproti dispergaci míchadlem rotor – stator. Vícestěnnými uhlíkovými nanotubicemi ve formě suspenze AQUACYL 0301 lze rovněž dosáhnout snížení hodnoty povrchového odporu povlaků CHS EPOXY 220 V 55 na hodnoty disipativních materiálů dle definice norem [57] a [24]. U nejvyšší použité koncentrace MWCNT 2,5 hm. % bylo dosaženo hodnoty povrchového odporu povlaku $2,0 \times 10^6 \Omega$. Povlaky obsahující měď a grafen nevykazovaly snížení povrchového odporu. Další zvyšování podílu MWCNT, grafenu ani vodivého polymeru PEDOT nebylo realizováno z důvodu nízkých koncentrací těchto částic v použitých disperzích. Stanovení povrchového odporu u výše uvedených povlaků bylo provedeno pomocí přístroje pro měření povrchového odporu TESPO 1. [4A, 5A]

Graf 8 – Povrchový odpor povlaků CHS EPOXY 220 V 55 v závislosti na typu použitého vodivého plniva, jeho koncentraci a metodě dispergace

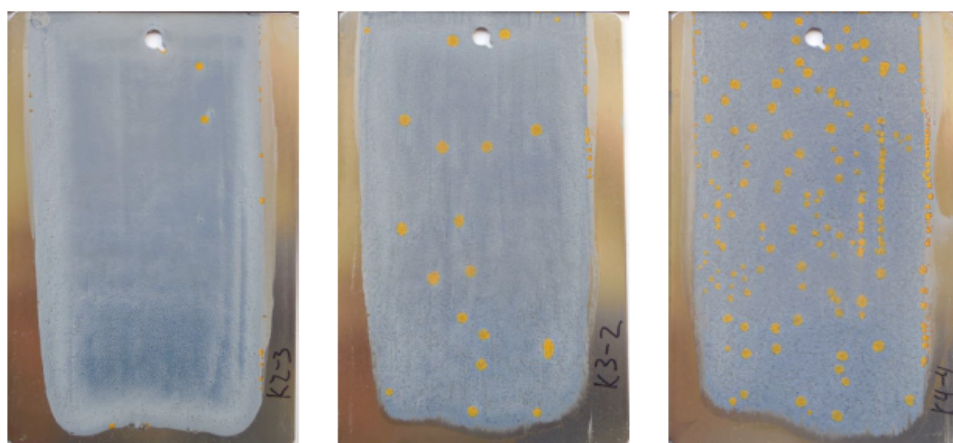


Obrázek 47 – Rozdílný stupeň dispergace a distribuce částic v povlaku CHS EPOXY 220 V 55 + 0,3 hm. % PEDOT v závislosti na použité metodě a parametrech dispergace: míchadlo rotor – stator (vlevo), míchadlo Visco Jet (vpravo) [4A]

Na obrázku 47 je viditelný rozdíl v dispergaci a distribuci částic povlaku CHS EPOXY 220 V 55 + 0,3 hm. % PEDOT míchadly rotor – stator a Visco Jet. V případě použití míchadla Visco Jet nedošlo k dostatečnému rozptýlení částic do vznosu nátěrové hmoty a rozbití jejich shluků, což se v konečném důsledku projevilo nehomogenitou povlaku a vysokým povrchovým odporem ve srovnání s povlakem připravenými metodou rotor – stator.[5A]

Adheze vytvořených povlaků nátěrových hmot CHS EPOXY 220 V 55 s podílem vodivého polymeru PEDOT na skle byla klasifikována stupni 1 pomocí mřížkové zkoušky dle ČSN EN ISO 2409 [37] a zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [82]. U těchto povlaků docházelo v případě aplikace na ocel k projevům bleskové koroze a snížení adheze na stupeň 2 – 4 dle ČSN EN ISO 2409 [37] a ČSN EN ISO 16276-2 [82]. Velikost zasažené plochy bleskovou korozí se zvětšovala s rostoucím podílem vodivého polymeru PEDOT (viz obrázek 48). Zkouškou hloubením byla zjištěna velmi nízká odolnost vůči praskání a oddělení od základního materiálu zkouškou hloubením dle ČSN EN ISO 1520 [91]. Povlaky CHS EPOXY 220 V 55 obsahující MWCNT vykazovaly rovněž dobrou adhezi na skle (stupně 1 dle [37 a 87]), avšak se zvyšujícím se podílem docházelo na oceli ke ztrátě adhezních vlastností indikovaných odlupováním povlaku a klasifikací výsledků mřížkových zkoušek [37] a zkoušek křížovým řezem [87] stupni 2 a 3. U těchto povlaků nedocházelo k projevům bleskové koroze ocelového základního materiálu. [4A, 5A]

Výše uvedené poznatky posloužily při vývoji dvou komponentní nátěrové hmoty na bázi epoxidové disperze obsahující vnitřně vodivý polymer PEDOT, inhibitor bleskové koroze a další aditiva ovlivňující fyzikálně mechanické a reologické vlastnosti nátěrové hmoty. [7A]



Obrázek 48 – Projevy bleskové koroze ocelového základního materiálu u povlaků CHS EPOXY 220 V 55 s podílem 0,6 hm. % PEDOT (vlevo), 0,8 hm. % PEDOT (uprostřed) a 1,0 hm. % PEDOT (vpravo) [4A]

Z výše uvedených nedostatků povlaků antistatických nátěrových hmot na bázi CHS EPOXY 220 V 55 byla pro další vývoj použita vodou ředitelná nátěrová hmota CP55 (Viton), do které byly za účelem snížení povrchového odporu dispergovány MWCNT ve formě kapalně suspenze AQUACYL 0301, grafit jemný (použitý v kapitole 4.2.1.1 pro tvorbu antistatických nátěrových hmot na bázi epoxidové pryskyřice [13A, 14A, 27A]) a tři typy vodivých sazí CHEZACARB AC 70, AC 60 a AC 20 (Unipetrol RPA). Schopnost snížení povrchového odporu povlaků epoxidové pryskyřice LV EPS 620 pomocí sazí CHEZACARB AC 70 při zachování jejich ochranných vlastností byla rovněž prezentována v kapitole 4.2.1.1. [13A]. V první fázi bylo přistoupeno ke stanovení vhodné koncentrace navržených funkčních pigmentů pro další experimenty formou optimalizace procesu míchání (volby vhodného zařízení a parametrů dispergace). V této první fázi bylo připraveno šest nátěrových hmot s rostoucím hmotnostním podílem 0,5 hm. % MWCNT v rozsahu 0,5 až 3,0 hm.% MWCNT, šest nátěrových hmot s rostoucím hmotnostním podílem 2 hm. % grafitu v rozsahu 8,0 až 18,0 hm. % a dvanáct nátěrových hmot s rostoucím podílem 0,5 hm. % vodivých sazí v rozsahu 0,5 až 2,0 hm.%. Příprava těchto hmot probíhala pomocí čtyřlopatkového míchadla WiseStirr HS – D se šikmým sklonem lopatek po dobu 15 min v rozsahu frekvence otáček míchadla 430 min⁻¹ až 2 400 min⁻¹ v závislosti na typu a koncentraci pigmentu. Účelem bylo ověření schopnosti nátěrové hmoty CP55 smáčet jednotlivé pigmenty a vytvoření nátěrových hmot pro účely posouzení změn povrchového odporu a hodnoty lesku jednotlivých povlaků. Aplikace nátěrových hmot probíhala pomocí natahovacího pravítka Baker (WFT 120 μm) na skleněné desky o rozměrech 500 x 500 x 3 mm. Stanovení povrchového odporu pro výše uvedené povlaky bylo provedeno pomocí přístroje pro měření povrchového odporu TESPO 1 a lesk povlaků měřený pod úhlem 60° pomocí přístroje GL0010 od firmy TQC dle ČSN EN ISO 2813 [69 p. 8]. [10A]

Nejlepších aplikačních i vzhledových vlastností dosahovaly povlaky s použitím plniva MWCNT ve formě suspenze AQUACYL 0301. U všech použitých pigmentů docházelo k postupnému snižování lesku povlaku s narůstající koncentrací funkčního pigmentu. Použitý způsob dispergace neumožňoval dokonalé odstranění agregátů a aglomerátů použitých částic především v případě sazí a grafitu. Povlaky CP55 obsahující tyto pigmenty vykazovaly značnou nehomogenitu a tedy i výrazně rozdílné hodnoty povrchového odporu na jednotlivých místech povlaku. Nejnižší hodnoty povrchového odporu bylo dosaženo u povlaků grafitu při podílu 12 hm. %. Nad touto hodnotou již nebyla patrná výrazná změna hodnoty povrchového odporu jenž činila $2,28 \times 10^5 \Omega$. Této hodnotě se blížily povlaky CP55

s podílem 1,5 hm. % MWCNT jejichž průměrná hodnota povrchového odporu byla $2,68 \times 10^5 \Omega$. V případě vodivých sazí se hodnoty povrchového odporu nepodařilo snížit pod $10^7 \Omega$. Hodnoty lesku povlaků se podařilo snížit z původní hodnoty 14,6 GU nepigmentované nátěrové hmoty CP55 na 1,5 GU v případě použití 18 hm. % grafitu. Na základě provedených měření byly připraveny pomocí míchadla rotor stator IKA S 25 N – 25 G (průměr rotoru 17 mm s dvěma zuby a statoru o průměru 25 mm s 12 zuby) nátěrové hmoty obsahující MWCNT, saze AC20 a grafit. Podíl jednotlivých funkčních pigmentů v nátěrové CP55, parametry dispergace a výsledné hodnoty povrchového odporu jednotlivých povlaků zhotovených na skle pomocí aplikátoru Baker (tloušťka WFT 120 μm) jsou uvedeny v tabulce 3. [10A, 12A]

Tabulka 3 – nátěrové hmoty na bázi CP55 obsahující vodivé částice dispergované pomocí míchadla rotor – stator [12A]

Nátěrová hmota	Typ částic	Koncentrace částic [hm. %]	Parametry dispergace				Povrchový odpor povlaku [Ω]
			n_1 [min^{-1}]	t_1 [min]	n_2 [min^{-1}]	t_2 [min]	
CP55	---	---	---	---	---	---	$> 10^{13}$
CP55	saze AC 20	0,25	15 000	5,0	---	---	$1,42 \cdot 10^{12}$
		1	15 000	5,0	---	---	$9,47 \cdot 10^{11}$
CP55	grafit	4	15 000	5,0	---	---	$4,73 \cdot 10^{11}$
		8	10 000	3,0	15 000	2,0	$7,30 \cdot 10^8$
CP55	MWCNT	0,5	15 000	0,5	10 000	4,5	$2,84 \cdot 10^{12}$
		1,0	15 000	0,5	10 000	4,5	$9,90 \cdot 10^5$
		1,5	15 000	0,5	10 000	4,5	$6,31 \cdot 10^5$
		2,0	15 000	0,5	10 000	4,5	$4,86 \cdot 10^5$
		2,5	15 000	0,5	10 000	4,5	$3,76 \cdot 10^5$

Z hodnot povrchového odporu jednotlivých povlaků CP55 je patrné, že v případě vícečetných uhlíkových nanotrubic postačuje 1,0 hm. % MWCNT k významnému snížení povrchového odporu povlaku nátěrové hmoty CP55 na hodnotu $< 10^6 \Omega$. Rovněž grafit o podílu 8 hm. % umožňuje dosažení povrchového odporu pro disipativní materiály dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24]. Dle parametrů uvedených v tabulce 3 byla rovněž připravována nátěrová hmota CP55 s podílem grafitu 16 hm. %, u které v průběhu dispergace vlivem odstranění agregátů a aglomerátů pigmentu došlo k výrazné změně viskozity neumožňující aplikaci na zkušební vzorky bez nutnosti

ředění. Z výše uvedených důvodů byly pro posouzení vlivu dispergačního zařízení na výsledné funkční vlastnosti povlaku – povrchový odpor vytvořeny nátěrové hmoty CP55 s 8 hm. % grafitu a 0,5 a 2,5 hm. % MWCNT. Pro účely dispergace byly nátěrové hmoty připraveny pomocí zubového míchadla (CVS 69 1038.1) o průměru 50 mm, míchadla rotor-stator IKA S 25 N – 25 G a míchadla Visco Jet o průměru 60 mm se dvěma kuželovými elementy. Parametry dispergace a výsledky hodnocení povrchových odporů povlaků nátěrových hmot jsou uvedeny v tabulce 4. [10A, 11A, 12A]

Z hodnot povrchového odporu uvedených v tabulce 4 pro jednotlivé povlaky je patrné, že v případě nátěrových hmot CP55 s podílem MWCNT se jako nejvhodnější způsob dispergace jeví použití míchadla rotor – stator, jenž umožňuje dosažení nejnižších hodnot povrchového odporu výsledných povlaků i při nízké koncentraci MWCNT. V případě dispergace nátěrové hmoty CP55 s podílem 2,5 hm. % MWCNT ve formě suspenze AQUACYL 0301 došlo v průběhu dispergace zubovým míchadlem ke změně viskozity do té míry, že nebylo možné tuto hmotu aplikovat na zkušební vzorky. Proto nebyla dále zkoumána. V případě grafitu bylo dosaženo největší změny hodnot povrchového odporu u povlaků nátěrové hmoty připravené pomocí míchadla Visco Jet. Hodnotu povrchového odporu se podařilo snížit na $3,28 \times 10^6 \Omega$. [12A]

Posouzení ochranných vlastností vytvořených povlaků shrnuje tabulka 5, kde jsou uvedeny výsledky zkoušek přilnavosti k základnímu materiálu – mřížkové zkoušky dle ČSN EN ISO 2409 [37], zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [82] a odtrhové zkoušky dle ČSN EN ISO 4624 [41]. Přilnavost vytvořených povlaků byla hodnocena jako velmi dobrá (stupně 0 dle [37 a 82]) přičemž v případě povlaků obsahujících MWCNT byl dokonce pozorován téměř dvojnásobný nárůst přilnavosti. Jednotlivé povlaky byly také testovány z hlediska odolnosti proti praskání a odlupování a ověřena jejich elasticita zkouškou ohybem na kónickém trnu dle ČSN EN ISO 6860 [70 p. 7]. U žádného z povlaků u zkoušky ohybem nedošlo k odloupení od podkladu ani k tvorbě trhlin v povlaku. Z hlediska aplikačních vlastností jednotlivých nátěrových hmot a vizuálního hodnocení vytvořených povlaků dle ČSN EN ISO 12944-7 [68] byly nejlépe hodnoceny v případě použití MWCNT povlaky nátěrové hmoty připravené pomocí míchadla rotor – stator a v případě grafitu povlaky nátěrové hmoty připravené pomocí míchadla Visco Jet. [11A, 12A]

Tabulka 4 – Metody a parametry dispergace jednotlivých hmot na bázi CP55 s obsahem grafitu a MWCNT a výsledný povrchový odpor vytvořených povlaků [12A]

Nátěrová hmota	Metoda dispergace	Podíl funkčních částic [hm. %]	Parametry dispergace						Povrchový odpor povlaku [Ω]
			n_1 [min ⁻¹]	t_1 [min]	n_2 [min ⁻¹]	t_2 [min]	n_3 [min ⁻¹]	t_3 [min]	
CP55	---	0,0	---	---	---	---	---	---	$> 10^{13}$
CP55 MWCNT	VJ	0,5	1 400	6,0	---	---	---	---	$3,38 \cdot 10^{10}$
		2,5	1 500	6,0	---	---	---	---	$2,38 \cdot 10^5$
	RS	0,5	15 000	0,5	10 000	5,0	---	---	$1,56 \cdot 10^8$
		2,5	15 000	0,5	10 000	5,0	---	---	$1,58 \cdot 10^5$
	ZM	0,5	3 600	6,0	---	---	---	---	$7,58 \cdot 10^9$
		2,5	3 600	6,0	---	---	---	---	---
CP55 grafit	VJ	8	1 500	6,0	---	---	---	---	$3,28 \cdot 10^6$
	RS	8	15 000	0,5	10 000	3,0	15 000	2,0	$4,11 \cdot 10^7$
	ZM	8	3 600	6,0	---	---	---	---	$1,30 \cdot 10^7$

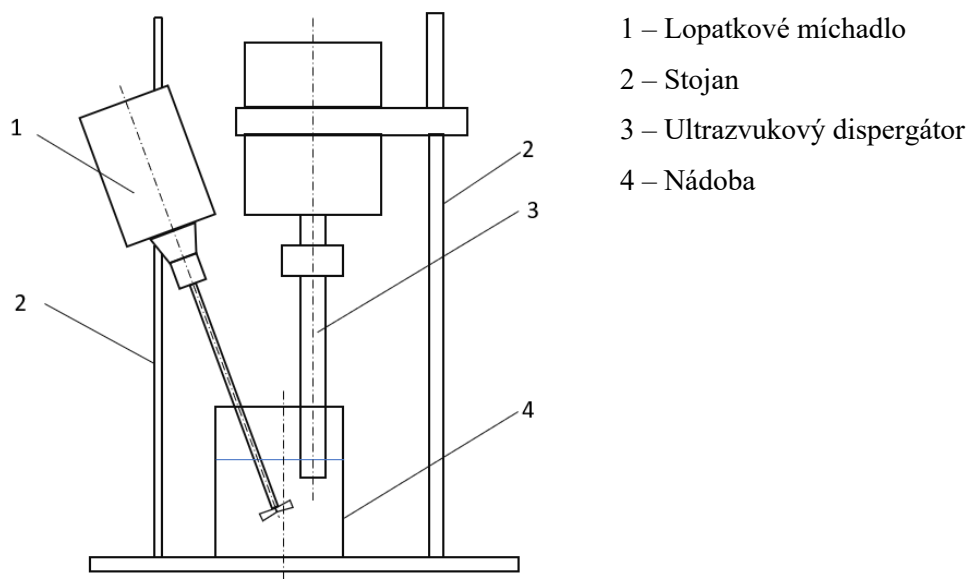
Tabulka 5 – Hodnoty lesku, elasticity a adheze jednotlivých povlaků na bázi nátěrové hmoty CP55 [12A]

Nátěrová hmota	Metoda dispergace	Koncentrace funkčních částic [hm. %]	Lesk [GU] [69]	Odrhové napětí [MPa] [41]	Adheze		Ohybová zkouška dle [70]
					Mřížková zkouška klasifikace dle [37]	Křížový řez klasifikace dle [82]	
CP55	---	0,0	14,6	5,84	0	0	U žádného z povlaků nedošlo k odloupení od podkladu ani k tvorbě trhlin v povlaku.
CP55 MWCNT	VJ	0,5	11,6	8,53	0	0	
		2,5	4,1	8,90	0	0	
	RS	0,5	10,7	9,95	0	0	
		2,5	4,4	8,78	0	0	
	ZM	0,5	10,5	9,91	0	0	
		2,5	---	---	---	---	
CP55 grafit	VJ	8	4,3	5,16	0	0	
	RS	8	4,7	5,49	0	0	
	ZM	8	4,5	5,66	0	0	



Obrázek 49 – Jednotlivé varianty povlaků vodou ředitelných antistatických nátěrových hmot na bázi CP55 [11A]

S ohledem na již popsaný pozitivní nárůst přilnavosti povlaků CP55 s obsahem MWCNT a zjištění, že metoda rotor – stator dává předpoklad k dosažení nízkých hodnot povrchových odporů i při nízkých koncentracích MWCNT, bylo přistoupeno k další optimalizaci dispergačního procesu hmot. Pomocí míchadla rotor – stator IKA S 25 N – 25 G bylo vytvořeno 6 nátěrových hmot CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT (AQUACYL 0301) přičemž dispergace probíhala při frekvenci otáčení 1) 10 200 min^{-1} a 2) 15 000 min^{-1} a časech dispergace 1) 2 min, 2) 4 min a 3) 6 min. Dále bylo připraveno šest nátěrových CP55 – 1,0 hm. % MWCNT pomocí ultrazvukového homogenizátoru Bandelin Sonopuls HD 3400 a sondy VS 200 T o průměru 20 mm s nuceným promícháváním vsádky pomocí šikmo pod úhlem 30° vloženého lopatkového míchadla WiseStirr HS – D o průměru 50 mm dle schématu na obrázku 50. Tento způsob dispergace probíhal při různých parametrech výkonu ultrazvukového generátoru (parametry pulsu ON 1 s, OFF 0,5 s), frekvenci otáčení lopatkového míchadla a časech procesu. Parametry obou způsobů dispergace jsou uvedeny v tabulce 6. [1A]



Obrázek 50 – Schéma dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru při současném míchání vsádky lopatkovým míchadlem [1A]

Tabulka 6 předkládá nejen parametry dispergačního procesu, ale také dopočítané hodnoty obvodové rychlosti míchadla, disipované energie a měrného disipovaného příkonu. Tyto parametry byly zohledněny při hodnocení dispergačních schopností jednotlivých míchadel a pro posouzení vhodnosti pro přípravu nátěrové hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT. Této problematice je věnována kapitola 4.3. [3A]

Zhotovení povlaků nátěrových hmot CP55 a CP55 obsahující MWCNT označených jako varianta 1 – 11 (viz tabulka 6), bylo provedeno pomocí aplikátoru (natahovacího pravítka) TQC BAKER v tloušťce WFT 120 μm a tloušťce WFT 270 μm na skleněné desky (izolanty) o rozměrech 500 mm \times 500 mm \times 3 mm pro následné stanovení povrchového odporu a na ocelové plechy Q-Panel (S235JR) o rozměrech 152 mm \times 102 mm \times 1 mm pro účely zkoušek ochranných vlastností povlaku. Výsledné tloušťky povlaků stanovené magneticko-indukční metodou (7B.2 dle ČSN EN ISO 2808 [67 p. 34]) vykazovaly redukci tloušťky o 2/3 oproti tloušťce naneseného nátěrového filmu. Dalšími hodnocenými parametry jednotlivých povlaku byly lesk měřený pod úhlem 60° dle ČSN EN ISO 2813 [69], přilnavost k základnímu materiálu mřížkovou zkouškou dle ČSN EN ISO 2409 [37] a křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [86], elasticita a odolnost vůči praskání a odlupování pomocí zkoušky hloubením dle ČSN EN ISO 1520 [91] a odolnost vůči vlhkosti v prostředí kondenzace vody dle ČSN EN ISO 6270-2 [78]. [3A]

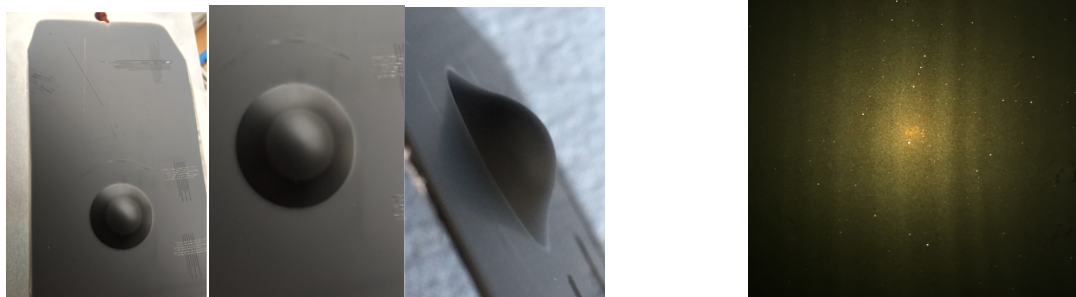
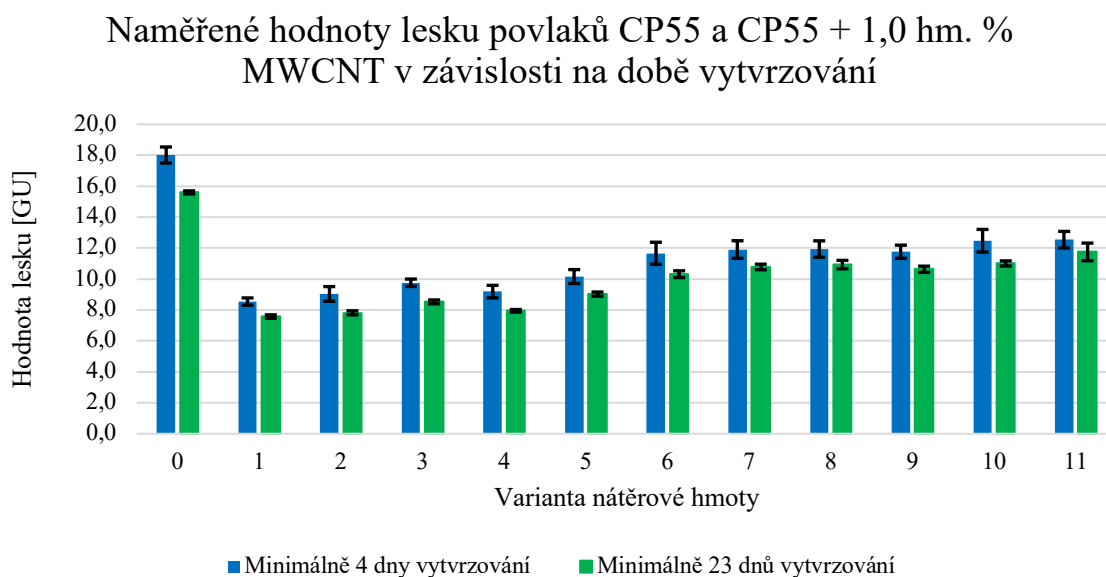
Tabulka 6 – Metody a parametry dispergace vodou ředitelné nátěrové hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT [1A]

Zařízení	Varianta č.	čas [min]	Hmotnost vsádky [kg]	Přikon [W]	Ponoření sondy ultrazvuku [mm]	Frekvence otáček míchadla [min ⁻¹]	Obvodová rychlost míchadla [m.s ⁻¹]	Teplota po dispergaci [°C]	Teplota vsádky před dispergaci [°C]	Teplota vsádky po dispergaci [°C]	Disipovaná energie [J.kg ⁻¹]	Měrný disipovaný výkon [W.kg ⁻¹]
ultrazvuk	1	5	0,6152	150	2,5	1 500	3,9	27,7	16,8	27,7	30 057,0	69 597,0
ultrazvuk	2	5	0,4595	250	2,5	1 500	3,9	38,8	18,4	38,8	49 839,0	115 995,0
ultrazvuk	3	5	0,4531	250	2,5	2 700	7,1	38,8	17,7	38,8	49 890,0	115 995,0
ultrazvuk	4	5	0,4600	150	2,5	2 700	7,1	31,9	18,6	31,9	29 987,0	69 597,0
ultrazvuk	5	5	0,4716	250	0,8	2 700	7,1	36,9	16,2	36,9	49 829,0	75 583,8
rotor - stator	6	2	0,4454	24	---	10 200	9,6	---	---	---	2 883,6	9 221,2
rotor - stator	7	4	0,4583	24	---	10 200	9,6	26,3	18,0	26,3	5 767,2	9 221,2
rotor - stator	8	6	0,4546	24	---	10 200	9,6	28,7	18,0	28,7	8 650,8	9 221,2
rotor - stator	9	2	0,4559	70	---	15 000	14,1	29,9	18,0	29,9	8 358,5	26 728,9
rotor - stator	10	4	0,4615	70	---	15 000	14,1	34,7	18,0	34,7	16 717,0	26 728,9
rotor - stator	11	6	0,4498	70	---	15 000	14,1	40,6	18,0	40,6	25 075,5	26 728,9

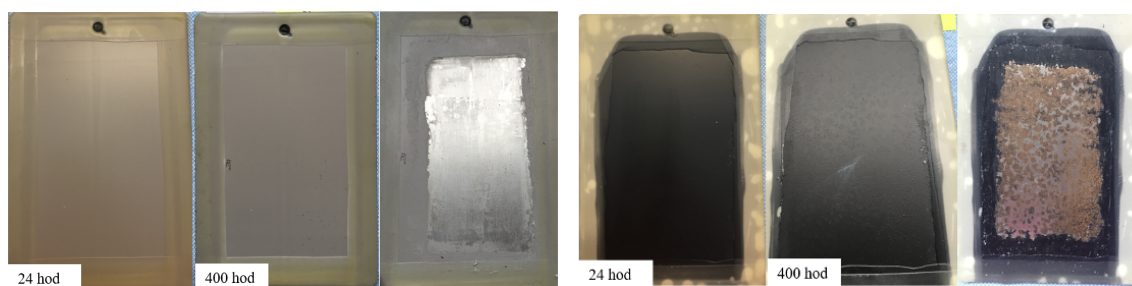
Hodnoty lesku povlaků byly stanoveny ve dvou časových úsecích (po 4 dnech vytvrzování a 23 dnech vytvrzování) z kvůli posouzení doby vytvrzování povlaků vodou ředitelných hmot na průběh hodnoty lesku. Měřením byl pozorován pokles hodnoty lesku povlaku o 10 až 15 % (viz graf 9). Nejnižších hodnot lesku dosahovaly povlaky varianty nátěrové hmoty 1 (7,6 GU) a 2 (7,8 GU). V případě zkoušek adheze povlaků k základnímu materiálu mřížkovou zkouškou [37] a křížovým řezem [86] byla ověřena vysoká přilnavost povlaků CP55 obsahující MWCNT ve formě suspenze AQUACYL 0301, kdy výsledky zkoušek byly klasifikovány převážně stupněm 0 (žádný odlup) případně 1 (velmi malé odlupování podél řezů nebo v jejich průsečíku). Mřížková zkouška a zkouška křížovým řezem neprokázala významné rozdíly mezi jednotlivými variantami povlaků. Rovněž zkouška hloubením dle [91], vtačením indentu proti povlaku do hloubky 8 mm neprokázala rozdíl mezi jednotlivými variantami. Všechny testované povlaky nevykazovaly známky ztráty adheze či praskání povlaku, docházelo pouze k nepatrné změně barevného odstínu v deformační zóně (viz obrázek 51). Odolnost povlaků vůči vlhkosti v prostředí kondenzace vody dle ČSN EN ISO 6270-2 [78] probíhala v délce trvání 400 h, přičemž kontrola vzorků a fotodokumentace vad byla prováděna po 24, 48, 72, 96 a 400 h. U všech povlaků obsahujících nanočástice MWCNT došlo v průběhu zkoušky k tvorbě puchýřků v rozsahu 3(S1) až 5(S2) dle ČSN EN ISO 4628-2 [79] v závislosti na variantě přípravy nátěrové hmoty. Rovněž bylo u těchto povlaků po jejich odstranění klasifikováno prorezavění stupněm Ri5 dle ČSN EN ISO 4628-3 [88]. Důvodem těchto projevů byla patrně významná porozita povlaků patrná ze snímku na obrázku 51 při prosvícení povlaku naneseného na skle ostrým světlem. Uvedené projevy snížené odolnosti vůči působení vlhkosti v prostředí kondenzace vody nebyly u nepigmentované nátěrové hmoty CP55 pozorovány. Nejlepších výsledků u nátěrových hmot s podílem MWCNT z hlediska tvorby puchýřků a prorezavění dosáhly vzorky variant č. 4 a 9 (značení viz tabulka 6).[1A, 2A]

Povrchový odpor vytvořených povlaků byl stanoven přímým měřením pomocí přístroje SRM 200, který umožňuje stanovení hodnoty povrchového odporu pomocí paralelních elektrod z vodivé pryže. Zařízení měří povrchový odpor v rozsahu $10^3 - 10^{12} \Omega$ v souladu s ČSN EN 61340-2-3 ed.2. [57] a rovněž umožňuje měření povrchového odporu mezi dvěma body [57 p. 17] (viz obrázek 23), které bylo rovněž provedeno. Výsledky stanovení povrchového odporu uvedenými postupy předkládají grafy 10 a 11.[1A, 3A]

Graf 9 – Hodnoty lesku měřené pod úhlem 60° pro povlaky antistatických nátěrových hmot CP55 a CP55 + 1,5 hm. % MWCNT [1A]

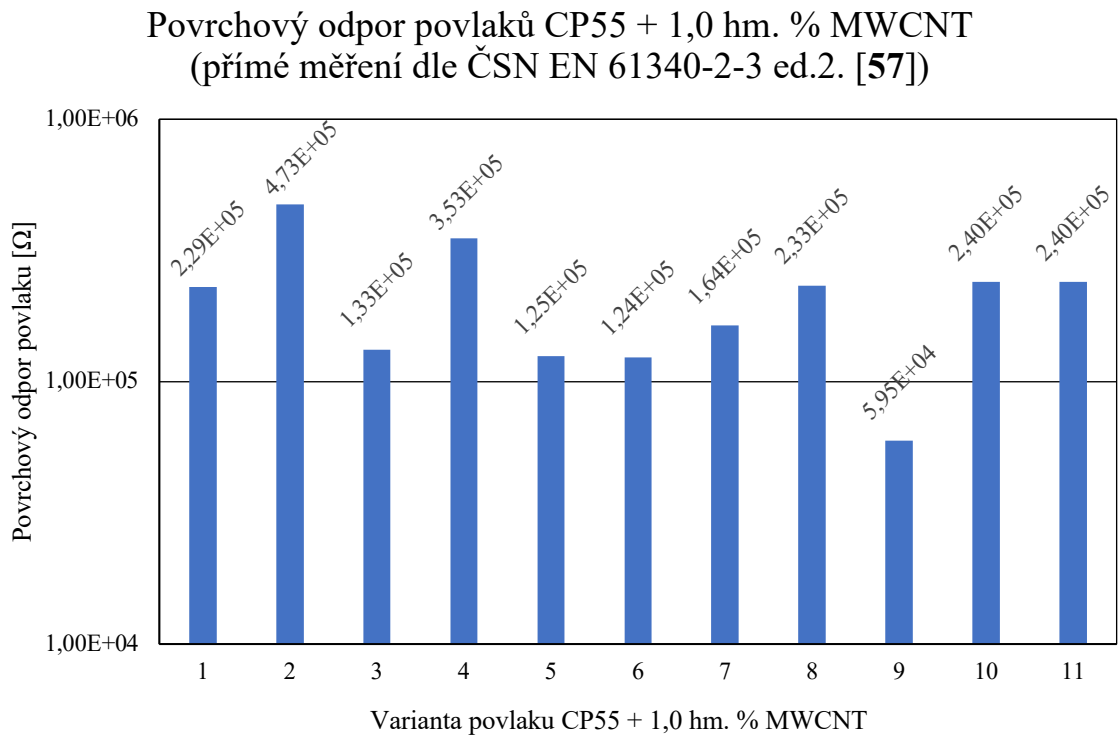


Obrázek 51 – Typický výsledek zkoušky hloubením u povlaků CP55 podílem 1,0 hm. % MWCNT (vlevo), pórovitost povlaku vytvořeného na skle (vpravo)

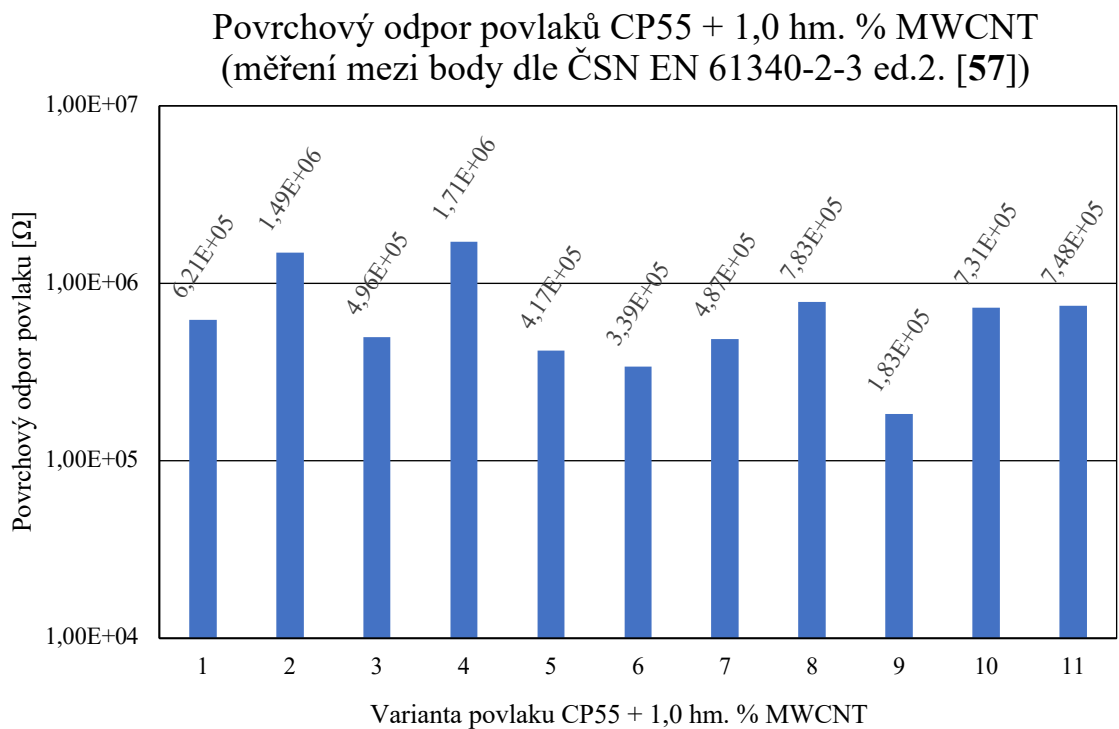


Obrázek 52 – Charakteristický stav vzorků CP55 (vlevo) a CP55 + 1,0 hm. % MWCNT (varianta 9) po zkoušce odolnosti vůči působení vlhkosti v prostředí kondenzace vody

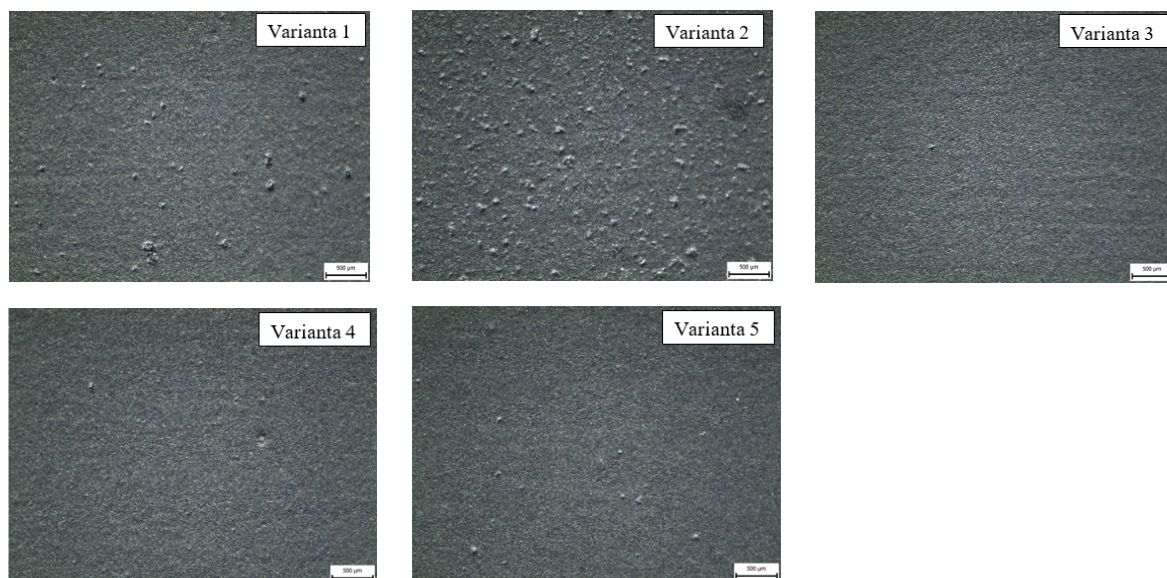
Graf 10 – Hodnoty povrchového odporu povlaků na bázi vodou ředitelné hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT [1A]



Graf 11 – Hodnoty povrchového odporu povlaků na bázi vodou ředitelné hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT (měření mezi body ČSN EN 61340-2-3 ed.2. [57])[A1]

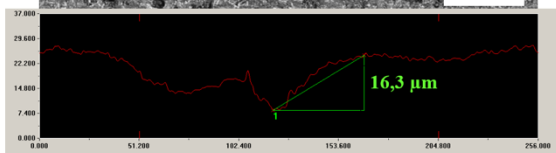
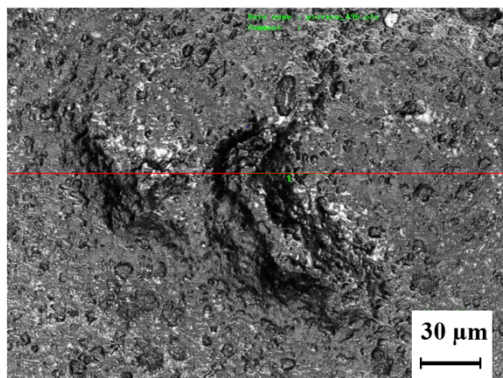
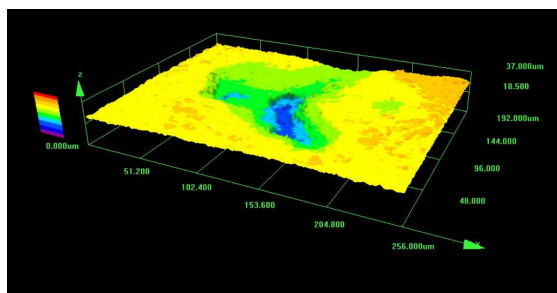


Z grafů 10 a 11 je patrný významný vliv metody a parametrů dispergace suspenze MWCNT AQUACYL 0301 na finální vlastnosti povlaků nátěrové hmoty jmenovitě elektrický odpor. Vhodně zvolená metoda a její parametry umožňují významné snížení povrchového odporu. V případě varianty č. 9 povlaku CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT, tj. nátěrové hmoty, která byla dispergována na zařízení rotor – stator po dobu 2 min při frekvenci otáček 15 000 min⁻¹ bylo dosaženo nejnižší hodnoty povrchového odporu $5,95 \times 10^4 \Omega$. Tento povlak je možné označit za elektricky vodivý dle definice ČSN IEC/TR 61340-1 *Elektrostatika – Část 1: Elektrostatické jevy – Principy a měření* [23 p. 10]. Vliv metody a parametrů dispergace byl pozorován i na vzhledu povrchu, kdy při použití ultrazvukového míchadla s nuceným promícháváním vsádky byly při nízkých hodnotách otáček (varianta 1 a 2) pozorovány defekty v povlaku ve formě shluků či důlků o průměru 50 až 150 μm . Jednotlivé povrchy povlaků připravených pomocí ultrazvukového míchadla s nuceným promícháváním vsádky nasnímané pomocí optického mikroskopu Olympus SZ61 (kamera Infinity 1, Lumenera) jsou vyobrazeny na obrázku 53. Detailní snímky morfologie povrchu povlaku včetně výše popsaných defektů jsou na obrázku 54. Tyto snímky byly vyhotoveny na povlaku varianty č. 1 pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 3000. Pomocí snímků z konfokálního mikroskopu bylo zjištěno, že hloubka (výška) defektů nepřevyšuje 20 μm . Povrch vybraných povlaků byl nasnímán pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) ve společnosti SVÚM. Snímky povlaků varianty 3 a 11 jsou na obrázku 55. [1A, 2A].

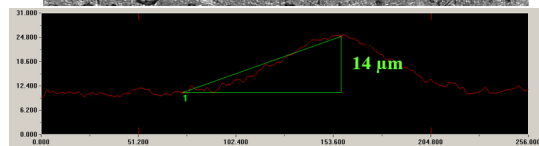
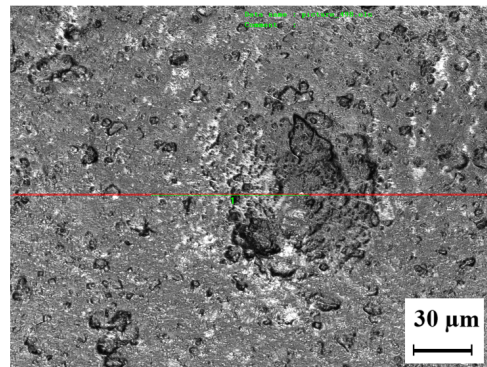
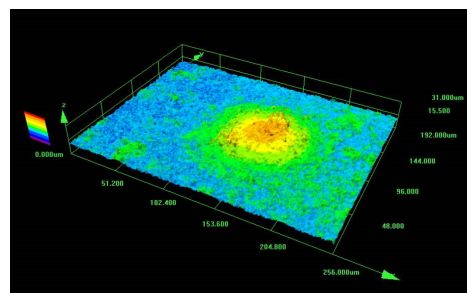


Obrázek 53 – Povrch povlaků antistatických nátěrových hmot CP55 + 1,0 hm. % MWCNT připravených pomocí ultrazvukového míchadla s nuceným promícháváním vsádky

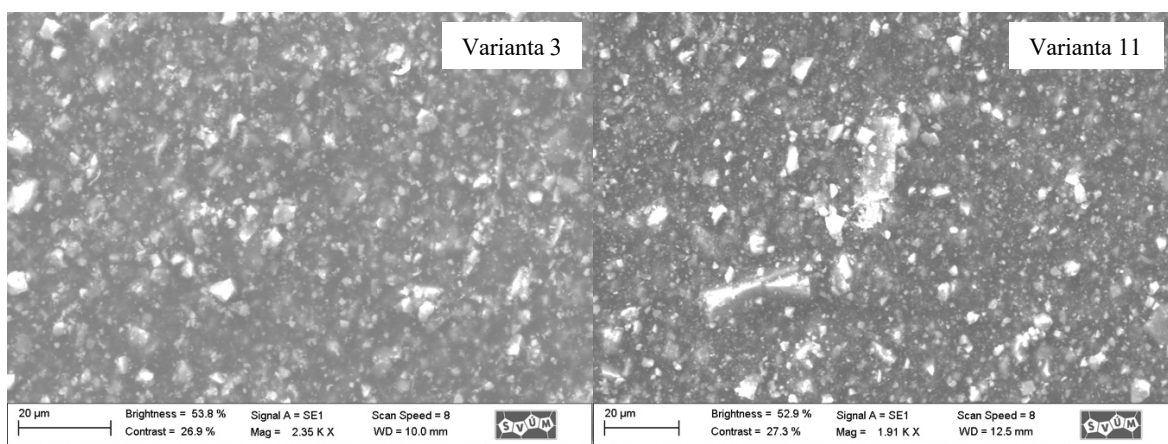
Morfologie povrchu – důlek



Morfologie povrchu – výstupek (shluk)



Obrázek 54 – Snímky povrchu povlaku varianty č.1 – CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT vyhotovené pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 300



Obrázek 55 – SEM snímky povlaků CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT: varianta č. 3 (vlevo), varianta č. 11 (vpravo)

V případě vodou ředitelné antistatické nátěrové hmoty na bázi CP55 s příměsí MWCNT bylo díky experimentům souvisejícím s výběrem vhodné metody a parametrů dispergace docíleno výrazného snížení potřebného množství částic pro dosažení elektricky vodivých vlastností povlaku. Optimalizací procesu dispergace pomocí míchadla rotor – stator IKA S 25 N – 25 G bylo docíleno hodnoty povrchového odporu $5,95 \times 10^4 \Omega$ při použití 1,0 hm. % MWCNT při současném významném zkrácení času dispergace na 2 min. Hodnoty povrchového odporu povlaku v řádu $10^4 \Omega$ se nepodařilo dosáhnout jinými typy použitých pigmentů ani vyšší koncentrací MWCNT. Provedené zkoušky ochranných vlastností povlaků CP55 potvrdily vhodnost nátěrové hmoty pro ochranu před účinky statické elektřiny v atmosférických prostředích nízké korozní agresivity dle ČSN EN ISO 9223 [89 p.17]. Povlaky antistatických nátěrových hmot na bázi vodou ředitelné nátěrové hmoty CP55 vykazovaly oproti povlakům na bázi CHS EPOXY 220 V 55 modifikované MWCNT či vodivým polymer PEDOT lepší funkční a ochranné vlastnosti [1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 10A, 11A].

4.3 Popis parametrů dispergace a jejich vlivu na finální vlastnosti povlaků

V rámci experimentální části disertační práce bylo realizováno několik experimentů za účelem výběru vhodné metody dispergace pigmentů (plniv) pro dosažení specifických funkčních vlastností. V rámci formulace antistatických a ořezvzdorných hmot na bázi epoxidové pryskyřice (kapitoly 4.2.2.1 a 4.2.2.2) a vodou ředitelných antistatických nátěrových hmot (kapitola 4.2.3.1) byly pro účely popsání procesu dispergace sledovány hodnoty disipované energie a měrného disipovaného příkonu jenž dle Daviese [6 p. 500] umožňuje se zvyšující se hodnotou dosažení menších průměrů kapek disperze. Na základě tohoto předpokladu byly v experimentech použity mimo jiné i míchadlo rotor – stator a ultrazvukový homogenizátor. Tato míchadla umožňují dosažení vysokých hodnot měrného disipovaného příkonu (viz obrázek 16) a tedy by měly být účinným nástrojem pro rozbití shluků pevných částic či jejich případnou žádoucí modifikaci rozměru.

Bylo prokázáno, že hodnota měrné disipované energie měla významný vliv na výsledné vlastnosti povlaků (viz obrázek 54, 65 a 95), avšak nelze konstatovat, že by sama o sobě byla dostačující k zabezpečení dostatečné dispergace a distribuce částic v míchané vsádce. Z provedených experimentů je patrné, že zásadní vliv má cirkulace vsádky přes dispergační zónu míchadla, tj. oblast, kde se disipuje většina energie. Tento jev lze velice dobře pozorovat na výsledcích přípravy nátěrových hmot, kdy byl použit pro účely dispergace pouze ultrazvukový homogenizátor a nebylo zabezpečeno nucené míchání vsádky. I přes vysoké hodnoty disipované energie nedosahovaly takto připravené nátěrové hmoty a jejich povlaky vlastností povlaků nátěrových hmot připravených pomocí rotačních míchadel. Disipovaná energie v dispergační zóně ultrazvukového míchadla a efekt akustické kavitace umožňující deaglomerizaci částic byl využit pouze lokálně a připravená nátěrová hmota tak nebyla homogenní což se v konečném důsledku projevilo zhoršením ochranných a funkčních vlastností povlaků. Pozitivní přínos nucené cirkulace vsádky mechanickým míchadlem (viz obr. 50) byl pozorován v případě tvorby vodou ředitelné antistatické nátěrové hmoty CP55 obsahující 1,0 hm. % MWCNT. Hodnoty povrchového odporu připravených povlaků byly blízké hodnotám povlaků nátěrových hmot připravovaných pomocí míchadla rotor – stator [1A, 3A, 4A, 6A, 13A, 14A, 27A].

V případě míchadla rotor – stator, které se vyznačuje vysokými smykovými silami a velmi dobrou schopností čerpání vsádky, lze ze získaných dat konstatovat, že pro přípravu

nátěrových hmot s podílem MWCNT, tedy antistatických nátěrových hmot na bázi CP55 (kap. 4.2.3.1) a otěruvzdorných hmot na bázi epoxidové pryskyřice LV EPS 620 (kap. 4.2.1.2) je rozhodující měrný disipovaný příkon míchadla, resp. frekvence otáčení míchadla a obvodová rychlost. U nátěrových hmot s podílem MWCNT (epoxidových i vodou ředitelných) se jako nejvýhodnější prokázala kombinace vysokých frekvencí otáček míchadla a velmi krátké doby procesu. V případě prodlužování doby procesu dispergace docházelo ke zhoršení funkčních vlastností povlaku. Tento jev může být způsoben právě dobrou schopností čerpání vsádky, a tedy i vícenásobným průchodem víceštěnných uhlíkových nanotrubic dispergační zónou, kde může opakovaně docházet k nežádoucí změně jejich délkových rozměrů, a tím v konečném důsledku ke změně parametrů povrchového odporu povlaků vlivem uspořádání částic v povlaku s ohledem na elektrickou vodivost (viz obr. 14 [65 p. 8]) [1A, 2A, 3A, 9A, 13A, 14A, 15A, 16A, 17A, 19A, 18A, 27A].

Nežádoucí degradace funkčních pigmentů při dispergaci míchadlem rotor – stator vedoucích ke změně jejich barevných charakteristik byla popsána v případě formulace termochromických nátěrových hmot v [6A, 7A].

V případě antistatických nátěrových hmot na bázi epoxidové pryskyřice byla jako optimální metoda dispergace grafitu rovněž vyhodnocena metoda rotor – stator. Avšak vzhledem k charakteru použitého pigmentu (shluky velkých částic) a nutnosti zajištění homogenní suspenze vycházely nejlépe funkční parametry povlaků připravených procesy s delším časem dispergace. Delší čas dispergace umožňuje několikanásobný průchod míchané vsádky dispergační zónou pro deaglomeraci částic a modifikaci jejich rozměru [9A, 13A, 14A, 16A, 18A, 27A].

Správná volba dispergačního zařízení je stěžejní pro efektivní a hospodárný způsob dispergace nátěrové hmoty ale i finální ceny produktu. Při tvorbě antistatické vodou ředitelné nátěrové hmoty na bázi CP55 byl optimalizací procesu dispergace zkrácen čas dispergace o 3 minuty a snížena potřebná koncentrace MWCNT o 1,5 hm. % pro vytvoření nátěrové hmoty pro tvorbu povlaků s hodnotou povrchového odporu v řádu $10^4 \Omega$. Snížení koncentrace MWCNT z původní hodnoty 2,5 hm. % na 1,0 hm. % pak představuje úsporu 315 000 Kč při přípravě 1 000 kg této nátěrové hmoty [1A, 12A].

4.4 Vytvořené funkční nátěrové systémy

Níže jsou popsány jednotlivé funkční nátěrové hmoty vytvořené v rámci experimentální části disertační práce.

4.4.1 Antistatické nátěrové hmoty

4.4.1.1 Antistatická nátěrová hmota na bázi epoxidové pryskyřice

Epoxidová dvousložková antistatická nátěrová hmota LV EPS 620 + 2 hm. % CHEZACERB B (AC70) [9A, 17A, 18A].

Funkce jednotlivých složek epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty:

- I. Epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 slouží jako matrice pro vodivé částice sazí CHEZACARB B (AC70).
- II. Tvrdivlo LV BU 45 N slouží k vytvrzení systému.
- III. Vodivé saze CHEZACARB B (AC70) o hmotnostním podílu 2 hm. % slouží k dosažení antistatických vlastností povlaků nátěrové hmoty.
- IV. Ředidlo LV PA 600 slouží ke změně viskozity systému, k usnadnění jejich aplikace, očištění zařízení a pomůcek.

Výsledek = dvousložková epoxidová nátěrová hmota s hodnotou povrchového odporu pro disipativní materiály dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24].



Obrázek 56 – Povlak epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty LV EPS 620 s obsahem 2 hm. % vodivých sazí

4.4.1.2 Antistatická nátěrová hmota na bázi epoxidové pryskyřice s příměsí grafitu

Epoxidová dvousložková antistatická nátěrová hmota LV EPS 620 + 8 hm. % grafit pudrový (Fichema) [13A, 14A, 27A]. .

Funkce jednotlivých složek epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty:

- I. Epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 slouží jako matrice pro vodivé částice grafitu pudrového (Fichema).
- II. Tvrdidlo LV BU 45 N slouží k vytvrzení systému.
- III. Grafit pudrový (Fichema) o hmotnostním podílu 8 hm. % slouží k dosažení antistatických vlastností povlaku nátěrové hmoty a současně svými vlastnostmi zvyšuje kluzné parametry a korozní odolnost.
- IV. Ředidlo LV PA 600 slouží ke změně viskozity systému, k usnadnění jejich aplikace, očištění zařízení a pomůcek.

Výsledek = dvousložková epoxidová nátěrová hmota s hodnotou povrchového odporu pro disipativní materiály dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24] modifikovaná částicemi zlepšující kluzné vlastnosti.



Obrázek 57 – Povlak epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty LV EPS 620 s obsahem 8 hm. % grafitu

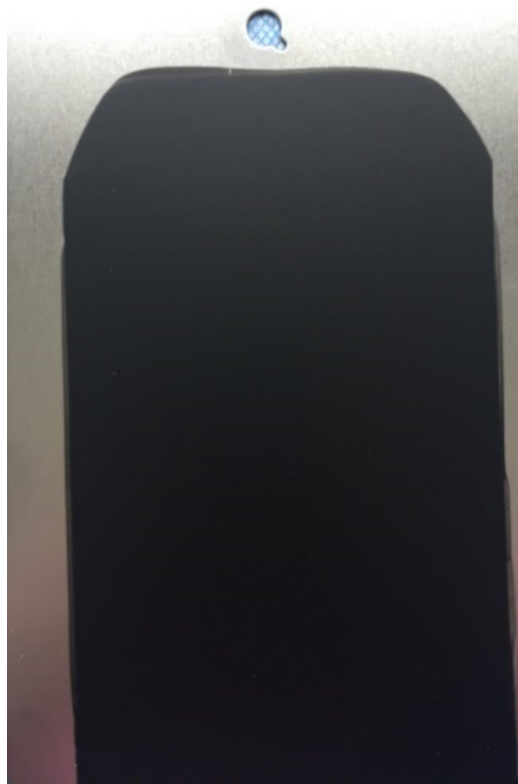
4.4.1.3 Vodou ředitelná nátěrová hmota pro tvorbu elektricky vodivých a antistatických povlaků

Vodou ředitelná samozákladující nátěrová hmota CP55 + 1,0 hm. % MWCNT (AQUACYL 0301) [1A, 2A, 3A, 5A, 10A, 11A, 12A, 13A, 14A, 27A].

Funkce jednotlivých složek nátěrové hmoty:

- I. Vodou ředitelná nátěrová hmota CP55 slouží jako matrice pro MWCNT ve formě suspenze AQUACYL 0301.
- II. Nanočástice MWCNT o hmotnostním podílu 1,0 hm. % slouží k dosažení elektricky vodivých či antistatických vlastností povlaku nátěrové hmoty.

Výsledek = vodou ředitelná samozákladující nátěrová hmota s hodnotou povrchového odporu povlaků pro elektricky vodivé nebo disipativní materiály dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24].



Obrázek 58 – Povlak vodou ředitelné samozákladující antistatické nátěrové hmoty CP55 + 1,0 hm. % MWCNT

4.4.1.4 Vodou ředitelná nátěrová hmota pro tvorbu antistatických povlaků

Vodou ředitelná samozákladující nátěrová hmota CP55 + 8,0 hm. % grafitu [10A, 11A, 12A].

Funkce jednotlivých složek nátěrové hmoty:

- I. Vodou ředitelná nátěrová hmota CP55 slouží jako matrice pro vodivé plnivo grafit Fichema – pudrový.
- II. Grafit pudrový (Fichema) o hmotnostním podílu 8 hm. % slouží k dosažení antistatických vlastností povlaku nátěrové hmoty a současně svými vlastnostmi zvyšuje kluzné parametry a korozní odolnost.

Výsledek = vodou ředitelná nátěrová hmota s hodnotou povrchového odporu pro disipativní materiály dle ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24] modifikovaná částicemi zlepšující kluzné vlastnosti.



Obrázek 59 – Povlak vodou ředitelné samozákladující antistatické nátěrové hmoty CP55 + 8,0 hm. % grafitu

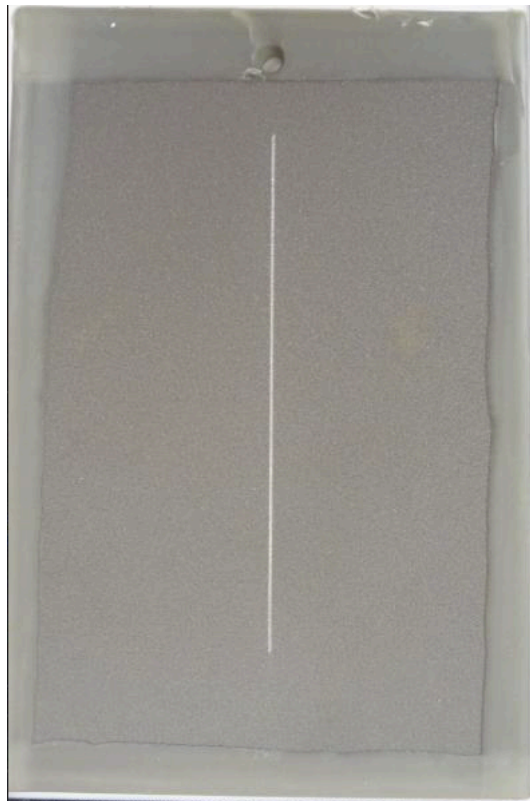
4.4.2 Antikoroziční nátěrové hmoty

Epoxidová dvousložková antikoroziční nátěrová hmota LV EPS 620 + 49 hm. % Mg [23A, 24A, 25A, 26A]

Funkce jednotlivých složek epoxidové dvousložkové antikoroziční nátěrové hmoty:

- I. Epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 slouží jako matrice pro částice hořčíku.
- II. Tvrdivlo LV BU 45 N slouží k vytvrzení systému.
- III. Hořčíkové částice o velikosti zrna 40 až 45 μm (Alfa Alesar) slouží k dosažení antikorozičních vlastností povlaků nátěrové hmoty.
- IV. Ředidlo LV PA 600 slouží ke změně viskozity systému, k usnadnění jejich aplikace, očištění zařízení a pomůcek.

Výsledek = antikoroziční dvousložková epoxidová nátěrová hmota pro ochranu ocelových a hliníkových materiálů.



Obrázek 60 – Povlak antikoroziční nátěrové hmoty LV EPS 620 + 49 hm. % Mg

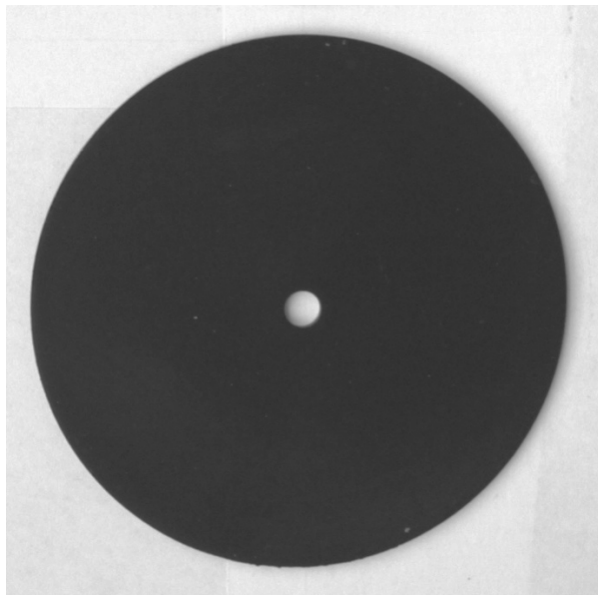
4.4.3 Otěruvzdorné nátěrové hmoty

Epoxidová dvousložková otěruvzdorná nátěrová hmota LV EPS 620 + 1,0 hm. % MWCNT (EPOCYL XCR 128-06) [14A, 15A, 17A, 19A, 20A].

Funkce jednotlivých složek epoxidové dvousložkové otěruvzdorné nátěrové hmoty:

- I. Epoxidová nátěrová hmota LV EPS 620 slouží jako matrice pro nanočástice MWCNT ve formě suspenze EPOCYL XCR 128-06.
- II. Tvrdivlo LV BU 45 N slouží k vytvrzení systému.
- III. Nanočástice MWCNT v koncentraci 1,0 hm.% slouží k dosažení otěruvzdorných vlastností nátěrové hmoty.
- IV. Ředidlo LV PA 600 slouží ke změně viskozity systému, k usnadnění jejich aplikace, očištění zařízení a pomůcek.

Výsledek = otěruvzdorná dvousložková epoxidová nátěrová hmota.



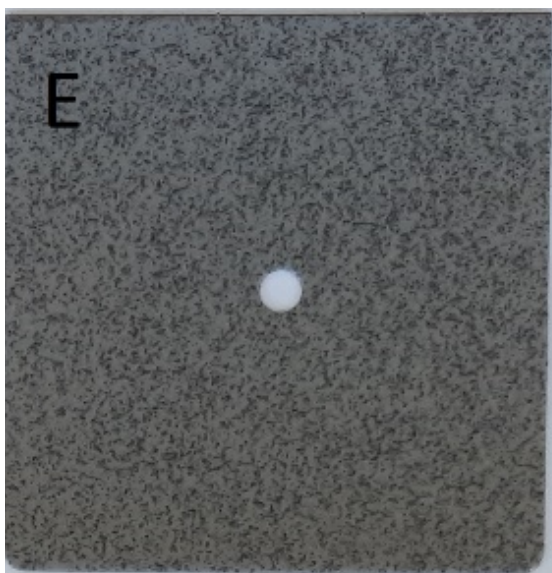
Obrázek 61 – Povlak otěruvzdorné nátěrové hmoty LV EPS 620 + 1,0 hm. % MWCNT

Polyuretanová dvousložková otěruvzdorná nátěrová hmoty CP05 + 5 hm. % Mg (10 hm. % Mg) [21A, 22A].

Funkce jednotlivých složek epoxidové dvousložkové otěruvzdorné nátěrové hmoty:

- I. Polyuretanová nátěrová hmoty CP05 slouží jako matrice pro částice hořčíku.
- II. Tvrdivlo PH93 slouží k vytvrzení systému.
- III. Hořčíkové částice o velikosti zrna 40 až 45 μm (Alfa Alesar) slouží k dosažení otěruvzdorných a protiskluzových vlastností povlaků nátěrové hmoty.
- IV. Ředidlo PT03 slouží ke změně viskozity systému, k usnadnění jejich aplikace, očištění zařízení a pomůcek.

Výsledek = **Funkční vzorek** – Nová otěruvzdorná nátěrová hmoty s hořčíkovými částicemi.



Obrázek 62 – Povlak otěruvzdorné a protiskluzové nátěrové hmoty CP05 + 10 hm. % Mg

Všechny výše uvedené nátěrové hmoty lze aplikovat pneumatickým stříkáním, štětcem, válečkem či aplikátory. Před aplikací nátěrových hmot je doporučeno předupravit povrch tryskáním ostrohranným abrazivem na stupeň čistoty min. Sa 2 ½ dle ČSN EN ISO 8501-1 [92 p. 8] a drsnost odpovídající dle komparátoru drsnosti Rugotest No. 3 [76] profilu B N9a [29A]. Na povlakovaném povrchu se nesmí vyskytovat nečistoty ve formě prachu a mastnoty. Před aplikací nátěru je vhodné provést stanovení výskytu mastných nečistot na povrchu vhodnou metodou [28A].

5. Závěr

V rámci experimentální části byly formulovány různé typy nátěrových hmot obsahující funkční částice volené s ohledem na požadované funkční a ochranné vlastnosti vyvíjených povlaků. Pojivové báze použité při tvorbě jednotlivých nátěrových hmot zohledňovaly současné trendy v oboru povrchových úprav. Pomocí použitých postupů při volbě vhodných typů a koncentrací částic pro daný typ nátěrové hmoty v kombinaci s ověřováním vhodnosti jednotlivých metod dispergace pro daný typ částic se podařilo docílit optimální koncentrace těchto částic pro dosažení požadovaných funkčních vlastností.

Z provedených experimentů při formulaci antistatických, antikoročních a ošetrudorných nátěrových hmot byl prokázán přímý vliv použitých metod a parametrů dispergace na aplikační, ochranné a funkční vlastnosti finálních povlaků. Úpravou a sledováním procesních parametrů se podařilo snížení potřebného podílu použitých částic v nátěrových hmotách při současném zabezpečení požadovaných funkcí povlaků. Komplexním posouzením funkčních a ochranných vlastností vytvořených povlaků bylo možné definovat jejich vysoké užité vlastnosti a oblasti jejich použití.

Byly vytvořeny, testovány a popsány antistatické, antikoroční a ošetrudorné nátěrové hmoty na bázi epoxidové pryskyřice, polyuretanová ošetrudorná (protiskluzová) nátěrová hmota a vodou ředitelné nátěrové hmoty pro tvorbu antistatických povlaků a elektricky vodivých povlaků.

6. Splnění cílů disertační práce

Hlavní cíl:

Vývoj nové antistatické nátěrové hmoty splňující parametry povrchového odporu pro disipativní materiály dané normou ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24].

Byla vyvinuta vodou ředitelná nátěrová hmota CP55 s podílem MWCNT 1,0 hm. % ve formě suspenze AQUACYL 0301 (Kapitola 4.2.3.1) vykazující hodnoty povrchového odporu pro disipativní materiály dané normou ČSN EN 61340-2-3 ed.2 (346440):2017 [57] a ČSN CLC/TR 60079-32-1 [24] případně vykazující hodnoty povrchového odporu pro elektricky vodivé materiály dle definice ČSN IEC/TR 61340-1 [23 p]. Povrchový odpor povlaků nátěrové hmoty dosahoval hodnoty $5,95 \times 10^4 \Omega$ při použití metody dispergace pomocí zařízení rotor – stator IKA S 25 N – 25 G, frekvenci otáčení rotoru $15\,000 \text{ min}^{-1}$ v délce trvání 2 min. Dispergační zařízení bylo vyhodnoceno na základě rozsáhlého porovnání finálních funkčních a ochranných parametrů povlaků jako nejvhodnější v porovnání s metodami přípravy vrtulovým míchadlem, zubovým míchadlem, míchadlem Visco Jet, ultrazvukovým homogenizátorem a ultrazvukovým homogenizátorem při nucené cirkulaci vsádky pomocí lopatkového míchadla. Při formulaci antistatické vodou ředitelné nátěrové hmoty na bázi CP55, byl kladen vysoký důraz na snížení potřebného podílu MWCNT pro dosažení nízkého povrchového odporu povlaku. V případě použití MWCNT ve formě suspenze AQUACYL 0301 bylo díky provedeným experimentům při různém nastavení dispergačního procesu dosaženo úspory 1,5 hm. % MWCNT. Výsledky provedených zkoušek ochranných vlastností povlaků dle ČSN EN ISO 6270-2 [78], ČSN EN ISO 2409 [37], ČSN EN ISO 16276-2 [82], ČSN EN ISO 4624 [41], ČSN EN ISO 1520 [91] a ČSN EN ISO 6860 [70] prokázaly vhodnost této nátěrové hmoty pro ochranu před účinky statické elektřiny v atmosférických prostředích nízké korozní agresivity dle ČSN EN ISO 9223 [89].

Cíl byl splněn

Dílčí cíle:

- **Návrh vhodných matric, pigmentů a dispergačních zařízení.**

Pro tvorbu antistatických nátěrových hmot (Kapitoly 4.2.1.1 a 4.2.3.1) byly navrženy a testovány tři typy matric (LV EPS 620, CP 55 a CHS EPOXY 220 V 50), deset typů pigmentů (MWCNT, grafen, dva typy grafitu, měď, tři typy vodivých sazí, zinek a vodivý polymer PEDOT) a šest typů dispergačních zařízení či jejich kombinace (vrtulové míchadlo, lopátkové míchadlo, rotor – stator, zubové míchadlo, míchadlo Visco Jet a ultrazvukový homogenizátor). Vybrané typy pojiv a pigmentů byly zvoleny na základě provedené rešerše současného stavu problematiky. Jednotlivé povlaky vytvořených nátěrových hmot byly posuzovány z hlediska povrchového odporu povlaků a ochranných vlastností. Dispergační zařízení byla volena s ohledem na hodnoty dosahovaného měrného disipovaného příkonu pro posouzení vlivu tohoto parametru na vlastnosti nátěrových hmot.

Cíl byl splněn

- **Návrh podílů jednotlivých pigmentů pro dosažení požadovaných vysokých užitných vlastností funkčních povlaků a nátěrových systémů (antistatické nátěrové hmoty, oěruvzdorné nátěrové hmoty, antikoroziční nátěrové hmoty).**

V rámci provedených experimentů byl vhodný podíl jednotlivých funkčních pigmentů v použitých matricích (pojivech, nátěrových hmotách) volen formou škálování s cílem posouzení parametrů ochranných a funkčních vlastností a jejich změny v závislosti na množství použitého pigmentu. Současně byly hodnoceny aplikační vlastnosti vytvořených nátěrových hmot a vzhledové vlastnosti povlaků. Jednotlivé varianty byly porovnávány vzájemně mezi sebou a s původní, nepigmentovanou nátěrovou hmotou (pojivem). V případě oěruvzdorných nátěrových hmot na bázi polyuretanu (Kapitola 4.2.1.1.) bylo porovnání provedeno s komerčními nátěrovými hmotami. Tímto způsobem byly vytvořeny funkční nátěrové hmoty a systémy pro užití v různých aplikacích dle požadované specifické funkce povlaku. V rámci experimentů byly vytvořeny a otestovány pro praktická použití: antistatické nátěrové hmoty: LV EPS 620 + 2,0 hm. % CHAZACERB AC70 a LV EPS 620 + 8,0 hm. % grafit pudrový, CP55 + 1,0 hm, % MWCNT (AQUACYL 0301), CP55 + 8,0

hm. % grafit pudrový, antikorozi ní nátěrová hmota LV EPS 620 + 49 hm % Mg a otěruvzdorné nátěrové hmoty: LV EPS 620 + 1,0 MWCNT (EPOCYL XCR 128-06) a LV EPS 620 + 10 hm. % Mg. Vytvořené funkční typy nátěrových systémů jsou uvedeny v kapitole 4.4.

Otěruvzdorná nátěrová hmota CP05 s podílem hořčkových částic byla zapsána jako Funkční vzorek – Nová otěruvzdorná nátěrová hmota s hořčkovými částicemi [1FVZ]

Cíl byl splněn

- **Výběr vhodného dispergačního zařízení a optimalizace procesu dispergace pro účely snížení potřebného podílu použitých částic či zkrácení dispergačního času při tvorbě nátěrových hmot vyšších užitečných vlastností.**

Proces výběru vhodného dispergačního zařízení a optimalizace parametrů procesu dispergace byla popsána v kapitolách (4.2.1.1, 4.2.1.2 a 4.2.3.1) při formulaci antistatických a otěruvzdorných nátěrových hmot na bázi epoxidových pryskyřic a při formulaci antistatické vodou ředitelné nátěrové hmoty. Optimalizací procesu se podařilo nejen dosáhnout zlepšení funkčních vlastností, ale zkrátit i potřebný čas dispergace a snížit potřebný podíl funkčních částic v matrici. Například v případě epoxidové nátěrové hmoty LV EPS 620 s příměsí grafitu bylo metodou rotor – stator a vhodných parametrů procesu (frekvence otáček $12\,000\text{ min}^{-1}$, 10 min) dosaženo povrchového odporu povlaku s 8 hm. % grafitu $1,5 \times 10^5\ \Omega$, přičemž při dispergaci zubovým míchadlem či ultrazvukovým homogenizátorem při různých parametrech bylo dosahováno hodnot v řádech 10^6 a $10^8\ \Omega$.

Cíl byl splněn

- **Ověření funkčních a ochranných vlastností vytvořených povlaků nátěrových hmot metodami běžně používanými v oboru povrchových úprav.**

Vytvořené povlaky byly testovány nejen z hlediska své specifické funkce, hodnoty povrchového odporu v případě antistatických povlaků, odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení v případě otěruvzdorných povlaků či odolnosti vůči agresivním atmosférám v případě antikoročních nátěrových hmot, ale byly vždy podrobeny sérii normalizovaných zkoušek z oboru povrchových úprav pro detailní popis charakteru vytvořeného povlaku a možnostem jeho použití v reálných aplikacích. Použité hodnotící metody a jejich výsledky byly vždy popsány s odkazem na příslušnou technickou normu.

Cíl byl splněn

7. Přínosy pro vědu a praxi

Hlavním přínosem disertační práce je praktické ověření a popis vlivu různých metod a parametrů dispergace na finální vlastnosti především antistatických povlaků, jenž lze uplatnit i při formulaci jiných typů nátěrových hmot.

Docílení významné redukce nutného podílu nanočástic obsažených v nátěrové hmotě pro dosažení funkčních parametrů povlaku pouhou změnou parametrů procesu dispergace pak může posloužit jako podklad pro optimalizaci stávajících výrobních procesů.

Vytvořená antistatická vodou ředitelná nátěrová hmota CP55 obsahující MWCNT pak může být použita jako forma ochrany před negativními účinky statické elektřiny. Rovněž další nátěrové hmoty uvedené v kapitole 4.4. vytvořené v rámci experimentální části lze použít pro jejich zamýšlené účely v reálných aplikacích.

8. Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN ISO 4618 (670010):2018. *Nátěrové hmoty – Termíny a definice*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [2] LAMBOURNE, R. a STRIVENS T. A.: *Paint and surface coatings, theory and practice*. Woodhead Publishing Limited, second edition 1999, ISBN 1-884207-73-1, 767 s.
- [3] KALEDOVÁ, Andrea a Petr KALENDA. *Technologie nátěrových hmot I.: pojiva, rozpouštědla a aditiva pro výrobu nátěrových hmot*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-691-5.
- [4] KREIBICH, Viktor a Karel HROCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Druhé vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991. ISBN 80-01-00476-7.
- [5] KALEDOVÁ, Andrea. *Technologie nátěrových hmot I.: pigmenty a plniva pro nátěrové hmoty*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-576-5.
- [6] PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A. a KRESTA, S. M. *Handbook of industrial mixing: science and practice*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. (2004), ISBN 0-471-26919-0, 1377 s.
- [7] STREITBERGER, H.J.; DOSSEL, K.F. *Automotive Paints and Coatings*; WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA: Weinheim, Germany, second edition 2008, ISBN 978-3-527-30971-9, 495 s.
- [8] World's Top ten Paints Companies 2020 Annual Report. *World Paint and Coatings Industry Association* [online]. Washington, 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.wpcia.org/news/World's%20Top%20ten%20Paints%20Companies%202020%20Annual%20Report.html>
- [9] World's Top ten Paints Companies 2022 Annual Report. *World Paint and Coatings Industry Association* [online]. Washington, 2023, 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.wpcia.org/news/World's%20Top%20ten%20Paints%20Companies%202022%20Annual%20Report.html>
- [10] World's Top ten Paints Companies 2019 Annual Report. *World Paint and Coatings Industry Association* [online]. Washington, 2020, 2020 [cit. 2023-03-14]. Dostupné

- z: <http://www.wpcia.org/news/World's%20Top%20ten%20Paints%20Companies%202019%20Annual%20Report.html>
- [11] World's Top ten Paints Companies 2018 Annual Report. *World Paint and Coatings Industry Association* [online]. Washington, 2019, 2019 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.wpcia.org/news/World's%20Top%20ten%20Paints%20Companies%202018%20Annual%20Report.html>
- [12] Top Companies Report: 2021 Top 20. *The Resource for the Global Coatings Industry | Coatings World* [online]. Rodman Media, 2019, 2022 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.coatingsworld.com/issues/2021-07-01/view_top-companies-report/top-companies-report-163001/
- [13] Asia Pacific Coatings Region: Poised for Continued Growth through 2024 – American Coatings Association: The Global Market Analysis for the Paint and Coatings Industry (2019–2024). *American Coatings Association (ACA)* [online]. ACA [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/asia-pacific-coatings-region-poised-for-continued-growth-through-2024/>
- [14] O'CONNOR, David, Deyi HOU, Jing YE, et al. Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications. *Environment International* [online]. 2018, 121, 85-101 [cit. 2023-03-15]. ISSN 01604120. Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2018.08.052
- [15] *Zákon 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší*. In: . Praha, 2012, 201/2012 Sb.
- [16] TŮMA, Zdeněk a kol. Stav a trendy vývoje průmyslových NH. *Transfer: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl*. 2014, 10.(22), 6-12. Dostupné také z: <https://www.vzlu.cz/wp-content/uploads/2021/03/file902.pdf>
- [17] *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2021*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2022, 164 s. ISBN 978-80-7653-038-6. Dostupné také z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/21groc/gr21cz/Obsah_CZ.html
- [18] *Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách u stacionárních zdrojů nespádajících pod BREF: Těkavé organické látky (VOC) – procesy a odstraňování*.

- In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí Státní fond životního prostředí České republiky, 2015. [cit. 2018-08-30]. Dostupné z:
[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/\\$FILE/000-Tekave_organicke_latky-20160222.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/$FILE/000-Tekave_organicke_latky-20160222.pdf)
- [19] ČSN EN ISO 12944-1 (505813). *Nátěrové hmoty – Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy – Část 1: Obecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [20] HOVORUN, T. P., K. V. BERLADIR, V. I. PERERVA, S. G. RUDENKO a A. I. MARTYNOV. Modern materials for automotive industry. *Journal of Engineering Sciences* [online]. 2017, 4(2), f8-f18 [cit. 2023-03-15]. ISSN 23122498. Dostupné z: doi:10.21272/jes.2017.4(2).f8
- [21] PHILIP MITCHELL, handbook editor. *Tool and manufacturing engineers handbook. Volume VIII, Plastic part manufacturing*. 4th ed. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 0872634566.
- [22] DERICILER, Kuray, Nargiz ALIYEVA, Hadi MOHAMMADJAFARI SADEGHI, Hatice S. SAS, Yusuf Ziya MENCELOGLU a Burcu SANER OKAN. Graphene in automotive parts. In: *Nanotechnology in the Automotive Industry* [online]. Elsevier, 2022, 2022, s. 623-651 [cit. 2023-03-15]. ISBN 9780323905244. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-90524-4.00030-X
- [23] ČSN IEC/TR 61340-1 (346440). *Elektrostatika – Část 1: Elektrostatické jevy – Principy a měření*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [24] ČSN CLC/TR 60079-32-1 (332320). *Výbušné atmosféry – Část 32-1: Návod na ochranu před účinky statické elektřiny*. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [25] MARKARIAN, Jennifer. New developments in antistatic and conductive additives. *Plastics, Additives and Compounding* [online]. 2008, 10(5), 22-25 [cit. 2023-03-15]. ISSN 1464391X. Dostupné z: doi:10.1016/S1464-391X(08)70172-7
- [26] JAKUBAS, Adam a Paweł JABŁOŃSKI. The influence of electrode size on resistance measurement in the modified four-electrodes method. *Measurement* [online]. 2017, 108, 34-40 [cit. 2023-03-15]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2017.05.006

- [27] SHEN, Wenning, Lajun FENG, Xiao LIU, Hong LUO, Zheng LIU, Peiru TONG a Weihua ZHANG. Multiwall carbon nanotubes-reinforced epoxy hybrid coatings with high electrical conductivity and corrosion resistance prepared via electrostatic spraying. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2016, 90, 139-146 [cit. 2023-03-15]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2015.10.006
- [28] ČSN EN 61340-5-3 ed. 2:2017 (346440) Elektrostatika – Část 5-3: Ochrana elektronických součástek před elektrostatickými jevy – Klasifikace vlastností a požadavky na obaly určené pro součástky citlivé na elektrostatické výboje, Praha: ÚNMZ, 2017.
- [29] HEISE, Axel. *ANTISTATIC COATING OF FUEL CELL (56) References Cited EXHAUST SYSTEMS MADE OF PLASTIC: United States Patent*. USA. US 8,432,658 B1. Uděleno Duben. 30, 2013. Zapsáno Listopad. 16, 2011.
- [30] FICKOVÁ, Zuzana, Jaroslava BENEŠOVÁ a Jan KUDLÁČEK. *Interaktivní nátěrové systémy. Transfer: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl*. 2014, 10.(22), 13-17. Dostupné také z: <https://www.vzlu.cz/wp-content/uploads/2021/03/file902.pdf>
- [31] YING, Fei, Yihua CUI, Genxiang XUE, Haiqing QIAN, Ahua LI, Xiang WANG, Xujie ZHANG a Dandan JIANG. Preparation and properties of an antistatic UV-curable coating modified by multi-walled carbon nanotubes. *Polymer Bulletin* [online]. 2016, 73(10), 2815-2830 [cit. 2023-03-13]. ISSN 0170-0839. Dostupné z: doi:10.1007/s00289-016-1623-5
- [32] FEI, Wenxiang, Jincan CUI, Yahui SUN, Junhe YANG, Shanglin GAO a Jing LI. Anti-corrosion and electrically conductive inorganic conversion coatings based on aligned graphene derivatives by electrodeposition. *Nano Materials Science* [online]. 2022, 4(3), 244-250 [cit. 2023-03-16]. ISSN 25899651. Dostupné z: doi:10.1016/j.nanoms.2021.07.011
- [33] MIRMOHSENI, Abdolreza, Ali GHARIEH a Manouchehr KHORASANI. Waterborne acrylic–polyaniline nanocomposite as antistatic coating: preparation and characterization. *Iranian Polymer Journal* [online]. 2016, 25(12), 991-998 [cit. 2023-03-13]. ISSN 1026-1265. Dostupné z: doi:10.1007/s13726-016-0486-9
- [34] AZIM, S. Syed, A. SATHEESH, K.K. RAMU, S. RAMU a G. VENKATACHARI. Studies on graphite based conductive paint coatings. *Progress in Organic*

- Coatings* [online]. 2006, 55(1), 1-4 [cit. 2023-03-16]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2005.09.001
- [35] PAN, Guoliang, Qiang GUO, Jian DING, Weidong ZHANG a Xiaoming WANG. Tribological behaviors of graphite/epoxy two-phase composite coatings. *Tribology International* [online]. 2010, 43(8), 1318-1325 [cit. 2023-03-13]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2009.12.068
- [36] BHAKARE, Madhuri A., Pravin H. WADEKAR, Rahul V. KHOSE, Mahesh P. BONDARDE a Surajit SOME. Eco-friendly biowaste-derived graphitic carbon as black pigment for conductive paint. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2020, 147 [cit. 2023-03-16]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2020.105872
- [37] ČSN EN ISO 2409 (673085). *Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [38] KOSIŃSKI, Szymon, Marcin GONSIOR, Piotr KRZYŻANOWSKI a Iwona RYKOWSKA. New Hybrid Polyurea-Polyurethane Elastomers with Antistatic Properties and an Influence of Various Additives on Their Physicochemical Properties. *Molecules* [online]. 2021, 26(19) [cit. 2023-03-13]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules26195778
- [39] FRANCIS, Lorraine F., Jaime C. GRUNLAN, Jiakuan SUN a W.W. GERBERICH. Conductive coatings and composites from latex-based dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2007, 311(1-3), 48-54 [cit. 2023-03-16]. ISSN 09277757. Dostupné z: doi:10.1016/j.colsurfa.2007.08.026
- [40] YOUSEFI, Elahe, Abolghasem DOLATI a Hossein NAJAFKHANI. Preparation of robust antistatic waterborne polyurethane coating. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2020, 139 [cit. 2023-03-14]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2019.105450
- [41] ČSN EN ISO 4624 (673077). *Nátěrové hmoty – Odtrhová zkouška přilnavosti*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [42] GORNICKA, B., M. MAZUR, K. SIERADZKA, E. PROCIOW a M. LAPINSKI. Antistatic Properties of Nanofilled Coatings. *Acta Physica Polonica A* [online].

2010, 117(5), 869-872 [cit. 2023-03-13]. ISSN 0587-4246. Dostupné z:
doi:10.12693/APhysPolA.117.869

- [43] KOČÍ, Petr. *Chemické inženýrství I*. 4. rozšířené vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-049-2.
- [44] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie*[online]. Zlín. UTB ve Zlíně [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11298787-Jiri-malac-gumarenska-technologie-4-smesi-1-obsah.html>
- [45] DVOŘÁK, Z. *Zpracovatelské procesy gumárenské: pro konstrukční směry*. Zlín: UNIVERZITA Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, 2013
- [46] SAUTER, C., M.A. EMIN, H.P. SCHUCHMANN a S. TAVMAN. Influence of hydrostatic pressure and sound amplitude on the ultrasound induced dispersion and deagglomeration of nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2008, 15(4): 517-523 [cit. 2018-10-31]. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2007.08.010.
- [47] KALEDOVÁ, Andrea a Petr KALENDA. *Technologie nátěrových hmot I.: stroje a procesy ve výrobě nátěrových hmot*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-625-7.
- [48] ZHOU, Genwen a Suzanne M. KRESTA. Evolution of drop size distribution in liquid–liquid dispersions for various impellers**This paper was the winner of the first North American Mixing Forum Student Award, June, 1997. *Chemical Engineering Science* [online]. 1998, 53(11), 2099-2113 [cit. 2023-03-16]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/S0009-2509(97)00437-5
- [49] DAUB, A., M. BÖHM, S. DELUEG a J. BÜCHS. Measurement of maximum stable drop size in aerated dilute liquid–liquid dispersions in stirred tanks. *Chemical Engineering Science* [online]. 2013, 104, 147-155 [cit. 2023-03-16]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2013.08.023
- [50] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 9788021426405.

- [51] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. Hydromechanické procesy II. Vyd. 1. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005, 167 s. ISBN 80-01-03302-3.
- [52] JIROUT, Tomáš. Míchání v kapalném prostředí [online]. [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/hmz/hmz9.pdf>
- [53] Visco Jet Agitator Technology. *Visco Jet Agitators* [online]. Küssaberg: Visco Jet Agitation Systems [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://viscojet.de/en/innovations/>
- [54] RAHIMI, Masoud, Saeideh AMRAEI a Ammar Abdulaziz ALSAIRAFI. Experimental and computational fluid dynamics modeling of mixing by Visco-jet impellers. *Korean Journal of Chemical Engineering* [online]. 2011, 28(6), 1372-1379 [cit. 2018-11-19]. DOI: 10.1007/s11814-010-0522-y. ISSN 0256-1115. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11814-010-0522-y>
- [55] TAHA, Ahmed, Eman AHMED, Amr ISMAIEL, Muthupandian ASHOKKUMAR, Xiaoyun XU, Siyi PAN a Hao HU. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions. *Trends in Food Science and Technology* [online]. 2020, 105, 363-377 [cit. 2023-03-18]. ISSN 09242244. Dostupné z: [doi:10.1016/j.tifs.2020.09.024](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.024)
- [56] FUENTES-GARCÍA, Jesús Antonio, Alex CARVALHO ALAVARSE, Ana Carolina MORENO MALDONADO, Alfonso TORO-CÓRDOVA, Manuel Ricardo IBARRA a Gerardo Fabián GOYA. Simple Sonochemical Method to Optimize the Heating Efficiency of Magnetic Nanoparticles for Magnetic Fluid Hyperthermia. *ACS Omega* [online]. 2020, 5(41), 26357-26364 [cit. 2023-03-18]. ISSN 2470-1343. Dostupné z: [doi:10.1021/acsomega.0c02212](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02212)
- [57] ČSN EN 61340-2-3 ed. 2 (346440):2017 Elektrostatika – Část 2-3: *Metody zkoušek pro stanovení rezistance a rezistivity tuhých materiálů, používaných k zabránění akumulace elektrostatického náboje*, Praha: ÚNMZ, 2017.
- [58] Antistatický vodivý epoxidový dvousložkový nátěr: StoPox WL 113 Elektricky vodivý epoxidový nátěr. [online]. 2017 [cit. 2018-08-30]. Dostupné z: https://www.epaprostory.cz/fotky26888/fotov/_ps_1867TL_StoPox_WL_113.pdf.

- [59] ESD PU Systém: Systémy ochranných nátěrů pro ESD podlahy. Dr. Schutz. [online]. 2018 [cit. 2018-08-30]. Dostupné z: https://www.floorcolor.cz/data/cf0/000130_000737.pdf
- [60] SEDLÁK, Bedřich. *Elektrina a magnetismus*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0172-7.
- [61] UHLIR, Arthur. The Potentials of Infinite Systems of Sources and Numerical Solutions of Problems in Semiconductor Engineering. *Bell System Technical Journal* [online]. 1955, 34(1), 105-128 [cit. 2023-03-18]. ISSN 00058580. Dostupné z: doi:10.1002/j.1538-7305.1955.tb03765.x
- [62] SMITS, F. M. Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe. *Bell System Technical Journal* [online]. 1958, 37(3), 711-718 [cit. 2023-03-18]. ISSN 00058580. Dostupné z: doi:10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x
- [63] ČSN EN 61340-4-1 (346440):2004 Elektrostatika – Část 4-1: *Standardní zkušební metody pro specifické aplikace – Elektrická rezistance podlahových krytin a instalovaných podlah*, Praha: ÚNMZ, 2004.
- [64] TABACZYŃSKA, Agnieszka, Anna DĄBROWSKA, Marcin MASŁOWSKI a Anna STRĄKOWSKA. Mechanical and Electrical Performance of Flexible Polymer Film Designed for a Textile Electrically-Conductive Path. *Materials* [online]. 2021, 14(9) [cit. 2023-03-19]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14092169
- [65] GULREZ, Syed K.H., M.E. ALI MOHSIN, Hamid SHAIKH, Arfat ANIS, Anesh Manjaly PULOSE, Mukesh K. YADAV, Eng Hau P. QUA a S.M. AL-ZAHRANI. A review on electrically conductive polypropylene and polyethylene. *Polymer Composites* [online]. 2014, 35(5), 900-914 [cit. 2023-03-19]. ISSN 02728397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.22734
- [66] MORTENSEN, Hans Henrik, Fredrik INNINGS a Andreas HÅKANSSON. The effect of stator design on flowrate and velocity fields in a rotor – stator mixer—An experimental investigation. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2017, 121, 245-254 [cit. 2023-03-19]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2017.03.016]

- [67] ČSN EN ISO 2808 (673061):2020. Nátěrové hmoty - Stanovení tloušťky nátěru. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [68] ČSN EN ISO 12944-7 (038241):2018. Nátěrové hmoty - Protikorozi ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy - Část 7: Provádění a dozor při zhotovování nátěrů. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [69] ČSN EN ISO 2813 (673066):2016. Nátěrové hmoty - Stanovení čísla lesku při úhlu 20°, 60° a 85°. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [70] ČSN EN ISO 6860 (673080): Nátěrové hmoty - Zkouška ohybem (na kónickém trnu). Praha: ÚNMZ, 2006
- [71] ČSN EN ISO 7784-2 (673082):2016. Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti proti abrazi - Část 2: Metoda s pryžovými brusnými kotouči a s rotujícím zkušebním vzorkem. Praha: ÚNMZ, 2016
- [72] ČSN EN ISO 8503-2 (038223):2012. Příprava ocelových podkladů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Charakteristiky drsnosti povrchu otryskaných ocelových podkladů - Část 2: Hodnocení profilu povrchu otryskané oceli komparátorem. Praha: ÚNMZ, 2012
- [73] ČSN EN ISO 9227 (038132):2017. Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou. Praha: ÚNMZ, 2017
- [74] ČSN EN ISO 22479 (038130):2023. Koroze kovů a slitin - Zkouška oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře (s určeným objemem plynu). Praha: ÚNMZ, 2023
- [75] ČSN EN ISO 8503-1 (038223):2012 Příprava ocelových podkladů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Charakteristiky drsnosti povrchu otryskaných ocelových podkladů - Část 1: Specifikace a definice pro hodnocení otryskaných povrchů s pomocí ISO komparátorů profilu povrchu. Praha: ÚNMZ, 2012
- [76] ASTM D4417, 2021 Edition, January 1, 2021 - Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel
- [78] ČSN EN ISO 6270-2 (673108):2018. Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti proti vlhkosti - Část 2: Kondenzace (expozice v komoře se zásobníkem ohřáté vody). Praha: ÚNMZ, 2018

- [79] ČSN EN ISO 4628-2 (673071):2016. Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 2: Hodnocení stupně puchýřkování. Praha: ÚNMZ, 2016
- [80] ČSN EN ISO 4628-8 (673071):2013. Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 8: Hodnocení stupně delaminace a koroze v okolí řezu nebo jiného umělého defektu. Praha: ÚNMZ, 2013
- [81] ANDREI, M., F. DI GABRIELE, P. L. BONORA a D. SCANTLEBURY. Corrosion behaviour of magnesium sacrificial anodes in tap water. *Materials and Corrosion* [online]. 2003, 54(1), 5-11 [cit. 2023-03-25]. ISSN 0947-5117. Dostupné z: doi:10.1002/maco.200390010
- [82] SIMÕES, Alda, Dante BATTOCCHI, Dennis TALLMAN a Gordon BIERWAGEN. Assessment of the corrosion protection of aluminium substrates by a Mg-rich primer: EIS, SVET and SECM study. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2008, 63(3), 260-266 [cit. 2023-03-25]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2008.02.007
- [83] BIERWAGEN, Gordon, Roger BROWN, Dante BATTOCCHI a Scott HAYES. Active metal-based corrosion protective coating systems for aircraft requiring no-chromate pretreatment. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2010, 67(2), 195-208 [cit. 2023-03-25]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2009.10.009
- [84] PATHAK, Shashi S., Sharathkumar K. MENDON, Michael D. BLANTON a James W. RAWLINS. Magnesium-Based Sacrificial Anode Cathodic Protection Coatings (Mg-Rich Primers) for Aluminum Alloys. *Metals* [online]. 2012, 2(3), 353-376 [cit. 2023-03-25]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met2030353
- [85] SPECIFICATIONS FOR A QUALITY LABEL FOR LIQUID AND POWDER ORGANIC COATINGS ON ALUMINIUM FOR ARCHITECTURAL APPLICATIONS. 16th ed. Zurich: QUALICOAT, 2019.
- [86] ČSN EN ISO 16276-2 (673202):2018. Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi ochrannými nátěrovými systémy - Hodnocení a kritéria přijetí, adheze/koheze (odtrhová pevnost) povlaku - Část 2: Mřížková zkouška a křížový řez. Praha: ÚNMZ, 2018.

- [87] ČSN EN ISO 17872 (673101):2020. Nátěrové hmoty – Směrnice k provedení řezů povlakem na kovových vzorcích pro korozní zkoušky. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [88] ČSN EN ISO 4628-3 (673071):2016. Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 3: Hodnocení stupně prorezavění. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [89] ČSN EN ISO 9223 (038203):2012. Korozní agresivita atmosfér - Klasifikace, stanovení a odhad. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [90] ČSN EN 60079-32-2 (332320):2015. Výbušné atmosféry – Část 32-2: Nebezpečí od statické elektřiny – Zkoušky. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [91] ČSN EN ISO 1520 (673081):2007. Nátěrové hmoty – Zkouška hloubením. Praha: ÚNMZ, 2007.
- [92] ČSN EN ISO 8501-1 (038221):2007. Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu - Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků. Praha: ÚNMZ, 2007.

9. Publikace autora

9.1 Publikace autora související s disertační prací

- [1A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., JIROUT, T. a ABRAMOV, A. The Influence of Mixing Method and Mixing Parameters in Process of Preparation of Anti-static Coating Materials Containing Nanoparticles. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019, s. 582-590. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-030-16943-5.
- [2A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., JIROUT, T. a CAR, Z. Testing of Antistatics Coatings Based on Waterborne Paints. In: International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2019 Belgrade – Proceedings. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2019, s. 17-20. ISSN 0184-9069.
- [3A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V. a JIROUT, T. The influence of mixing on the functional properties of antistatic coatings containing nanoparticles. In: Sborník XI. Konference pigmenty a pojiva. Pardubice: CHEMAGAZÍN s. r. o, 2018, s. 96-100. ISBN 978-80-906269-3-5.
- [4A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., VLASÁKOVÁ, J., ZASIMENKO, A. a CAR, Z. The influence of mixing on functional properties of conductive anti-static coatings. In: IN-TECH 2018 International Conference on Innovative Technologies, Zagreb, Proceedings. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2018, s. 237-241. ISSN 0184-9069.
- [5A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J. a ZASIMENKO, A. Use of Nanomaterials and Conductive Polymers in Antistatic Coatings. In: Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018, s. 229-232. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [6A] TATÍČKOVÁ, Zuzana; KUDLÁČEK, Jan; ZOUBEK, Michal; KUCHARŤ, Jiří. Behaviour of Thermochromic Coatings under Thermal Exposure. Coatings [online]. 2023, roč. 13, č. 3 [cit. 2023-03-21]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings13030642.
- [7A] TATÍČKOVÁ, Z., ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KUCHARŤ, J. a KREIBICH, V. Smart Interactive Paints – The Effect of Dispergation on Color Characteristics. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering – Advances in Manufacturing III.

- Berlin: Springer Science+Business Media, 2022, s. 175-188. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-031-00804-7.
- [8A] VLASÁKOVÁ, J., a ZOUBEK, M. Usage of Conductive Polymers in Paint. In: Sborník X. Konference Pigmenty a Pojiva. Pardubice: CHEMAGAZÍN s. r. o, 2017, s. 100-104. ISBN 978-80-906269-2-8.
- [9A] KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., KREIBICH, V., VALEŠ, M. a HERRMANN, F. Aplikace nátěrových systémů se zvýšenou elektrickou vodivostí. Občasník Povrcháři. 2014, roč. 7/2014, č. 7, ISSN 1802-9833.
- [10A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., DRAŠNAR, P., MATAS, F. a HERRMANN, F. Využití mikro a nanočástic pro funkční nátěrové hmoty. Transfer – Výzkum a vývoj pro letecký průmysl. 2016, roč. 28, č. 28, s. 6-37. ISSN 1801-9315.
- [11A] OTTA, J., ZOUBEK, M. a KREIBICH, V. Coating materials for electrical conductive coatings. In: Technological forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016, s. 9-329. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [12A] ZOUBEK, M., OTTA, J., KREIBICH, V., MATAS, F. a PEPELNJAK, T. New Antistatic Water-Soluble Coating Materials. In: IN-TECH 2016 – International Conference on Innovative Technologies. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2016, s. 1-360. ISSN 1849-0662.
- [13A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., JIROUT, T., MATAS, F. a CAR, Z. The Influence Of A Mixing Method In Preparation Of Antistatic Coating Materials On A Resulting Electrical Conductivity Of Coatings. In: IN-TECH 2015 – International Conference on Innovative Technologies. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2015, s. 442-446. ISSN 1849-0662.
- [14A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V. a PEPELNJAK, T. Effect of the fillers dispersion on properties of coatings with specific functional properties. In: Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, s. 152-156. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [15A] DIBLÍKOVÁ, L., KOUKALOVÁ, A., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M. a HERRMANN, F. Properties of Functional Epoxy Coatings Modified by Carbon Nanoparticles. Solid State Phenomena. 2015, roč. 227, s. 127-130. ISSN 1662-9779.

- [16A] KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., DIBLÍKOVÁ, L., KOUKALOVÁ, A. a HERRMANN, F. Nátěrové systémy s funkčními vlastnostmi. Tribotechnika. 2014, č. 2, s. 50-52. ISSN 1338-0524.
- [17A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V. a SVOBODA, J. Functional Coating Systems Based on Epoxy Resins. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, s. 71-76. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [18A] DRAŠNAR, P., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., FICKOVÁ, Z. a PERO, R. Coating Systems Based on Epoxy Resins with Antistatic Function. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014, s. 317-320. ISSN 1849-0662.
- [19A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., DRAŠNAR, P., HERRMANN, F., VALEŠ, M. a CAR, Z. The New Wear-Resistant Coatings System Containing Carbon Nanotubes. In: IN-TECH 2013. Budapest: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2013, s. 373–376. ISBN 978-953-6326-88-4.
- [20A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., DRAŠNAR, P., VALEŠ, M. a HERRMANN, F. Nové otěruvzdorné nátěrové systémy s CNT nanočásticemi. Povrcháři. 2013, roč. 2013, č. 6, s. 5-8. ISSN 1802-9833.
- [21A] SLOVINEC, M., ZOUBEK, M. a KUDLÁČEK, J. The Influence of Mg Particles in The Matrix of Organic Paints on the Abrasion Resistance of Coatings. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [22A] SLOVINEC, M., ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J. a NEIŠL, V. Abrasion Resistance of Organic Coatings Containing Mg Particles. In: International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2019 Belgrade – Proceedings. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2019, s. 96-101. ISSN 0184-9069.
- [23A] MOULIS, T., ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J. a KREIBICH, V. Anticorrosive properties of coating systems containing Mg and Zn particles on steel substrates. In: Technological forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016, s. 9-239. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [24A] FIALOVÁ, L., MOULIS, T., ZOUBEK, M. a KUDLÁČEK, J. Anticorrosive properties of coating systems containing magnesium and zinc particles on an

- aluminium alloy 2024. In: Technological forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016, s. 9-239. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [25A] DRAŠNAR, P., FIALOVÁ, L., ZOUBEK, M. a KUDLÁČEK, J. Anticorrosive properties of coating systems containing magnesium particles on an aluminum alloy 2024. In: IN-TECH 2016 – International Conference on Innovative Technologies. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2016, s. 1-360. ISSN 1849-0662.
- [26A] ZOUBEK, M., MOULIS, T., KUDLÁČEK, J., HERRMANN, F a CAR, Z. Potential of anticorrosive protection of coating systems containing magnesium pigments. In: IN-TECH 2016 – International Conference on Innovative Technologies. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2016, s. 1-360. ISSN 1849-0662.
- [27A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KREIBICH, V., JIROUT, T. a MATAS, F. Vliv míchání na elektrickou vodivost povlaků. In: MM Průmyslové spektrum, 2015. ISSN 1212-2572.
- [28A] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., CHÁBERA, P. a ABRAMOV, A. Complex Control Method of Degreasing Process. In: Advances in Manufacturing – Lecture Notes in Mechanical Engineering. Berlin: Springer Science+Business Media, 2018, s. 575-585. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-319-68618-9.
- [29A] KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M. a KOUDELKOVÁ, L. The influence of surface pre-treatment and cleanness on adhesion of coating materials. In: IN-TECH 2018 Proceedings. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2018, s. 231-235. ISSN 0184-9069.

9.2 Publikace autora přímo nesouvisející s disertační prací

- [1B] KANIA, H., SATERNUS, M., KUDLÁČEK, J., and ZOUBEK, M. Comparison of the corrosion resistance of zinc coatings obtained in baths with the addition of Al, Ni, Pb, Bi and Sn. *Ochrana przed korozja*. 2022, vol. 65, no. 7, p. 203-215. ISSN 0473-7733.
- [2B] TATÍČKOVÁ, Z., HELLER, J., KUDLÁČEK, J., NOVÁK, V., and ZOUBEK, M. Evaluation of the mechanical properties of LD thermochromic paints in the long term horizon. In: *Technological Forum 2022*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022, p. 352-360. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [3B] TATÍČKOVÁ, Z., HELLER, J., KUDLÁČEK, J., NOVÁK, V., and ZOUBEK, M. Methodology for measuring the color of thermochromic paints. In: *Technological Forum 2022*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022, p. 361-368. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [4B] KUDLÁČEK, J., SVOBODA, J., ZOUBEK, M., KANIA, H., and SATERNUS, M. Technology of Repairs of Anticorrosion Protection of Smaller Parts of Historic Steel Structures Using Hot-Dip Galvanizing. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering – Advances in Manufacturing III*. Berlin: Springer Science+Business Media, 2022, p. 189-201. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-031-00804-7.
- [5B] KUDLÁČEK, J., SVOBODA, J., and ZOUBEK, M. Technologie oprav protikorozní ochrany menších částí historických ocelových konstrukcí s využitím žárového zinkování. In: *Sborník přednášek 26. konference žárového zinkování*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2021, p. 74-85. vol. 1. ISBN 978-80-905298-9-2.
- [6B] TATÍČKOVÁ, Z., KREIBICH, V., KUDLÁČEK, J., and ZOUBEK, M. Design and mechanical properties of new leuco-dye base thermochromic paint. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2021*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021, p. 285-291. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [7B] HUSAIN, H., HAZDRA, Z., ZOUBEK, M., and KUDLÁČEK, J. Risk factors for B4C composite utilization in tribological processes. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2021*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021, p. 92-97. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [8B] KUDLÁČEK, J., SVOBODA, J., and ZOUBEK, M. Volba opravy PKO demontovatelných částí ocelových konstrukcí. In: *17. Mezinárodní odborný*

- seminář "Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav". Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021, p. 69-74. ISBN 978-80-87583-34-0.
- [9B] BEJBLÍK, J., ZOUBEK, M., and KUDLÁČEK, J. Application of paints to slots of steel structures. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020, p. 21-23. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [10B] KŠIŇANOVÁ, S., and ZOUBEK, M. Influence of oxide layers on fluorescence properties of light metals. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020, p. 90-97. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [11B] KUDLÁČEK, J.; KREIBICH, V.; ZOUBEK, M.; SVOBODA, J. Stanovení účinnosti odmašťování ve vodných alkalických roztocích. Povrcháři, 2020, roč. 13, č. 5, s. 15-18. ISSN 1802-9833.
- [12B] SVOBODA, J., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M. a KREIBICH, V. Odstranění korozních produktů a starých nátěrových systémů ocelových konstrukcí v místech s těžkou dostupností. In: Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav 16. Mezinárodní odborný seminář. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019, s. 44-50. ISBN 978-80-87583-31-9.
- [13B] SVOBODA, J., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., and RYJÁČEK, P. Experimental verification of removal of corrosion products and old paint systems of steel structures in places with difficult accessibility. In: International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2019 Belgrade – Proceedings. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2019, p. 39-46. ISSN 0184-9069.
- [14B] KUKLÍK, V., KUDLÁČEK, J., and ZOUBEK, M. Případové studie: Realizace projektu s duplexním systémem. In: Sborník přednášek 24. konference žárového zinkování. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2018, p. 99-107. ISBN 978-80-905298-7-8.
- [15B] KUKLÍK, V., KUDLÁČEK, J., and ZOUBEK, M. Mýtus o navodíkování oceli mořením při žárovém zinkování. In: Sborník přednášek KONSTRUKCE 2018. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí (ČAOK), 2018, p. 25-30. ISBN 978-8090535657.
- [16B] KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., KREIBICH, V., SLOVINEC, M., and MATAS, F. Nátěrové hmoty pro dočasnou protikorozní ochranu. In: Sborník XI. Konference pigmenty a pojiva. Pardubice: CHEMAGAZÍN s. r. o, 2018, p. 101-106. ISBN 978-80-906269-3-5.

- [17B] ZOUBEK, M., KREIBICH, V. Navrhování konstrukcí z oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi typu Atmofix. In: *Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav / 15. Mezinárodní odborný seminář – Sborník přednášek*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018, p. 14-19. ISBN 978-80-87583-28-9.
- [18B] ZOUBEK, M., KREIBICH, V. Podmínky pro spolehlivý provoz konstrukcí z patinujících ocelí. In: *Sborník 56. celostátní konference OCELOVÉ KONSTRUKCE 2018*. Ostrava – Zábřeh: SEKURKON, 2018. ISBN 978-80-02-02801-7.
- [19B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., MATAS, F. Ověření doby zasychání metodou s použitím mechanického záznamu průběhu zasychání pro rychleschnoucí nátěrové hmoty. *Občasník Povrcháři*. 2018, (1), 3-5. ISSN 1802-9833.
- [20B] ZOUBEK, M., KREIBICH, V. Navrhování konstrukcí z oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi typu Atmofix. *Občasník Povrcháři*. 2018, (8), 4-8. ISSN 1802-9833.
- [21B] HORNÍK, J., ZUNA, P., ZOUBEK, M., SVOBODOVÁ, M., CHMELA, T. Analysis of Corrosion Attack on Kaplan Turbine Blades. In: *Contribution of Metallography to Production Problem Solutions II*. Zurich: Trans Tech Publications, 2017, p. 149-155. *Solid State Phenomena*, vol. 270. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1241-4.
- [22B] ZOUBEK, M., KRČILOVÁ, S. Unikátní dílo připomínající tragickou událost. *Občasník Povrcháři*. 2017, 2017(1), ISSN 1802-9833.
- [23B] ZOUBEK, M. Destruktivní měření tloušťky vícevrstevných nátěrových systémů. *Občasník Povrcháři*. 2017, 2017(1), 10-12. ISSN 1802-9833.
- [24B] ZOUBEK, M., KREIBICH, V. I koroze může být krásná. *Občasník Povrcháři*. 2017, 2017(7), 2-4. ISSN 1802-9833.
- [25B] KUKLÍK, V., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., SVOBODA, J. Origin of Russet Coloring of Hot-Dip Galvanized Coating. In: *23rd Hot Dip Galvanizing Conference – Proceedings*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2017, pp. 64-67. ISBN 978-80-905298-6-1.
- [26B] KOPŘIVA, A., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., CHÁBERA, P. The Device For Oil Film Coating. In: *Book of Proceedings from Conference Technological Forum 2017*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2017, pp. 211-214. ISBN 978-80-87583-22-7.

- [27B] KOUDELKOVÁ, L., ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KUKLÍK, V. Abrasion Resistance Of Hot Dip Galvanized Zinc Coatings With Tin Addition. In: Technological Forum 2017 Book of Proceedings. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017, pp. 214-219. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [28B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., TESAŘÍKOVÁ, P. Resistance of Aluminum Alloys in an Environment With Increased Concentration Of Chlorides. In: Book of Proceedings from Conference Technological Forum 2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2017, pp. 238-241. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [29B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KOPŘIVA, A., CHÁBERA, P. New Possibilities Of Detecting Contaminants Using UV-VSI Spectroscopy. In: Book of Proceedings from Conference Technological Forum 2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2017, pp. 220-224. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [30B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., MALÁ, R., and MATAS, F. Evaluation of Drying Time During Film Formation of Fast Drying Organic Coatings Using Mechanical Recorder. In: Sborník X. KONFERENCE PIGMENTY A POJIVA. Pardubice: CHEMAGAZÍN s. r. o, 2017, pp. 149-150. ISBN 978-80-906269-2-8.
- [31B] KUKLÍK, V., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., and SVOBODA, J. Původ červenohnědého zbarvení povlaku žárového zinku. In: Sborník přednášek 23. konference žárového zinkování. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2017, s. 64-67. ISBN 978-80-905298-6-1.
- [32B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., KOPŘIVA, A., and CHÁBERA, P. Hodnocení účinnosti procesu odmašťování. In: 49. Celostátní aktiv galvanizérů: Jihlava 2016: sborník přednášek. Jihlava: Česká společnost pro povrchové úpravy, 2016.
- [33B] KOUDELKOVÁ, L., ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., and KUKLÍK, V. Odolnost proti otěru povlaků žárového zinku s přidavkem cínu. MM Průmyslové spektrum, 12/2016(12), 8-138. ISSN 1212-2572.
- [34B] ZOUBEK, M., KUDLÁČEK, J., and CHÁBERA, P. Detection of contamination for degreasing baths and service fluids. In: Crfi CoRrosion Forum Israel 2016. Tel Aviv: Association of Engineers in Israel, 2016.
- [35B] SVOBODA, J., KUDLÁČEK, J., ZOUBEK, M., MAREŠOVÁ, D., and KOLÁŘ, M. Nátěrové hmoty s vysokou korozní odolností pro všeobecné využití. Občasník Povrcháři, 4-8. ISSN 1802-9833.

- [36B] ZOUBEK, M., KOPŘIVA, A., and CHÁBERA, P. Efektivní způsob volby odmašťovacího prostředku. MM Průmyslové spektrum, 12/2015. ISSN 1212-2572.
- [37B] RYJÁČEK, P.; ROTTER, T.; STANČÍK, V.; MACHO, M.; VŮJTĚCH, J.; ŠTĚPÁN, J.; KRAMOLIŠ, F.; POSPÍŠIL, M. et al. Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví. Praha: CTU. Faculty of Civil Engineering, 2022. ISBN 978-80-01-06990-5.

9.3 Aplikované výstupy související s disertační prací

[1FVZ] KUDLÁČEK, J.; ZOUBEK, M.; KREIBICH, V.; DRAŠNAR, P.

Nová otěruvzdorná nátěrová hmota s hořčikovými částicemi

[Funkční vzorek] 2019.

9.4 Aplikované výstupy přímo nesouvisející s disertační prací

[2FVZ] KUDLÁČEK, J.; LERACH, O.; ZOUBEK, M.; SVOBODA, J. Tryska pro čištění

úzkých štěrbin ocelových konstrukcí [Funkční vzorek] 2021.

[1UZV] RYJÁČEK, P.; KUDLÁČEK, J.; SVOBODA, J.; ZOUBEK, M.; ŠINÁGL, V.

Tryska pro vysokotlaké tryskání vodním paprskem do obtížně přístupných míst.

Česká Republika. Užitený vzor CZ 34780. 2021-01-19.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 – Segmentace trhu v Asijsko-pacifickém regionu dle objemu spotřeby nátěrových hmot v roce 2018 [13].....	15
Obrázek 2 – Celkové rozdělení typů nátěrových hmot v Asijsko-pacifickém regionu podle objemu spotřeby v letech 2008, 2013 a 2018 [13].....	16
Obrázek 3- vývoj emisí VOC v ČR v letech 2010 až 2020 [17]	17
Obrázek 4 – podíl sektorů uvedených na obrázku 3 na celkových emisích nemetanových těkavých organických látek (NMVOC) [17]	17
Obrázek 5 – Poměr objemů pigmentů a pojiva při zvyšování OKP [3 p. 19] a – nízká hodnota OKP, b – vyšší hodnota OKP, c – hodnota OKP = KOKP, d – hodnota OKP > KOKP	22
Obrázek 6 – Průběh povrchové rezistance v závislosti na podílu grafitu v povlaku [35 p. 1320]	24
Obrázek 7 – Schéma vývoje mikrostruktury kompozitního povlaku na bázi latexu s vodivými částicemi [39].....	26
Obrázek 8 – vliv podílu částic ZrO ₂ na povrchovou rezistivitu povlaku (vlevo), vliv podílu částic ZrO ₂ na jejich průměrnou distribuci (vpravo) [40].....	27
Obrázek 9 – průběh odtrhového napětí (přilnavosti povlaku) v závislosti na podílu částic ZrO ₂ v povlaku [40].....	28
Obrázek 10 – Snímky původních MWCNT (vlevo) a modifikovaných MWCNT (vpravo) pořízené skenovacím elektronovým mikroskopem [31].....	29
Obrázek 11 – Průběh povrchové rezistivity v závislosti na podílu MWCNT v UV vytvrditelném povlaku (vlevo), vliv doby mletí v kulovém mlýnu na výslednou povrchovou rezistivitu povlaku obsahujícího 2,0 hm. % MWCNT (vpravo) [31].....	29
Obrázek 12 – Morfologie povrchu UV vytvrditelného povlaku obsahujícího 2,0 hm.% MWCNT (vlevo), zvětšený detail oblasti b (vpravo) [31].....	30
Obrázek 13 – mikrosnímek části UV vytvrditelného povlaku s podílem 2,0 hm. % MWCNT (vpravo) a přiblížené snímky oblastí b (uprostřed) a c (vpravo) [31].....	30
Obrázek 14 – Znárodnění dispergace a distribuce plniva v matrici a jejich vliv na elektrickou vodivost povlaku [65 p. 8]	32
Obrázek 15 – Běžně používané postupy dispergace nanočástic ve vodných roztocích [46 p. 519]	32
Obrázek 16 – Dosažitelná velikost kapek v systému dispergace kapalina – kapalina v závislosti na disipovaném měrném příkonu jednotlivých míchadel [6 p. 500]	33

Obrázek 17 – Znázornění tokových profilu v mechanicky míchaných nádobách [43 p. 107]	34
Obrázek 18 – Příklady různého provedení lopatkových míchadel [47 p. 145]	37
Obrázek 19 – Zubové míchadlo [6 p. 358]	37
Obrázek 20 – Princip koloidního mlýnu (a), radiální míchadlo rotor – stator (b), schéma hydrodynamických procesů v radiálním míchadle rotor – stator [6 p. 483]	39
Obrázek 21 – míchadla Visco Jet (A, B, C) a naznačení hydrodynamických procesů při použití kuželového elementu (D) [53]	40
Obrázek 22 – Schéma tvorby emulze pomocí akustické kavitace ultrazvukového míchadla [55 p. 36]	41
Obrázek 23 – Sonda pro stanovení povrchové nebo plošné rezistance (vlevo), sonda pro stanovení odporu metodou mezi dvěma body (vpravo) [57 p. 12, 13]	45
Obrázek 24 – Schéma zapojení elektrod při měření povrchové rezistance (vlevo nahoře), objemové rezistance (vlevo dole) a měření mezi dvěma body (vpravo) [57 p. 14, 15, 17]	46
Obrázek 25 – Sonda pro měření tvarově složitých a malých předmětů [57 p. 20] (nahore), zkušební vzorek s přiloženými paralelními elektrodami (dole) [90 p. 14]	46
Obrázek 26 – Zapojení elektrod v případě čtyřbodové metody [61 p. 112]	47
Obrázek 27 – Povlak LV EPS 620 obsahující 2 hm. % sazí – před (vlevo) a po (vpravo) korozní zkoušce oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře, doba expozice 240 hod [9A]	54
Obrázek 28 – Vzhled povrchu povlaků různě dispergované nátěrové hmoty LV EPS 620 obsahující grafit: dispergace stator-rotor vzorek G8SRVZ1 (vlevo), dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru (vlevo) [13A]	57
Obrázek 29 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po 240 hodinách zkoušky v neutrální solné mlze [15A]	61
Obrázek 30 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po 240 hodinách zkoušky v oxidem siřičitým s povšechnou kondenzací [15A]	62
Obrázek 31 – Vzhled jednotlivých povlaků LV EPS 620 – MWCNT po zkoušce Machu Test [15A]	63
Obrázek 32 – Delaminace a prokorodování povlaků v okolí umělého defektu po zkoušce v neutrální solné mlze v délce trvání 240 hodin LV EPS 620 (nahore), LV EPS 620 + 2 hm. % MWCNT (dole) [15A]	64
Obrázek 33 – Mikroskopické snímky lomových ploch povlaků LV EPS 620 s příměsí MWCNT 1,0 hm. % (patrná plynná složka v povlaku) [14A]	69

Obrázek 34 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 1 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (uprostřed) a po expozici a odstranění povlaku (vpravo) [25A]	75
Obrázek 35 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (uprostřed) a po expozici a odstranění povlaku (vpravo) [25A]	75
Obrázek 36 – Slitina Al 2024 – T3 opatřená povlakem LV EPS 620 + 8 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]	76
Obrázek 37 – Slitina Al 2024 – T3 opatřená povlakem LV EPS 620 + 49 hm. % Mg typ 2 před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]	76
Obrázek 38 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 70 hm. % Zn před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]	77
Obrázek 39 – Ocel S355J2 opatřená povlakem nátěrové hmoty LV EPS 620 + 49 hm. % Mg před (vlevo) a po expozici v solné mlze (vpravo) [25A]	77
Obrázek 40 – Mikroskopický snímek příčného řezu povlakem LV EPS 620 + 49 hm. % Mg (nahore) a LV EPS 620 + 8 hm. % Mg (dole)	78
Obrázek 41 – Typický vzhled vytvořených povlaků CP05 obsahujících ošetrivzdorné částice 5 h, % Mg (vlevo), 10 hm. % Mg (uprostřed) a 5 hm. % Al ₂ O ₃ (vpravo).....	80
Obrázek 42 – Profil povrchu povlaku CP05 + 10 hm. % Mg nasnímaný pomocí konfokálního mikroskopu po 1 000 cyklech zkoušky abrazivní odolnosti na zařízení Taber Abraser (oblast vyznačená fialovou elipsou)	82
Obrázek 43 – Povlak nátěrové hmoty CP05: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo).....	83
Obrázek 44 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 5 hm. % Mg: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)	83
Obrázek 45 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 10 hm. % Mg: před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)	84
Obrázek 46 – Povlak nátěrové hmoty CP05 + 5 hm. % Al ₂ O ₃ : před expozicí v solné mlze (vlevo), po expozici (uprostřed) a koroze v okolí řezu po odstranění povlaku (vpravo)	84
Obrázek 47 – Rozdílný stupeň dispergace a distribuce částic v povlaku CHS EPOXY 220 V 55 + 0,3 hm. % PEDOT v závislosti na použité metodě a parametrech dispergace: míchadlo rotor – stator (vlevo), míchadlo Visco Jet (vpravo) [4A]	88

Obrázek 48 – Projevy bleskové koroze ocelového základního materiálu u povlaků CHS EPOXY 220 V 55 s podílem 0,6 hm. % PEDOT (vlevo), 0,8 hm. % PEDOT (uprostřed) a 1,0 hm. % PEDOT (vpravo) [4A]	89
Obrázek 49 – Jednotlivé varianty povlaků vodou ředitelných antistatických nátěrových hmot na bázi CP55 [11A]	94
Obrázek 50 – Schéma dispergace pomocí ultrazvukového homogenizátoru při současném míchání vsádky lopatkovým míchadlem [1A].....	95
Obrázek 51 – Typický výsledek zkoušky hloubením u povlaků CP55 podílem 1,0 hm. % MWCNT (vlevo), pórovitost povlaku vytvořeného na skle (vpravo)	98
Obrázek 52 – Charakteristický stav vzorků CP55 (vlevo) a CP55 + 1,0 hm. % MWCNT (varianta 9) po zkoušce odolnosti vůči působení vlhkosti v prostředí kondenzace vody....	98
Obrázek 53 – Povrch povlaků antistatických nátěrových hmot CP55 + 1,0 hm. % MWCNT připravených pomocí ultrazvukového míchadla s nuceným promícháváním vsádky	100
Obrázek 54 – Snímky povrchu povlaku varianty č.1 – CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT vyhotovené pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 300.....	101
Obrázek 55 – SEM snímky povlaků CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT: varianta č. 3 (vlevo), varianta č. 11 (vpravo)	101
Obrázek 56 – Povlak epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty LV EPS 620 s obsahem 2 hm. % vodivých sazí	105
Obrázek 57 – Povlak epoxidové dvousložkové antistatické nátěrové hmoty LV EPS 620 s obsahem 8 hm. % grafitu	106
Obrázek 58 – Povlak vodou ředitelné samozákladující antistatické nátěrové hmoty CP55 + 1,0 hm. % MWCNT.....	107
Obrázek 59 – Povlak vodou ředitelné samozákladující antistatické nátěrové hmoty CP55 + 8,0 hm. % grafitu	108
Obrázek 60 – Povlak antikorozi ní nátěrové hmoty LV EPS 620 + 49 hm. % Mg.....	109
Obrázek 61 – Povlak otěruvzdorné nátěrové hmoty LV EPS 620 + 1,0 hm. % MWCNT	110
Obrázek 62 – Povlak otěruvzdorné a protiskluzové nátěrové hmoty CP05 + 10 hm. % Mg	111

11. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Souhrn parametrů dispergace a výsledků jednotlivých zkoušek povlaků nátěrových hmot LV EPS 620 s 8 hm. % grafitu [13A]	55
Tabulka 2 – Souhrn parametrů dispergace a výsledků jednotlivých zkoušek povlaků nátěrových hmot LV EPS 620 s 1,0 hm. % MWCNT [14A]	66
Tabulka 3 – nátěrové hmoty na bázi CP55 obsahující vodivé částice dispergované pomocí míchadla rotor – stator [12A].....	91
Tabulka 4 – Metody a parametry dispergace jednotlivých hmot na bázi CP55 s obsahem grafitu a MWCNT a výsledný povrchový odpor vytvořených povlaků [12A].....	93
Tabulka 5 – Hodnoty lesku, elasticity a adheze jednotlivých povlaků na bázi nátěrové hmoty CP55 [12A].....	93
Tabulka 6 – Metody a parametry dispergace vodou ředitelné nátěrové hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT [1A]	96

12. Seznam grafů

Graf 1 – Přehled součtu tržeb 10 nejúspěšnějších výrobců nátěrových hmot v období 2018 – 2022 [8, 9, 10, 11, 12].....	14
Graf 2 – Hodnoty povrchového odporu vytvořených povlaků na bázi epoxidové nátěrové hmoty LV EPS 620.....	53
Graf 3 – Průběhy průměrných hmotnostních úbytků jednotlivých povlaků na bázi epoxidových pryskyřic obsahujících 0,0 a 0,5 hm. MWCNT [19A].....	59
Graf 4 – Hodnoty odtrhového napětí pro jednotlivé povlaky LV EPS 620 obsahující MWCNT v podílech 0,0; 0,5; 1,0 a 1,5 hm. % před a po korozních testech [15A]	60
Graf 5 – Průběh hmotnostních úbytků v závislosti na počtu zátěžných cyklů při zkoušce abrazivní odolnosti povlaku nátěrové hmoty LV EPS 620 a různě dispergovaných nátěrových hmot LV EPS 620 – 1,0 hm. % MWCNT [14A].....	70
Graf 6 – Průběh hmotnostních úbytků povlaků nemodifikovaných nátěrových hmot [22A]	81
Graf 7 – Průběh hmotnostních úbytků povlaků na bázi CP05 s příměsí Mg a Al ₂ O ₃ [22A]	81
Graf 8 – Povrchový odpor povlaků CHS EPOXY 220 V 55 v závislosti na typu použitého vodivého plniva, jeho koncentraci a metodě dispergace	88
Graf 9 – Hodnoty lesku měřeného pod úhlem 60° pro povlaky antistatických nátěrových hmot CP55 a CP55 + 1,5 hm. % MWCNT [1A].....	98
Graf 10 – Hodnoty povrchového odporu povlaků na bázi vodou ředitelné hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT [1A]	99
Graf 11 – Hodnoty povrchového odporu povlaků na bázi vodou ředitelné hmoty CP55 s podílem 1,0 hm. % MWCNT (měření mezi body ČSN EN 61340-2-3 ed.2. [57])[A1]...	99

13. Seznam příloh

Příloha A – Technické listy