

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. Adam Plachý

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO–TECHNOLOGICKÁ
ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE MAKROMOLEKULÁRNÍCH
LÁTEK
ORGANICKÉ POVLAKY A NÁTĚROVÉ HMOTY

INTUMESCENTNÍ POVLAKY PRO PROTIPOŽÁRNÍ OCHRANU
OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Adam Plachý

2024

UNIVERZITY OF PARDUBICE
FACULTY CHEMICAL TECHNOLOGY
INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF
MACROMOLECULAR MATERIALS
DEPARTMENT OF PAINTS AND ORGANIC COATINGS

INTUMESCENT COATING FOR FIRE PROTECTION OF STEEL
CONSTRUCTIONS

THESIS

Bc. Adam Plachý

2024

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Plachý**
Osobní číslo: **C22330**
Studijní program: **N0531A130053 Organické povlaky a nátěrové hmoty**
Téma práce: **Intumescentní povlaky pro protipožární ochranu ocelových konstrukcí**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na téma zpěňovatelné nátěrové hmoty a volba pojiv a pigmentů pro tyto nátěrové hmoty.
- Vypracujte přehled postupů a zkoušek pro hodnocení zpěňovatelných NH, se zaměřením na hodnocení protipožární odolnosti.
- Charakterizujte vybraná pojiva, plniva a pigmenty vhodné pro tyto typy nátěrových hmot.
- Na základě literárních poznatků navrhnete optimální směrnou formulaci zpěňovatelné NH a popište fyzikální a chemické děje v NH při tepelné zátěži.
- Zvolte čtyři typy pojiv a připravte z nich nátěrové hmoty ve variantě bez obsahu antikorozního pigmentu a za přítomnosti antikorozního pigmentu.
- Stanovte změny ve vlastnostech zpěňovatelných NH po termické zátěži při zvolených teplotách výpalu. Stanovte mechanické vlastnosti jednotlivých připravených nátěrových filmů. Provedte zkoušky v solné a kondenzační komoře a porovnejte antikorozní vlastnosti NH s přítomností a bez přítomnosti antikorozního pigmentu ve formulaci.
- Stručně popište nové poznatky, závěry, přínosy práce pro vědu a praxi. Závěrem doporučte, do jakého typu prostředí lze připravené nátěry doporučit.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Andréa Kalendová, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek
Konzultant diplomové práce: **Dr. Ing. Petr Antoš, Ph.D.**
VŠCHT Technopark Kralupy nad Vltavou
Datum zadání diplomové práce: **22. prosince 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2024

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnici Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

jméno a příjmení

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. Číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce paní prof. Ing. Andrée Kalendové Dr. za odborné rady a pomoc v průběhu vypracovávání.

Dále děkuji panu Dr. Ing. Petru Antošovi, Ph.D. za vedení při experimentální části.

Děkuji firmě Perstorp Specialty Chemicals AB za poskytnutí vzorku dipentaerythritolu a panu Jaroslavu Palcrovi z firmy Adichem za poskytnutí vzorků ostatních intumescentních plniv.

Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu.

Anotace

Tato práce se zabývá přípravou a testováním protipožárních zpěňovacích povlaků na ocelové konstrukce. Organické intumescentní nátěry jsou tenkovrstvé zpěňovatelné nátěry, které jsou založeny na kyselém katalyzátoru (např. polyfosforečnan amonný), organických látkách s vysokým obsahem uhlíku (např. pentaerytritol) a nadouvadle (např. melamin) a to jak ve vodou ředitelných, tak i rozpouštědlových pojivech.

V práci byl zkoumán poměr třech základních složek zpěňovatelných nátěrů (donor uhlíku, kyselý katalyzátor a nadouvadlo) v různém typu pojiva, kterými byla vodou ředitelná epoxidová disperze, vodou ředitelná alkydové disperze a rozpouštědlová epoxyesterová pryskyřice. Byl zjišťován vliv přídavku fosforečnanu zinečnatého na kvalitu ochranné vrstvy a na ochranné působení povlaku během jeho životnosti.

U protipožárních zpěňovatelných hmot byly testovány fyzikálně mechanické vlastnosti (ohyb, úder, hloubení, přilnavost, tvrdost) a antikorozi vlastnosti v solné a kondenzační komoře. Navíc byly provedeny testy ohnivzdornosti, byla hodnocena kvalita a síla zpěněné vrstvy. Pro analýzu připravených nátěrových hmot a vzniklých uhlíkatých vrstev byla použita infračervená spektroskopie a také byly použity metody termické analýzy TG a DSC.

Klíčová slova: Zpěňovatelné nátěrové hmoty, požární ochrana, organický povlak, antikorozi účinnost organických povlaků

Summary

This thesis discusses the preparation and testing of fire-retardant intumescent coatings for steel structures. Organic intumescent coatings are thin-layer foaming coatings based on an acidic catalyst (e.g., ammonium polyphosphate), organic substances with high carbon content (e.g., pentaerythritol), and a blowing agent (e.g., melamine) in both water-based and solvent-based binders. The research examined the ratio of three basic components of foaming coatings (carbon donor, acidic catalyst, and blowing agent) in different types of binders, including water-based epoxy dispersion, water-based alkyd dispersion, and solvent-based epoxy ester resin. The influence of adding zinc phosphate on the quality of the protective layer and the protective properties of the coating during its lifespan was investigated.

For fire-retardant intumescent coatings, physical-mechanical properties (flexibility, impact resistance, adhesion, hardness) and anticorrosive properties in salt spray and humidity chambers were tested. Additionally, fire resistance tests were conducted, and the quality and strength of the foamed layer were evaluated. Infrared spectroscopy was used for the analysis of prepared coatings and carbon layers, along with methods of thermal analysis TG and DSC.

Keywords: foaming coatings, fire protection, organic coating, anticorrosive effectiveness of organic coatings

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled plynotvorných sloučenin	32
Tabulka 2: Formulace pojiv na základě vodou ředitelné styren akrylátové vodné disperze Axilat 2802A	49
Tabulka 3: Formulace pojiv na základě alkydové pryskyřice CHS-HYDROSPOL D870 F	49
Tabulka 4: Formulace pojiv na základě epoxidové pryskyřice CHS-Epoxy 200 V 55	50
Tabulka 5: Formulace pojiv na základě epoxysterové pryskyřice Worleé Dur D46.....	50
Tabulka 6: Klasifikace stupňů přilnavosti podle normy ČSN EN ISO 2409.....	54
Tabulka 7: Klasifikace typu lomu podle ČSN EN ISO 4624	55
Tabulka 8: Stupně korozní agresivity atmosféry a příklady typických prostředí podle normy ČSN EN ISO 12944-2	59
Tabulka 9: Zkušební postupy pro nátěrové systémy pro různé stupně korozní atmosféry normy ČSN EN ISO 12944-6.....	59
Tabulka 10: Charakterizace pigmentů a plniv	60
Tabulka 11: Hodnotky jemnosti tření nátěrových hmot	60
Tabulka 12: Hodnoty stanovení relativní povrchové tvrdosti nátěrových filmů v závislosti na čase....	61
Tabulka 13: Hodnoty mechanické odolnosti nátěrových filmů po zkouškách hloubením, ohybem, úderem a mřížkovou zkouškou. DFT = $120 \pm 10 \mu\text{m}$	62
Tabulka 14: Hodnoty a charakteristika odtrhů intumescentních nátěrových filmů. DFT = $500 \pm 20\mu\text{m}$	63
Tabulka 15: Výsledky charakterizace zpěněné vrstvy	66
Tabulka 16: Hodnoty korozní odolnosti intumescentních nátěrových povlaků po 168 hodinách v atmosféře s obsahem 5 % NaCl. DFT = $120 \pm 10\mu\text{m}$	81
Tabulka 17: Hodnoty korozní odolnosti intumescentních nátěrových povlaků po 168 hodinách v atmosféře s povšechnou kondenzací. DFT = $120 \pm 10\mu\text{m}$	82

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zpěňovací proces [19]	24
Obrázek 2: Pentaerytritol–difosfátová struktura [18].....	30
Obrázek 3: Molekulová struktura melaminu, melonu a melemu. [30].....	33
Obrázek 4: Struktura zesítěné intumescentní pryskyřice[20].....	38
Obrázek 5: Příklady a) správně vytvořené zpěněné vrstvy, b) nesprávně vytvořené zpěněné vrstvy [20]	39
Obrázek 6: Křivky hoření používané k simulaci požáru [49]	42
Obrázek 7: Umístění pece a vzorku.....	56
Obrázek 8: Fotografické standardy puchýřků podle normy ASTM D 714–78	58
Obrázek 9 Fotografické standardy pro vyhodnocení stupně koroze podle ASTM D 610-85.....	58
Obrázek 10: Výsledek testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi styren akrylátové disperze (AKR).....	64
Obrázek 11: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi epoxidové pryskyřice (EPOX)	64
Obrázek 12: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi alkydové emulze (ALK)	65
Obrázek 13: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi epoxyesterové pryskyřice (EST).....	65
Obrázek 14: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1	67
Obrázek 15: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1/ZP	67
Obrázek 16: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1	68
Obrázek 17: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1/ZP	68
Obrázek 18: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1	69
Obrázek 19: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1/ZP.....	69
Obrázek 20: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1	70
Obrázek 21: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1/ ZP.....	70
Obrázek 22: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1	71
Obrázek 23: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1/ZP.....	71
Obrázek 24: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/1,5:1	72
Obrázek 25: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/1,5:1/ZP	72
Obrázek 26: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1	73
Obrázek 27: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1/ZP	73
Obrázek 28: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1	74
Obrázek 29: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1/ZP	74
Obrázek 30: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1	75

Obrázek 31: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1/ZP	75
Obrázek 32: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1	76
Obrázek 33: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1/ZP.....	76
Obrázek 34: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1	77
Obrázek 35: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1/ZP.....	77
Obrázek 36: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1	78
Obrázek 37: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1/ZP.....	78
Obrázek 38: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/ 3:1	79
Obrázek 39: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/ 3:1/ZP.....	79
Obrázek 40: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1	80
Obrázek 41: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1/ZP	80
Obrázek 42: Příklad adhezního lomu mezi podkladem a první vrstvou u epoxyesterové pryskyřice... 87	87
Obrázek 43: Příklad separace zpěněné vrstvy od podkladu u epoxyesterové pryskyřice EST/3:1 při 500°C.....	89
Obrázek 44: Příklad stékání taveniny u styren akrylátové vodné disperze AKR/1,5:1 při teplotě 700 °C	91

Seznam rovnic

Rovnice 1: Výroba pentaerythritolu [20].....	27
Rovnice 2: Tepelná degradace polyfosfátu amonného [27]	30
Rovnice 3: Reakce oxidu titaničitého s polyfosfátem amonným	35
Rovnice 4: Uvolnění anorganické kyseliny [38]	37
Rovnice 5: Karbonizace zdrojů uhlíku [38]	37
Rovnice 6: Tepelný rozklad melaminu [38]	37
Rovnice 7: Tepelný rozklad pentaerythritolu [39].....	38
Rovnice 8: Vznik melamin aldehydové pryskyřice [39]	38
Rovnice 9: Výpočet intumescentního koeficientu.....	42
Rovnice 10: Vývoj teploty celulózové křivky [49]	42
Rovnice 11: Výpočet olejového čísla	48
Rovnice 12: Výpočet KOKP	49
Rovnice 13 Výpočet relativní povrchové tvrdosti nátěrového filmu.....	52
Rovnice 14: Výpočet odtrhové pevnosti	55

Seznam použitých zkratk, symbolů a cizojazyčných názvů

APP	ammonium polyfosfát
MEL	melamin
PER	pentaerythritol
DPER	dipentaerythritol
DFT	suchá tloušťka filmu
KOKP	kritická objemová koncentrace pigmentu
V_{oleje}	objem oleje [ml]
$m_{pigmentu}$	hmotnost pigmentu [$g \cdot cm^{-3}$]
ρ_{oleje}	hustota oleje [$0,93 g \cdot cm^{-3}$]
EGBE	ethylenglykol butyl ether
MEL	melamin
ZP10	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$
AKR	styren akrylová vodná disperze
ALK	vodná emulze alkydové pryskyřice
EPOX	vodná disperze epoxidové pryskyřice
EST	epoxyesterová pryskyřice
τ	relativní povrchová tvrdost [%]
t_1	počet kmitů vzorku
t_2	počet kmitů standardu
C_{int}	intumescentní koeficient
h_s	tloušťka zpěněné vrstvy [mm]
h_0	původní tloušťka nátěru [mm]
σ	odtrhová pevnost [MPa]
F_m	maximální odtrhová síla [N]
d	zkušebního tělíska [mm]
TGA	termogravimetrická analýza
DSC	diferenční skenovací kalorimetrie
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
T	teplota plynů [$^{\circ}C$]
t	čas [min]

Obsah

1	Úvod.....	18
2	Současný stav problematiky	19
2.1	Ochrana oceli	19
2.2	Typy požární ochrany.....	19
2.2.1	Prvky pasivní požární ochrany	20
2.3	Protipožární nátěrové systémy	23
2.3.1	Zábranové nátěrové systémy	23
2.3.2	Sublimující nátěrové systémy.....	24
2.4	Zpěňovatelné (intumescentní) nátěrové hmoty	24
2.4.1	Složení intumescentních systémů	24
2.4.2	Mechanismus zpěňovacího nátěrového systému	37
2.4.3	Pojiva pro intumescentní nátěrové hmoty	39
2.5	Metody používané pro hodnocení protipožárních hmot	40
2.5.1	Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla (ČSN EN ISO 4589-2).....	40
2.5.2	Termogravimetrická analýza (TG).....	40
2.5.3	Diferenciální termická analýza (DTA)	41
2.5.4	Zkoušky požární odolnosti (ČSN EN 1363-1)	41
2.5.5	Intumescentní koeficient.....	41
2.5.6	Testy ohnivzdornosti.....	42
2.5.7	Charakterizace zpěněné vrstvy	43
3	Experimentální část	44
3.1	Cíle práce	44
3.2	Specifikace surovin.....	44
3.2.1	Použité typy pojiv	44
3.2.2	Seznam použitých pigmentů.....	45
3.2.3	Další použité chemikálie.....	46
3.2.4	Přístrojové vybavení	47
3.3	Stanovení fyzikálních vlastností pigmentů	48
3.3.1	Stanovení hustoty pigmentů	48
3.3.2	Stanovení spotřeby oleje a kritické objemové koncentrace pigmentu (KOKP)	48
3.4	Příprava nátěrových hmot	49
3.4.1	Formulace nátěrových hmot	49
3.4.2	Příprava nátěrových hmot.....	50
3.5	Příprava zkušebních vzorků	50
3.5.1	Příprava zkušebních vzorků na skleněné panely	50
3.5.2	Příprava zkušebních vzorků pro mechanické testy	51

3.5.3	Příprava zkušebních vzorků pro odtrhovou zkoušku, pro hodnocení zpěněné vrstvy a pro test ohnivzdornosti	51
3.5.4	Příprava zkušebních vzorků pro korozní testy.....	51
3.6	Metody hodnocení vlastností nátěrových hmot	51
3.6.1	Zkouška stanovení jemnosti tření ČSN EN ISO 1524.....	51
3.7	Metody hodnocení fyzikálně mechanických vlastností nátěrových filmů na skle a na oceli	52
3.7.1	Měření tloušťky nátěrového filmu (ČSN ISO 2808).....	52
3.7.2	Zkouška tvrdosti nátěru tlumením kyvadla (ČSN EN ISO 1522)	52
3.7.3	Zkouška rychlou deformací (odolnost proti úderu) (ČSN EN ISO 6272-2).....	52
3.7.4	Zkouška ohybem (na válcovém trnu) (ČSN EN ISO 1519)	53
3.7.5	Mřížková zkouška (ČSN EN ISO 2409)	53
3.7.6	Zkouška hloubením ČSN EN ISO 1520.....	54
3.7.7	Odtrhová zkouška přilnavosti (ČSN EN ISO 4624).....	54
3.8	Metody hodnocení a testování nátěrových hmot	55
3.8.1	Test ohnivzdornosti.....	55
3.8.2	Charakterizace zpěněné vrstvy	56
3.8.3	Infračervená spektroskopie.....	56
3.8.4	Termické metody (TGA, DSC).....	56
3.9	Metody hodnocení vlastností nátěrových filmů pomocí cyklických korozních zkoušek	56
3.9.1	Korozní zkouška solnou mlhou	56
3.9.2	Korozní zkouška s povšechnou kondenzací	57
3.10	Hodnocení korozních zkoušek.....	57
3.10.1	Metoda hodnocení stupně puchýřovatení dle normy ASTM D 714-87.....	57
3.10.2	Metoda hodnocení koroze v ploše podle normy ASTM D 610-85.....	58
3.10.3	Určení předpokládané životnosti nátěru v korozních prostředích.....	58
4	Výsledky a hodnocení	60
4.1	Výsledky charakterizování vlastností pigmentů, plniv a připravených nátěrových hmot ...	60
4.2	Výsledky hodnocení fyzikálně mechanických vlastností nátěrových filmů na skle	61
4.2.1	Výsledky zkoušky tvrdosti nátěru tlumením kyvadla.....	61
4.3	Výsledky hodnocení mechanických vlastností nátěrových povlaků na oceli	61
4.4	Výsledky odtrhové zkoušky přilnavosti.....	62
4.5	Výsledky testu ohnivzdornosti.....	64
4.6	Výsledky charakterizace zpěněné vrstvy	66
4.7	Výsledky infračervené spektroskopie	67
4.8	Výsledky termických analýz.....	74
4.9	Výsledky korozních zkoušek v atmosféře s obsahem solné mlhy	81
4.10	Výsledky korozních zkoušek v atmosféře s povšechnou kondenzací.....	82

5	Diskuze k výsledkům	83
5.1	Diskuze stanovení vlastností pigmentů a nátěrových hmot	83
5.2	Diskuze zkoušky tlumením kyvadla	83
5.3	Diskuze mechanických zkoušek	84
5.3.1	Diskuze zkoušky rychlou deformací (úderem).....	84
5.3.2	Diskuze zkoušky ohybem	85
5.3.3	Diskuze mřížkové zkoušky.....	85
5.3.4	Diskuze zkoušky hloubením.....	85
5.4	Diskuze odtrhové zkoušky přilnavosti	86
5.5	Diskuze testu ohnivzdornosti	88
5.6	Diskuze charakterizace zpěněné vrstvy	90
5.7	Diskuze infračervené spektroskopie	92
5.8	Diskuze termických analýz	92
5.9	Diskuze korozních zkoušek v atmosféře s obsahem solné mlhy	93
5.10	Diskuze korozních zkoušek v atmosféře s povšechnou kondenzací.	95
5.11	Určení stupně korozní agresivity prostředí	96
6	Přínosy diplomové práce	97
7	Závěr.....	99
8	Seznam literatury.....	100
9	Obrázková příloha	104
9.1	Vzorky nátěrových filmů po žíhání v elektrické peci	104
9.2	Vzorky nátěrových filmů před expozicí, po expozici v komoře se solnou mlhou s dobou expozice 168 hodin.....	112
9.3	Vzorky nátěrových filmů před expozicí, po expozici a po stažení nátěrů v komoře s povšechnou kondenzací s dobou expozice 168 hodin	114

1 Úvod

Organické intumescentní nátěry jsou tenkovrstevné zpěňovatelné nátěry, které jsou založeny na kyselém katalyzátoru (např. polyfosforečnan amonný), organických látkách s vysokým obsahem uhlíku (např. pentaerythritol) a nadouvadle (např. melamin) a to jak ve vodou ředitelných, tak i rozpouštědlových pojivech. Tyto druhy nátěrů jsou stabilnější vůči povětrnosti a účinkům vody ve srovnání s nátěry na bázi alkalických silikátů. Jsou určeny pro pasivní protipožární ochranu ocelových konstrukcí, neboť ocel při požáru ztrácí výrazně na pevnosti. Proces intumescence začíná změkčením a roztavením polymerního pojiva, nad 250 °C dochází k rozkladu polyfosforečnanů a uvolnění kyseliny fosforečné, která způsobuje dehydrataci a karbonizaci zuhelnatělých látek z polyalkoholů. Rozkladem melaminu se uvolní plynné složky, které se podílí na pění a rozpínání směsi. Konečnou fází je síťování a tuhnutí uhlíku. Ochranné a tepelně bariérové vlastnosti jsou do značné míry ovlivněny strukturou uhlíkaté vrstvy. [1]

Zpěňovatelné nátěry na ocelových nosných konstrukcích jsou limitovány mezním stavem R, tedy stabilitou staticky zatížené nosné konstrukce. Čím více je konstrukce ve stavbě zatěžována, tím klesá její požární odolnost. Normou ČSN/STN 73 0851 je uvažováno takové statické zatížení ocelové nosné konstrukce, které vyvolá kritickou ztrátu stability při teplotě cca 472 °C. Od nátěru se tedy vyžaduje maximální tepelně izolační schopnost, která musí zajistit, aby k překročení tohoto limitu došlo co nejpozději.

Současně ovšem musí být pod protipožárním nátěrem zajištěna i dobrá korozní odolnost, což obvykle znamená, že nátěr musí být kompatibilní alespoň s některými antikorozními nátěry. Protože u protipožárních nátěrů jde vždy o nátěry vysokosušinnové, s nízkou odolností proti vodě a agresivním vlivům, musí se tyto nátěry prakticky vždy aplikovat v systému, kde jsou proti těmto vlivům chráněny. Vrchní krycí nátěr zároveň však nesmí bránit vývinu zpěněné vrstvy a musí na vrstvě, kterou má chránit, dobře držet. Tyto nátěry jsou většinou aplikovány na viditelných částech konstrukcí a musí proto působit i esteticky. [2]

2 Současný stav problematiky

2.1 Ochrana oceli

Přestože je ocel nehořlavý stavební materiál, tak chování ocelových konstrukcí podmínkách požáru je nepříznivé. Do teploty 350 °C neklesají mechanické vlastnosti natolik, aby byla ohrožena bezpečnost staveb. Při teplotě 500 až 700 °C pozbývá ocel téměř zcela svou únosnost, pokud není deformována, lze ji po požáru opět použít. U nechráněných nosných ocelových prvků se požární odolnost pohybuje přibližně v rozmezí 5–20 minut.

Základním principem zvýšení odolnosti ocelových konstrukcí vůči požáru je zamezení jejich prohřátí na teplotu 500 °C a vyšší. Vlivem účinků vysokých teplot dochází při požáru k poklesu meze kluzu, pevnosti a modulu pružnosti ocelových konstrukcí.

Stavební konstrukce dosáhne požadované požární odolnosti tehdy, jestliže po daný čas nedojde k porušení její funkce. Požární odolnost se určuje dle normy ČSN 73 0810, doby požární odolnosti konstrukcí jsou určeny stupnicí 15, 30, 45, 60, 90, 180 minut. Požární odolnost lze zvýšit ošetřením povrchů například deskami, omítkami, nástříky a nátěry. Tyto úpravy mohou zvýšit požární odolnost až o 180 minut. [3]

2.2 Typy požární ochrany

Aktivní protipožární ochrana

Současné technologie umožňují stavět stále větší, vyšší a složitější objekty. Stávající objekty jsou rekonstruovány k jiným účelům, než bylo původně plánováno. Zároveň také rostou požadavky na zvyšování požární bezpečnosti staveb, technologií, zařízení a provozovaných činností. Zabezpečení budov a technologických zařízení proti účinkům možného požáru zahrnuje pasivní a aktivní zajištění. [4, 5]

Aktivní protipožární ochrana zahrnuje všechna obranná opatření a je uceleným systémem pro rozpoznání a hašení požárů (požární hlásiče, postřikovací hasicí systémy, hasicí přístroje, zařízení pro odvod kouře a tepla, nouzové osvětlení). Tyto prostředky vytvářejí předpoklady k úspěšné evakuaci osob, účinnému zásahu jednotek požární ochrany a snížení rozsahu škod.

Pasivní protipožární ochrana

Oproti aktivní protipožární ochraně má pasivní protipožární ochrana preventivní úlohu. Zahrnuje celek všech konstruktivních opatření, která zajišťují po určitou dobu odolnost proti ohni. Požární ochrana je upravena předpisy s ohledem na druh a použití budovy. Tyto prvky fungují bez zásahu člověka nebo externího napájení energií. Kromě toho umožňují včasnou evakuaci i zásah záchranných týmů.

Konstruktivní opatření mají:

- zadržet šíření kouřových plynů
- zabránit šíření plamenů
- potlačit tepelné účinky v dotyčných úsecích
- zachovat protipožární odolnost stavebních dílů/částí

Aktivní a pasivní zajištění se vzájemně doplňují, zvyšuje se tak účinnost zabezpečení budov a zařízení proti požáru. Účinnost aktivního a pasivního zajištění klesá, nejsou-li jednotlivá zařízení a opatření či úpravy stavebního řešení vzájemně koordinovány. [4, 5]

2.2.1 Prvky pasivní požární ochrany

2.2.1.1 Protipožární omítky

Protipožární nanášené hmoty patří kromě deskových silikátových obkladů k nejstarším ochranným systémům. V současné době podle složení malty rozeznáváme tyto druhy nanášených omítek: I. sádroperlitové nebo sádrovermikulitové, II. sádrové nebo vápenosádrové, III. vápenné, vápenocementové nebo cementové.

Z klasických omítek jsou nejúčinnější malty skupiny I, nejméně účinné malty skupiny III. Pro jejich aplikaci je třeba zajistit jejich tloušťku alespoň 10 mm. Vermikulitové omítky kromě dobrých protipožárních vlastností vykazují dobré vlastnosti akustické, protikondenzační a tepelně izolační. Omítky na bázi perlitu obsahují expandovaný perlit s velikostí zrn 0,1 až 1 mm a pojivo, kterým je cement, sádra nebo vápno (je vhodné přidávat jako přísadu anorganická vlákna).

U omítek II. skupiny příznivě působí sádra pro svůj vysoký obsah chemicky vázané vody, ta se při teplotách nad 100 °C uvolňuje a na začátku požáru redukuje teplotu plamene, a tím zpomaluje ohřívání nanesené vrstvy. Při vysokých teplotách nastává smršťování sádry, což má za následek vznik kontrakčních trhlin a následné oddělování nanášených vrstev při požáru. Těmto objemovým změnám lze zabránit přidáním vláknitých hmot (např. minerálních vláken).

Omítky se mohou nanášet na velkou škálu podkladů, na silikátové, dřevěné a ocelové, které ale musí být povrchově upravené. Dřevěné a ocelové prvky musí mít povrch opatřen keramickým pletivem nebo drátěnou sítí. [6, 7]

2.2.1.2 Protipožární nástřiky

Protipožární nástřiky se používají mnohem častěji než omítky. Je to díky vyšší účinnosti požární odolnosti, jednodušší aplikaci a pro malou hmotnost ochranné vrstvy. Technologie nástřiků je analogická jako u omítání, ale nanášení ochranné vrstvy se provádí strojně pod tlakem.

K nejvýhodnějším protipožárními nástřikům patří nástřiky na bázi vermikulitu s přídavkem cementu a vápenného hydrátu. Díky vermikulitu vykazují tyto nástřiky velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, což se projevuje nižšími požadavky na výslednou tloušťku ochranné vrstvy. Nástřiky s obsahem expandovaného perlitu jsou levnější, ale k zajištění stejné požární odolnosti je zapotřebí silnějších vrstev, což se projeví horšími fyzikálně–chemickými vlastnostmi.

Sádrové nástřiky s obsahem vermikulitu nebo experlitu jsou srovnatelné s předchozími. Při teplotách nad 100 °C se ze sádry uvolňuje velké množství chemicky vázané i volné vody, která na začátku požáru redukuje teplotu plamene a tím zpomaluje ohřívání nanesené vrstvy. Stejně jako u omítek je možno vzniku trhlin zabránit vyztužením stříkané směsi minerálními vlákny.

Kvalita provedených nástřiků je silně závislá na přesném dodržování výrobní technologie. Protipožární nástřiky nejsou použitelné pro plasty jakéhokoliv typu a složení a dřevěné konstrukce (pokud nejsou předem impregnovány proti plísním a dřevokaznému hmyzu). [6, 7]

2.2.1.3 Protipožární obkladové materiály

Obklady dřevěných konstrukcí jsou používány v hojně míře, a to zejména pro tyčové nosné prvky s vyšší požární odolností, v půdních vestavbách, stropních konstrukcích a všude tam, kde protipožární nátěr svými parametry nestačí. Hlavními parametry, které jsou od deskových prvků vyžadovány, jsou především tepelně izolační vlastnosti, schopnost desky aktivně působit proti účinku plamene, celistvost desky při zvýšených teplotách, Deskové obklady jsou obvykle trvanlivé a dlouhodobě odolávají vlivům prostředí podstatně více než nátěry a nástřiky. Rozhodující význam mají především při plošných aplikacích, kde jsou prakticky nenahraditelné. Dají se dobře esteticky upravovat, lze je (až na výjimky) poměrně snadno zpracovávat, dělit a spojovat běžnými technologiemi.

Desky využitelné v požární ochraně staveb lze rozdělit buď podle materiálu, ze kterého jsou zhotoveny, podle jejich struktury, případně podle jejich chování při požáru. Desky z anorganických hmot jsou představovány deskami cementovými, sádrovými a vápenocementovými, deskami na bázi vermikulitu a na bázi minerálních vláken. Sádrokartonové desky jsou tvořené oboustranným pláštěm z kartonu, mezi nimž je jádro ze sádry, armované obvykle skleněnými či minerálními vlákny. Tyto desky jsou užívány pro naprostou většinu všech protipožárních obkladů, přiček a stropů, resp. dalších protipožárních aplikací. [3, 8]

2.2.1.4 Retardanty hoření

Retardant hoření nebo samozhášecí přísada je látka, která zpomaluje nebo zabraňuje hoření, tj. zvyšuje tepelnou odolnost materiálu. Retardanty hoření se často používají k ochraně polymerů, které díky svým vlastnostem nahradily ve velké míře tradiční materiály. Při spalování polymerů dochází ale k jejich rozkladu a vzniku toxických plynů a kouře. [9, 10]

Existuje více způsobů, jakými může retardér hoření působit: odstraněním tepla, zvýšením teploty, která je nezbytná pro vývoj hořlavých plynů, snížením obsahu těkavých látek a hořlavých plynů, podpořením tvorby pěny, zamezením přístupu vzduchu, snížením tvorby plamene, zvýšením teploty, při které dojde k vznícení vznikajících plynů. Pro správnou funkčnost je nezbytné, aby měl retardant alespoň jednu z uvedených vlastností. [11, 12]

Mechanismus v pevné fázi

Mechanismus v pevné fázi spočívá ve změnách ve struktuře polymeru. Tyto systémy podporují zesílení povrchu polymeru a vytvoření uhlíkaté vrstvy. Tato vrstva izoluje povrch od tepla, brání vzniku dalších produktů a následnému hoření. Jiné systémy podporují tvorbu vody, ochlazují tak povrch a zvyšují množství energie nutné k udržení hoření. Tímto mechanismem působí retardanty obsahující fosfor pro ochranu celulózy a syntetických polymerů. [13, 14]

Mechanismus v plynné fázi

Mechanismus v plynné fázi spočívá v narušení procesu spalování polymeru. Do struktury polymeru jsou zabudovány látky, které vlivem tepla uvolňují volné radikály. Tyto radikály difundují do ohně a inhibují boční radikálové reakce. Výsledkem je zvýšení energie potřebné k dalšímu hoření a inhibici požáru. Retardéry hoření často kombinují působení obou mechanismů. Tímto mechanismem působí hlavně retardanty na bázi chloridů a bromidů. [13, 14]

Podle chemického složení je možné retardanty rozdělit do čtyř skupin: anorganické, halogenované, na bázi fosforu, na bázi dusíku, Další dělení je založeno na druhu vazby s materiálem: aditivní (bez chemické vazby na polymer), reaktivní (zakomponovány do struktury materiálu pomocí chemické vazby). [11]

2.3 Protipožární nátěrové systémy

2.3.1 Zábranové nátěrové systémy

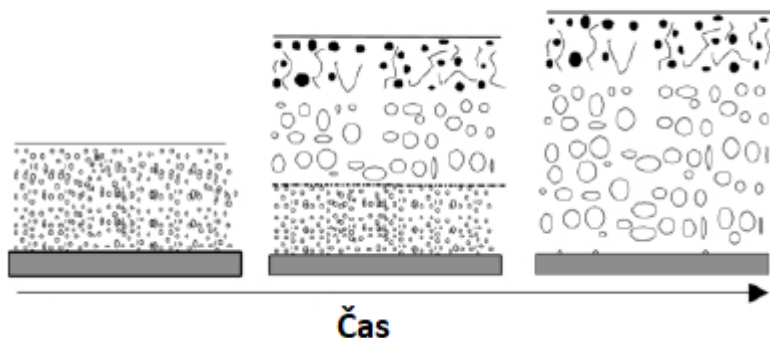
Zábranové nátěrové systémy brání přístupu plamene k povrchu zapalovaného předmětu a po určitou dobu nedovolí jeho vznícení. Tyto systémy jsou užívány především pro hořlavé konstrukce a materiály a vedle dřeva jsou s nimi nejčastěji chráněny plasty, kabelové izolace, plastová potrubí atd. Bývají obvykle formulovány na bázi anorganických systémů, nejčastěji lehko tavitelných sklovin, glazur, často s přísadou krátkých armujících vláken a retardérů hoření. Tyto nátěry většinou nemají tepelně izolační schopnosti a jejich funkce je výhradně založena na bariérovém efektu, omezují přístup kyslíku a brání šíření plamene po povrchu. [15]

2.3.2 Sublimující nátěrové systémy

Podstatou sublimujících nátěrových systémů je poměrně silná vrstva sublimujících aditiv, která se při vyšších teplotách začíná odpařovat, resp. sublimovat. Unikající plyny zhášejí plamen a ochlazují povrch na kterém jsou naneseny. Používají se obvykle v epoxidovém pojivu. Tyto systémy dosud nenašly širšího využití, protože jsou poměrně nákladné. Na druhé straně jsou velmi stále, odolné povětrnostním vlivům a mechanickému namáhání. [2]

2.4 Zpěňovatelné (intumescentní) nátěrové hmoty

Zpěňovatelné nátěrové hmoty jsou důležitou třídou pasivních protipožárních systémů. Značná informací o těchto nátěrech pochází z patentové literatury, první zmínky pochází z roku 1938. V roce 1971 publikoval Vandersall [16] článek, kde vysvětloval podstatu intumescentního procesu. Zpěňovací nátěrové hmoty se dostaly do popředí s ústupem halogenovaných retardantů hoření, které jsou sice účinné, ale jsou u nich obavy z vlivu na životní prostředí. [17] Intumescentní nátěrové hmoty vytvářejí působením tepla na povrchu podkladu objemnou zuhelnatělou pěnu, která poskytuje ochranu proti požáru. [18]



Obrázek 1: Zpěňovací proces [19]

2.4.1 Složení intumescentních systémů

Intumescentní protipožární materiály jsou vícesložkové systémy. Složky těchto systémů jsou rozděleny do tří hlavních skupin: (a) zdroje uhlíku, které jsou obvykle polyatomické alkoholy nebo polyoly–organické sloučeniny obsahující hydroxyly s vysokým obsahem uhlíku;

(b) katalyzátory (kyselé složky), což jsou anorganické kyseliny nebo látky uvolňující kyselinu při teplotě 100–250 °C; (c) pěnотvorné látky, kterými jsou organické aminy nebo amidy; některé anorganické soli jsou schopny uvolnit významné množství nehořlavých plynů při tepelné dekompozici; obvykle se jedná o alkalické uhličitany a amonné soli. Principy tvorby receptur pro intumescentní povlaky předpokládají synergický efekt těchto složek. Skupinu takových sloučenin, o kterých se nejvíce diskutuje v odborné a technické literatuře, tvoří především fosforečnany amonné, především polyfosforečnany, pentaerythritol a melamin.

Kromě těchto hlavních složek obsahují intumescentní nátěry další složky, jako jsou pigmenty, zejména oxid titaničitý; plniva různého typu: skelná vlákna, minerální vlákna, kaolin, mastek, oxid hlinitý, hydroxid hlinitý, hydroxid hořečnatý, srážený oxid křemičitý, silikáty, duté mikrosféry, drcená celulóza, plastifikátory, zahuš'ovadla, smáčedla, konzervanty. [20]

- a) Anorganická kyselina nebo sloučenina, která při ohřevu na 100 až 250 °C uvolňuje kyselinu.
- b) Polyhydričké sloučeniny bohaté na uhlíkové atomy.
- c) Organické aminy nebo amidy.

Příklady sloučenin:

- a) Zdroje anorganické kyseliny:
 - Kyseliny: fosforečná, sírová, boritá.
 - Amonné soli: polyfosfáty, sulfáty, halidy.
 - Aminové/amidové fosfáty: močovina, guanylmočovina, produkty reakce amoniaku s oxidem fosforečným.
 - Organofosforečnany: trikresylfosfát, alkylfosfáty, haloalkylfosfáty.
- b) Polyhydričké sloučeniny:
 - Škrob, dextrin, sorbitol.
 - Pentaerythritol–monomer, dimer, trimer.

- fenolformaldehydové pryskyřice, methylolmelamin.

c) Aminy, amidy:

- Močovina, močovinoformaldehydové pryskyřice,
- Dikyandiamid, melamin, polyamidy. [18]

Při zahřívání intumescentních nátěrových systémů probíhá velké množství reakcí a je obtížné přesně určit funkci, kterou plní jednotlivé složky směsi. Některé sloučeniny nesou více než jednu funkční skupinu a mohou plnit více než jednu funkci, jako například melaminfosfát, který je jak aminem, tak zdrojem kyseliny.[18]

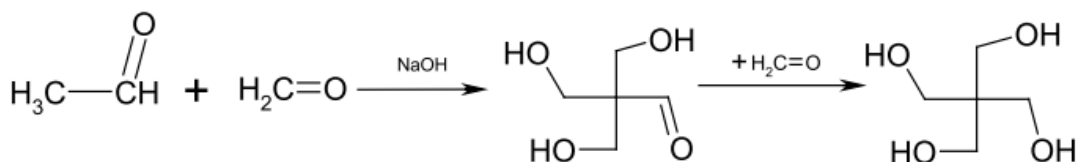
2.4.1.1 Zdroje uhlíku

Zdroje uhlíku jsou obvykle vybírány z různých uhlovodíků obsahujících hydroxylové skupiny. Intumescenční systémy obvykle obsahují následující složky: škrob, dextrin, polyfunkční alkoholy, zejména mono-, di- a tri-pentaerythritol nebo jejich směsi, sorbitol, rezorcinol, trimethylolmelamin, triethylenglykol, fenol-formaldehydy a fenoly. Mezi další hydroxylové složky mohou patřit některé oleje, celulóza, škrob, proteiny, glukóza, maltóza, mannitol, kapalné polyoly s lineárním řetězcem C2–C5 a sloučeniny s komplexnější strukturou. Účinnost potenciálních uhlíkových zdrojů závisí na jejich obsahu uhlíku a počtu reaktivních hydroxylů. Hmotnost popela, který lze získat, závisí na množství uhlíku, zatímco obsah hydroxylů určuje rychlost dehydratace a tím i rychlost pění.[20]

Pentaerythritol

Deriváty pentaerythritolu jsou nejučinnějšími tvůrci uhlíku díky své multifunkčnosti a vysokému obsahu uhlíku. Pokud jde o obsah uhlíku, dosahuje pentaerythritol 44 %, di-pentaerythritol 50 % a tri-pentaerythritol 53 %. Je důležité, že pentaerythritol je téměř zcela krystalický a není to polymer. Díky tomu se může dříve a snadněji účastnit syntézy organofosfátové struktury intumescenční vrstvy, a od samého začátku nebrání uvolňování plynu při pění intumescenčních složek. Což je výhoda, kterou má pentaerythritol oproti jiným karbonizačním činidlům jako je škrob a celulóza.

Pentaerythritol byl získán na konci devatenáctého století kondenzací acetaldehydu s formaldehydem. Komerčně se začal vyrábět ve 30. letech 20. století. Kondenzace acetaldehydu s formaldehydem se provádí v alkalickém prostředí. Proces probíhá podle rovnice 1.



Rovnice 1: Výroba pentaerythritolu [20]

Kromě pentaerythritolu se mohou vytvořit různé vedlejší produkty. Aby bylo možné získat technický pentaerythritol, je směs extrahována s malým množstvím dipentaerythritolu a odpaří se extrakční roztok. Pro získání čistého pentaerythritolu se provádí některé operace odpařování a frakční krystalizace.[20, 21]

Pokud se pentaerythritol získává z acetaldehydu a formaldehydu, reakce je termodynamicky katalyzována a stejně probíhá i opačná reakce. To znamená, že když je pentaerythritol zahříván v přítomnosti dehydratačního činidla–fosforečnanu amonného, který je nutnou složkou intumescentních nátěrů, může se pentaerythritol rozkládat na povrchu oxidu titaničitého a tvořit aldehydy, ze kterých byl syntetizován. Ty mohou reagovat s melaminem a vytvořit melaminaldehydovou pryskyřici. [20]

Dipentaerythritol

Dipentaerythritol se komerčně získává jako vedlejší produkt při výrobě pentaerythritolu z acetaldehydu a formaldehydu v zásaditém prostředí, výtěžky se pohybují kolem 10 %. Používá se při výrobě polyesterů, polyetherů, polyuretanů a alkydových pryskyřic. Používán je také při syntéze lubrikantů, nátěrů, lepidel a kosmetiky. [22] Dipentaerythritol se vyznačuje nižší rozpustností ve vodě než pentaerythritol. [23, 24] V intumescentních systémech jej lze použít místo pentaerythritolu. Jeho přídavek zvyšuje teplotu, při které dochází ke zpěňovacím reakcím. Zvyšuje také viskozitu vzniklé taveniny. [25] Teplota rozkladu dipentaerythritolu je přibližně 200°C. Dipentaerythritol se rozkládá ve dvou krocích, první krok je při teplotách 200–400 °C, kdy je ztráta hmotnosti 95 %. Při teplotě 500 °C dipentaerythritol téměř kompletně degraduje. [26]

Celulóza

V minulosti byly učiněny pokusy využít celulózu nebo škrob v intumescenčních protipožárních systémech. Nicméně zkušenosti naznačují, že celulóza a škrob jsou oproti pentaerythritolu mnohem méně účinné. Obvykle tyto látky nejsou používány v materiálech pro ochranu proti požáru u kovových konstrukcí.

Tepelný rozklad celulózy je doprovázen velkým množstvím paralelních a postupných reakcí. Díky těmto procesům prochází celulóza hlubokými transformacemi a vytváří se velké množství meziproduktů, z nichž se některé při určitém teplotním intervalu mění na uhlík. Termální destrukce je ovlivněna strukturou makromolekuly a supramolekulárními stadii celulózy, prostředím, ve kterém probíhá tepelné ošetření, nečistotami a katalyzátory, podmínkami ohřevu a podobně. Hlavní procesy degradace celulózy jsou dokončeny při teplotě asi 350 °C. V této fázi se vytváří mnoho sloučenin, dochází k největší ztrátě hmotnosti celulózy a vytváří se uhlíkový zbytek obsahující až 60–70 % uhlíku. Tato fáze termální destrukce se nazývá pyrolýza celulózy. Produkty z termální destrukce celulózy lze rozdělit do tří skupin: sloučeniny, které jsou těkavé při nízkých teplotách, pryskyřice a pevný zbytek, který v závislosti na konečné teplotě ošetření obsahuje různé množství uhlíku.

Podobně jako pentaerythritol, je i celulóza v přítomnosti dehydratačního činidla zdrojem aldehydů. Kvůli své struktuře se celulóza rozkládá s tvorbou širší škály produktů, ale pravděpodobně s nižší koncentrací produktů reaktivních s melaminem. Teploty rozkladu se také liší od teplot rozkladu pro pentaerythritol. Výsledkem je, že pěnová vrstva vytvořená během destrukce nátěru na bázi celulózy zaostává svými vlastnostmi za materiálem na bázi pentaerythritolu. [20]

2.4.1.2 Zdroje kyselin

V protipožárních intumescenčních systémech se široce používají anorganické a organické fosforečné sloučeniny jako zdroj kyseliny. Ohnivzdorné vlastnosti fosforečných sloučenin jsou známy již dlouhou dobu. Typickými kyselými složkami nehořlavých povlaků jsou kyselina ortofosforečná, její étery, soli (zejména amonné, aminové a amidové soli), fosforečnan melaminu a polyfosforečnan amonný. [17] Jsou také používány soli kyseliny sírové a kyseliny borité, včetně disíranu p-nitroalaninu, síranu amonného a boritanů alkalických kovů. Přesto jsou nejvíce preferované amonné soli kyseliny fosforečné nebo polyfosforečných kyselin,

zejména amonné polyfosforečnany s vzorcem $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$, kde n je číslo od 10 do 1500. Polyfosforečnan amonný obsahuje nejvíce fosforu, kterého je asi 32 %. Ostatní zdroje kyselin obsahují méně fosforu, například 26,9 % v monoamoniu fosfátu, 14,2 % ve fosforečnanu melaminu a 19,6 % ve fosforečnanu močoviny. Látky obsahující fosfor jsou do nátěrových systémů zavedeny nejen k tomu, aby snížily jejich hořlavost, ale také proto, že často zvyšují přilnavost, odolnost proti korozi a mají další užitečné vlastnosti. Navíc fosforečné přísady jsou prakticky jediné, které zabrání doutnání. Největší důležitost se přikládá polyfosfátům. [20]

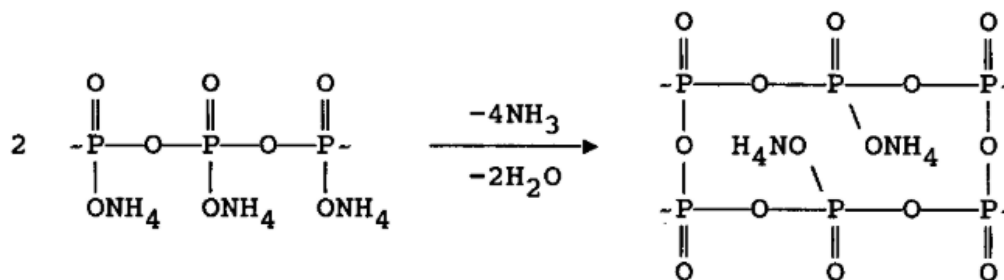
Polyfosfát amonný

Polyfosfát amonný $(\text{NH}_4\text{PO}_4)_n$ je bezbarvá krystalická látka. Nejčastěji se používá jako nehořlavá přísada při výrobě protipožárních nátěrů, laků, impregnací, plastů, obalů elektrických kabelů a dalších. Podle referenčních údajů APP taje při teplotě 180–185 °C. Intenzivní rozklad na amoniak a kyselinu polyfosforečnou probíhá při teplotě asi 300 °C. Existují dva typy amonného polyfosfátu používaného jako přísada: s krystalickou fází I s polymerizačním stupněm $n < 1000$ a vysoko kondenzovaný polyfosfát s krystalickou fází II s polymerizačním stupněm $n > 1000$. Amonné polyfosfáty s krystalickou fází I mají lineární strukturu s různou délkou řetězce, rozkládají se při nižších teplotách a mají vyšší rozpustnost ve vodě ve srovnání s amonnými polyfosfáty s krystalickou fází II. Amonné polyfosfáty s krystalickou fází II mají podobnou, ale složitější a větvenou strukturu s vyšší molekulovou hmotností, vysokou tepelnou stabilitou a nižší rozpustností ve vodě než amonné polyfosfáty s krystalickou fází I.

Účinnost ochrany amonných polyfosfátů je dána mimo jiné jejich tepelnou stabilitou. Teplota počátku hmotnostní ztráty by neměla být nižší než 210–220 °C a hmotnostní ztráta by měla být ne více než 0,2 %. Tepelná stabilita polyfosfátů závisí na podílu nízkomolekulárních polyfosfátů ve složení výrobku, které snižují počáteční teplotu rozkladu. Čím nižší je podíl nízkomolekulárních polyfosfátů ve výrobku, tím vyšší je teplota, při které se začne rozkládat, a tím účinnější je jeho odolnost proti plamenu. [20]

Tepelná degradace amoniu polyfosfátu nastává ve třech krocích krátce po dosažení bodu tání při teplotě 220–280 °C. Tyto kroky nastávají při teplotách 260–420°C, 420–500°C a 500–680°C. Plynné produkty, kterými jsou amoniak a voda, se uvolňují při prvním a druhém kroku. Při tání APP se odštěpuje amoniak, jsou tak uvolněny hydroxylové skupiny, které dále

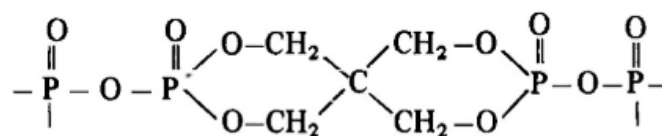
kondenzují za eliminace vody. Výsledná síťovaná struktura je definována jako ultrafosfát, protože poměr protiiontů k atomům fosforu je menší než jedna. Během reakce je uvolněno dvojnásobné množství amoniaku oproti vodě. Ve třetím kroku dochází k rozštěpení ultrafosfátové struktury.



Rovnice 2: Tepelná degradace polyfosfátu amonného [27]

Zavedení APP do polymeru může ovlivnit proces intumescence mnoha způsoby, ať už chemicky nebo fyzikálně. Polymer totiž může působit jako rozpouštědlo pro nadouvadlo a APP, které musí reagovat, aby vznikl intumescenční účinek. Kromě toho viskozita taveniny materiálu, která je důležitým parametrem v procesu pění, může modifikovat intumescenční chování k němuž dochází v nepřítomnosti polymeru. Plyny uvolňované rozkládajícím se polymerem mohou zasahovat do intumescenčního procesu. [27]

Reakce probíhající při zahřívání směsi pentaerytritolu s polyfosforečnanem amonným vedou ke vzniku pentaerytritol–difosfátových struktur:



Obrázek 2: Pentaerytritol–difosfátová struktura [18]

Reakce probíhá v několika fázích, z nichž první je alkoholýza APP PER (nebo fosforylace PER), která nezahrnuje eliminaci plynů. Vývin amoniaku a vody probíhá souběžně s tvorbou cyklických fosfátových struktur v produktu reakce. [18]

Estery kyselin

Mezi estery fosforečných kyselin jsou nejznámější jedno-, dvou- a tři-substituované ortofosfáty, ROP(O)(OH)_2 , $\text{(RO)}_2\text{P(O)OH}$ a $\text{(RO)}_3\text{PO}$, (kde R je alkyl, aryl nebo heterocyklický zbytek).

Ortofosfáty–soli kyseliny ortofosforečné H_3PO_4 –jsou známy jako mono-, di- a tri-substituované. Když jsou zahřívány jedno- a dvou-substituované ortofosfáty, dehydratují, uvolňují strukturní vodu a vytvářejí polymerové (lineární nebo kruhové) fosfáty.

Typickým zástupcem ortofosfátů je monoamoniumfosfát ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), který tvoří bezbarvé krystaly s tetragonální mřížkou. Rozkládá se za uvolňování NH_3 při $190\text{ }^\circ\text{C}$ a je rozpustný ve vodě. Diamoniumfosfát je krystalická látka, dobře se rozpouští ve vodě a taje s rozkladem při $70\text{ }^\circ\text{C}$. Triamoniumfosfát je krystalická látka, která se rozkládá při pokojové teplotě.

Kondenzované fosforečnany se dělí do tří hlavních typů: lineární fosforečnany (polyfosforečnany) tvoří řadu solí, jejichž anionty se skládají z PO_4^{4-} tetraedrů spojených mezi sebou kyslíkovými atomy v nevětvených řetězcích; cyklické fosforečnany (metafosforečnany) mají kruhovou strukturu; ultraphosforečnany jsou větvené fosforečnany, které jsou kombinací kruhů a řetězců. Lineární polyfosforečnany mají sklon k tvoření cyklických a větvených struktur při termolýze intumescenčních směsí.[20]

2.4.1.3 Plynotvorné složky

Ve většině známých intumescenčních nátěrů hrají důležitou roli složky, které jsou klasifikovány jako porofory–plynotvorné látky, které tvoří uhlíkatou pěnu. Je známo, že plyn vzniká v důsledku tepelného rozkladu látek a vypařování složek nízké molekulární hmotnosti. V souvislosti se zpěňováním amonných fosfátových povlaků byl melamin považován za tradiční nadouvadlo. Pěnotvorné látky se musí rozkládat při správné teplotě a uvolňovat velké množství plynu. V současnosti se v povlacích používají následující porofory: organické aminy a amidy jako močovina, butylmočovina, dicyandiamid, kasein, urotropin, guanidin, sulfamidy, polyamidy a aminoformaldehydové oligomery, melamin a jeho deriváty, včetně melaminfosfátu, melaminkyanurátu, melaminborátu, melaminpolyfosfátu a tak dále. Teploty a produkty rozkladu některých nejznámějších pěnotvorných látek jsou uvedeny v tabulce 1. [20]

Tabulka 1: Přehled plynotvorných sloučenin

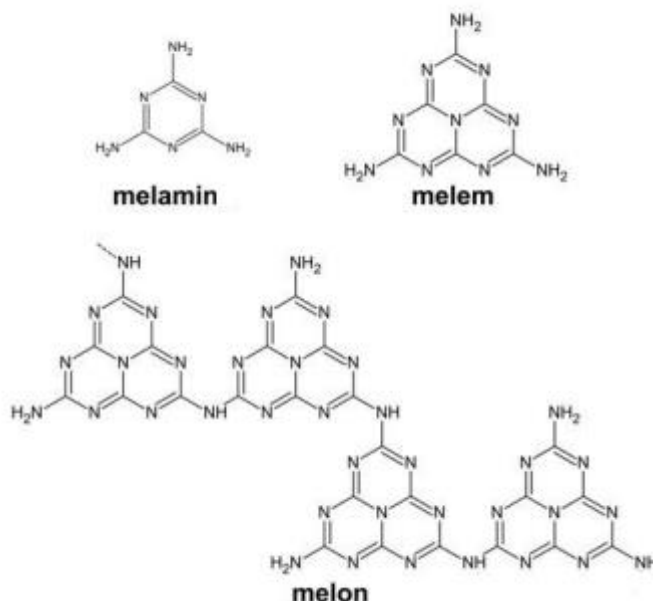
Sloučenina	Plynné produkty	Teplota rozkladu [°C]
Melamin	NH ₃ CO ₂ H ₂ O	300
Guanidin (NH ₂) ₂ C=NH	NH ₃ CO ₂ H ₂ O	160
Glycin NH ₂ -CH ₂ -COOH	NH ₃ CO ₂ H ₂ O	~233
Močovina CH ₂ -CO-NH ₂	NH ₃ CO ₂ H ₂ O	~130
Chloroparaffin C _m H _n -Cl _n	HCl CO ₂ H ₂ O	160–350

Melamin

Melamin je považován za jedno z nejúčinnějších plynotvorných činidel pro intumescentní nátěry. Melamin (2,4,6-triamino-1,3,5-triazin) patří do třídy cyklických kyanamidů a má soubor vlastností, které jsou důsledkem energetické stability triazinových jader. Mezi ně patří tepelná, světelná a chemická odolnost a schopnost tvořit multifunkční reaktivní chemické sloučeniny. Proto je melamin cenným surovinovým materiálem pro výrobu celé řady polymerních sloučenin. Melamin je bází, tvoří komplexní soli s kyselinami, které se při zahřátí rozkládají. Melamin snadno reaguje s aldehydy, kondenzuje s celulózou, cukry, glykoly a jinými organickými sloučeninami obsahujícími OH⁻ skupiny. Všechny reakce melaminu probíhají prostřednictvím aminových skupin. Chemicky čistý melamin představuje bezbarvé krystaly, které jsou prakticky nerozpustné v chladné vodě (5 % při 100 °C) a ve většině organických rozpouštědlech. Rozpouští se v glycerolu a pyridinu. [20]

Melamin se začíná degradovat při teplotě tavení, asi od 350°C. tato teplota je velmi blízká teplotám pro APP a pentaerythritol, obecně jsou transformace těchto látek v podobných teplotních intervalech. To znamená, že existují optimální podmínky pro transformaci těchto tří aktivních složek pro kombinaci v intumescentních reakcích. [28]

Při zahřívání melaminu nad 354 °C v atmosféře dusíku probíhají kondenzační reakce za odštěpení amoniaku NH₃ (deaminace). Postupnými kondenzacemi vznikají „melam“, „melem“ a „melon“. [29]



Obrázek 3: Molekulová struktura melaminu, melonu a melemu. [30]

Močovina

Tepelný rozklad močoviny probíhá ve dvou fázích s maximy hmotnostních ztrát při 230 a 350 °C. Močovina se ne zcela rozkládá (zbytek nepřesahuje 3% hmotnosti) při teplotě asi 400 °C. V první fázi jsou rozkladné produkty oxid uhličitý, amoniak a voda; ve druhé fázi jsou to karbamylmočovina a cykloalkylamidové sloučeniny.

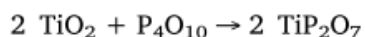
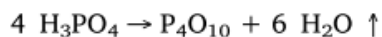
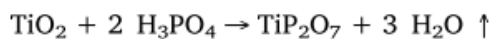
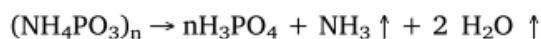
Močovina může být považována za aminokyselinový amid. Dvě aminoskupiny v močovině nejsou identické—jedna z nich je amid a druhá je amin. Věří se, že amidová skupina NH₂ reaguje s formaldehydem, aby vytvořila methylmočovinu. Takové sloučeniny jsou meziprodukty při získávání síťovaných močovinoformaldehydových pryskyřic. Monomethylolmočovina je trimerizována se ztrátou vody. Poté formaldehyd reaguje s CO–NH₂ skupinami trimerů, aby vytvořil síťovaný produkt. Stechiometrie mechanismu vyžaduje poměr močovina:formaldehyd 1:1,5. Nicméně cyklická seskupení nejsou nezbytná pro vytvoření zesíťovaného polymeru. Jsou známy lineární a větvené části v souladu se strukturou uvedenou níže, pokud je malý počet nebo vůbec žádné cykly. Síťování je urychlováno buď kyselými produkty nebo látkami s funkcionalitou schopnou hrát roli kyseliny při vysokých teplotách.

Chování močoviny bylo zkoumáno ve směsi s APP a pentaerythritolem (v poměru 1:3:1), bylo zjištěno, že močovina, uvolňuje plynné produkty až do 70 % své počáteční hmotnosti, ale nepřináší významný příspěvek k pění rozkládající se směsi, protože tyto plyny jsou uvolňovány při příliš nízké teplotě (většina při 175–300 °C, menší množství při 300–400 °C). Třísložková směs pění při teplotě nad 375 °C. Bylo zjištěno, že močovina spíše snižuje, než zvyšuje intumescenci a retardaci hoření APP–PER. [18, 20]

2.4.1.4 Titanová běloba

Oxid titaničitý se používá v intumescentních nátěrových hmotách jako pigment. Je chemicky inertní při pokojové teplotě, netoxický a obvykle je k dispozici v rutilové i anatasové formě. Intumescentním povlakům dodává kryvost, bělost a jas. Bylo zjištěno, že v intumescentních nátěrových hmotách není TiO_2 pouze inertním pigmentem, ale hraje roli v termolytické syntéze intumescentní vrstvy a určuje strukturu vrstvy. Na výsledné vlastnosti TiO_2 má vliv úprava jeho povrchu. Úprava povrchu je navržena tak, aby zlepšila dispergovatelnost (ve vodě a v řadě organických rozpouštědlech), krycí schopnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Anorganická úprava se provádí převážně nanesením sloučenin hliníku a křemíku nebo, méně často, zirkonia na povrch. Poměr těchto sloučenin určuje kyselost anebo zásaditost povrchu částic oxidu titaničitého, která se pohybuje v širokém rozmezí. Organická úprava je rozmanitější. Povrch částic může obsahovat modifikátor hydrofilně–lipofilních vlastností. To určuje rozložení částic oxidu titaničitého v kompozici, což může ovlivnit charakter termolýzy intumescentních povlaků. Každý druh oxidu titaničitého má proto specifické vlastnosti díky odlišnému povrchovému uspořádání. [20]

Je dobře zdokumentováno, že TiO_2 reaguje s APP, $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$ nebo jeho degradačními produkty, jako jsou polyfosforečné kyseliny, $(\text{H}_3\text{PO}_4)_n$ a/nebo pentoxid fosforu (P_4O_{10}) při vyšší teplotě (také sublimuje) za vzniku tepelně stabilního produktu, pyrofosforečnanu titaničitého TiP_2O_7 .



Rovnice 3: Reakce oxidu titaničitého s polyfosfátem amonným

To umožňuje udržet celistvost zpěněné vrstvy po delší dobu, a tím zlepšuje tepelnou izolaci nebo požární odolnost intumescentních nátěrů. Díky těmto interakcím hraje TiO_2 v intumescentních nátěrech zásadní roli a působí jako výztuž vrstvy. Bylo také zaznamenáno, že TiO_2 částečně reaguje s APP, v důsledku čehož výsledná vrstva obsahuje na povrchu jak nezreagovaný TiO_2 , tak TiP_2O_7 . Je tedy nutné optimalizovat zastoupení TiO_2 ve složení s ohledem na APP.

Ze studie vyplývá, že nátěr s mírně převyšujícím atomovým poměrem Ti a P poskytuje lepší tepelně izolační vlastnosti. Vzhledem k dalším funkcím TiO_2 , jako je sálavý odraz tepla, tepelná odolnost plniva, nehořlavost a schopnost zpevňovat uhlík a také reaktivita při vyšší teplotě, vykazuje mírný nadbytek TiO_2 lepší tepelně izolační vlastnosti intumescentních nátěrů. [31]

Bylo zjištěno, že TiO_2 rutilového typu je při zvyšování doby požární odolnosti povlaků účinnější než TiO_2 anatasového typu. Předpokládá se, že za tento rozdíl může být zodpovědné rozdělení velikosti částic a různé krystalické formy TiO_2 . Průměrná velikost částic TiO_2 anatasového typu je $0,30 \mu\text{m}$ a TiO_2 rutilového typu je $0,17 \mu\text{m}$. Proto by TiO_2 rutilového typu mohl mít ve srovnání s TiO_2 anatasového typu lepší dispergaci v povlacích. TiO_2 může zlepšit požární odolnost vytvořením vysoce kvalitní voštinové struktury zpěněné vrstvy, která odolává požáru. Poté, co se zbytky zpěněné vrstvy postupně oxidují při vysoké teplotě, zůstává na povrchu pouze část amorfního uhlíku a bílé anorganické materiály.

Výsledek naznačuje, že TiO_2 anatasového typu se může při vysoké teplotě částečně přeměnit na TiO_2 rutilového typu a tato přeměna je kvůli vysoké teplotě plamene (obvykle nad $1000 \text{ }^\circ\text{C}$). Proto lze vyvodit závěr, že TiO_2 anatasového typu se mění na sloučeninu složenou

z TiO_2 rutilového typu a TiP_2O_7 , TiO_2 rutilového typu se během procesu hoření částečně přeměňuje na TiP_2O_7 . Výsledek je v souladu s některými dřívějšími výzkumy, které rovněž zjistily přítomnost TiP_2O_7 na povrchu zuhelnatělé vrstvy při aplikaci TiO_2 na epoxidový povlak. Předpokládá se, že došlo k následující reakci, kdy vznikla vrstva podobná keramice z TiO_2 a TiP_2O_7 rutilového typu na povrchu zpěněné vrstvy, která může chránit substrát po celou dobu hoření a může zlepšit mechanické vlastnosti.[32]

V intumescentním systému oxid titaničitý funguje jako katalytické aktivní centrum, kdy povrchová úprava snižuje aktivační energii probíhajících reakcí, například morfologické transformace pentaerytritolu s následující konverzí na aldehydy. Oxid titaničitý tak funguje jako nukleační prvek pro uhlíkatou vrstvu. [20]

2.4.1.5 Další typy plniv

Expandovatelný grafit (EG) vykazuje atraktivní aplikace jako samoexpanzivní retardér hoření díky svému velkému nárůstu objemu. Jedná se o vrstevnatý krystal skládající se z vrstev uhlíkových atomů pevně spojených mezi sebou. Mezi uhlíkové vrstvy mohou být vmezeřeny chemikálie (jako například kyselina sírová). Příčinou expanze je zvýšení objemu a následného tlaku způsobeného rychlým ohříváním vmezeřené látky, která se mění z kapalně nebo pevné fáze na fázi plynou. Tvoření plynu způsobuje zvýšení objemu přibližně 100–krát. Tlak generovaný tímto zvýšením objemu nutí sousední grafenové vrstvy oddělit se. EG byl primární složkou těsnění pro spoje, dutiny nebo otvory. Je však schopný poskytnout dobrou odolnost proti ohni dalším materiálům, jako je polyethylen, kopolymer ethylen–propylen–dien, epoxidy, nenasycené polyestery, celulózu, atd. Kvůli jeho vysoké účinnosti jako retardér hoření může být EG použit jako nová generace intumescenčních přísad, samostatně nebo ve spojení s jinými retardéry hoření, jako je například APP, zinečnatan boritý, červený fosfor, hydroxid hořečnatý a hydroxid hlinitý. [33, 34]

Organicky modifikovaný montmorillonit byl použit jako nanoplivo s cílem zlepšit protipožární vlastnosti a také odolnost proti korozním a povětrnostním vlivům. Montmorillonit lze modifikovat vmezeřením organických látek například kvarterní amoniou solí. Formulace epoxidové pryskyřice s 1 hmotn. % přídavku organicky modifikovaného montmorillonitu vykazovala rovnoměrnou distribuci v nátěru a paralelní orientaci s podkladem. Takto orientované částice vykazovaly bariérový efekt, který se pozitivně projevil při zkouškách

korozní odolnosti. Tepelná stabilita a struktura zpěněné vrstvy byla přidavkem organicky modifikovaného montmorillonitu vylepšena. [35]

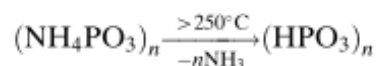
Mikroprášek CaCO_3 získaný z drcených vaječných skořápek byl použit v intumescentním systému na bázi rozpouštědlové akrylátové pryskyřice. Při složení 20 % nano- TiO_2 a 15 % mikroprášku, došlo k dobrému zpěnění a metodou TGA byla potvrzena dobrá tepelná stabilita. [36]

2.4.2 Mechanismus zpěňovacího nátěrového systému

Zpěňovací nátěrové systémy při zahřívání vytváří zuhelnatělou vrstvu na povrchu substrátu, která chrání materiál před účinky plamene. Zpěněná vrstva účinkuje jako fyzická bariéra, která zpomaluje vstup tepla, kyslíku a zplodin hoření. Při užití na hořlavém podkladu má vstup tepla za následek zpomalení tepelné degradace podkladu, a tím zpomalení tvorby hořlavých plynů. Dalším efektem je zpomalení difuze těchto plynů do okolního prostředí.

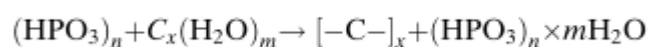
Zpěňovací proces obvykle probíhá v těchto krocích [17, 33, 37]

1. Měknutí a tavení polymerní matrice.
2. Uvolnění anorganické kyseliny.



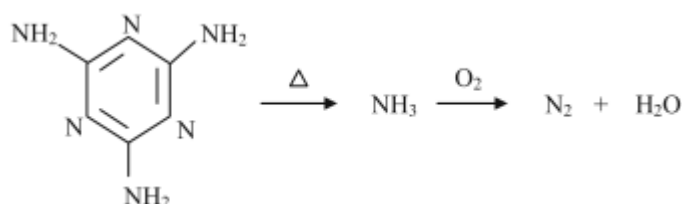
Rovnice 4: Uvolnění anorganické kyseliny [38]

3. Karbonizace zdrojů uhlíku (polyalkoholů).



Rovnice 5: Karbonizace zdrojů uhlíku [38]

4. Uvolnění plynných produktů z nadouvadec (melaminu).

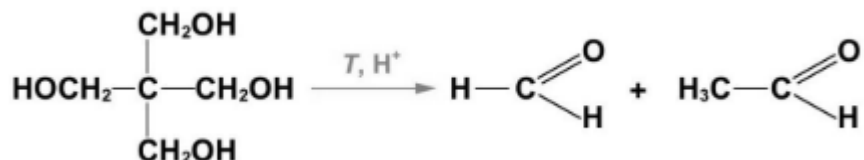


Rovnice 6: Tepelný rozklad melaminu [38]

5. Pěnění a expanze směsi.

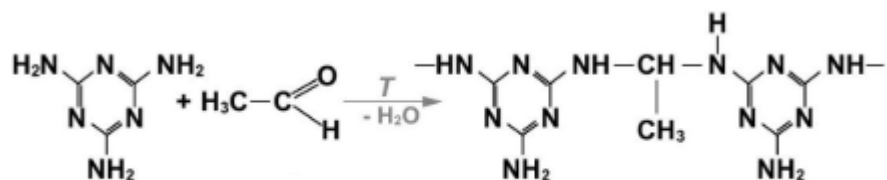
6. Zesítení a ztuhnutí pěny. [38]

Jiné teorie předpokládají, že pentaerythritol není esterifikován fosforečnanem, ale vlivem zvýšené teploty a kyselého prostředí se pentaerythritol rozkládá na formaldehyd a acetaldehyd.



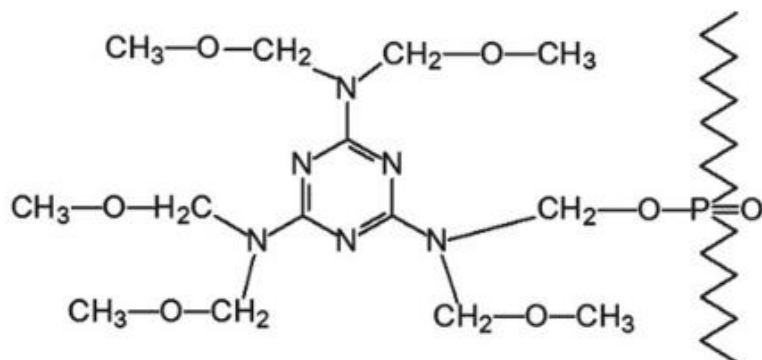
Rovnice 7: Tepelný rozklad pentaerythritolu [39]

Aldehydy vzniklé rozkladem pentaerythritolu jsou zapojeny do syntézy melamin aldehydové pryskyřice, prekursoru pěnového uhlíkového skeletu.



Rovnice 8: Vznik melamin aldehydové pryskyřice [39]

Amonný polyfosfát působí jako regulátor růstu pro melamin aldehydové pryskyřici, když je chemicky vázán na substrát na jedné straně a na druhé straně na melamin. [20, 39]



Obrázek 4: Struktura zesítené intumescentní pryskyřice [20]

Studie [20] zkoumala vzniklou uhlíkatou vrstvu pomocí plynové chromatografie s hmotnostním spektrometrem. Ve vzorcích odebraných při teplotě 400 °C byla zjištěna přítomnost melaminfosfátu, což by vyvracelo domněnku, že se melamin rozkládá na CO, NH₃ a H₂O a má funkci nadouvadla. Plynné složky, které způsobují nadouvání zpěněné vrstvy tak

vznikají jako vedlejší produkty reakcí melaminu s fosforečnou kyselinou a aldehydy vzniklé rozkladem pentaerythritolu.

2.4.3 Pojiva pro intumescentní nátěrové hmoty

Typ pojiva má vliv na intumescentní vlastnosti. Zajišťuje rovnoměrné rozložení plniv, zaručuje adhezi nátěru k podkladu a podílí se na tvorbě zpěněné vrstvy, kdy tvoří uhlíkaté struktury, které jsou katalyticky aktivní. [20] Pro vytvoření kvalitní zpěněné vrstvy by měla být teplota degradace pojiva v podobném rozmezí, jako ostatní zpěňovací aditiva. Důležitá je viskozita taveniny, nízká viskozita by měla za následek stékání, vysoká viskozita by bránila rozpínání zpěněné vrstvy. Ideální tavenina, by měla zadržet plyny vzniklé reakcemi plniv a nebránit expanzi pěny.



Obrázek 5: Příklady a) správně vytvořené zpěněné vrstvy, b) nesprávně vytvořené zpěněné vrstvy [20]

Některá pojiva mají s APP synergický efekt a přímo se podílejí na vzniku pěny, která je více tepelně stabilní. Jako pojivo lze použít velkou škálu polymerních pryskyřic. Typ pojiva také záleží na prostředí, kterému bude nátěr vystaven a odpovídající odolnosti. [38]

Vodouředitelné nátěrové hmoty

Vodouředitelné nátěrové hmoty využívají vody jako hlavní těkavé složky. Použité pryskyřice jsou obvykle modifikovány, aby se zvýšila jejich hydrofilita. Obvykle se používají akryláty, alkydy, polyestery, epoxidy, polyuretany. Výhodou vodouředitelných nátěrových hmot je nízká viskozita, nízký obsah těkavých látek, snížená hořlavost, nízký zápach, a snadná aplikace běžným vybavením. Nevýhodami jsou jejich cena, tendence k tvorbě pěny, nutnost udržení nezámrzné teploty při skladování, nutnost předúpravy povrchů před aplikací, mikrobiální degradace, vysoká vodivost, vliv atmosférické vlhkosti a teploty při zasychání. [40]

V literatuře byly zkoumány například emulze ethylen vinyl acetátu [26, 41], epoxidové emulze [28], silikonová emulze. [42]

Rozpouštědlové nátěrové hmoty

Rozpouštědlové nátěrové hmoty využívají organických rozpouštědel jako hlavní těkavé složky. Historicky byla většina nátěrových hmot na rozpouštědlové bázi. Od poloviny minulého století se od jejich používání začalo ustupovat z důvodů hořlavosti, zápachu, nerozpustnosti ve vodě a obsahu těkavých rozpouštědel. Jejich výhodou je nižší cena aplikačního vybavení, vypařování rozpouštědla není závislé na vlhkosti prostředí, nevyskytuje se pění při míchání. [43] V literatuře byly zkoumány například epoxidové pryskyřice [44, 45], akrylátová pryskyřice [46, 47].

2.5 Metody používané pro hodnocení protipožárních hmot

2.5.1 Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla (ČSN EN ISO 4589-2)

Metoda slouží k určení minimální objemové frakce kyslíku ve směsi s dusíkem, která umožní hoření malého vertikálně umístěného vzorku za daných podmínek. Zkušební zařízení se skládá ze skleněného válce velkého 50 cm s průměrem 10 cm. Uvnitř je držák, ve kterém je zkušební vzorek vertikálně umístěn. Válcem proudí směs kyslíku a dusíku vzhůru v laminárním proudění. Horní část vzorku je zapálená a je pozorován charakter hoření. Kyslíkové číslo je nejnižší koncentrace O_2 ve směsi s N_2 , při které zapalovaný materiál hoří po zapálení méně než 180 s a při minimálním zvýšení koncentrace O_2 hoří déle než 180 s. V případě, že není možno použít časové kritérium, používá se kritérium délky odhoření vzorku 100 mm (např. u plošných vzorků).

2.5.2 Termogravimetrická analýza (TG)

Termogravimetrická analýza měří změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě. Teploty, při kterých se tyto změny dějí, souvisí se složením. Pokud se složení vzorku nemění, je závislostí vodorovná přímka. Pokud začne nastávat úbytek hmotnosti, objeví se sestupný schod. Křivka se dá také vynášet jako derivační a potom má tvar píků. Zařízení pro TGA vyžaduje pícku, ve které je kelímek na vzorek napojený na citlivé váhy. Atmosféra v pícce je inertní. Při tepelných rozkladech lze analyzovat unikající plyny pomocí infračervené spektroskopie nebo hmotnostní spektroskopie. Metodu TGA lze v moderních zařízeních výhodně kombinovat s DTA a získáme tak obě křivky při stejných podmínkách. [48]

2.5.3 Diferenciální termická analýza (DTA)

Diferenciální termická analýza měří teplotní rozdíl mezi vzorkem a srovnávacím materiálem jako funkci teploty při zahřívání nebo ochlazování materiálu. Teplotní rozdíly mezi sledovanými látkami se objevují v důsledku tepelně zabarvených fyzikálních a chemických dějů. DTA křivka je závislost teplotního rozdílu na teplotě (času). Ve variantě DSC se vynáší tepelný tok dH/dt v mW proti teplotě (času). Jestliže ve vzorku nastane při určité teplotě endotermický pochod, objeví se to zvýšením teploty oproti srovnávacímu vzorku a na grafické závislosti se objeví maximum. Při endotermickém ději ve vzorku se na křivce objeví minimum. Základem zařízení pro diferenční termickou analýzu je pírka válcového tvaru. V její ose je dvojice malých kelímků pro vzorek a srovnávací látku spojená termočlánky. Ohřev je elektrický. Atmosféra bývá zpravidla inertní, například dusíková nebo heliová. Pracovní teploty mohou dosahovat 1600°C. [48]

2.5.4 Zkoušky požární odolnosti (ČSN EN 1363-1)

Cílem zkoušek je posouzení chování vzorku stavební konstrukce vystavené definovaným podmínkám ohřívání a tlaku. Jsou stanovena kritéria funkcí, pomocí kterých lze vyhodnotit nosnost, zabránit průniku ohně (udržení celistvosti) a postupu tepla (tepelná izolace). Zkoušky probíhají ve speciálně konstruovaných pecích, které musí být schopny zajistit výše uvedené podmínky zkoušek. Pro některé zkoušky může být použito zatěžovací zařízení, které může být mechanické, hydraulické, nebo závaží. Zatěžovací zařízení nesmí znatelně ovlivnit podmínky zkoušek. Požární odolnost zkušného prvku je vyjádřena dobou, po kterou jsou splněna kritéria zkoušky. Takto získané časy jsou měřítkem, zda je konstrukce vyhovující při požáru, ale nemají přímý vztah k trvání skutečného požáru.

2.5.5 Intumescentní koeficient

Intumescentní koeficient se používá v laboratorní praxi k určení intumescentních vlastností. Je určen zahřátím nátěru o známé tloušťce naneseném na kovovém panelu v peci. Ke zpěnění dochází po vystavení vzorku teplotě 500 °C po dobu 5 minut.

Intumescentní koeficient C_{int} je definován jako poměr tloušťky zpěněné vrstvy h_s a původní tloušťce nátěru h_0 .

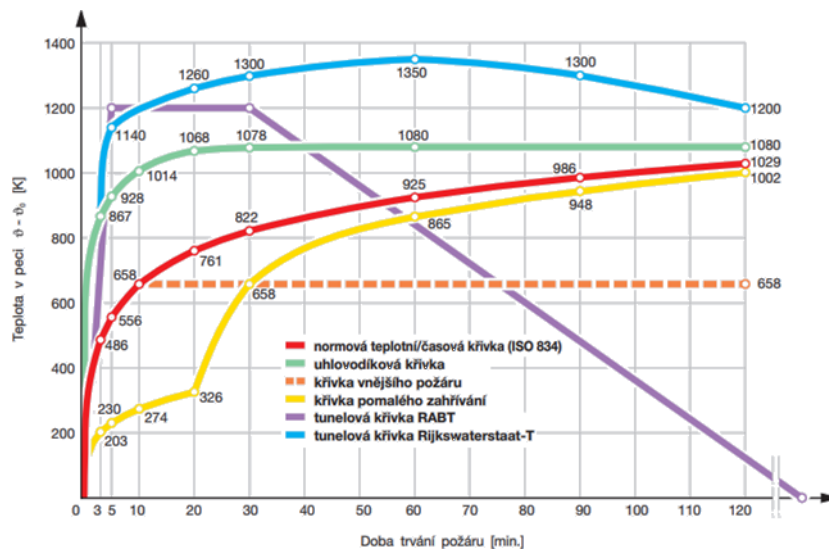
$$C_{int} = \frac{h_S}{h_0}$$

Rovnice 9: Výpočet intumescentního koeficientu

Kde: T...teplota plynů [°C], t...čas [min]

2.5.6 Testy ohnivzdornosti

Na základě mezinárodních výzkumů byly zjištěny typy požárů, ke kterým může docházet v prostředí staveb. Byla proto vyvinuta řada časově/teplotních křivek pro simulaci hoření z různých zdrojů.



Obrázek 6: Křivky hoření používané k simulaci požáru [49]

Normovaná teplotní křivka (ISO 834) vyjadřuje normové namáhání pro stanovení doby požární odolnosti částí stavby, zatímco ostatní typy zatížení jsou omezeny na určité případy použití. Nárůst teploty je vypočítán podle následující rovnice:

$$T = 20 + 345 \cdot \text{Log}_{10}(8t + 1)$$

Rovnice 10: Vývoj teploty celulókové křivky [49]

Kde: T ... teplota plynů [°C], t ... čas [min]

Uhlovodíková křivka byla vyvinuta pro potřeby petrochemického průmyslu, kde lze očekávat hoření ropných produktů a chemikálií a kde mohou vysoká požární zatížení při dostatečném přívodu kyslíku způsobit rychlejší vzrůst teploty, než je tomu u ISO 834. Ještě vyšší teploty než u ISO 834 a uhlovodíkové křivky mohou vzniknout v dopravních tunelech.

Křivka vnějšího požáru platí pouze pro požární zatížení zvnějšku a zohledňuje přitom obecně nižší teploty ve srovnání s požárem uvnitř budovy. [49]

2.5.7 Charakterizace zpěněné vrstvy

Pro hodnocení zpěněné vrstvy vytvořené během spalování lze použít několik metod. Mohou to být například: rastrovací elektronová mikroskopie–SEM, infračervená spektroskopie–IR, rentgenová difrakce–XRD. Pomocí těchto metod lze určit prvkové a strukturní složení zbytkové zuhelnatěné vrstvy a objasnit tím intumescentní procesy. Pomocí SEM lze určit velikost a četnost pórů vzniklých při zpěňování.

3 Experimentální část

3.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce bylo naformulovat a připravit intumescentní nátěrové systémy a studovat jejich požární a korozní odolnost včetně mechanických vlastností. Byly připraveny nátěrové systémy na bázi: styren akrylátové vodné disperze, vodné emulze alkydové pryskyřice, vodné disperze epoxidové pryskyřice, a rozpouštědlový typ epoxyesterové pryskyřice. Pro studium protipožárních vlastností byly připraveny formulace, které obsahovaly různé poměry intumescentních plniv, konkrétně polyfosfát amonný, melamin, dipentaerytritol a titanovou bělobu TiO_2 . Pro posouzení korozní odolnosti byly připraveny vzorky obsahující fosforečnan zinečnatý ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) jako antikorozní pigment. Připravené nátěrové hmoty byly poté aplikovány na ocelové a skleněné panely a byly studovány jejich fyzikálně–mechanické vlastnosti a mechanická odolnost. Organické povlaky byly podrobeny cyklickým korozním testům v atmosféře s NaCl a za zvýšené vlhkosti. Intumescentní vlastnosti byly zkoumány vystavením vzorků vysokých teplotám v elektrické peci, analýzou pomocí infračervené spektroskopie a termickým analýzám. V rámci práce byl studován vliv typu pojiva a poměru plniv na intumescentní vlastnosti a přítomnost antikorozičního pigmentu na korozní odolnost. Závěrem práce bylo zhodnocení získaných výsledků, určení vhodného složení intumescentního nátěru z hlediska poměru plniv a vhodného pojiva, doporučení, do jakého korozního prostředí by bylo možné dané organické povlaky použít.

3.2 Specifikace surovin

3.2.1 Použité typy pojiv

Pojivo Axilat 2802A

Složení: styren akrylátová vodná disperze

Rozpouštědlo: voda

Sušina: 50 %

Viskozita: $0,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$

Původ: Hexion Sokolov

Pojivo CHS-Hydrospol D870 F

Složení: vodná emulze olejem modifikované alkydové pryskyřice

Rozpouštědlo: voda

Sušina: 50 %

Viskozita: 0,2 Pa.s⁻¹

Původ: Spolchemie a.s., Ústí nad Labem

Pojivo CHS-Epoxy 200 V 55

Složení: vodná disperze epoxidové pryskyřice

Rozpouštědlo: voda

Sušina: 50 %

Viskozita: 0,2 Pa.s⁻¹

Původ: Spolchemie a.s., Ústí nad Labem

Pojivo Worleé Dur D46

Složení: olejem modifikovaná epoxyesterová pryskyřice

Rozpouštědlo: xylen

Sušina: 50 %

Viskozita: 3,6-4,8 Pa.s⁻¹

Původ: Worleé, Hamburg

3.2.2 Seznam použitých pigmentů

Název: Polyfosforečnan amonný

Složení: [NH₄PO₃]_n

Výrobce: Adichem spol. s r.o.

Název: Melamin

Složení: (2,4,6-triamino-1,3,5-triazin)

Výrobce: Adichem spol. s r.o.

Název: Dipentaerythritol

Složení: C₁₀H₂₂O₇

Výrobce: Perstorp Specialty Chemicals AB

Název: Oxid titaničitý

Složení: TiO₂

Výrobce: Precheza, Přerov

Název: Fosforečnan zinečnatý (ZP 10)

Složení: Zn₃(PO₄)₂·2H₂O

Výrobce: Heubach, SRN

3.2.3 Další použité chemikálie

Název: Destilovaná voda

Složení: H₂O

Výrobce: Unverzita Pardubice

Název: Aceton

Složení: C₃H₆O

Výrobce: Penta s.r.o., Praha, Česká republika

Název: Chloroform

Složení: CHCl₃

Výrobce: Penta s.r.o., Praha, Česká republika

3.2.4 Přístrojové vybavení

Přístroje sloužící k přípravě a charakterizaci částic pigmentů a plniv

Laboratorní váhy (Kern & Sohn GmbH, Německo), analytické váhy (OHAUS, Švýcarsko), heliový pyknometr (Micromeritics AccuPyc II 1340, USA), grindometr (Elcometr).

Přístroje a pomůcky použité k přípravě a zhotovení nátěrových hmot

Dispergační zařízení (Netsch, Německo), nanášecí krabicová pravítka se štěrbinou 150–300 μm (Česká republika).

Přístroje pro stanovení fyzikálních vlastností a mechanické odolnosti nátěrových filmů

Tloušťkoměr (MINITEST 1100, ElektroPhysik, Německo), mechanický úchylkoměr, kyvadlový přístroj (typ Persoz, Automatic 500, Belgie), přístroj na stanovení odolnosti úderem (Elcometr K1542, Impact tester, Velká Británie), Erichsenův přístroj (Erichsen, Německo), řezací nůž (Cross cut, Elcometr), odtrhový přístroj (COMTEST OP3P, Coming plus a. s., Praha).

Přístroje a zařízení použité ke stanovení antikorozi odolnosti nátěrových filmů

Korozi komora s kondenzací solné mlhy (Liebisch, Německo), kondenzační komora (KB 400-MTR-K, Liebisch, Německo).

Přístroje a zařízení použité ke stanovení požární odolnosti nátěrů

Elektrická pec (Clasic), FT-IR spektrometr S 50 (Nicolet), posuvné měřítko (Geko), infračervený teploměr (Voltcraft), Simultánní termoanalyzátor Labsys Evo.

3.3 Stanovení fyzikálních vlastností pigmentů

3.3.1 Stanovení hustoty pigmentů

Hustota pigmentů je důležitým ukazatelem jejich použitelnosti; zejména v nátěrových hmotách a tmelech závisí stabilita suspenze na rozdílu mezi hustotou pigmentu a hustotou pojiva. Hustota je také důležitým ukazatelem pro posouzení druhu a čistoty zkoumaného pigmentu. Hustota byla měřena pomocí plynového pyknometru. Principem je měření objemu plynu (helium), který je vytěsněn vzorkem pigmentu. Pyknometr byl před použitím kalibrován za pomoci kalibračních kovových kuliček o známém objemu. Na analytických vahách bylo odváženo konkrétní množství pigmentu a výsledná hustota pigmentů byla vypočtena na základě rozdílnosti objemů.

3.3.2 Stanovení spotřeby oleje a kritické objemové koncentrace pigmentu (KOKP)

Stanovení spotřeby lněného oleje je nutným parametrem k výpočtu kritické objemové koncentrace pigmentů (KOKP), která je nezbytná pro formulaci nátěrových hmot. Stanovení se provádí metodou miska–tlouček dle normy ČSN 670531. Do třecí misky bylo naváženo 1,5–5 g pigmentu. Pigment byl míchán tloučkem a z byrety byl přikapáván lněný olej. Stanovení bylo ukončeno ve chvíli, kdy veškerý pigment ulpěl na tloučku a třecí miska zůstala čistá. Z byrety byla odečtena spotřeba oleje v ml a podle rovnice 14 bylo vypočteno olejové číslo.

$$\text{Olejové číslo} = \frac{100 \cdot V_{\text{oleje}} \cdot \rho_{\text{oleje}}}{m_{\text{pigmentu}}}$$

Rovnice 11: Výpočet olejového čísla

Kde: V_{oleje} ... objem oleje [ml], m_{pigmentu} ... hmotnost [g], ρ_{oleje} ... hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

KOKP je hodnota objemové koncentrace pigmentu, nad kterou se výrazně mění stanovené vlastnosti nátěrové hmoty. Při tomto stavu je objem pojiva dostatečný na to, aby pokryl povrch pigmentu a vyplnil mezery mezi těsně uspořádanými částicemi. Výpočet hodnoty KOKP se provádí na základě znalostí hustoty pigmentu a výpočtu olejového čísla.

$$\text{KOKP} = \frac{\frac{10000}{\rho_{\text{pigm}}}}{\frac{100}{\rho_{\text{pigm}}} + \frac{\text{olejové číslo}}{\rho_{\text{ol}}}}$$

Rovnice 12: Výpočet KOKP

Kde: ρ_{ol} ... hustota lněného oleje [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$], ρ_{pigm} ... hustota pigmentu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

3.4 Příprava nátěrových hmot

3.4.1 Formulace nátěrových hmot

Formulace nátěrových hmot byly navrženy s využitím programu „Formul“. Byly připraveny modelové řady, ve kterých byly jako pojiva použity styren–akrylátová vodná disperze Axilat 2802A, epoxidová pryskyřice CHS–Epoxy 200 V 55, alkydová pryskyřice CHS–Hydrospol D870 F a rozpouštědlová epoxyesterové pryskyřice Worleé Dur D46. Jako zpěňovací plniva byly použity polyfosforečnan amonný (APP), dipentaerythritol (DPER) a melamin (MEL). Pro každé pojivo byly připraveny formulace s poměry APP:DPER:MEL v poměrech 1,5:1:1 a 3:1:1. Formulace dále obsahovaly dispergační, rheologická a odpěňovací aditiva. Pro zvýšení antikorozi odolnosti byla připravena formulace s obsahem fosforečnanu zinečnatého ZP 10. Jednotlivé formulace modelových nátěrových hmot jsou uvedeny v tabulkách 2–5.

Tabulka 2: Formulace pojiv na základě vodou ředitelné styren akrylátové vodné disperze Axilat 2802A

Nátěrový systém	pojivo [hm %]	voda [hm %]	EGBE [hm %]	APP [hm %]	DPER [hm %]	MEL [hm %]	TiO ₂ [hm %]	ZP10 [hm %]
AKR/1,5:1	30	20	5	15	10	10	9,5	-
AKR/1,5:1/ZP	30	20	5	12	7	7	9,5	9
AKR/3:1	30	20	5	22	7	7	9,5	-
AKR/3:1/ZP	30	20	5	16	5,5	5,5	9,5	9

Pozn: EGBE–ethylenglykol butyl ether, APP–polyfosforečnan amonný, DPER– dipentaerythritol, MEL–melamin, ZP10– $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AKR–styren akrylátová vodná disperze

Tabulka 3: Formulace pojiv na základě alkydové pryskyřice CHS-HYDROSPOL D870 F

Nátěrový systém	pojivo [hm %]	voda [hm %]	EGBE [hm %]	APP [hm %]	DPER [hm %]	MEL [hm %]	TiO ₂ [hm %]	ZP10 [hm %]
ALK/1,5:1	30	20	5	15	10	10	9,5	-
ALK/1,5:1/ZP	30	20	5	12	7	7	9,5	9
ALK/3:1	30	20	5	22	7,5	7,5	9,5	-
ALK/3:1/ZP	30	20	5	15,5	5	5	9,5	9

Pozn: EGBE–ethylenglykol butyl ether, APP–polyfosforečnan amonný, DPER– dipentaerythritol, MEL–melamin, ZP10– $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice

Tabulka 4: Formulace pojiv na základě epoxidové pryskyřice CHS-Epoxy 200 V 55

Nátěrový systém	pojivo [hm %]	voda [hm %]	EGBE [hm %]	APP [hm %]	DPER [hm %]	MEL [hm %]	TiO ₂ [hm %]	ZP10 [hm %]
EPOX/1,5:1	30	10	5	15	10	10	9,5	-
EPOX/1,5:1/ZP	30	10	5	12	7	7	9,5	9
EPOX/3:1	30	10	5	22	7,5	7,5	9,5	-
EPOX/3:1/ZP	30	10	5	21	7	7	9,5	9

Pozn: EGBE–ethylenglykol butyl ether, APP–polyfosforečnan amonný, DPER–dipentaerythritol, MEL–melamin, ZP10–Zn₃(PO₄)₂·2H₂O, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice

Tabulka 5: Formulace pojiv na základě epoxyesterové pryskyřice Worlé Dur D46

Nátěrový systém	pojivo [hm %]	xylen [hm %]	APP [hm %]	DPER [hm %]	MEL [hm %]	TiO ₂ [hm %]	ZP10 [hm %]
EST/1,5:1	35	10	20	13	13	9,5	-
EST/1,5:1/ZP	35	10	15	10	10	9,5	9
EST/3:1	35	10	27	9	9	9,5	-
EST/3:1/ZP	35	10	23	7,5	7,5	9,5	9

Pozn: EGBE–ethylenglykol butyl ether, APP–polyfosforečnan amonný, DPER–dipentaerythritol, MEL–melamin, ZP10–Zn₃(PO₄)₂·2H₂O, EST–epoxyesterová pryskyřice

3.4.2 Příprava nátěrových hmot

Na laboratorních vahách bylo naváženo pojivo a zpěňovací plniva dle formulací uvedených v tabulkách 3–6. Pojivo bylo umístěno do kovové nádoby pod dispergátor a při nízkých otáčkách (500 ot/min) mícháno po dobu 15 min a byly do něj přidány dispergační aditivum a zpěňovací plniva. Počet otáček byl poté zvýšen na 2000 ot/min a dispergace probíhala 60 minut. Před koncem dispergace byla přidána aditiva ovlivňující rheologické vlastnosti výsledných nátěrových hmot, jejich pěnovost a sedimentaci.

3.5 Příprava zkušebních vzorků

3.5.1 Příprava zkušebních vzorků na skleněné panely

Nátěrové hmoty byly aplikovány na skleněné panely velikosti 20 x 10 cm a tloušťce 0,4 cm. Panely byly očištěny mýdelným roztokem a poté chloroformem. Nátěrová hmota byla aplikována nanášecím pravítkem se šterbinou 200 μm v jedné vrstvě. Zasychání nátěrů probíhalo po dobu 28 dní v klimatizované místnosti při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 % podle normy ČSN EN 23270.

3.5.2 Příprava zkušebních vzorků pro mechanické testy

Nátěrové hmoty byly aplikovány na ocelové panely velikosti 20 x 5 cm a tloušťce 0,7 mm, které jsou z jedné strany obroušené. Panely byly očištěny acetonem a poté chloroformem. Nátěrová hmota byla aplikována nanášecím pravítkem se štěrbinou 250 μm ve dvou vrstvách tak, aby celková tloušťka nátěrového systému byla $120 \pm 10 \mu\text{m}$. Zasychání nátěrů probíhalo po dobu 28 dní v klimatizované místnosti při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$ podle normy ČSN EN 23270.

3.5.3 Příprava zkušebních vzorků pro odtrhovou zkoušku, pro hodnocení zpěněné vrstvy a pro test ohnivzdornosti

Nátěrové hmoty byly aplikovány na otryskané ocelové panely o velikosti 100x150x3 mm. Panely byly očištěny acetonem a poté chloroformem, nátěrové hmoty byly aplikovány nanášecím pravítkem se štěrbinou 250 μm v několika vrstvách tak, aby celková tloušťka nátěrového systému byla $500 \pm 20 \mu\text{m}$. Zasychání nátěrů probíhalo po dobu 28 dní v klimatizované místnosti při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$ podle normy ČSN EN 23270.

3.5.4 Příprava zkušebních vzorků pro korozní testy

Nátěrové hmoty byly aplikovány na ocelové Q-panely typu S46, které jsou z jedné strany obroušené. Panely byly očištěny acetonem a poté chloroformem. Nátěrová hmota byla aplikována nanášecím pravítkem ve dvou vrstvách nanášecím pravítkem se štěrbinou 250 μm tak, aby celková tloušťka nátěrového systému byla $120 \pm 10 \mu\text{m}$. Zasychání nátěrů probíhalo po dobu 28 dní v klimatizované místnosti při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$ podle normy ČSN EN 23270.

3.6 Metody hodnocení vlastností nátěrových hmot

3.6.1 Zkouška stanovení jemnosti tření ČSN EN ISO 1524

Účelem zkoušky je stanovení jemnosti tření a dispergace nátěrových hmot. Grindometr je tvořen blokem z tvrzené oceli a je v něm vybroušený žlábek, který se po celé délce rovnoměrně zmenšuje od dané hloubky do nuly, a je doplněn o stupnici. Stěrka je tvořená ocelovou čepelí s jedním nebo dvěma ostřími. Do hlubšího konce žlábků se nalije takové množství vzorku, aby nepatrně přetékal ze žlábků. Stěrka se uchopí kolmo k povrchu

grindometru a v pravém úhlu k ose žlábků. Stěrkou se rovnoměrnou rychlostí během 1–2 sekundy táhne až za konec žlábků. Zjišťuje se místo, kde se ve vzorku objevuje pět až deset částic anebo rýh v oblasti široké 3 mm. Vypočte se aritmetický průměr ze tří stanovení.

3.7 Metody hodnocení fyzikálně mechanických vlastností nátěrových filmů na skle a na oceli

3.7.1 Měření tloušťky nátěrového filmu (ČSN ISO 2808)

Měření suché tloušťky nátěrových filmů (DFT) na ocelových panelech bylo provedeno nedestruktivní metodou pomocí magnetického tloušťkoměru podle normy ČSN ISO 2808, kdy byla na deseti místech změřena suchá tloušťka nátěrového filmu a hodnoty byly statisticky vyhodnoceny. Před každým měřením byl přístroj kalibrován na ocelovém panelu. Měření suché tloušťky nátěrových filmů na skle bylo provedeno destruktivní metodou pomocí mechanického tloušťkoměru podle normy ČSN ISO 2808.

3.7.2 Zkouška tvrdosti nátěru tlumením kyvadla (ČSN EN ISO 1522)

Stanovení relativní povrchové tvrdosti nátěru bylo měřeno pomocí metody útlumu kyvadla. Naměřená tvrdost se udává jako poměr tvrdosti vzorku vůči skleněnému standardu (tvrdost standardu brána jako 100 %). Měření probíhalo na kyvadlovém přístroji v režimu podle Persöze. Principem měření bylo stanovení doby útlumu kyvadla, které je s nátěrem v kontaktu dvěma kuličkami, které slouží jako opěrné body. Kyvadlo bylo vychýleno o 12° a byl měřen počet kmitů potřebných ke snížení amplitudy na 4°. Naměřené výsledky se poté hodnotí oproti výrobcem přiloženému skleněnému standardu. Z naměřených hodnot se nakonec vypočítá relativní povrchová tvrdost dle rovnice 16.

$$\tau = \frac{t_1}{t_2} 100$$

Rovnice 13 Výpočet relativní povrchové tvrdosti nátěrového filmu.

Kde: τ ... relativní povrchová tvrdost [%], t_1 ... počet kmitů vzorku, t_2 ... počet kmitů standardu

3.7.3 Zkouška rychlou deformací (odolnost proti úderu) (ČSN EN ISO 6272-2)

Zkouška spočívá v testování odolnosti nátěru vůči normalizovanému závaží s úderníkem, který deformuje podklad. Zkušební závaží se skládá ze svislého tubusu pro vedení válcového

závaží, které se spouští na úderník opřený o zkušební vzorek. Zkoušku lze provést natřenou stranou vzorku vzhůru (proti padajícímu závaží a úderníku) nebo stranou dolů (směrem od závaží a úderníku). Postupným zvětšováním vzdálenosti, ze které závaží padá, lze stanovit hodnotu, při které nastává poškození. U nátěrů obvykle dochází k praskání, které je viditelné. Výsledkem je uvedení výšky pádu v cm, při které došlo k viditelnému poškození.

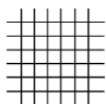

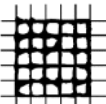

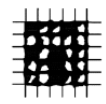
3.7.4 Zkouška ohybem (na válcovém trnu) (ČSN EN ISO 1519)

Tato zkouška spočívá v hodnocení odolnosti povlaků proti praskání, anebo oddělení od kovového podkladu při ohybu přes válcový trn. Vzorek se do zkušebního zařízení vloží shora mezi ohýbací čelist a trn. Nastavovacím šroubem a upínacími čelistmi se vzorek zafixuje tak, aby ohýbací část, vzorek a trn byly v kontaktu. Ohyb se provede konstantní rychlostí v průběhu 1–2 s a zkušební vzorek se ohne o 180°. Zkouška se opakovala na postupně menších trnech, aby se zjistil průměr prvního trnu, kdy dojde k prasknutí, anebo oddělení nátěru od podkladu. Povlaky byly testovány na válcových trnech o průměrech 25 až 3 mm.

3.7.5 Mřížková zkouška (ČSN EN ISO 2409)

Tato zkouška spočívá v provedení řezů ve tvaru mřížky do nátěru a následné vizuální porovnání stavu nátěrového filmu se stupnicí. Metoda stanovuje odolnost nátěru vůči oddělení od podkladu, jestliže je nátěr proříznut pravoúhlou mřížkou až k podkladu. Mřížka byla provedena řezným nástrojem s jedním ostřím za použití odpovídající distanční šablony. Charakter poškození vzorků byl vizuálně porovnán s klasifikační tabulkou normy a byl určen stupeň poškození.

Tabulka 6: Klasifikace stupňů přilnavosti podle normy ČSN EN ISO 2409

Klasifikace	Vzhled povrchu plochy	Popis
0		Hrany řezů jsou hladké, žádný čtverec mřížky není poškozen
1		Odloupení malinkých šupinek v místech, kde se řezy kříží, poškozená plocha nesmí přesahovat 5 %
2		Nátěr je odloupen podél řezů a v místech jejich křížení, povrch mřížky smí být poškozen o více než 5 % a méně než 15 %
3		Nátěr je poškozen v rozích řezů, podél řezných hran částečně, nebo celý, na různých místech mřížky, poškození je větší než 35 %
4		Nátěr odloupen podél řezů a některé čtverečky jsou částečně nebo zcela poškozeny, plocha mřížky převyšuje 35 % ale ne 65 % plochy mřížky
5	-	Rozsah změn, které nelze klasifikovat stupněm 4

3.7.6 Zkouška hloubením ČSN EN ISO 1520

Zkouškou se stanovuje odolnost nátěrů vůči popraskání nebo odloupení od kovového podkladu při vystavení deformací hloubením. Principem je vtlačení ocelové koule o průměru 20 mm do plechu s nátěrem. Nejprve se vzorek se uchytí do Erichsenova přístroje. Tlačení koule probíhá konstantní rychlostí a probíhá do doby, kdy se na vzorku projeví viditelná deformace. Zjišťuje se hloubka vtlačení v mm koule do ocelového panelu.

3.7.7 Odtrhová zkouška přilnavosti (ČSN EN ISO 4624)

Tato metoda stanovuje přilnavost nátěrového filmu k podkladu měřením minimálního napětí v tahu potřebného k oddělení nebo odtržení nátěru ve směru kolmém k podkladu. Odtrhová metoda spočívá v přilepení zkušebních tělísek o průměru 20 mm na povrch nátěru. Po zaschnutí lepidla byl okolo zkušebního tělíska nátěrový film proříznut na podklad za použití

řezného nástavce. Zkušební sestava byla umístěna do trhačického zařízení. Během zkoušky bylo zvyšováno napětí kolmo k rovině natřeného podkladu, dokud nedošlo k rozlomení nejslabšího rozhraní (adhezní porušení mezi vrstvami) nebo nejslabší složky (kohezní porušení v jedné vrstvě). Odrhové napětí bylo přepočteno na odtrhovou pevnost a charakter lomu byl vyhodnocen podle normy.

$$\sigma = \frac{4F_m}{\pi d^2}$$

Rovnice 14: Výpočet odtrhové pevnosti

Kde: σ – odtrhová pevnost [MPa], F_m – maximální odtrhová síla [N], d – průměr lepeného terčíku [mm]

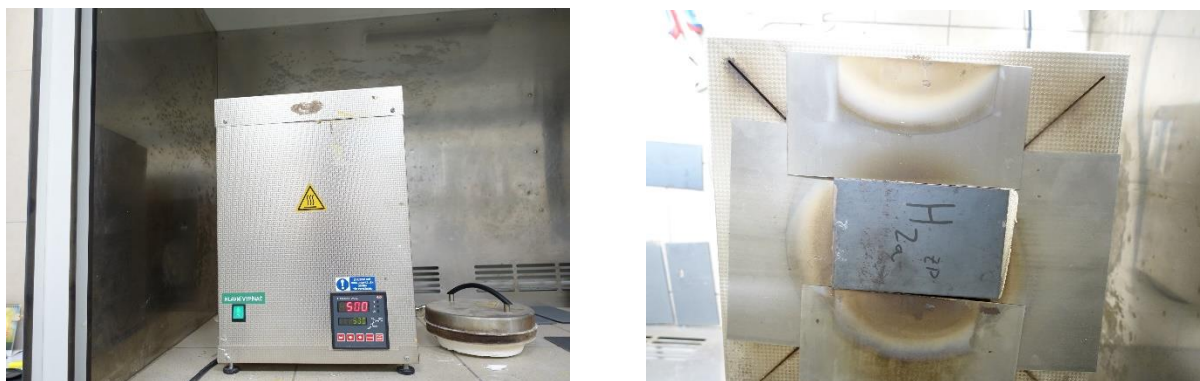
Tabulka 7: Klasifikace typu lomu podle ČSN EN ISO 4624

Symbol	Typ lomu
A	Kohezní porušení v podkladu
A/B	Adhezní porušení mezi podkladem a první vrstvou
B	Kohezní porušení v první vrstvě
B/C	Adhezní porušení mezi první a druhou vrstvou
C	Kohezní lom v druhé vrstvě
C/D	Adhezní porušení mezi druhou a třetí vrstvou
D	Kohezní lom v třetí vrstvě
-Y	Adhezní lom mezi nátěrem a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a tělítkem

3.8 Metody hodnocení a testování nátěrových hmot

3.8.1 Test ohnivzdornosti

Podstatou testu ohnivzdornosti zpěňovatelných nátěrů je stanovení doby, po kterou nátěrový systém odolá působení zvýšené teploty. Na zadní straně panelu byla v pravidelných intervalech měřena teplota a výsledkem testu je závislost teploty na čase. Test byl prováděn do dosažení předem určené teploty, maximálně po dobu 30 minut. Teplota, při které byly vzorky zkoušeny byla 500°C. Vzorky byly zkoušeny v elektrické kelímkové peci od firmy Clasic. Nejprve byla pec vyhřáta na požadovanou teplotu a poté se na vršek pece umístil vzorek tak, aby na stranu s nátěrem působilo vnitřní prostředí pece a vzorek byl ve výšce 27 cm od dna pece. Z důvodu vývoje zplodin hoření bylo nutné pracovat v digestoři.



Obrázek 7: Umístění pece a vzorku

3.8.2 Charakterizace zpěněné vrstvy

Pro hodnocení zpěněné vrstvy byly vzorky vypalovány v elektrické kelímkové peci od firmy Clasic při teplotách výpalu 300°C, 500°C a 700°C. Byla změřena výška zpěněné vrstvy a podle rovnice 10 vypočítán intumescentní koeficient.

3.8.3 Infračervená spektroskopie

FTIR analýza byla provedena metodou ATR (diamantový krystal) ke zjištění přítomných funkčních skupin ve vytvrzených nátěrových filmech a ve vzorcích uhlíkatých vrstev při teplotách výpalu 300°C, 500°C a 700°C. Měření bylo provedeno na přístroji iS 50 od firmy Nicolet v rozsahu vlnočtů 400-4000 cm^{-1} se 128 sceny a rozlišením 4 cm^{-1} .

3.8.4 Termické metody (TGA, DSC)

Termogravimetrická analýza a diferenční skenovací kalorimetrie byly provedeny na vzorcích vytvrzených nátěrových hmot. Měření probíhalo rychlostí ohřevu 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. v přítomnosti vzduchu v rozpětí teplot 30–600 $^{\circ}\text{C}$ na přístroji LabSys evo.

3.9 Metody hodnocení vlastností nátěrových filmů pomocí cyklických korozních zkoušek

3.9.1 Korozní zkouška solnou mlhou

Tato cyklická zkouška byla odvozena podle normy ČSN ISO 9227. Při zkoušce je využíváno vlivu NaCl, zvýšené teploty a zvýšené vlhkosti vzduchu. Vzorky byly podrobeny expozici, při níž se opakovaly 12 hodinové cykly. Nejprve na vzorky působila po dobu deseti hodin solná mlha (5 % roztok NaCl), následovala hodinová kondenzace destilované vody při teplotě 40 $^{\circ}\text{C}$ a následně vzorky hodinu osychaly. Vzorky byly kontrolovány po 168 hodinách.

3.9.2 Korozní zkouška s povšechnou kondenzací

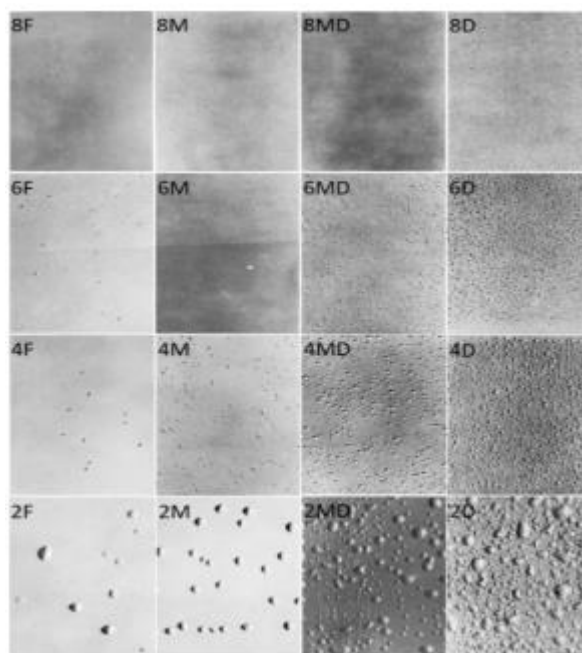
Zkouška byla provedena podle normy ČSN ISO 6270-2. Během zkoušky byly vzorky vystaveny prostředí 100 % relativní vlhkosti za teploty 38 ± 2 °C, a na vzorcích tak docházelo ke kondenzaci vody. Cílem zkoušky je zjistit odolnost nátěrových filmů vůči vzdušné vlhkosti. Vzorky byly kontrolovány po 168 hodinách.

3.10 Hodnocení korozních zkoušek

Ve zrychlených korozních zkouškách byly vzorky vystaveny v normovaných podmínkách zesíleným vlivům korozních činitelů: vody, teploty, vysoké vlhkosti a koncentrace korozních látek. Na vzorcích byla vyhodnocena koroze v ploše, v okolí řezu a množství puchýřů v ploše.

3.10.1 Metoda hodnocení stupně puchýřovatení dle normy ASTM D 714-87

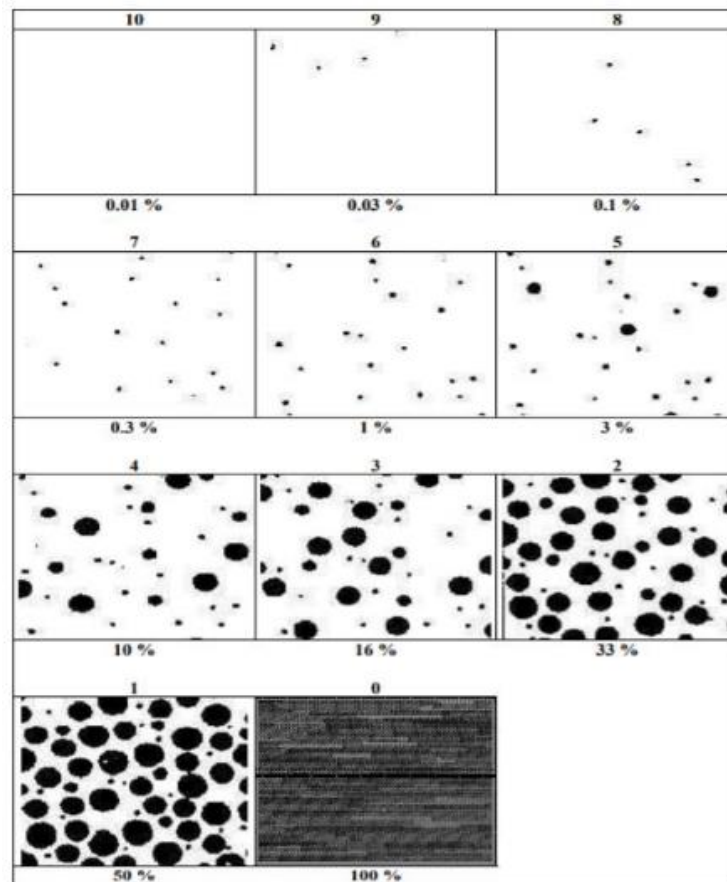
Vzorky byly vyhodnoceny ihned po skončení korozních zkoušek v korozních komorách. Vyhodnocení bylo provedeno porovnáním s fotografickými standardy podle normy ASTM D 714–78. Jednotlivé fotografické standardy jsou uvedeny na obrázku 6. Puchýřky byly hodnoceny podle velikosti a četnosti. Podle velikosti jsou puchýře popsány čísly 2, 4, 6, 8 (2 jsou nejmenší puchýřky a 8 největší puchýřky). Četnost puchýřků se označuje písmeny F (few), M (medium), MD (medium dense) a D (dense), kdy je F nejmenší četnost a D největší četnost.



Obrázek 8: Fotografické standardy puchýřků podle normy ASTM D 714-78

3.10.2 Metoda hodnocení koroze v ploše podle normy ASTM D 610-85

Touto metodou byl hodnocen rozsah koroze plochy pod zkoušeným organickým povlakem. Po ukončení expozice byl organický povlak z ocelových panelů odstraněn pomocí odstraňovače nátěrů a opláchnut vodou. Výsledkem byla hodnota plochy zasažená korozí vyjádřená v procentech. Standardy normy pro porovnání výsledků jsou uvedeny na obrázku 8.



Obrázek 9 Fotografické standardy pro vyhodnocení stupně koroze podle ASTM D 610-85

3.10.3 Určení předpokládané životnosti nátěru v korozních prostředích

Koroze je v přírodních podmínkách podmíněna přítomností kyslíku a vody, v průmyslovém a městském prostředí se přidávají i další korozní faktory jako jsou oxidy síry nebo dusíku a další chemické látky. Pro výběr vhodného nátěrového systému je důležité určit korozní úroveň prostředí, kterému bude nátěr vystaven. Korozní agresivitu atmosféry klasifikuje norma ČSN EN ISO 12944-2 do šesti stupňů podle tabulky 8. Zkušební postupy pro nátěrové systémy pro různé stupně korozní atmosféry klasifikuje norma ČSN EN ISO 12944-6 podle tabulky 9.

Tabulka 8: Stupně korozní agresivity atmosféry a příklady typických prostředí podle normy ČSN EN ISO 12944-2

Stupeň korozní agresivity	Příklad venkovního prostředí	Příklady typického vnitřního prostředí
C1 velmi nízká	-	Vytápěné budovy s čistou atmosférou, např. školy, kanceláře, hotely obchody, Nevytápěné budovy, kde může docházet ke kondenzaci, např. sklady, sportovní haly
C2 nízká	Atmosféry s nízkou úrovní znečištění: převážně venkovské oblasti	
C3 střední	Městské a průmyslové atmosféry, střední úroveň znečištění oxidem siřičitým, pobřežní oblasti s nízkou salinitou	Výrobní prostory s vysokou vlhkostí a malým znečištěním ovzduší, např. výrobního potravin, pivovary, mlékárny
C4 vysoká	Průmyslové a pobřežní oblasti se střední salinitou	Chemické závody, plavecké bazény, loděnice a doky na mořském pobřeží
C5 velmi vysoká	Průmyslové oblasti s vysokou vlhkostí a agresivní atmosférou, pobřežní oblasti	Budovy nebo prostředí s převážně trvalou kondenzací a s vysokým znečištěním ovzduší
CX extrémní	Průmyslové oblasti s extrémní vlhkostí a agresivní atmosférou, přímořské oblasti s vysokou salinitou	Průmyslové oblasti s extrémní vlhkostí a agresivní atmosférou

Tabulka 9: Zkušební postupy pro nátěrové systémy pro různé stupně korozní atmosféry normy ČSN EN ISO 12944-6

Stupeň korozní agresivity atmosféry	Rozmezí životnosti (ISO 12944-1)	ISO 6270-1 (kondenzace vody) [h]	ISO 9227 (neutrální solná mlha) [h]
C2	nízká	48	-
	střední	48	-
	vysoká	120	-
	velmi vysoká	240	480
C3	nízká	48	120
	střední	120	240
	vysoká	240	480
	velmi vysoká	480	72
C4	nízká	120	240
	střední	240	480
	vysoká	480	720
	velmi vysoká	720	1440
C5	nízká	240	480
	střední	480	720
	vysoká	720	1440
	velmi vysoká	-	-

Pozn: nízká (do 7 let), střední (7-15 let), vysoká (15-25 let), velmi vysoká (přes 25 let)

4 Výsledky a hodnocení

4.1 Výsledky charakterizování vlastností pigmentů, plniv a připravených nátěrových hmot

Pro použitá plniva byly zkoušky měřící hustotu a spotřebu oleje, ze získaných hodnot byla následně vypočítána hodnota KOKP. Výsledky charakterizace pigmentů a plniv jsou uvedeny v tabulce 9. V tabulce 10 jsou uvedeny výsledky jemnost tření připravených nátěrových hmot, které byly provedeny po dispergaci pomocí grindometru.

Tabulka 10: Charakterizace pigmentů a plniv

Pigment	Hustota [g/cm ³]	Olejšvé číslo [g/100 g pigmentu]	KOKP
Polyfosforečnan amonný	1,95 ± 0,02	30,2 ± 0,1	59
Melamin	1,56 ± 0,02	24,3 ± 0,1	69
Dipentaerythritol	1,36 ± 0,02	41,5 ± 0,1	60
Titanová běloba	3,90 ± 0,02	21,3 ± 0,1	54
Fosforečnan zinečnatý	3,60 ± 0,02	20,8 ± 0,1	58

Tabulka 11: Hodnotky jemnosti tření nátěrových hmot

Nátěrový systém	Jemnost tření [μm]	Nátěrový systém	Jemnost tření [μm]
AKR/1,5:1	25	EPOX/1,5:1	24
AKR/1,5:1/ZP	28	EPOX/1,5:1/ZP	26
AKR/3:1	22	EPOX/3:1	26
AKR/3:1/ZP	18	EPOX/3:1/ZP	28
ALK/1,5:1	22	EST/1,5:1	24
ALK/1,5:1/ZP	22	EST/1,5:1/ZP	22
ALK/3:1	22	EST/3:1	31
ALK/3:1/ZP	17	EST/3:1/ZP	34

Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.2 Výsledky hodnocení fyzikálně mechanických vlastností nátěrových filmů na skle

4.2.1 Výsledky zkoušky tvrdosti nátěru tlumením kyvadla

V tabulce 12 jsou uvedeny výsledky zkoušky stanovení relativní povrchové tvrdosti nátěru, které byly měřeny za pomoci kyvadlového přístroje typu Perzos každý sedmý den po dobu 29 dní. Hodnoty relativní povrchové tvrdosti jsou vztaženy k tvrdosti skleněného standardu (100 %).

Tabulka 12: Hodnoty stanovení relativní povrchové tvrdosti nátěrových filmů v závislosti na čase.

$DFT = 60 \pm 10 \mu m$

Nátěrový systém	Relativní povrchová tvrdost [%] (odchylka 0,5 %)				
	1.den	8.den	15.den	22.den	29.den
AKR/1,5:1	13,4	25,0	24,7	24,7	24,8
AKR/1,5:1/ZP	13,0	22,5	22,4	22,5	22,6
AKR/3:1	7,6	11,7	13,9	14,2	14,8
AKR/3:1/ZP	8,5	13,4	16,5	17,5	18,0
ALK/1,5:1	4,1	8,9	10,	11,3	11,8
ALK/1,5:1/ZP	7,1	9,2	10,	10,9	11,7
ALK/3:1	2,7	8,3	8,5	8,2	8,5
ALK/3:1 ZP	4,1	8,8	8,9	9,0	9,1
EPOX/1,5:1	19,6	21,8	25,9	33,5	37,1
EPOX/1,5:1/ZP	19,6	21,8	25,9	26,4	27,1
EPOX/3:1	8,1	16,5	24,9	24,5	22,5
EPOX/3:1/ZP	6,7	13,7	23,6	24,8	23,5
EST/1,5:1	7,6	12,2	13,5	23,9	27,3
EST/1,5:1/ZP	7,8	11,5	13,7	23,8	29,3
EST/3:1	7,5	11,7	16,7	23,0	28,1
EST/3:1/ZP	7,5	22,0	28,6	30,3	31,6

Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.3 Výsledky hodnocení mechanických vlastností nátěrových povlaků na oceli

V tabulce 13 jsou souhrnně uvedeny výsledky mechanických vlastností nátěrových povlaků na oceli. Výsledky hloubení udávají hloubku v mm, při které došlo k viditelnému poškození nátěru. Výsledky ohybu udávají průměr zkušebního trnu, kdy došlo k poškození nátěru. Výsledky úderu udávají výšku dopadu závaží v cm, při které došlo k poškození nátěru, kdy byl úder veden natřenou stranou vzorku dolů (směrem od závaží a úderníku). Výsledky mřížkové

zkoušky udávají stupeň poškození, který byl na povlaku způsoben řezacím nožem s rozstupem ostří 2 mm.

Tabulka 13: Hodnoty mechanické odolnosti nátěrových filmů po zkouškách hloubením, ohybem, úderem a mřížkovou zkouškou. $DFT = 120 \pm 10 \mu\text{m}$

Nátěrový systém	Úder [cm]	Ohyb [mm]	Mřížková zkouška [st.]	Hloubení [mm]
AKR/1,5:1	7,5	8	1	9,2
AKR/1,5:1/ZP	7,5	6	0	8,1
AKR/3:1	25,0	3	0	10,0
AKR/3:1/ZP	12,0	3	0	5,2
ALK/1,5:1	7,5	12	1	3,7
ALK/1,5:1/ZP	7,5	12	1	3,4
ALK/3:1	5,0	10	1	4,2
ALK/3:1 ZP	5,0	10	1	3,4
EPOX/1,5:1	5,0	8	1	1,7
EPOX/1,5:1/ZP	5,0	13	1	5,2
EPOX/3:1	5,0	12	2	3,0
EPOX/3:1/ZP	5,0	8	1	4,6
EST/1,5:1	10,0	10	1	7,0
EST/1,5:1/ZP	10,0	8	1	7,1
EST/3:1	10,0	8	1	6,9
EST/3:1/ZP	10,0	10	1	7,1

Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.4 Výsledky odtrhové zkoušky přilnavosti

V tabulce 14 jsou uvedeny výsledky odtrhové zkoušky přilnavosti, na vzorky byla přilepena 3 odtrhová tělíska. Výsledkem zkoušky je určení charakteru lomu a vypočtení průměrné odtrhové pevnosti

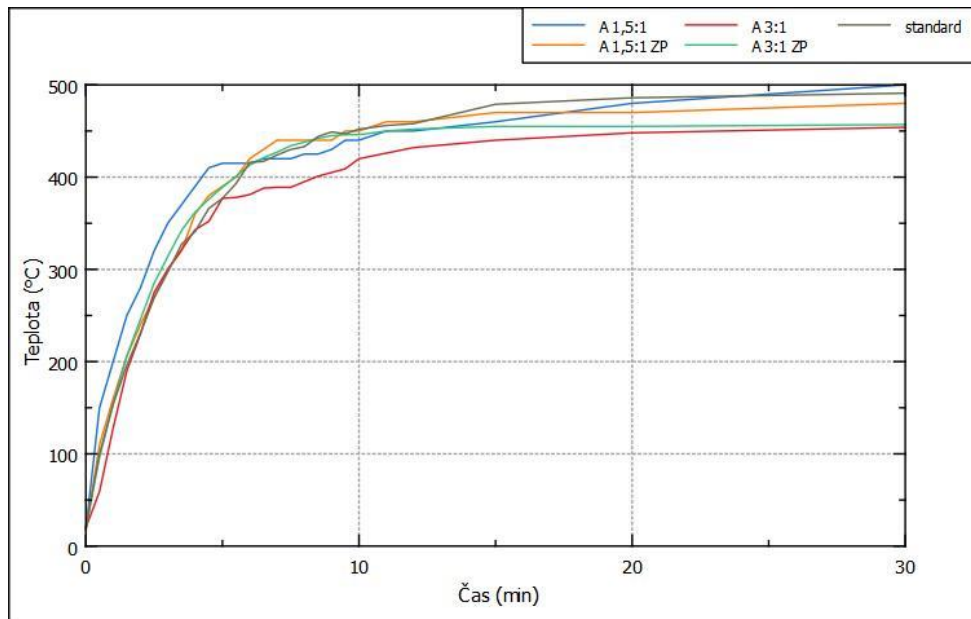
Tabulka 14: Hodnoty a charakteristika odtrhů intumescentních nátěrových filmů. $DFT = 500 \pm 20 \mu\text{m}$

Nátěrový systém	Odtrhová pevnost [MPa]	Charakter lomu	Průměrná odtrhová pevnost [MPa]
AKR/1,5:1	5,21	90 % A/B, 10 % B/C	4,79 ± 0,34
	4,79	20 % A/B, 80 % B/C	
	4,37	70 % A/B, 30 % B/C	
AKR/1,5:1/ ZP	3,33	60 % B/C, 40 % C	3,14 ± 0,16
	2,93	80 % A/B, 20 % B	
	3,17	70 % B, 30 % B/C	
AKR/3:1	4,08	100 % C	4,27 ± 0,32
	4,02	100 % C	
	4,73	100 % C	
AKR/3:1/ZP	5,71	100 % B	5,40 ± 0,23
	5,32	100 % B	
	5,16	100 % B	
ALK/1,5:1	2,83	30 % B, 50 % C/D, 20 % D	2,83 ± 0,11
	2,69	100 % D	
	2,97	20 % B, 60 % C, 20 % D	
ALK/1,5:1/ZP	3,31	80 % B, 20 % C	3,27 ± 0,31
	2,87	20 % B, 40 % C, 40 % D	
	3,63	30 % B, 70 % D	
ALK/3:1	2,06	100 % B	2,76 ± 0,5
	2,96	100 % B	
	3,25	100 % B	
ALK/3:1/ ZP	3,05	80 % B, 20 % C/D	3,39 ± 0,31
	3,32	30 % A/B, 70 % B	
	3,81	100 % B	
EPOX/1,5:1	2,52	100 % A/B	2,90 ± 0,28
	3,22	100 % A/B	
	2,97	100 % A/B	
EPOX/1,5:1/ ZP	4,48	100 % B	4,09 ± 0,27
	3,9	80 % B, 20 % -/Y	
	3,89	100 % B	
EPOX/3:1	1,68	80 % B, 20 % C/D	2,04 ± 0,26
	2,15	100 % B	
	2,29	100 % B	
EPOX/3:1/ ZP	3,27	30 % A/B, 60 % B, 10 % D	3,41 ± 0,32
	3,1	30 % A/B, 70 % C	
	3,85	30 % A/B, 70 % B	
EST/1,5:1	3,66	70 % A/B, 30 % B/C	3,51 ± 0,10
	3,43	80 % A/B, 20 % B/C	
	3,45	70 % A/B, 30 % B/C	
EST/1,5:1/ZP	4,23	100 % A/B	3,99 ± 0,17
	3,85	100 % A/B	
	3,89	100 % A/B	
EST/3:1	3,52	90 % A/B, 10 % C/D	3,58 ± 0,22
	3,34	70 % A/B, 30 % C/D	
	3,87	70 % A/B, 30 % C/D	
EST/3:1/ZP	3,46	90 % A/B, 10 % C/D	3,63 ± 0,17
	3,58	80 % A/B 20 % C/D	
	3,87	90 % A/B, 10 % C/D	

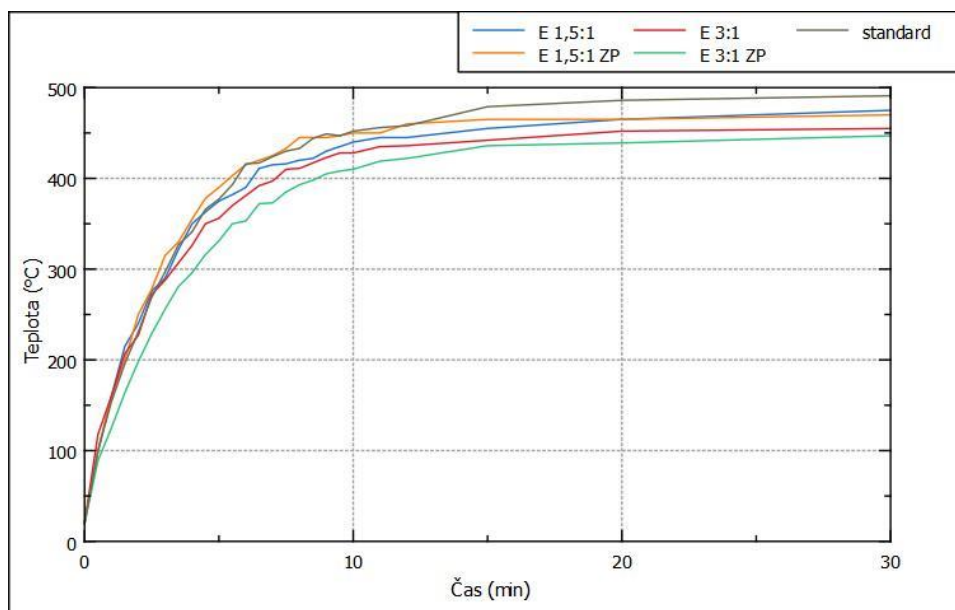
Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.5 Výsledky testu ohnivzdornosti

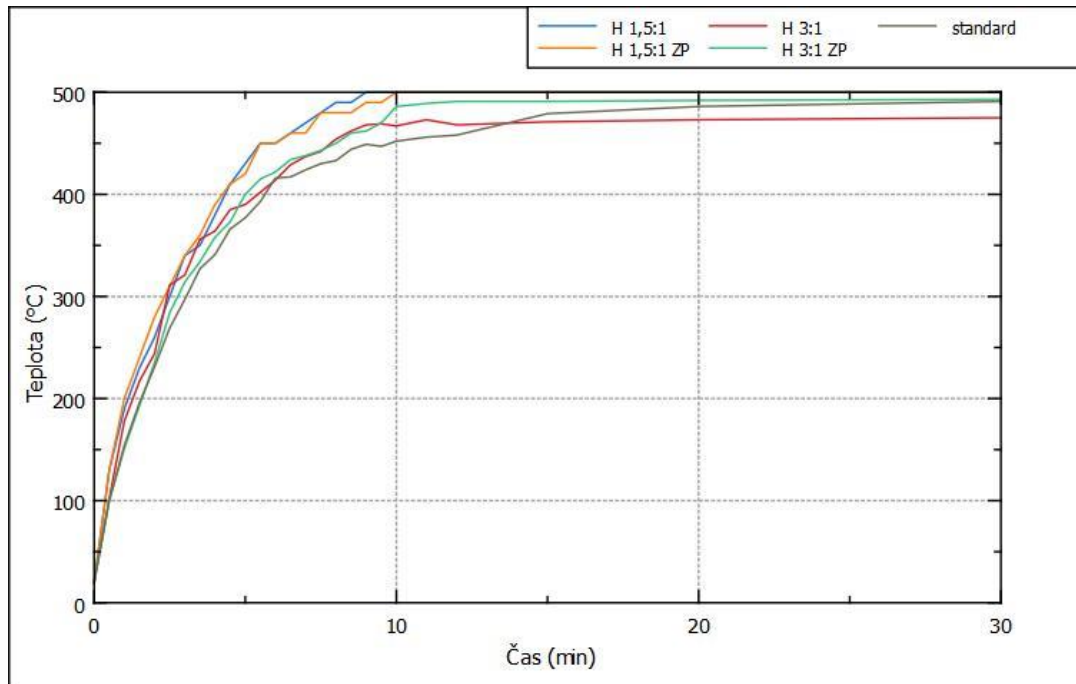
Na obrázcích 10–13 jsou uvedeny výsledky testu ohnivzdornosti intumescentních nátěrů při působení konstantní teploty 500 °C na nátěrový film. Teplota byla měřena na zadní části panelu infračerveným teploměrem v pravidelných intervalech. Výsledkem je závislost teploty na čase. Jako standard byl změřen identický panel bez povlaku.



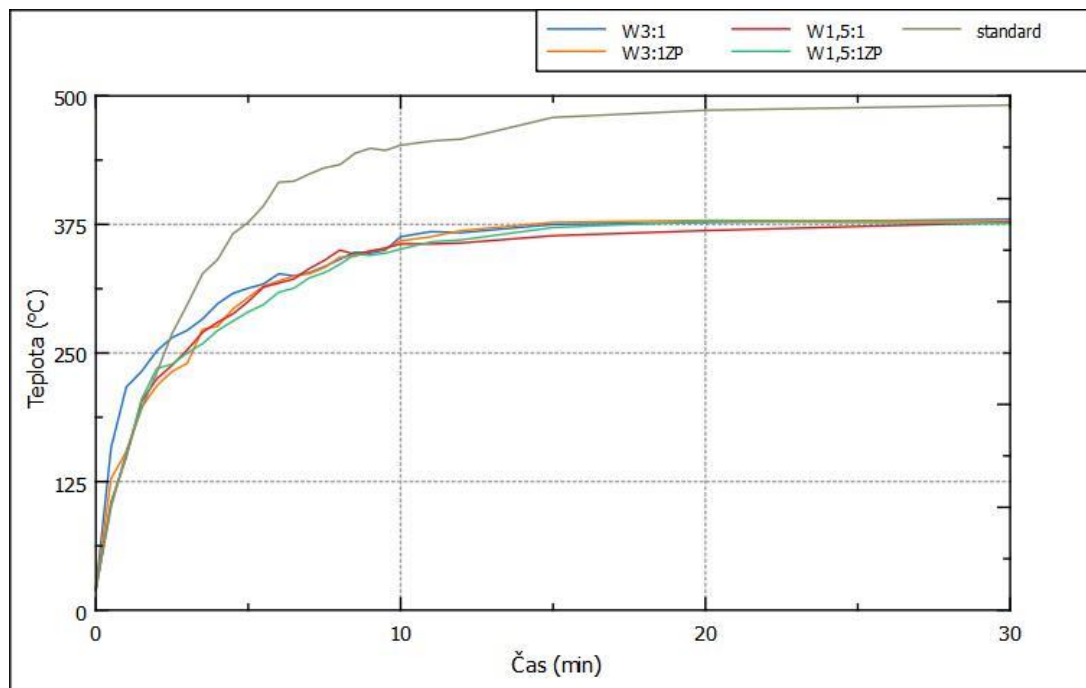
Obrázek 10: Výsledek testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi styren akrylátové disperze (AKR)



Obrázek 11: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi epoxidové pryskyřice (EPOX)



Obrázek 12: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi alkydové emulze (ALK)



Obrázek 13: Výsledky testu ohnivzdornosti nátěrů na bázi epoxyesterové pryskyřice (EST)

4.6 Výsledky charakterizace zpěněné vrstvy

V tabulce 15 jsou uvedeny výsledky měření tloušťky pěny, která vznikla během spalování povlaků při teplotách výpalu 300 °C, 500 °C a 700 °C. Intumescentní koeficient byl vypočten jako poměr tloušťky zpěněné vrstvy k původní tloušťce nátěru podle rovnice 11.

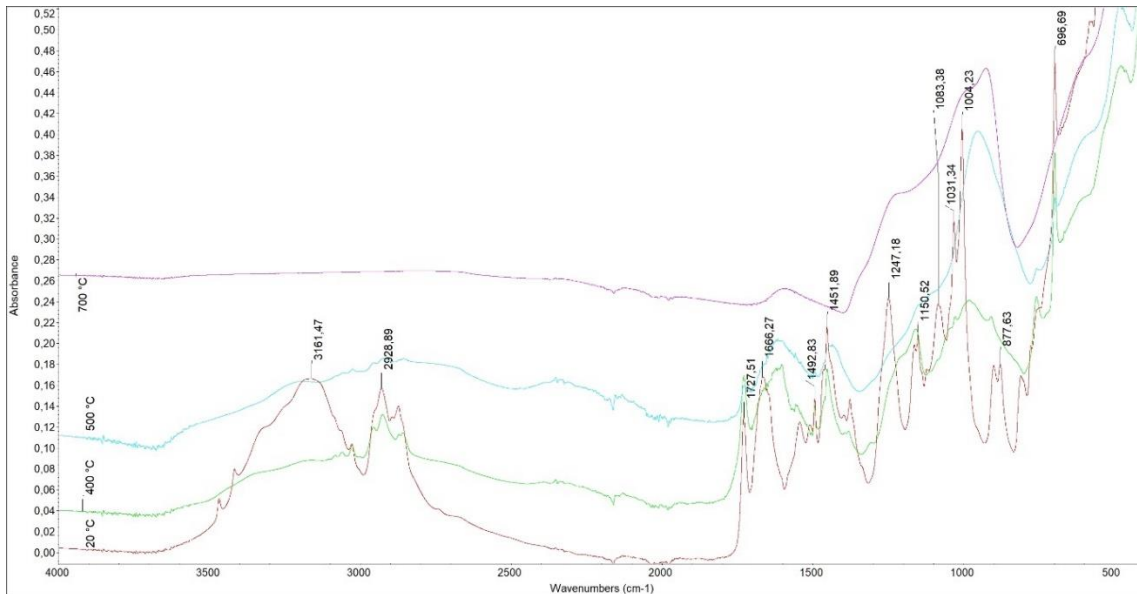
Tabulka 15: Výsledky charakterizace zpěněné vrstvy

Nátěrový systém	300°C		500°C		700°C	
	Tloušťka pěny [mm]	C_{int}	Tloušťka pěny (mm)	C_{int}	Tloušťka pěny [mm]	C_{int}
AKR/1,5:1	1,3	3,0	5,5	13,2	5,0	10,3
AKR/1,5:1/ZP	0,5	1,2	3,0	6,0	3,7	7,8
AKR/3:1	9,0	20,8	3,5	8,1	10,0	23,3
AKR/3:1/ZP	4,2	10,2	2,3	4,7	7,0	17,2
ALK/1,5:1	0,0	0,0	2,0	4,5	2,3	4,8
ALK/1,5:1/ZP	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	4,9
ALK/3:1	0,0	0,0	3,3	7,5	6,5	13,2
ALK/3:1 ZP	0,0	0,0	3,0	7,3	3,5	7,5
EPOX/1,5:1	0,0	0,0	4,1	8,9	2,1	4,8
EPOX/1,5:1/ZP	0,0	0,0	2,0	4,8	1,1	2,5
EPOX/3:1	6,0	12,2	15,3	31,3	20,2	40,6
EPOX/3:1/ZP	2,0	4,0	7,2	15,9	8,3	17,1
EST/1,5:1	0,0	0,0	4,0	8,9	5,5	11,5
EST/1,5:1/ZP	0,0	0,0	2,5	5,5	4,3	9,6
EST/3:1	1,4	3,4	3,0	7,2	8,3	19,8
EST/3:1/ZP	0,9	2,0	1,5	3,1	6,5	15,2

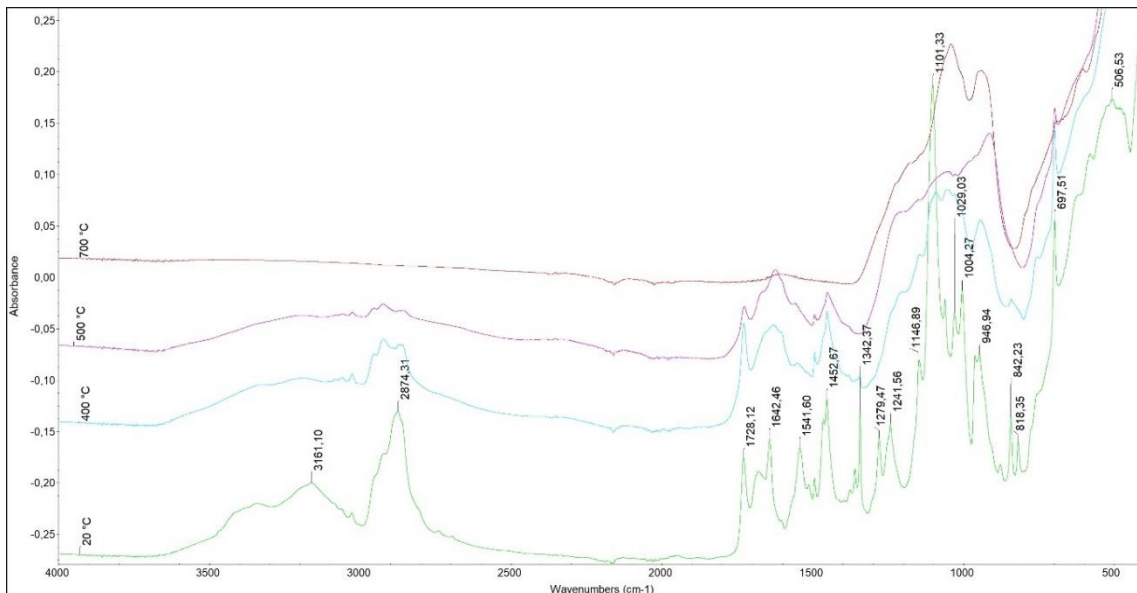
Pozn: C_{int} –intumescentní koeficient, AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.7 Výsledky infračervené spektroskopie

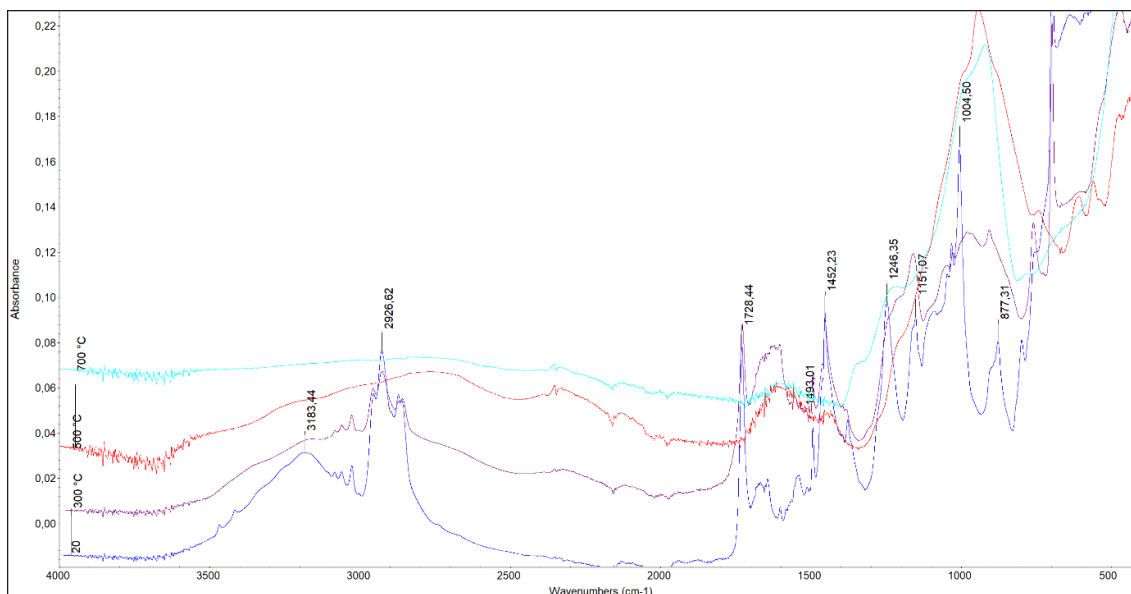
Na obrázcích 14–27 jsou uvedeny výsledky FTIR infračervené spektroskopie vzorků vytvrzené nátěrové hmoty a vzorků uhlíkaté vrstvy při teplotách výpalu 300 °C, 500 °C a 700 °C za předpokladu, že došlo ke vzniku uhlíkaté vrstvy.



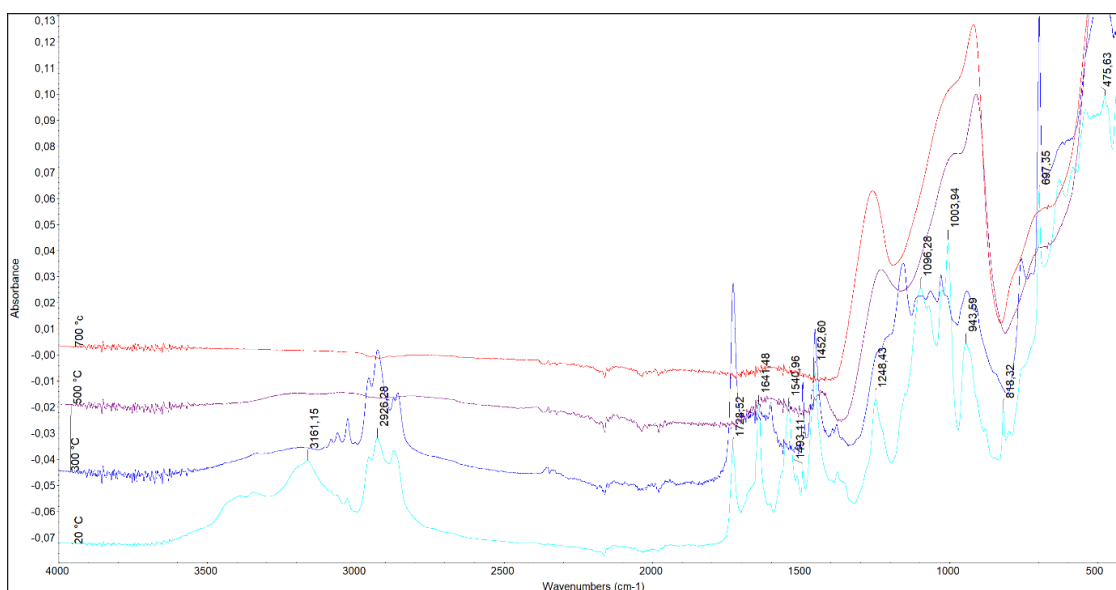
Obrázek 14: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1



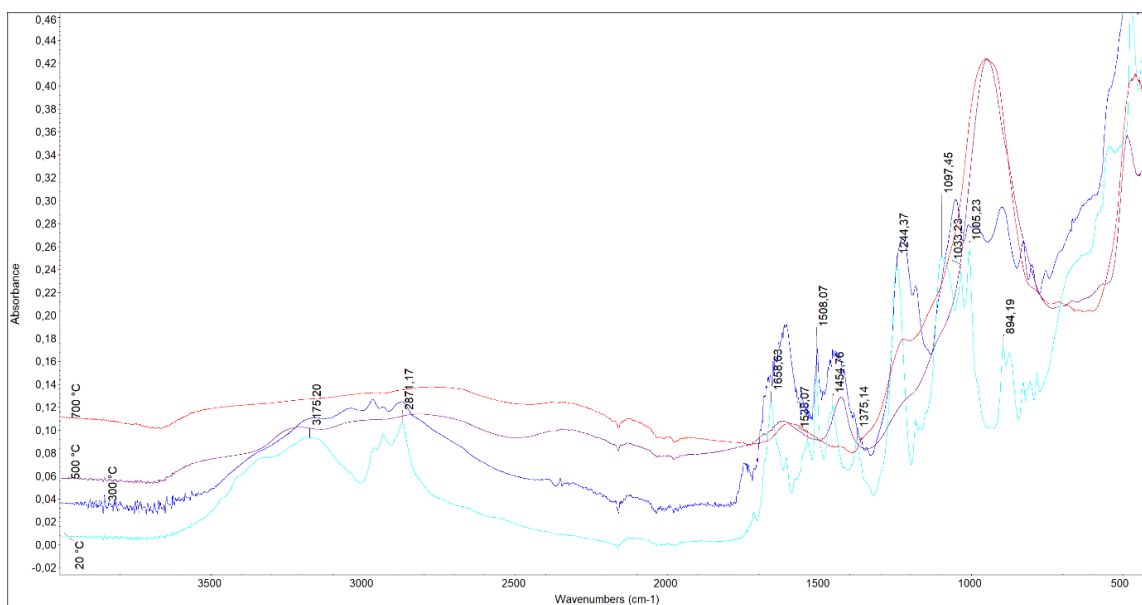
Obrázek 15: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1/ZP



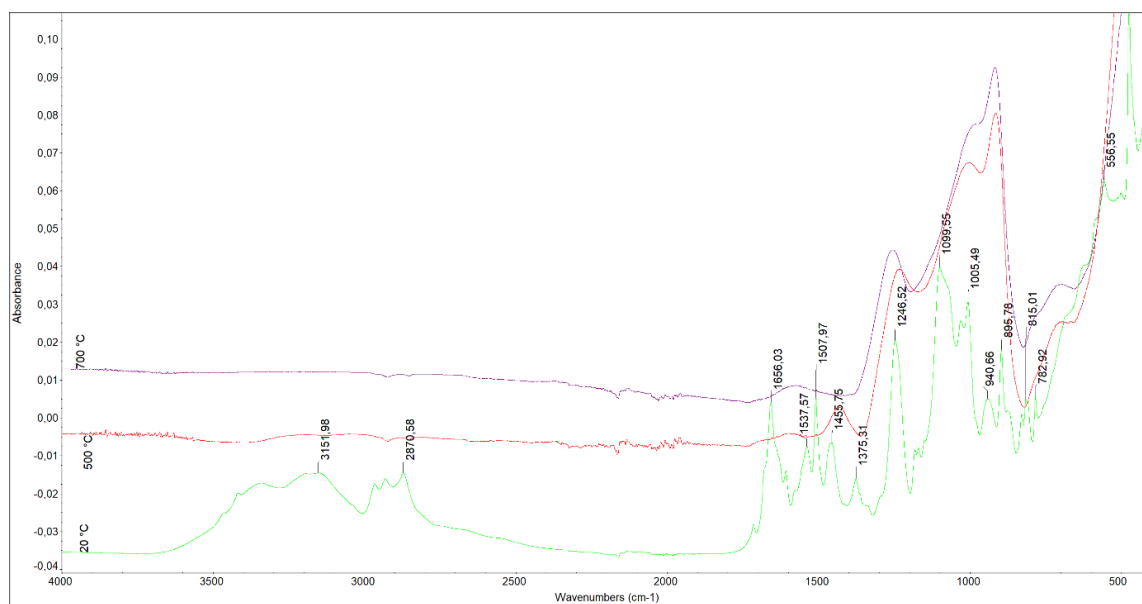
Obrázek 16: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1



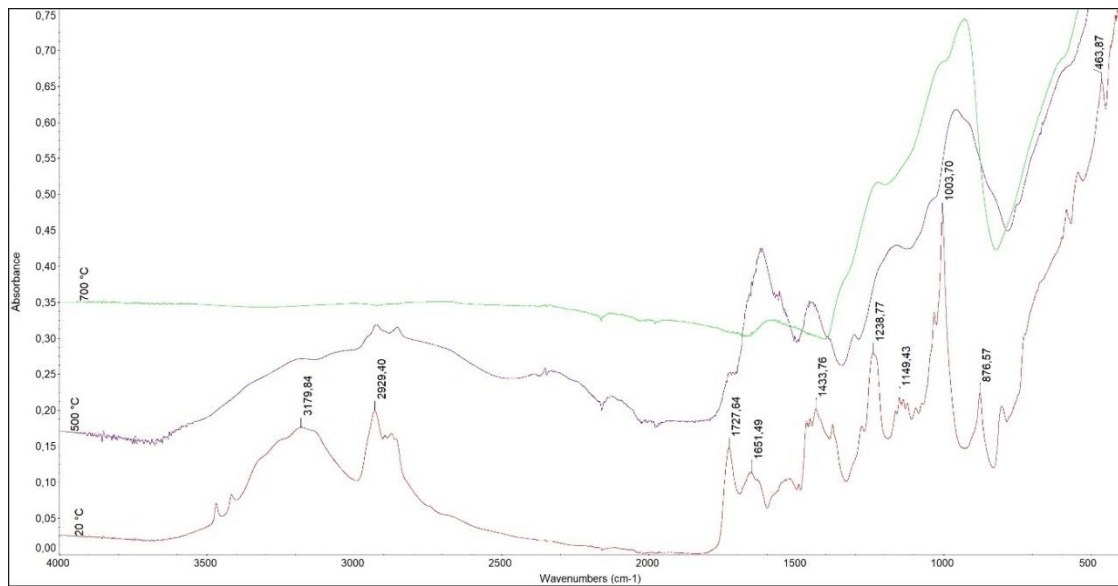
Obrázek 17: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1/ZP



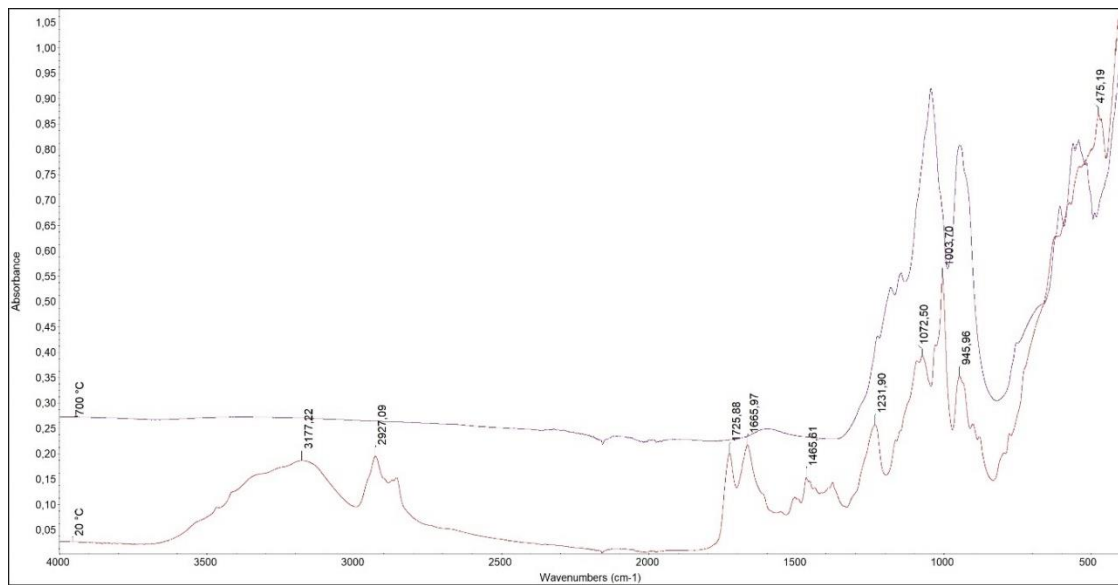
Obrázek 18: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1



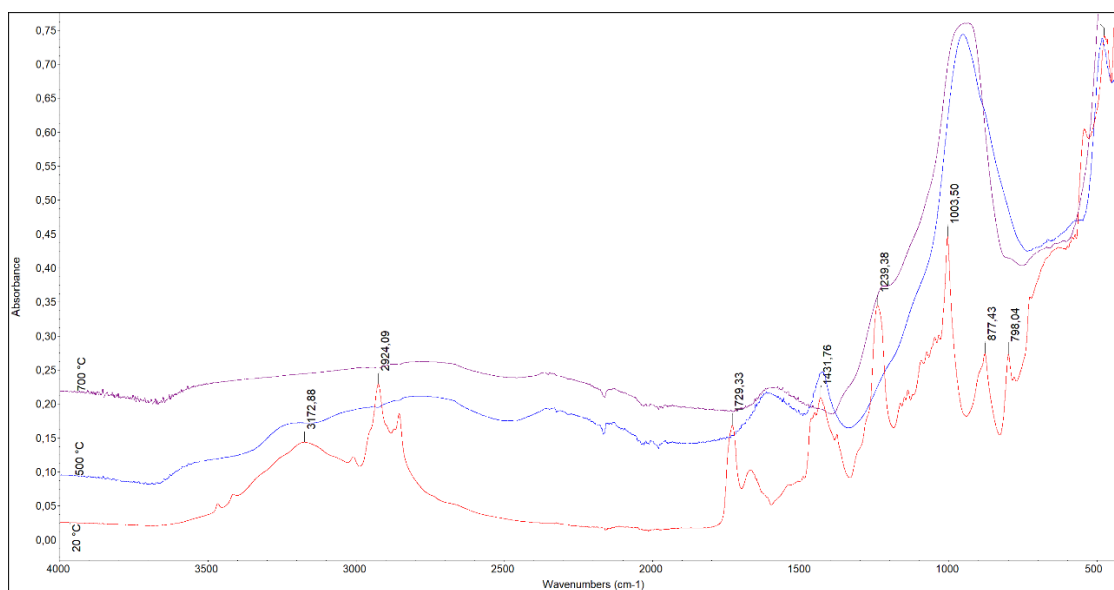
Obrázek 19: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1/ZP



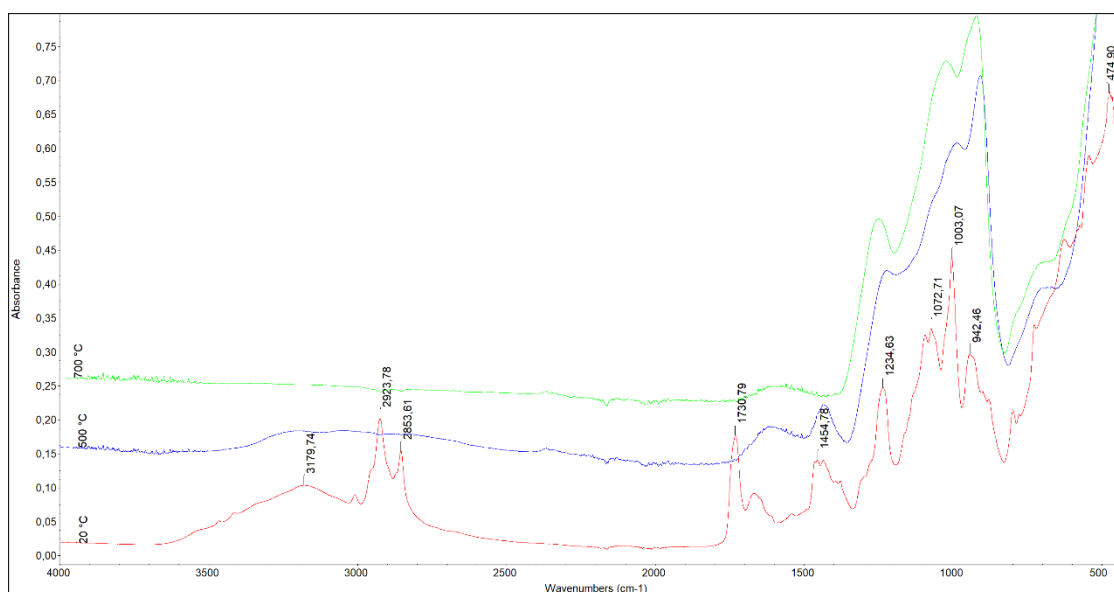
Obrázek 20: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1



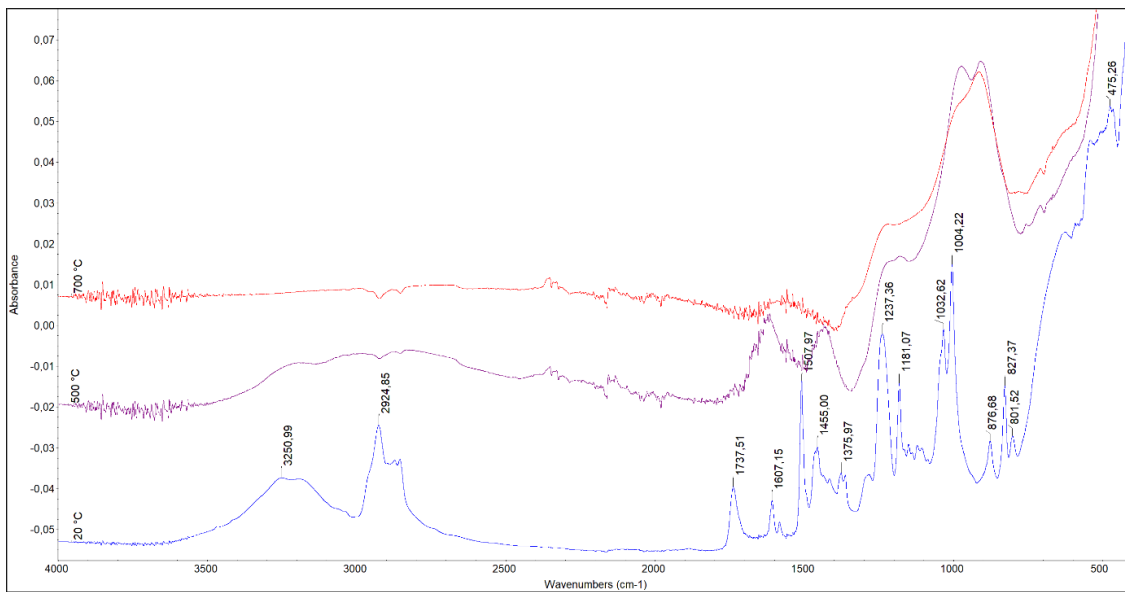
Obrázek 21: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1/ZP



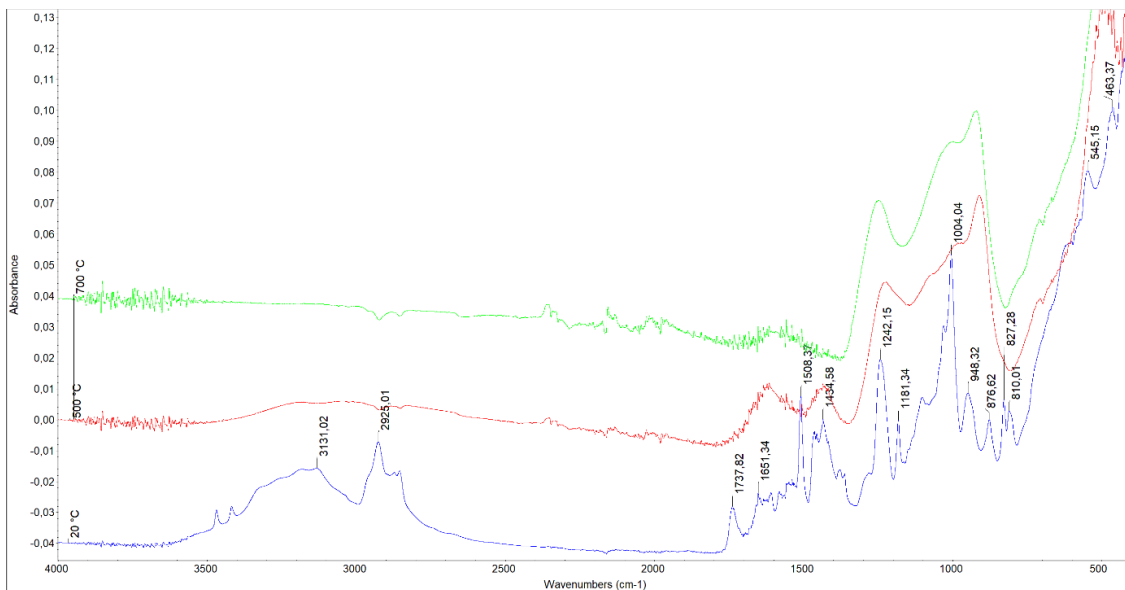
Obrázek 22: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1



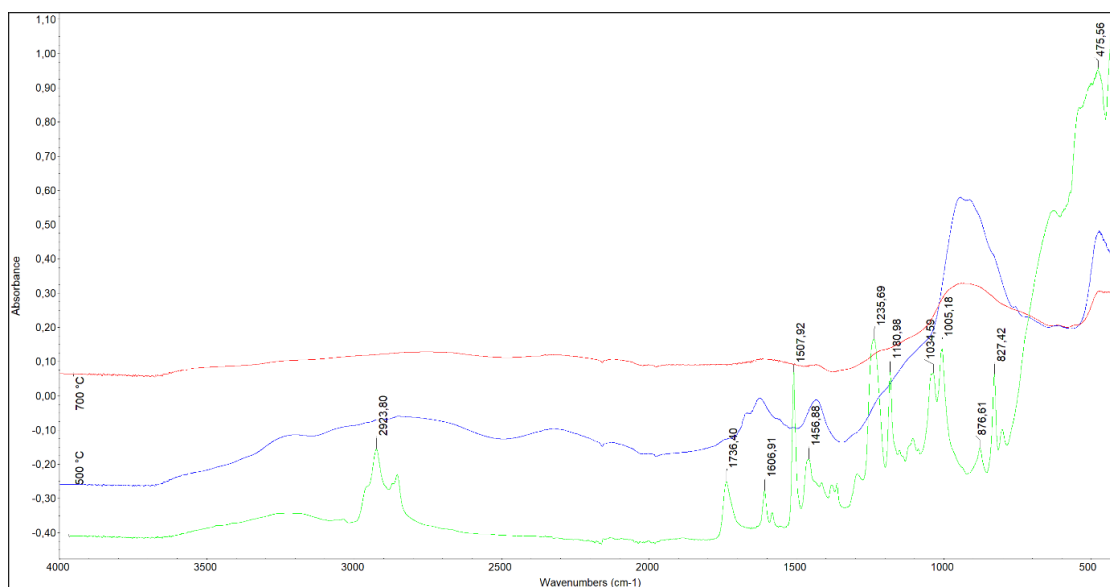
Obrázek 23: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1/ZP



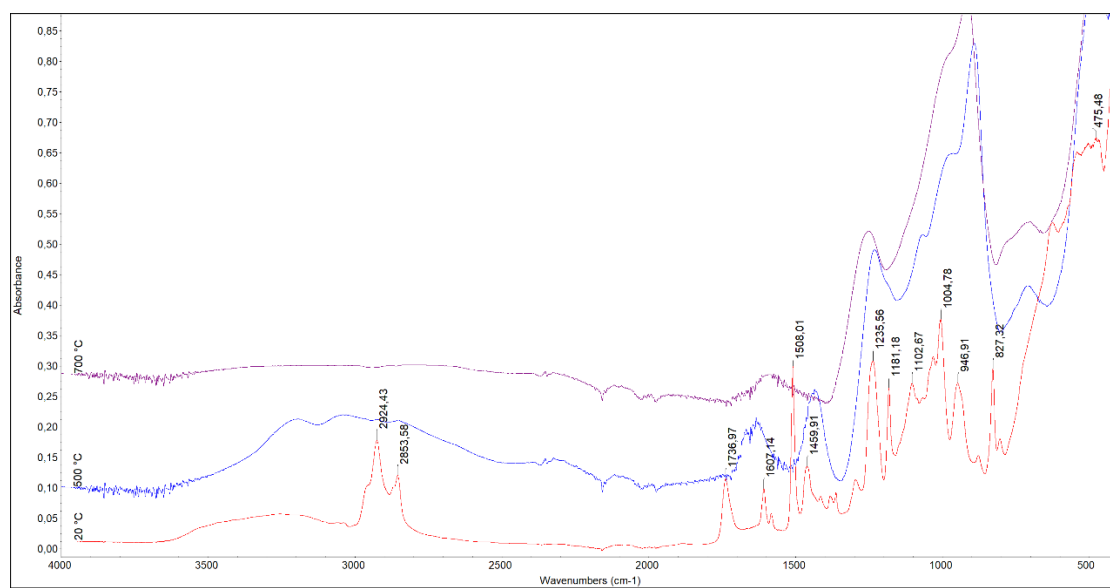
Obrázek 24: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxysterové pryskyřice EST/1,5:1



Obrázek 25: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxysterové pryskyřice EST/1,5:1/ZP



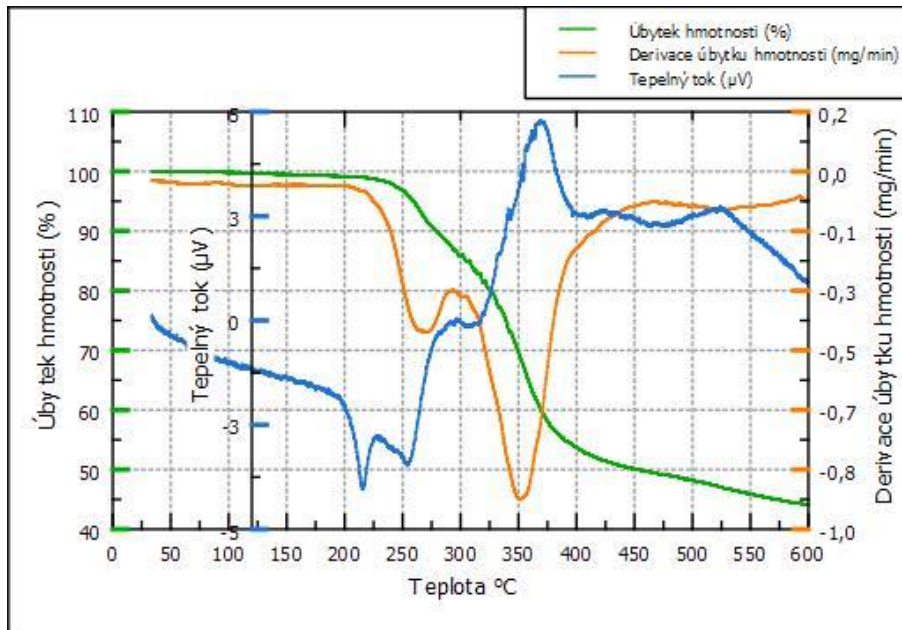
Obrázek 26: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1



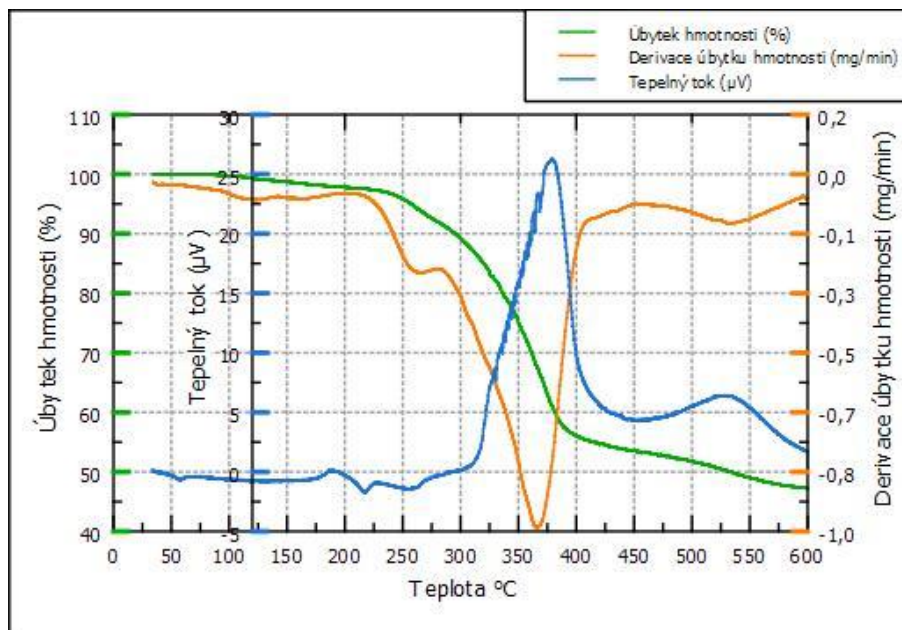
Obrázek 27: Výsledky infračervené spektroskopie nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1/ZP

4.8 Výsledky termických analýz

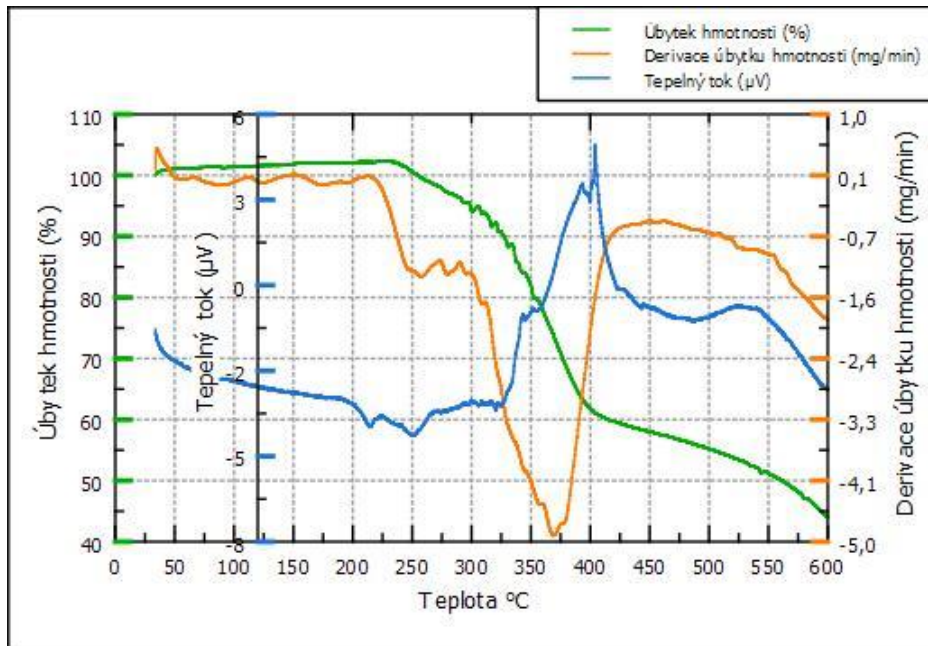
Na obrázcích 28–41 jsou uvedeny výsledky termických analýz (DTA a DSC) vzorků intumescentních nátěrových hmot připravených nátěrem na sklo. Vzorky byly měřeny v rozsahu teplot 30–600 °C. Výsledkem jsou křivky tepelného toku, derivace úbytku hmotnosti a procentuálního úbytku hmotnosti.



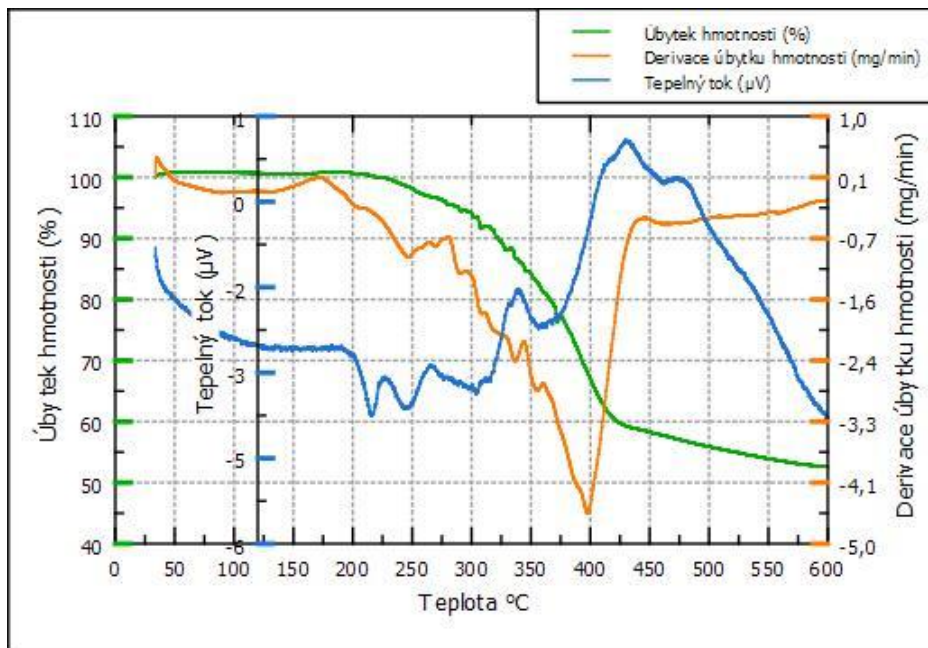
Obrázek 28: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1



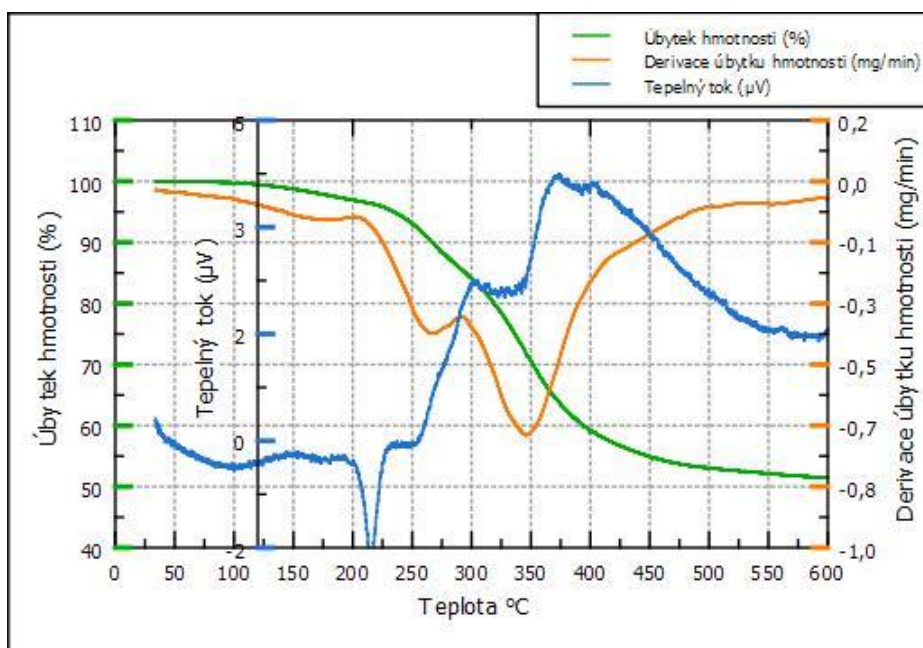
Obrázek 29: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/1,5:1/ZP



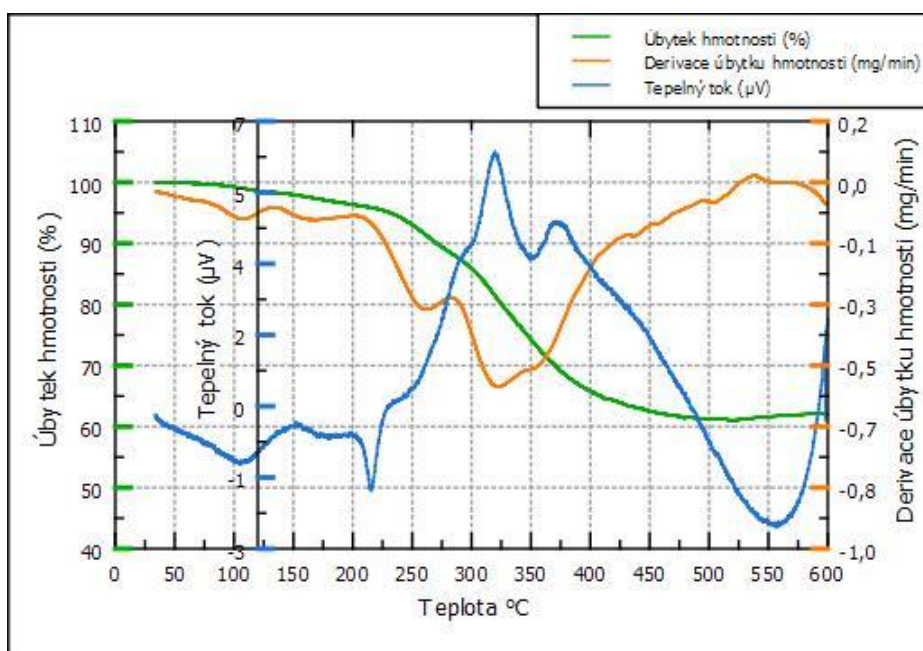
Obrázek 30: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1



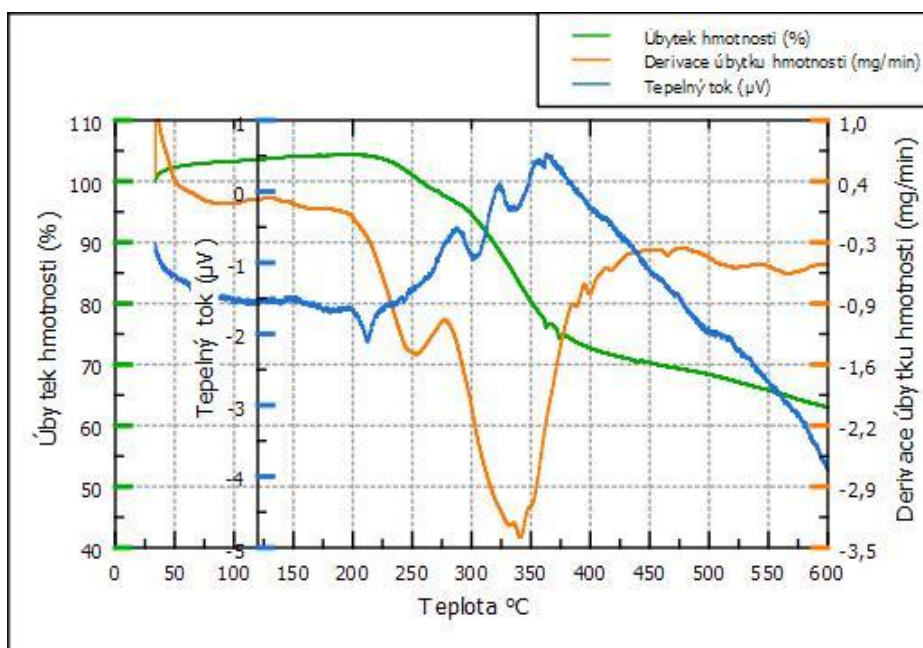
Obrázek 31: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi styren akrylátové disperze AKR/3:1/ZP



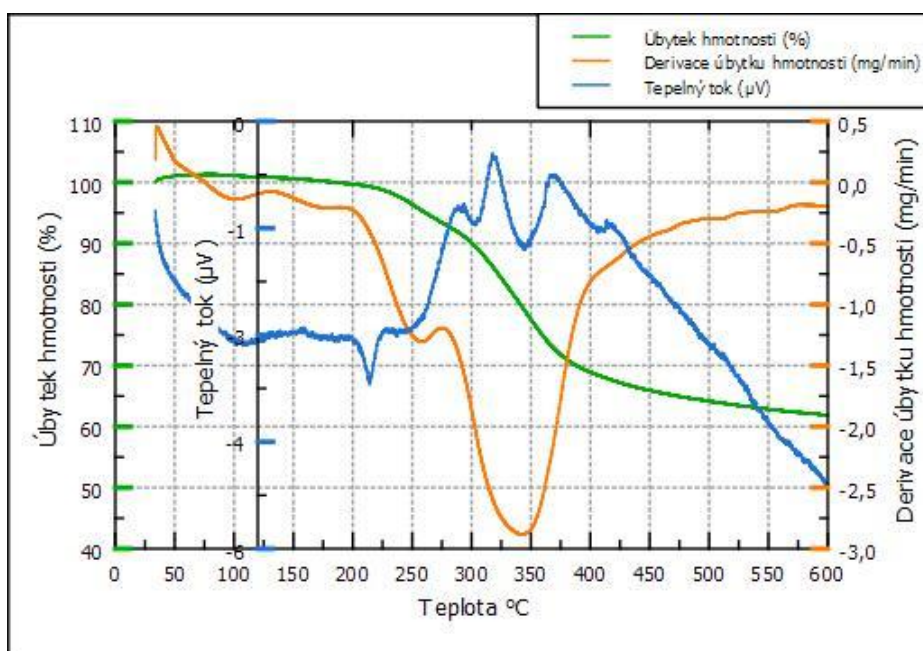
Obrázek 32: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1



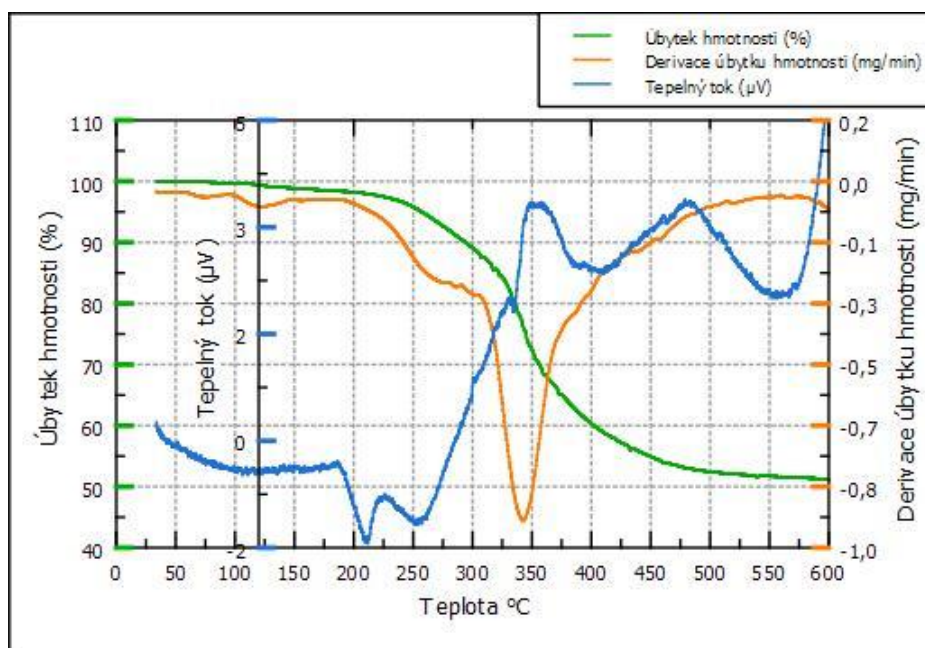
Obrázek 33: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/1,5:1/ZP



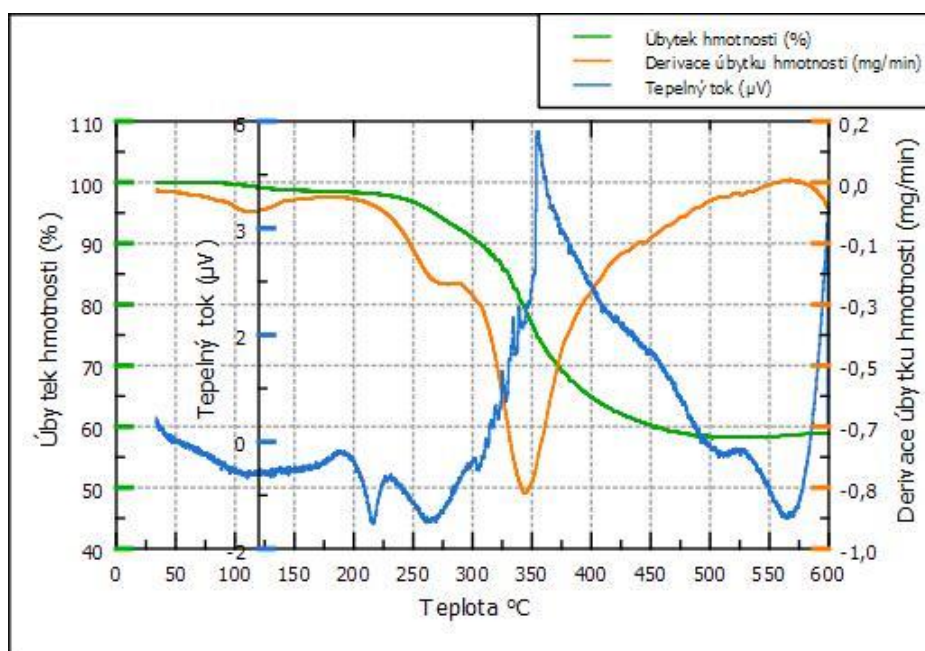
Obrázek 34: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1



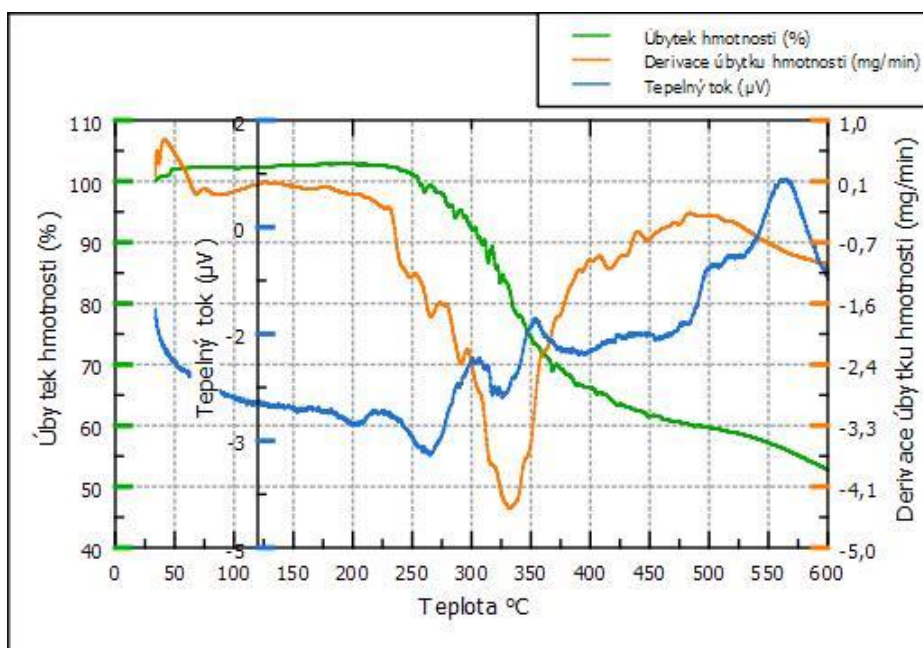
Obrázek 35: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi alkydové emulze ALK/3:1/ZP



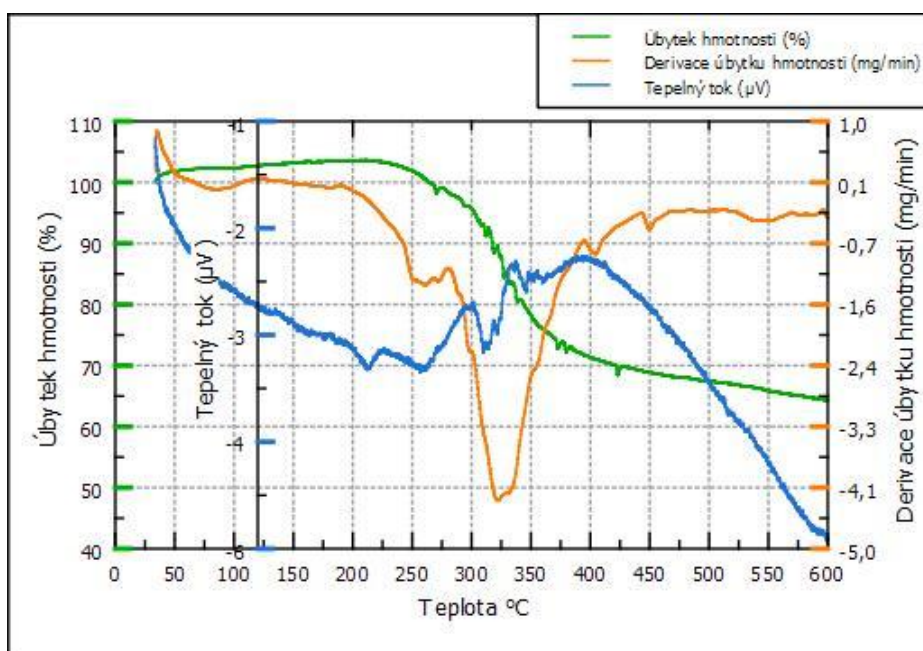
Obrázek 36: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1



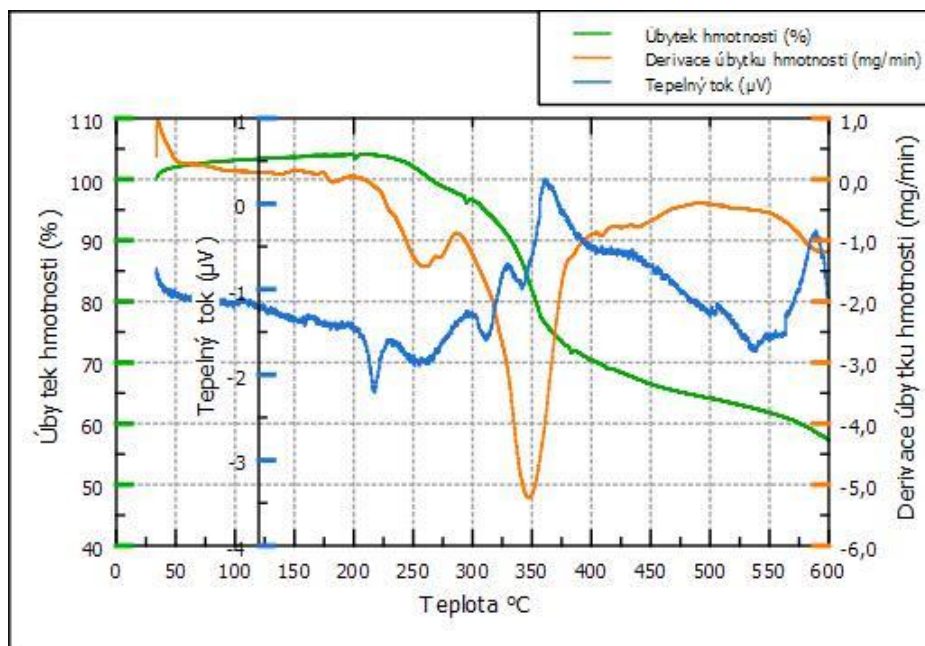
Obrázek 37: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1/ZP



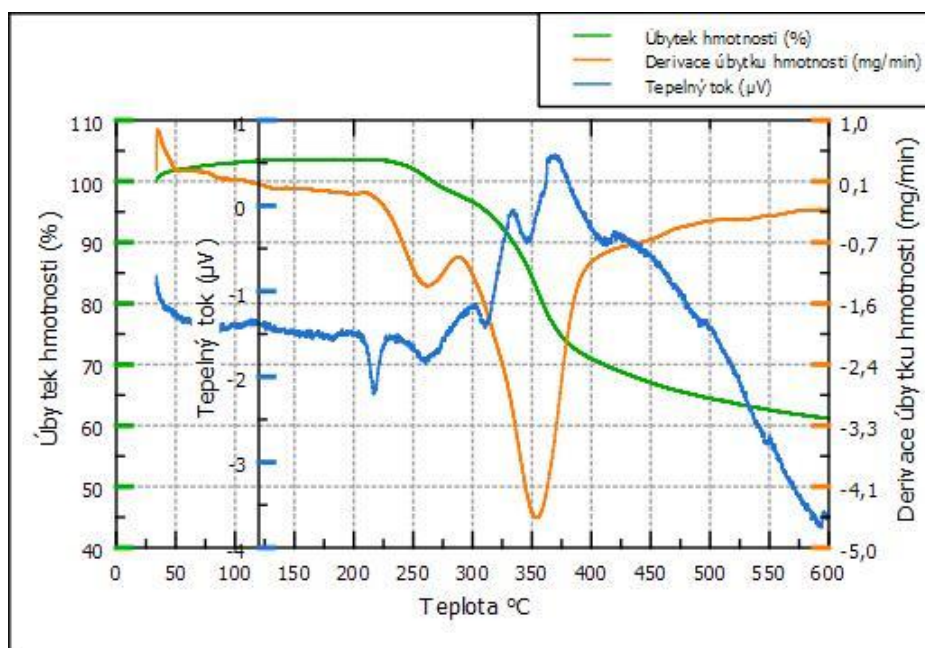
Obrázek 38: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1



Obrázek 39: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxidové pryskyřice EPOX/3:1/ZP



Obrázek 40: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1



Obrázek 41: Výsledky termogravimetrické analýzy nátěrového systému na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1/ZP

4.9 Výsledky korozních zkoušek v atmosféře s obsahem solné mlhy

V tabulce 16 jsou uvedeny výsledky zrychlených korozních zkoušek intumescentních nátěrových povlaků na oceli v atmosféře s obsahem NaCl. Na vzorcích bylo hodnoceno puchýřovatění v ploše a v řezu, dále byla hodnocena koroze v ploše a v řezu. Po stažení nátěrového filmu byla hodnocena míra koroze kovového podkladu.

Tabulka 16: Hodnoty korozní odolnosti intumescentních nátěrových povlaků po 168 hodinách v atmosféře s obsahem 5 % NaCl. DFT = $120 \pm 10 \mu\text{m}$

Nátěrový systém	Expozice v atmosféře s obsahem 5 % solné mlhy hodnocení po 168 hodinách				
	Puchýře		Povlak [%]	Koroze	
	Plocha [st.]	Řez [st.]		Plocha [%]	Řez [mm]
AKR/1,5:1	4F	0	5	50	0-0,5
AKR/1,5:1/ZP	8D	0	3	16	0-0,5
AKR/3:1	4MD	4F	0	33	2-3
AKR/3:1/ZP	4M	0	0	10	0,5-1
ALK/1,5:1	4F	2F	10	50	2-3
ALK/1,5:1/ZP	0	2F	5	50	2-3
ALK/3:1	6M	0	10	50	0-0,5
ALK/3:1 ZP	6F	0	10	50	0-0,5
EPOX/1,5:1	4D	4D	0	50	2-3
EPOX/1,5:1/ZP	2MD	2MD	0	16	0,5-1
EPOX/3:1	2D	2D	0	50	2-3
EPOX/3:1/ZP	2MD	2D	0	33	0,5-1
EST/1,5:1	8F	0	3	33	0,5-1
EST/1,5:1/ZP	0	6F	0	16	0-0,5
EST/3:1	8F	0	3	33	0-0,5
EST/3:1/ZP	0	0	0	16	0-0,5

Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

4.10 Výsledky korozních zkoušek v atmosféře s povšechnou kondenzací

V tabulce 17 jsou uvedeny výsledky zrychlených korozních zkoušek intumescentních nátěrových povlaků na oceli v atmosféře s obsahem povšechnou kondenzací. Na vzorcích bylo hodnoceno puchýřovatění v ploše a prokorodování povlaku. Po stažení nátěrového filmu byla hodnocena míra koroze kovového podkladu.

Tabulka 17: Hodnoty korozní odolnosti intumescentních nátěrových povlaků po 168 hodinách v atmosféře s povšechnou kondenzací. $DFT = 120 \pm 10 \mu\text{m}$

Nátěrový systém	Expozice v atmosféře s povšechnou kondenzací, hodnocení po 168 hodinách		
	Puchýře v ploše [st.]	Koroze povlaku [%]	Koroze v ploše [%]
AKR/1,5:1	6M	3	100
AKR/1,5:1/ZP	8D	0,3	33
AKR/3:1	6F	0	50
AKR/3:1/ZP	6M	16	50
ALK/1,5:1	0	10	100
ALK/1,5:1/ZP	4F	0,3	50
ALK/3:1	6F	3	33
ALK/3:1 ZP	6F	0,3	16
EPOX/1,5:1	4D	1	16
EPOX/1,5:1/ZP	4M	1	16
EPOX/3:1	4MD	3	50
EPOX/3:1/ZP	2F	10	16
EST/1,5:1	6D	1	33
EST/1,5:1/ZP	4M	0	10
EST/3:1	2D	0	33
EST/3:1/ZP	6F	3	16

Pozn: AKR–styren akrylátová vodná disperze, ALK–vodná emulze alkydové pryskyřice, EPOX–vodná disperze epoxidové pryskyřice, EST–epoxyesterová pryskyřice

5 Diskuze k výsledkům

5.1 Diskuze stanovení vlastností pigmentů a nátěrových hmot

Stanovení hustoty a olejového čísla pigmentů je nezbytné pro stanovení hodnoty KOKP (kritickou objemovou koncentrací pigmentu) a formulaci nátěrových hmot. Hodnoty hustoty u zpěňovacích plniv (APP, MEL, DPER) se pohybovaly v rozmezí 1,36–1,95 g/cm³. U titanové běloby a fosforečnanu zinečnatého byly naměřeny vyšší hustoty: 3,60 a 3,90 g/cm³. Hodnoty olejových čísel se pohybovaly v rozmezí 20,8–41,5 g/100 g pigmentu. Nejvyšší hodnota byla změřena u vzorku dipentaerythritolu (41,1 g/100 g pigmentu). Zkouškou jemnosti tření byla zjištěna maximální velikost pevných částic v nátěrových hmotách. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí 17–34 μm, což je pro dané typy nátěrových hmot vyhovující.

5.2 Diskuze zkoušky tlumením kyvadla

Stanovení relativní povrchové tvrdosti filmů na skleněných panelech s DFT = 60 ± 10 μm bylo měřeno za pomoci Perzosova kyvadla. Měření bylo prováděno v pravidelných intervalech každý sedmý den po dobu 29 dní od nanesení povlaku na skleněné panely. Z měření vyplývá, že s časem se povrchová tvrdost vzorků zvyšovala. Výsledná relativní tvrdost se lišila v závislosti na použitém typu pojiva.

Povlaky na bázi styren akrylátové disperze dosáhly výsledné povrchové tvrdosti v rozsahu 14,8–24,8 %. Vyšší povrchovou tvrdost vykazovaly systémy v poměru plniv 1,5:1 oproti systémům v poměru plniv 3:1. Rozdíly mezi povlaky s obsahem fosforečnanu zinečnatého a bez jeho přídavku nebyly výrazné.

Povlaky na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice dosáhly výsledné povrchové tvrdosti v rozsahu 8,5–11,8 %. Nepatrně vyšší povrchovou tvrdost vykazovaly systémy v poměru plniv 1,5:1 oproti systémům v poměru plniv 3:1. Rozdíly filmů na této bázi nebyly výrazné.

Povlaky na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice dosáhly výsledné povrchové tvrdosti v rozsahu 22,6–37,2 %. Vyšší povrchovou tvrdost vykazovaly systémy v poměru plniv 1,5:1 oproti systémům v poměru plniv 3:1. Povlak EPOX/1,5:1 vykazoval výrazně vyšší tvrdost než ostatní povlaky na této bázi a to 37,18 %. Rozdíly ostatních filmů na této bázi nebyly výrazné a byly v rozmezí 22,6–27,1 %.

Povlaky na bázi epoxyesterové pryskyřice dosáhly výsledné povrchové tvrdosti v rozsahu 27,4–31,65 %. Nepatrně vyšší povrchovou tvrdost vykazovaly systémy v poměru plniv 3:1 oproti systémům v poměru plniv 1,5:1. Rozdíly filmů na této bázi nebyly výrazné.

Závěry z výsledků zkoušky povrchové tvrdosti:

- Relativní povrchová tvrdost v čase rostla vlivem vytvrzování pojivových složek povlaků.
- Rozdíly mezi nátěrovými povlaky s obsahem fosforečnanu zinečnatého a bez jeho přídavku nebyly výrazné.
- Výrazněji se projevily rozdíly mezi systémy v poměru plniv 3:1 oproti systémům v poměru plniv 1,5:1, kdy systémy 1,5:1 vykazovaly vyšší relativní povrchové tvrdosti. U povlaků na bázi epoxyesterové pryskyřice byly hodnoty povrchových tvrdostí srovnatelné.
- Vysoké povrchové tvrdosti vykazovaly povlaky epoxyesterové pryskyřice v rozsahu 27,4–31,6 % a povlaky na bázi epoxidové pryskyřice dosáhly výsledné povrchové tvrdosti v rozsahu 22,6–37,2 %.

5.3 Diskuze mechanických zkoušek

5.3.1 Diskuze zkoušky rychlou deformací (úderem)

Odolnost proti úderu byla u testovaných organických povlaků měřena na ocelových panelech s DFT $120 \pm 20 \mu\text{m}$. Zkušebním závažím byl veden úder na rubovou vzorku se zvyšující se vzdáleností, dokud nedošlo k prasknutí povlaku.

Nejvyšší odolnost vůči úderu vykazovaly povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze AKR/3:1 a AKR/3:1/ZP. U vzorku AKR/3:1 došlo k poškození nátěru při dopadu závaží z výšky 25 cm, u vzorku AKR/3:1/ZP se poškození projevilo při pádu závaží z výšky 12 cm. Nejnižší odolnost vykazovaly povlaky na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice a povlaky na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice u kterých se poškození projevilo již při pádu závaží z 5 cm výšky. U ostatních povlaků došlo k poškození při výšce dopadu závaží mezi 5 a 10 cm.

5.3.2 Diskuze zkoušky ohybem

Odolnost proti ohybu testovaných organických povlaků byla měřena na ocelových panelech s DFT $120 \pm 20 \mu\text{m}$. Povlaky byly testovány na válcových trnech o průměrech od 25 do 3 mm.

Nejvyšší odolnost vůči ohybu vykazovaly povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze AKR/3:1 a AKR/3:1/ZP, které byly odolné vůči ohybu přes 3 mm válcový trn. Odolnosti většiny ostatních povlaků se pohybovaly mezi průměrem válcového trnu od 8 do 10 cm. Nejnižší odolnosti dosahoval povlak na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/3:1/ZP, kdy došlo k prasknutí při použití válcového trnu o průměru 13 mm.

Rozdíly mezi povlaky s obsahem fosforečnanu zinečnatého a bez jeho přídavku nebyly výrazné, projevíly se u několika vzorků. U povlaku na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1 se přídavek fosforečnanu zinečnatého projevil snížením odolnosti při ohybu přes válcové trny, a to z průměru válcového trnu 8 mm k průměru válcového trnu 13 mm.

U nátěrového systému na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/3:1 se přídavek fosforečnanu zinečnatého projevil zvýšením odolnosti při ohybu přes válcové trny, a to z průměru válcového trnu 12 mm k průměru válcového trnu 8 mm.

5.3.3 Diskuze mřížkové zkoušky

Odolnost proti oddělení od podkladu byla u testovaných organických povlaků měřena na ocelových panelech s DFT $120 \pm 20 \mu\text{m}$.

Hodnoty praskání a odlupování se pohybovaly se u všech nátěrových systémů mezi stupni 0 až 2. Stupeň 0, kdy nedochází k poškození na hranách řezů, vykazovaly vzorky styren akrylátové vodné disperze AKR/1,5:1/ZP, AKR/3:1 a AKR/3:1/ZP. Většina vzorků vykazovala stupeň poškození stupně 1, kdy dochází k odloupení malých šupinek v povlaku v místech křížení řezů. Stupeň 2, kdy dochází k odloupení podél hran řezů a v místech jejich křížení, vykazoval pouze vzorek vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/3:1.

5.3.4 Diskuze zkoušky hloubením

Odolnost proti deformacím hloubením byla u testovaných organických povlaků měřena na ocelových panelech s DFT $120 \pm 20 \mu\text{m}$. Pomocí Erichensova přístroje byla do podkladu vtlačována ocelová koule, než došlo k porušení povlaku

Nejvyšší odolnost vůči hloubení vykazovaly povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze, u vzorku AKR/3:1 došlo k poškození povlaku při 12,1 mm hloubení? a u vzorku AKR/3:1/ZP při 11,9 mm. Nejnižší hodnoty vykazoval povlak nátěrového systému na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1 a to 1,7 mm. Hodnoty odolnosti povlaků nátěrových systémů na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice a vodné emulze alkydové pryskyřice byly vyšší než 3,0 mm.

Rozdíly mezi nátěrovými povlaky s obsahem fosforečnanu zinečnatého a bez jeho přídavku nebyly výrazné, projevíly se u několika vzorků. U povlaku na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice EPOX/1,5:1 se přídavek fosforečnanu zinečnatého projevil zvýšením odolnosti z 1,7 na 5,2 mm. U povlaku na bázi styren akrylátové vodné disperze AKR/3:1 se přídavek projevil snížením odolnosti z 12,1 mm na 5,2 mm.

Závěry z výsledků mechanických zkoušek

- Z důvodů vysoké pigmentace a nízkého obsahu pojiva vykazovaly připravené nátěrové filmy nízkou odolnost vůči mechanickému namáhání.
- Nejvyšších odolností dosahovaly povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze, které vykazovaly vysoké odolnosti při zkouškách hloubení a ohybu.
- Nejnižších odolností dosahovaly povlaky na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice, které vykazovaly nízké odolnosti při zkouškách hloubení a ohybu. Vlastnosti epoxidových pryskyřic závisí na množství tvrdidla a jsou citlivé na jeho předávkování.

5.4 Diskuze odtrhové zkoušky přilnavosti

Odolnost proti odtrhu byla u testovaných organických povlaků měřena na ocelových panelech s DFT 500 ± 20 μm . Pomocí odtrhového přístroje byla provedena zkouška odolnosti vůči odtrhu na 3 místech pomocí zkušebních tělísek.

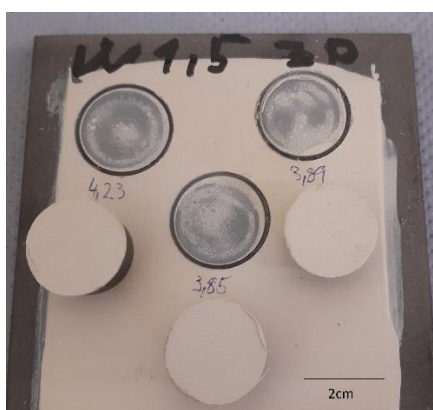
Povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze vykazovaly průměrnou odtrhovou pevnost v rozmezí 3,14–5,39 MPa. Nejvyšší průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak AKR/3:1/ZP (5,40 MPa) s kohezním lomem v 1. vrstvě. Dobrou průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak AKR/1,5:1 (4,79 MPa) s adhezním lomem k podkladu. Srovnatelnou průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak AKR/3:1/ZP (4,27 MPa) s kohezním lomem

ve 3. vrstvě. Nižší průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak AKR/1,5:1/ZP (3,14 MPa) s částečným adhezním lomem s podkladem.

Povlaky na bázi na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice vykazovaly průměrnou odtrhovou pevnost v rozmezí 2,04–4,09 MPa. Nejvyšší průměrnou odtrhovou pevnost vykazovaly povlaky ALK/3:1/ZP (3,39 MPa) s částečným adhezním lomem s podkladem a ALK/1,5:1/ZP (3,27 MPa) se smíšenými lomy mimo podklad. Ostatní povlaky vykazovaly nižší průměrnou odtrhovou pevnost. Povlak ALK/1,5:1 (2,83 MPa) se smíšenými lomy mimo podklad a ALK/3:1 (2,83 MPa) s kohezním lomem v 1. vrstvě.

Povlaky na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice vykazovaly průměrnou odtrhovou pevnost v rozmezí 2,75–3,39 MPa. Nejvyšší průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak EPOX/1,5:1/ZP (4,09 MPa) se smíšenými lomy mimo podklad. Dobrou průměrnou odtrhovou pevnost vykazoval povlak EPOX/3:1/ZP (3,41 MPa) se smíšenými lomy mimo podklad. Nižší průměrnou odtrhovou pevnost vykazovaly povlaky EPOX/1,5 (2,90 MPa) s adhezním lomem k podkladu a EPOX 3:1 se smíšenými lomy mimo podklad.

Povlaky na bázi epoxyesterové pryskyřice vykazovaly podobnou průměrnou odtrhovou pevnost v rozmezí 3,51–3,99 MPa. U všech těchto povlaků došlo k adheznímu lomu mezi podkladem a první vrstvou v rozsahu 70–100 %.



Obrázek 42: Příklad adhezního lomu mezi podkladem a první vrstvou u epoxyesterové pryskyřice

Závěry výsledků zkoušky přilnavosti

- Vysoké průměrné odtrhové pevnosti vykazovaly povlaky na bázi akrylátové vodné disperze a epoxyesterové pryskyřice.
- Povlaky s přidavkem fosforečnanu zinečnatého vykazovaly vyšší hodnoty průměrné odtrhové pevnosti.
- U intumescentních nátěrových hmot není žádoucí, aby se vyskytl lom mezi podkladem a první vrstvou, z důvodů možné ztráty přilnavosti zpěněné vrstvy.

5.5 Diskuze testu ohnivzdornosti

Test byl prováděn vystavením povlaků o DFT $500 \pm 20 \mu\text{m}$ na ocelových panelech při teplotě $500 \text{ }^\circ\text{C}$ v elektrické kelímkové peci, kdy se na vršek pece umístil vzorek tak, aby na stranu s nátěrem působilo vnitřní prostředí pece.

Na zadní straně panelu byla v pravidelných intervalech měřena teplota a výsledkem testu je závislost teploty na čase. Jako standard byl změřen identický panel bez povlaku, který po 30 minutách vykazoval teplotu $490 \text{ }^\circ\text{C}$.

Z povlaků na bázi styren akrylátové vodné disperze vykazoval po 30 minutách měření nejnižší teplotu vzorek AKR/3:1 a vzorek AKR/3:1/ZP s výslednou teplotou $460 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyšší konečnou teplotu vykazovaly vzorky AKR/1,5:1/ZP ($480 \text{ }^\circ\text{C}$) a AKR/1,5:1 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$). Ve srovnání se standardem vykazovaly vzorky AKR/3:1 a AKR/3:1/ZP o $30 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší teplotu a vykazovaly tak tepelně–izolační účinky.

Z povlaků na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice vykazoval po 30 minutách měření nejnižší teplotu vzorek ALK/3:1 a to $475 \text{ }^\circ\text{C}$. U vzorku ALK/3:1 ZP byla výsledná teplota $493 \text{ }^\circ\text{C}$. U vzorků ALK/1,5:1 a ALK/1,5:1/ZP došlo po 10 minutách k dosažení teploty $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Ve srovnání se standardem vykazoval vzorek ALK/3:1 slabé tepelně–izolační účinky, kdy jeho teplota byla o $15 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší.

Z povlaků na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice vykazovaly po 30 minutách měření nejnižší teplotu vzorky EPOX/3:1/ZP a EPOX/3:1 s výslednou teplotou $450 \text{ }^\circ\text{C}$, o $40 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší, než byla teplota standardu. U vzorků EPOX/1,5:1 a EPOX/1,5:1/ZP byla výsledná teplota 470

°C, o 20 stupňů nižší než teplota standardu. Ve srovnání se standardem vykazovaly všechny vzorky tepelně–izolační účinky.

Povlaky na bázi epoxyesterové pryskyřice po 30 minutách měření vykazovaly shodně teplotu 380 °C a k dosažení teploty 400 °C nedošlo.

Závěry z výsledků zkoušky ohnivzdornosti

- Nejvýrazněji rostla teplota vzorků během prvních 10 minut testu. V tomto rozmezí docházelo k tvorbě zpěněné vrstvy a teplota vzorků dosahovala cca 400 °C.
- Nejnižší protipožární odolnosti dosahovaly pojiva na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice, které při těchto teplotách zpěněnou vrstvu nevytvářely a po ukončení zkoušky tak dosahovaly nejvyšších teplot.
- Povlaky s poměrem intumescentních pigmentů v poměru 3:1 vykazovaly nižší teploty při ukončení zkoušky než systémy s poměrem 1,5:1.
- Nejvyšší odolnost vykazovaly povlaky na bázi epoxyesterové pryskyřice, kdy došlo k nadouvání nátěrového filmu a vytvoření izolující kapsy, tento vývoj zpěněné vrstvy však není žádoucí.
- Dobrých výsledků dosáhla pojiva na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice a styren akrylátové vodné disperze.



Obrázek 43: Příklad separace zpěněné vrstvy od podkladu u epoxyesterové pryskyřice EST/3:1 při 500°C

5.6 Diskuze charakterizace zpěněné vrstvy

Pro hodnocení zpěněné vrstvy byly vzorky vypalovány v elektrické kelímkové peci od firmy Classic. při teplotách výpalu 300°C, 500°C a 700°C. Byla změřena výška zpěněné vrstvy a podle rovnice 10 vypočítán intumescentní koeficient jako poměr zpěněné vrstvy a suché tloušťky filmu. V diskuzi budou komentovány výsledky při teplotách 700°C, kdy vznikala nejvyšší zpěněná vrstva.

U povlaků na bázi styren akrylátové vodné disperze byla nejvyšší tloušťka zpěněné vrstvy vytvořena u vzorku AKR/3:1 o tloušťce 10 mm s intumescentním koeficientem 23,3. Nižší tloušťka byla vytvořena u vzorku AKR/3:1/ZP o tloušťce 7,0 mm s intumescentním koeficientem 17,2. U vzorku AKR/1,5:1 byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 5,0 mm s intumescentním koeficientem 10,3. U vzorku AKR/1,5:1 byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 3,7 mm s intumescentním koeficientem 7,8.

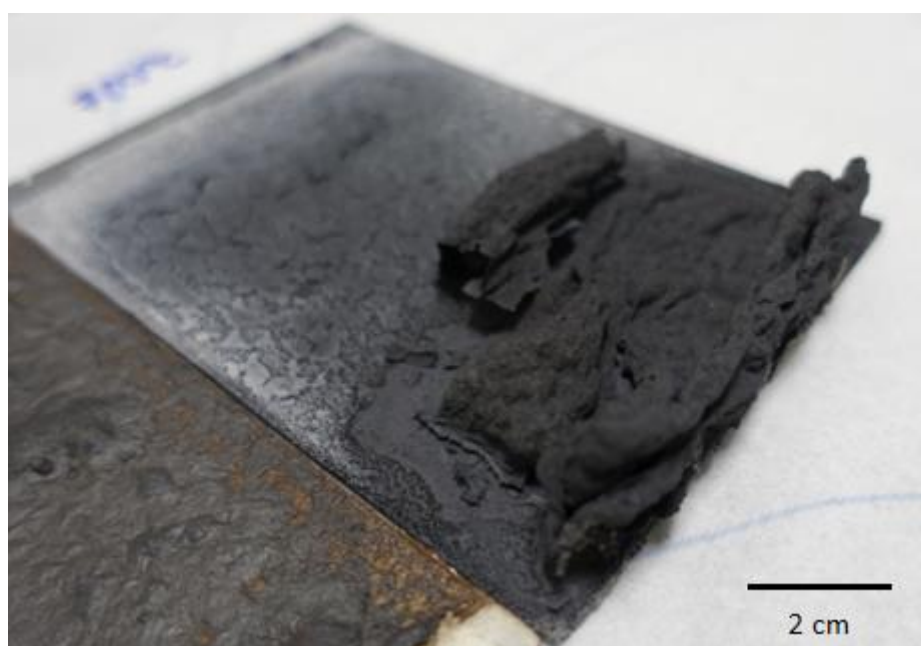
U nátěrových povlaků na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice byla nejvyšší tloušťka zpěněné vrstvy vytvořena u vzorku ALK/3:1 o tloušťce 6,5 mm s intumescentním koeficientem 13,2. Nižší vrstva byla vytvořena u vzorku ALK/3:1/ZP o tloušťce 3,5 mm s intumescentním koeficientem 7,5. U vzorku ALK/1,5:1 byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 2,3 mm s intumescentním koeficientem 4,8. U vzorku ALK/1,5:1 ZP byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 2,2 mm s intumescentním koeficientem 4,8.

U nátěrových povlaků na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice byla nejvyšší tloušťka zpěněné vrstvy vytvořena u vzorku EPOX/3:1 o tloušťce 22,7 mm s intumescentním koeficientem 40,6. Nižší vrstva byla vytvořena u vzorku EPOX/3:1/ZP o tloušťce 8,3 mm s intumescentním koeficientem 17,1. U vzorku EPOX/1,5:1 byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 2,1 mm s intumescentním koeficientem 4,8. U vzorku EPOX/1,5:1 ZP byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 1,1 mm s intumescentním koeficientem 2,5.

U nátěrových povlaků na epoxyesterové pryskyřice byla nejvyšší tloušťka zpěněné vrstvy vytvořena u vzorku EST/3:1 o tloušťce 8,3 mm s intumescentním koeficientem 19,8. Nižší tloušťka byla vytvořena u vzorku EST/3:1/ZP o tloušťce 6,5 mm s intumescentním koeficientem 15,2. U vzorku EST/1,5:1 byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 5,5 mm s intumescentním koeficientem 11,5. U vzorku EST/1,5:1/ZP byla vytvořena zpěněná vrstva o tloušťce 6,5 mm s intumescentním koeficientem 15,2.

Závěry z výsledků vlastností zpěněné vrstvy

- Nátěrové povlaky s poměrem intumescentních plniv v poměru 3:1 vykazovaly vyšší tloušťku zpěněné vrstvy než povlaky s poměrem plniv 1,5:1.
- Vyšších tloušťek zpěněné vrstvy dosahovaly systémy bez přídavku fosforečnanu zinečnatého, přídavek fosforečnanu zinečnatého vedl k nižší tloušťce zpěněné vrstvy.
- Při teplotě 500 a 700 °C docházelo u styren akrylátové vodné disperze a u vodné disperze epoxidové pryskyřice ke snížení viskozity taveniny a ke stékání taveniny po podkladu při uložení vzorků ve vertikální poloze.
- Při chladnutí vzorků docházelo k vnitřnímu pnutí zpěněné vrstvy, která nebyla mechanicky odolná a docházelo k jejímu odlupování. Tento jev snižoval přesnost měření.
- U povlaků na bázi epoxyesterové pryskyřice došlo k nadouvání nátěrového filmu a vytvoření izolující kapsy, tento vývoj zpěněné vrstvy však není žádoucí



Obrázek 44: Příklad stékání taveniny u styren akrylátové vodné disperze AKR/1,5:1 při teplotě 700 °C

5.7 Diskuze infračervené spektroskopie

Z naměřených spekter vyplývá, že se s rostoucí teplotou mění složení zpěněné vrstvy. Spektra se však nedají přesně určit z důvodu vysokého počtu složek nátěrových systémů.

Při teplotě 20 °C jsou patrné pásy v oblastech 2700–3500 cm^{-1} . V oblasti 2800–2800 cm^{-1} se objevují pásy uhlovodíkových složek pojiva (vibrace skupin CH_3 a CH_2), oblast 3000 až 3500 cm^{-1} je typická pro hydroxylové skupiny, především z dipentaerythritolu. Oblasti 1500–1600 cm^{-1} odpovídají melaminu. Při vlnočtu 1700 cm^{-1} je výrazné maximum charakteristické pro karbonylovou skupinu $\text{C}=\text{O}$. Píky v oblasti 1000–1100 cm^{-1} a 1160 cm^{-1} jsou charakteristické pro anorganické složky nátěrové hmoty, např. pro vibrace skupin PO_4^{3-} a $\text{P}-\text{O}-\text{C}$. Polyfosfátům odpovídají píky v rozmezí 1025 a 870 cm^{-1} . TiO_2 vykazuje charakteristický pík při 660 a 540 cm^{-1} . S rostoucí teplotou nejprve mizí spektra hořlavých organických složek. Při konečné teplotě výpalu 700 °C jsou patrná spektra pouze v oblastech anorganických látek. [50] Dá se předpokládat, že při vyšších teplotách vznikají fosfo–uhlíkaté skupiny s $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ můstky a také sloučeniny titanu ve formě TiO_2 a TiP_2O_7 . [39]

5.8 Diskuze termických analýz

Vzorky vytvrzených nátěrových hmot byly studovány termogravimetrickou analýzou (TGA) a diferenční skenovací kalorimetrií (DSC). Výsledkem zkoušek byly grafy hmotnostních ztrát, tepelného toku a derivovaných úbytků hmotnosti. V diskuzi bude popsán průběh křivek s rostoucí teplotou a reakce, které při těchto teplotách probíhají.

Při 106 °C je na grafu tepelného toku patrný endotermní pík, který je doprovázen ztrátou hmotnosti, a který byl určen jako ztráta vlhkosti z povlaku, popř. z některých v něm obsažených pigmentů např. z fosforečnanu zinečnatého, který může obsahovat nejen dihydrát ale i tetrahydrát. K dalšímu uvolnění krystalové vody fosforečnanu zinečnatého dochází při 160 °C a 301 °C, poslední krok se v grafech částečně překrývá s ostatními reakcemi. Při 220 stupních je na grafu tepelného toku patrný endotermní pík bez ztráty hmotnosti, který byl určen jako bod tání dipentaerythritolu. Při 250 °C je na křivce tepelného toku a derivované hmotnostní křivce patrný endotermní pík který značí počátek rozkladu polyfosfátu amonného na kyselinu polyfosforečnou za uvolnění amoniaku. Uvolněná polyfosforečná kyselina esterifikuje dipentaerythritol za vzniku vody. Kyselina polyfosforečná se může také cyklovat za vzniku ultrafosfátových struktur za uvolnění amoniaku a vody. Při teplotě 300 °C se melamin rozkládá

za vzniku vody, oxidu uhličitého a amoniaku. Exotermní pík v oblasti 350 °C ukazuje na vyhoření organické pojivové složky. Při teplotě 400 °C se rychlost úbytku hmotnosti snižuje. Zbytkové hmotnosti vzorků se pohybovaly v rozmezí mezi 44 až 63 %. U systémů s poměrem intumescentních plniv 3:1 byl graf tepelného toku posunut do záporných hodnot, to znamená, že probíhají endotermní procesy a teplo se spotřebovávalo pro intumescentní reakce. Na grafech vzorků s poměrem plniv 1,5:1 je patrná oblast záporného tepelného toku do cca 300 °C. Nad touto teplotou byl tepelný tok kladný a probíhaly exotermní procesy.

5.9 Diskuze korozních zkoušek v atmosféře s obsahem solné mlhy

Nátěrové filmy na ocelových panelech byly podrobeny zkoušce v komoře se solnou mlhou, kde byly vzorky exponovány po dobu 168 hodin. U všech nátěrových filmů došlo k formám korozního poškození: korozi v ploše, korozi v řezu anebo k vytvoření puchýřů.

Z povlaků na bázi styren akrylátové vodné disperze vykazoval vzorek AKR/3:1/ZP nejvyšší odolnosti vůči korozi v ploše, která dosáhla hodnoty 10 %, puchýřovatění v ploše dosáhlo stupně 4M, k puchýřovatění v řezu u tohoto filmu nedošlo, k prorezivění povlaku došlo z 3 %. Koroze v řezu se pohybovala mezi 0,5–1 mm. Obdobná odolnost vůči korozi v ploše byla zaznamenána u povlaku AKR/1,5:1/ZP, kdy koroze v ploše dosáhla 16 %. Koroze v řezu se u tohoto povlaku pohybovala mezi 0,5–1 mm k prorezivění povlaku došlo z 3 %. Puchýřovatění v ploše dosáhlo stupně 8D, k puchýřovatění v řezu u tohoto vzorku nedošlo. Nižší odolnosti dosáhl povlak AKR/3:1, kdy koroze dosáhla 33 %. U tohoto filmu dosáhlo puchýřovatění v řezu stupně 4F a puchýřovatění v ploše 4MD. U vzorku AKR/1,5:1 dosáhla koroze v ploše 50 %, v ploše se vyskytly puchýře stupně 4F, v řezu k vytvoření osmotických puchýřků nedošlo.

U povlaků na bázi alkydové emulze došlo u všech vzorků ke korozi v ploše v rozsahu 50 %. Povlaky ALK/3:1 a ALK/3:1/ZP vykazovaly nízké hodnoty koroze v řezu, ta se zde pohybovala mezi 0–0,5 mm, prorezivění povlaků zde dosáhlo 10 %, k puchýřovatění v řezu u těchto povlaků nedocházelo. Povlaky ALK/1,5:1 a ALK/1,5:1/ZP vykazovaly shodný stupeň puchýřovatění v řezu stupně 2F a rozsah koroze v řezu 2–3 mm. U filmu ALK/1,5:1 dosáhlo puchýřovatění v ploše stupně 4F, povlak prorezivění z 10 %, u filmu ALK/1,5:1/ZP k puchýřovatění v ploše nedocházelo, došlo zde k prorezivění povlaku z 3 %.

U povlaků na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice došlo u všech vzorků ke značnému puchýřovatení v ploše, které se překrývalo s puchýřovatením v řezu, k prokorodování nátěrového filmu u těchto povlaků nedocházelo. Film EPOX/1,5:1/ZP dosáhl odolnosti koroze v ploše 16 %, puchýřovatení v řezu a v ploše stupně 4D. Koroze v řezu se pohybovala mezi 0,5–1 mm. Nižší korozní odolnosti dosáhl film EPOX/3:1/ZP, kdy koroze dosáhla 33 %, puchýřovatení v ploše zde dosáhlo stupně 2MD a puchýřovatení v řezu 2D. Koroze v řezu se pohybovala mezi 0,5–1 mm. Povlaky EPOX/1,5:1 a EPOX/3:1 dosáhly korozní odolnosti v ploše 50 % a koroze v řezu se pohybovala mezi 2–3 mm. U filmu EPOX/1,5:1 dosáhlo puchýřovatení v ploše a v řezu stupně 4D.

U povlaků na bázi epoxyesterové pryskyřice dosáhl nátěrový film EST/3:1/ZP odolnosti koroze v ploše 16 %, koroze v řezu se pohybovala mezi 0–0,5 mm, k ostatním zkoumaným korozním jevům u tohoto filmu nedocházelo. Nižší korozní účinnosti dosáhl povlak EST/1,5:1/ZP, který dosáhl hodnoty koroze v ploše 16 %, puchýřovatení v řezu u tohoto povlaku dosáhlo stupně 6F, k puchýřovatení v ploše a k prorezivění nedošlo. U povlaků bez antikorozního pigmentu EST/1,5:1 a EST/3:1 dosáhla koroze v ploše 33 % s mírou prorezivění povlaků 3 %. Došlo zde k vytvoření osmotických puchýřků stupně 8F.

Závěry z výsledků korozních zkoušek v atmosféře s obsahem solné mlhy

- Nejvyšší antikorozní účinnosti dosáhl povlak styren akrylátové disperze AKR/3:1/ZP, kde dosáhla koroze v ploše 10 % a povlak AKR/1,5:1/ZP kde dosáhla koroze v ploše 16 %.
- Z připravených povlaků dosahovaly vysoké antikorozní účinnosti povlaky na bázi epoxyesterové pryskyřice EST/3:1/ZP a EST/1,5:1/ZP, kdy koroze v ploše dosáhla 16 %.
- Mezi povlaky s nejnižší korozní odolností jsou povlaky na bázi alkydové pryskyřice, kdy koroze v ploše dosáhla 50%.
- Vyšší korozní odolnosti dosahovaly povlaky obsahující fosforečnan zinečnatý jako antikorozní pigment.
- Intumescentní povlaky obsahují vysoký podíl plniv a nízký podíl pojivové složky, proto jejich korozní odolnost není příliš vysoká.

5.10 Diskuze korozních zkoušek v atmosféře s povšechnou kondenzací.

Nátěrové filmy na ocelových panelech byly podrobeny zkoušce v komoře s atmosférou s povšechnou kondenzací, kde byly vzorky exponovány po dobu 168 hodin. U všech nátěrových filmů došlo k vzniku korozního poškození: korozi v ploše, prokorodování nátěrovým filmem anebo k vytvoření puchýřů.

Z povlaků na bázi styren akrylátové disperze vykazoval vzorek AKR/1,5:1/ZP nejvyšší odolnosti vůči korozi v ploše, která dosáhla hodnoty 33 % a prorezivění povlaku dosáhlo 0,3 %, na filmu došlo k vytvoření osmotických puchýřků stupně 6F. Nižší odolnost vykazoval vzorek AKR/3:1, kde koroze v ploše dosáhla stupně 50 % a puchýřkovatění v ploše 6F, k prorezivění povlaku. Podobnou odolnost vykazoval vzorek AKR/3:1/ZP s korozi v ploše 50 %, prorezivění povlaku zde bylo ze 16 % a puchýřkovatění dosáhlo stupně 6M. Nejnižší odolnosti dosáhl vzorek AKR/1,5:1 s korozi v ploše 100 %, korozi povlaku 3 % a osmotickými puchýřky 6M.

Z povlaků na bázi vodné emulze alkydové pryskyřice vykazoval nejvyšší korozní odolnost povlak ALK/3:1 ZP, kdy koroze v ploše dosahovala 16 %, k prorezivění povlaku došlo z 0,3 % a došlo k vytvoření osmotických puchýřků 6F. Dobré odolnosti dosáhl vzorek ALK/3:1, kdy koroze v ploše dosáhla 33 % a došlo k prorezivění povlaku z 3 %, puchýřkovatění v ploše dosáhlo stupně 6F. Nižší korozní odolnosti dosáhl vzorek ALK/1,5:1/ZP, u kterého dosáhla koroze v ploše 50 % a prorezivění se vyskytlo z 0,3 %, puchýřkovatění dosáhlo stupně 6F.

Nejvyšší korozní odolnosti z povlaků na bázi epoxidové pryskyřice dosáhly povlaky EPOX/1,5:1 a EPOX/1,5:1/ZP u kterých koroze v ploše zasahovala z 16 %, prorezivění filmu z 1 %. U filmu EPOX/1,5:1 dosáhlo puchýřkovatění stupně 4D a u filmu EPOX/1,5:1 stupně 4M. Dobré odolnosti dosáhl film EPOX/3:1, kde koroze zasahovala z 16 %. Prorezivění se u tohoto filmu vyskytlo z 10 % a množství puchýřků bylo hodnoceno stupněm 2F. Nižší korozní odolnost vykazoval povlak EPOX/3:1, kde se koroze podkladu vyskytla z 50 % a k prorezivění podkladu došlo z 3 %, puchýřkovatění u tohoto povlaku dosáhlo stupně 4MD.

Nejvyšší odolnosti z povlaků na bázi epoxyesterové pryskyřice vykazoval povlak EST/3:1 ZP s korozi v ploše 10 %, u filmu došlo k vytvoření osmotických puchýřků stupně 4M a k prorezivění povlaku nedošlo. Dobré korozní odolnosti dosáhl vzorek EST/3:1 ZP, kdy koroze v ploše dosahovala 16 %, k prorezivění povlaku došlo z 3 % a došlo k vytvoření osmotických puchýřků stupně 6F. Nižší korozní odolnosti dosáhl film EST/3:1, kdy koroze

v ploše dosáhla 33 %, puchýřkovatění v ploše dosáhlo stupně 2D, k prorezivění povlaku nedošlo. Podobnou korozní odolnost vykazoval vzorek EST/1,5:1, kdy koroze v ploše dosáhla 33 % a puchýřkovatění dosáhlo stupně 6D.

Závěry z výsledků korozních zkoušek v atmosféře s povšechnou kondenzací

- Nejvyšší antikoroziční účinnosti dosáhl povlak epoxyesterové pryskyřice EST/1,5:1 ZP s korozi v ploše 10 %.
- Dobré antikoroziční účinnost vykazovaly povlaky EST/3:1 ZP, EPOX/3:1/ZP, EPOX/1,5:1/ZP, EPOX/1,5:1, a ALK/3:1 ZP, kdy došlo ke korozi v ploše z 16 %
- Vyšší korozní odolnosti dosahovaly povlaky obsahující fosforečnan zinečnatý jako antikoroziční pigment.
- Intumescentní povlaky obsahují vysoký podíl plniv a nízký podíl pojivové složky, proto jejich korozní odolnost není příliš vysoká.

5.11 Určení stupně korozní agresivity prostředí

Pro vyhodnocení stupně korozní agresivity prostředí bylo zapotřebí zaznamenat dobu expozice testovaných povlaků ve zrychlených cyklických korozních zkouškách kdy nebyl zaznamenán výskyt puchýřů či podkorodování povlaku. Stupeň korozní agresivity byl určen podle normy ISO 12944-6.

Při testech intumescentních nátěrových systémů v prostředích solné mlhy a atmosféře s povšechnou kondenzací vykazovaly všechny nátěrové filmy alespoň jeden projevy korozního poškození, jako je tvorba osmotických puchýřků a prorezivění povlaku po 168 hodinách.

Dle dané normy lze tyto povlaky doporučit do prostředí o korozním stupni agresivity C1 anebo C2, v této atmosféře je životnost těchto nátěrových povlaků hodnocena jako střední až nízká.

6 Přínosy diplomové práce

Tato práce byla zaměřena na studium zpěňovacích nátěrových povlaků na bázi styren akrylátové vodné disperze, vodné emulze alkydové pryskyřice, vodou ředitelné epoxidové pryskyřice, a epoxyesterové pryskyřice rozpouštědlového typu, s různými poměry intumescentních plniv (polyfosfátu amonného, melaminu a dipentaerythritolu). V neposlední řadě byl zkoumán vliv přídavku fosforečnanu zinečnatého na antikorozi a protipožární účinnost. Zpěňovací nátěrové systémy byly testovány z hlediska jejich fyzikálně – mechanických vlastností, mechanické odolnosti, ohnivzdornosti a antikorozi účinnosti. Z testovaných pojiv vykazovalo nejvyšší mechanickou odolnost pojivo na bázi styren akrylátové vodné disperze. Tyto povlaky se vyznačovaly vysokými odolnostmi při zkoušce hloubení (10 mm), ohybem (průměr ohybového trnu 3 mm), mřížkovou zkouškou (stupeň poškození 0) a vysokými hodnotami odtrhových pevností (3,14 – 5,40 MPa). Zatím co systémy na bázi vodné disperze epoxidové pryskyřice a vodné emulze alkydové pryskyřice vykazovaly z důvodů vysoké pigmentace a nízkého obsahu pojiva nízkou odolnost vůči mechanickému namáhání. Testem ohnivzdornosti byla zkoumána doba, po kterou povlak odolává zvýšené teplotě. Z výsledků zkoušek vyplývá, že povlaky s poměrem intumescentních pigmentů v poměru 3:1 vykazovaly nižší teploty při ukončení zkoušky než systémy s poměrem 1,5:1. Jako vhodné pojivo lze použít styren akrylátovou vodnou disperzi, která snižovala konečnou teplotu vzorku až o 30 °C ve srovnání se standardem, a vodnou disperzi epoxidové pryskyřice, která snižovala konečnou teplotu vzorku až o 40 °C ve srovnání se standardem. Při hodnocení zpěněné vrstvy bylo zjištěno, že přídavek fosforečnanu zinečnatého vedl k nižší výšce zpěněné vrstvy a nižšímu intumescentnímu koeficientu. Možným vysvětlením je uvolňování vázané vody z krystalové mřížky fosforečnanu zinečnatého při nižších teplotách, než dochází ke změkčení nátěrového filmu. Expanzí vodních par z fosforečnanu zinečnatého vznikají v organickém povlaku kapiláry, kterými při vyšších teplotách unikají plyny vznikající při intumescentních reakcích. Vyšší výšku zpěněné vrstvy vykazovaly povlaky s poměrem intumescentních plniv 3:1. Infračervenou spektroskopií bylo určeno chemické složení připravených nátěrových filmů a také chemické složení zpěněných vrstev při specifických teplotách vypalování. Při vysokých teplotách výpalu jsou patrné píky charakteristické pouze pro anorganické látky. Došlo tak ke kompletnímu vypálení organických pojivových složek. Z metod termických analýz vyplývá, že u vzorků s poměrem intumescentních plniv 3:1 dochází

k posunu tepelného toku do záporných hodnot a probíhají endotermické reakce. Teplo, které by vedlo k ohřevu podkladu, je spotřebováno na intumescentní reakce. Podle výsledků korozních zkoušek přidavek fosforečnanu zinečnatého zvyšuje antikorozi účinnost organických povlaků. Intumescentní povlaky obsahují vysoký podíl plniv a nízký podíl pojivové složky, proto jejich korozní odolnost není příliš vysoká, a lze tyto povlaky doporučit do atmosféry s korozní agresivitou C1–C2. Příkladem jejich využití jsou vytápěné budovy s čistou atmosférou, a nevytápěné budovy, kde může docházet ke kondenzaci vody. Další výzkum bude zkoumat plniva, která by mohla zlepšit mechanické vlastnosti zuhelnatělé vrstvy, jako například wollastonit nebo slídu. Je také možnost zkoumání jiných antikorozi pigmentů, které by nepotlačovaly intumescentní procesy, jako například zinkferit ($ZnFe_2O_4$). Pro použití v agresivnějším prostředí lze uvažovat o opatření povlaků vrchním nátěrem, který by ale nesměl potlačovat zpěňovací procesy. Již fungující povlaky by bylo možné vyzkoušet za jiných podmínek, jako například vystavení normované teplotní křivce.

7 Závěr

Předmětem této práce bylo navrhnout a testovat protipožární povlaky na ocelové konstrukce. Byl zkoumán poměr třech základních složek zpěňovatelných nátěrů (polyfosfátu amonného, melaminu a dipentaerythritolu) v různém typu pojiva (styren akrylátové vodné disperzi, vodné emulzi alkydové pryskyřice, vodou ředitelné epoxidové pryskyřici, a epoxyesterové pryskyřici rozpouštědlového typu). Také byl studován vliv fosforečnanu zinečnatého na kvalitu ochranné vrstvy a na ochranné působení povlaku během jeho životnosti. U organických povlaků byly hodnoceny jejich mechanické vlastnosti a dále byla hodnocena jejich antikoroziční účinnost při zrychlených korozních zkouškách. Navíc byly provedeny zkoušky se zaměřením na tepelně–izolační účinky těchto nátěrových hmot. Z testovaných poživ vykazovalo nejvyšší mechanickou odolnost pojivo na bázi styren akrylátové vodné disperze. Při testu ohnivzdornosti vykazovaly tepelně–izolační účinky povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze a vodné disperze epoxidové pryskyřice s poměry plniv 3:1. Při hodnocení zpěněné vrstvy bylo zjištěno, že přídavek fosforečnanu zinečnatého vedl k nižší výšce zpěněné vrstvy. Nižší vrstvu tvořily také povlaky s poměrem intumescentních plniv v poměru 1,5:1. Korozní odolnost intumescentních nátěrových systémů je obecně nízká a lze je doporučit do prostředí s nízkou korozní agresivitou.

Závěrem lze konstatovat, že organické povlaky na bázi styren akrylátové vodné disperze současně vykazovaly dobré mechanické vlastnosti a tepelně–izolační účinky a lze je tak doporučit pro další výzkum.

8 Seznam literatury

- [1] HAO, J. a W. K. CHOW. A brief review of intumescent fire retardant coatings. *Architectural Science Review* [online]. 2003, **46**(1), 89–95. ISSN 17589622. Dostupné z: doi:10.1080/00038628.2003.9696967
- [2] VAŠÁTKO, Eduard. Protipožární nátěry ve stavebnictví. *seidl.cz* [online]. 2009. Dostupné z: <https://seidl.cz/protipozarni-natery-ve-stavebnictvi/>
- [3] NETOPILOVÁ, Miroslava. *Stavební materiály* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2004. ISBN 80-86634-27-2. Dostupné z: <https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/StavebniMaterialy.pdf>
- [4] *Jaký je rozdíl mezi aktivní protipožární ochranou a pasivní protipožární ochranou?* [online]. Dostupné z: https://www.nullifire.com/cs_CZ/podpora/know-how-centrum/aktivni-a-pasivni-pozarni-ochrana/
- [5] KRATOCHVÍL, Václav, Šárka NAVAROVÁ a Michal KRATOCHVÍL. *Požárně bezpečnostní zařízení ve stavbách: stručná encyklopedie pro jednotky PO, požární prevenci a odbornou veřejnost*. 17. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2011. ISBN 978-80-7385-103-3.
- [6] KUPILÍK, Václav. *Protipožární omítky a nástříky Protipožární* [online]. Praha: Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2007. Dostupné z: http://fire.fsv.cvut.cz/vzdelavani/technici/3/3-3_Omitky+nastriky.pdf
- [7] MORAVEC, Vladimír. Protipožární nástříky a omítky. *seidl.cz* [online]. 2009. Dostupné z: <https://seidl.cz/protipozarni-nastriky-a-omitky/>
- [8] VAŠÁTKO, Eduard. Problematika desek a deskových konstrukcí v protipožární ochraně staveb. *seidl.cz* [online]. 2009. Dostupné z: <https://seidl.cz/problematika-desek-a-deskovych-konstrukci-v-protipozarni-ochrane-staveb/>
- [9] JIANJUN, Li a Ou YUXIANG. 5. Flame retardation mechanism of other flame retardants. *Theory of Flame Retardation of Polymeric Materials* [online]. 2019, 131–156. Dostupné z: doi:10.1515/9783110349351-005
- [10] MASÁŘÍK, Ivo. *Plasty a jejich požární nebezpečí*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2003. ISBN 80-86634-16-7.
- [11] PETROVÁ, Šárka, Petr SOUDEK a Tomáš VANĚK. *Retardanty hoření, jejich použití a vliv na životní prostředí* [online]. 2015. Dostupné z: http://chemicke-listy.cz/docs/full/2015_09_679-686.pdf
- [12] HORROCKS, A R, J ALONGI, F CAROSIO a G MALUCELLI. Fundamental aspects of flame retardancy. In: *Update on Flame Retardant Textiles: State of the Art, Environmental Issues and Innovative Solutions*. 2013, s. 20–53.
- [13] LEWIN, Menachem a Edward D. WEIL. 2 Mechanisms and modes of action in flame retardancy of polymers. In: A.R. HORROCKS a D. PRICE, ed. *Fire Retardant Materials* [online]. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2001, s. 31–68. Dostupné z: doi:10.1533/9781855737464.31
- [14] NELSON, Gordon L. Fire and Polymers: An Overview. In: [online]. 1995, s. 1–26. Dostupné

z: doi:10.1021/bk-1995-0599.ch001

- [15] KUPILÍK, Václav. *Protipožární nátěry* [online]. Praha: Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2007. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/technici/3/3-4_Protipozarni_natery.pdf
- [16] VANDERSALL, H.L. Vandersall. *J. Fire Flamm.* 1971, **2**(97).
- [17] CAMINO, G, L COSTA a G MARTINASSO. Intumescent Fire-retardant Systems G. Camino, L. Costa & G. Martinasso. *Polymer.* 1989, **23**, 359–376.
- [18] CAMINO, G. a L. COSTA. Mechanism of Intumescence in Fire Retardant Polymers. *Reviews in Inorganic Chemistry* [online]. 1986, **8**(1–2), 69–100. ISSN 21910227. Dostupné z: doi:10.1515/REVIC.1986.8.1-2.69
- [19] DUQUESNE, S., S. MAGNET, C. JAMA a R. DELOBEL. Intumescent paints: Fire protective coatings for metallic substrates. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, **180–181**, 302–307. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2003.10.075
- [20] ZYBINA, Olga a Marina GRAVIT. *Intumescent Coatings for Fire Protection of Building Structures and Materials* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020. Springer Series on Polymer and Composite Materials. ISBN 978-3-030-59421-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-59422-0
- [21] BELKIN, D. I. a O. A. DEMCHENKO. A Mathematical Model of the Synthesis of Pentaerythritol. *Kinetics and Catalysis* [online]. 2020, **61**(3), 374–383. ISSN 16083210. Dostupné z: doi:10.1134/S0023158420030052
- [22] LANDART, Mélissa, Marc LEMAIRE a Estelle MÉTAY. Synthesis of dipentaerythritol from pentaerythritol under acidic conditions. *Organic Process Research and Development* [online]. 2020, **24**(11), 2591–2603. ISSN 1520586X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.oprd.0c00269
- [23] KAZARINOV, Roman, Krzysztof KOWALCZYK, Jakub ŁOPIŃSKI, Beata SCHMIDT a Joanna ROKICKA. An intumescent coating system modified with waste poly(ethylene terephthalate) as a substitute for dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2018, **125**(June), 481–488. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2018.10.006
- [24] HORACEK, H. Reactions of Stoichiometric Intumescent Paints. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2010, **116**(5), 2658–2667. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.29940
- [25] CIRET, Jeremy. *Investigation of Intumescent Coatings for Fire Protection - Application to Jet-Fire* [online]. B.m., 2010. Université Lille I Sciences et Technologies pour. Dostupné z: <https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/de49df5a-0eb0-45a7-8084-828c6c08cd95>
- [26] WANG, Zhengzhou, Lin LIU, Ganxin JIE a Pingkai JIANG. Flame retardance and thermal decomposition of EVA composites containing melamine phosphate and dipentaerythritol. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **284–286**, 1831–1835. ISSN 10226680. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.284-286.1831
- [27] CAMINO, G., L. COSTA a M. P. LUDA. Mechanistic aspects of intumescent fire retardant systems. *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia* [online]. 1993, **74**(1), 71–83. ISSN 02580322. Dostupné z: doi:10.1002/masy.19930740109
- [28] WANG, Guojian a Jiayun YANG. Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*

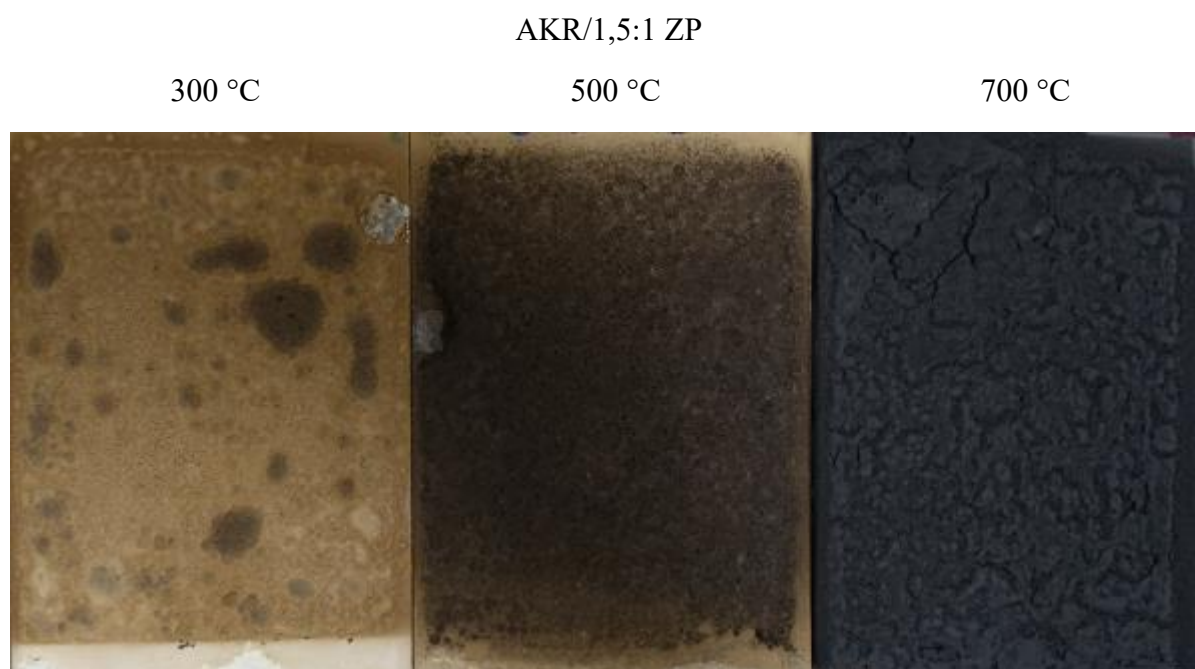
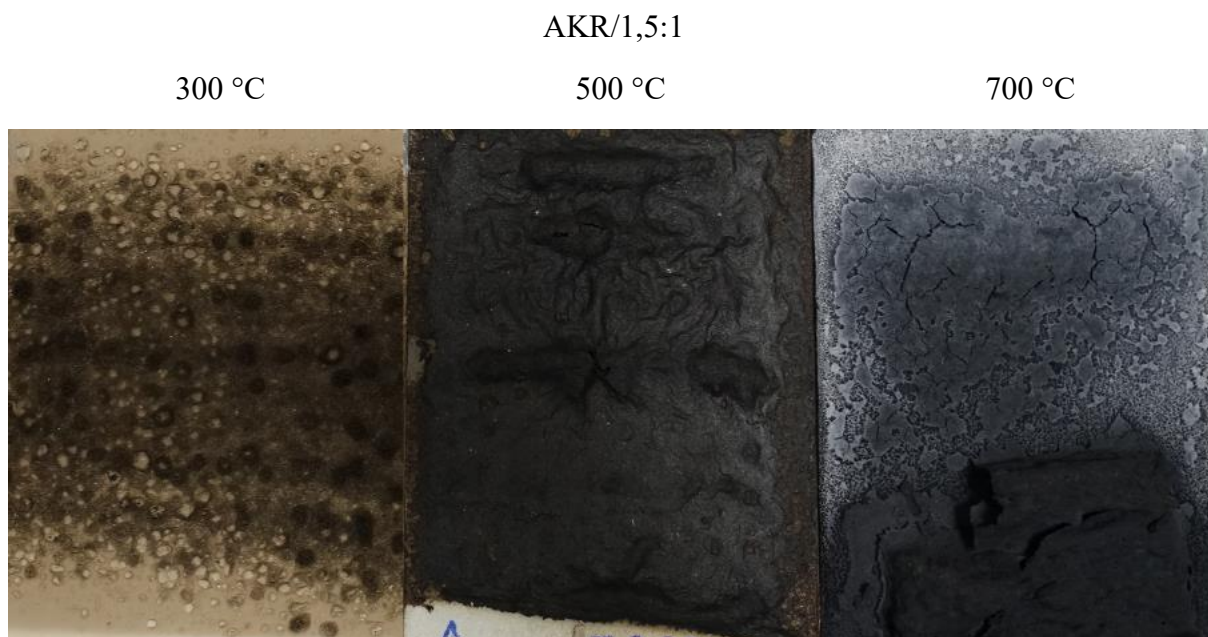
- [online]. 2011, **72**(4), 605–611. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2011.07.001
- [29] COSTA, L. a G. CAMINO. Thermal behaviour of melamine. *Journal of Thermal Analysis* [online]. 1988, **34**, 423–429. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/BF01913181
- [30] MIYAKE, Yuto, Goichiro SEO, Kotaro MATSUHASHI, Noriyuki TAKADA a Kaname KANAI. Synthesis of carbon nitride oligomer as a precursor of melon with improved fluorescence quantum yield. *Materials Advances* [online]. 2021, **2**(18), 6083–6093. ISSN 26335409. Dostupné z: doi:10.1039/d1ma00579k
- [31] MARIAPPAN, Thirumal, Aishvarya AGARWAL a Sushma RAY. Influence of titanium dioxide on the thermal insulation of waterborne intumescent fire protective paints to structural steel. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2017, **111**(May), 67–74. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2017.04.036
- [32] LI, Hongfei, Zhongwu HU, Sheng ZHANG, Xiaoyu GU, Huajin WANG, Peng JIANG a Qian ZHAO. Effects of titanium dioxide on the flammability and char formation of water-based coatings containing intumescent flame retardants. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2015, **78**, 318–324. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2014.08.003
- [33] ALONGI, Jenny, Zhidong HAN a Serge BOURBIGOT. Intumescence: Tradition versus novelty. A comprehensive review. *Progress in Polymer Science* [online]. 2014, **51**, 28–73. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2015.04.010
- [34] MAZELA, Bartłomiej, Anyelkis BATISTA a Wojciech GRZE. Expandable Graphite as a Fire Retardant for Cellulosic Materials — A Review. *Forests* [online]. 2020, **11**(7), 755. Dostupné z: doi:10.3390/f11070755
- [35] WANG, Junbo a Guojian WANG. Influences of montmorillonite on fire protection, water and corrosion resistance of waterborne intumescent fire retardant coating for steel structure. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2014, **239**, 177–184. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2013.11.037
- [36] BEHESHTI, Amir a Saeed Zeinali HERIS. Experimental investigation and characterization of an efficient nanopowder-based flame retardant coating for atmospheric-metallic substrates. *Powder Technology* [online]. 2015, **269**, 22–29. ISSN 1873328X. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2014.08.048
- [37] MARIAPPAN, Thirumal. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences* [online]. 2016, **34**(2), 120–163. ISSN 15308049. Dostupné z: doi:10.1177/0734904115626720
- [38] PURI, Ravindra G. a A. S. KHANNA. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research* [online]. 2017, **14**(1), 1–20. ISSN 19353804. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-016-9815-3
- [39] GUZII, S, T KURSKA, Y OTROSH, P BALDUK a Y IVANOV. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, **1162**(1), 012003. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899x/1162/1/012003
- [40] WEISS, Keith D. Paint and coatings: A mature industry in transition. *Progress in Polymer Science* [online]. 1997, **22**(2), 203–245. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6700(96)00019-6

- [41] PURI, Ravindra G. a A. S. KHANNA. Influence of heat-stable filler on the thermal shielding performance of water-based intumescent fire-resistive coating for structural steel applications. *Journal of Coatings Technology and Research* [online]. 2017, **14**(2), 323–331. ISSN 15470091. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-016-9850-0
- [42] DONG, Ying, Guojian WANG a Jiayun YANG. Influences of silicone emulsion on fire protection of waterborne intumescent fire-resistive coating. *Journal of Coatings Technology and Research* [online]. 2014, **11**(2), 231–237. ISSN 15470091. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-013-9532-0
- [43] WICKS, Zeno W., Frank N. JONES, S. Peter PAPPAS a Douglas A. WICKS. Solventborne and High-Solids Coatings. In: *Organic Coatings* [online]. B.m.: Wiley, 2007, s. 511–523. Dostupné z: doi:10.1002/9780470079072.ch25
- [44] ULLAH, Sami, Faiz AHMAD, A. M. SHARIFF, M. Rafi RAZA a Patrick J. MASSET. The role of multi-wall carbon nanotubes in char strength of epoxy based intumescent fire retardant coating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2017, **124**, 149–160. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2017.02.011
- [45] ZHANG, Wenchao, Xiangdong HE, Tinglu SONG, Qingjie JIAO a Rongjie YANG. The influence of the phosphorus-based flame retardant on the flame retardancy of the epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2014, **109**, 209–217. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.07.023
- [46] BEHESHTI, Amir a Saeed Zeinali HERIS. Is MWCNT a good synergistic candidate in APP-PPER-MEL intumescent coating for steel structure? *Progress in Organic Coatings* [online]. 2016, **90**, 252–257. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2015.10.023
- [47] YEW, M. C., N. H. RAMLI SULONG, M. K. YEW, M. A. AMALINA a M. R. JOHAN. Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2015, **78**, 59–66. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2014.10.006
- [48] ŠTARHA, Pavel a Zdeněk TRÁVNÍČEK. *Termická analýza* [online]. 2011. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/afc/Studijni_materialy/Termicka_analyza.pdf
- [49] PROMAT. *Požární ochrana pro využití ve speciálních oblastech* [online]. B.m.: Promat. 2023. Dostupné z: <https://www.promat.tech/katalog-pbs/#pozarni-scenare/z>
- [50] LARKIN, Peter J. *Infrared and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation* [online]. 2017. ISBN 9780128041628. Dostupné z: doi:10.1016/C2015-0-00806-1

9 Obrázková příloha

9.1 Vzorky nátěrových filmů po žihání v elektrické peci

Na následujících fotografiích jsou zobrazeny organické povlaky po žihání v elektrické peci. Jednotlivé organické povlaky jsou srovnány v pořadí zleva doprava při teplotách výpalu 300 °C, 500 °C a 700 °C



AKR/3:1

300 °C

500 °C

700 °C



AKR/3:1 ZP

300 °C

500 °C

700 °C



EPOX/1,5:1

300 °C

500 °C

700 °C



EPOX/1,5:1ZP

300 °C

500 °C

700 °C

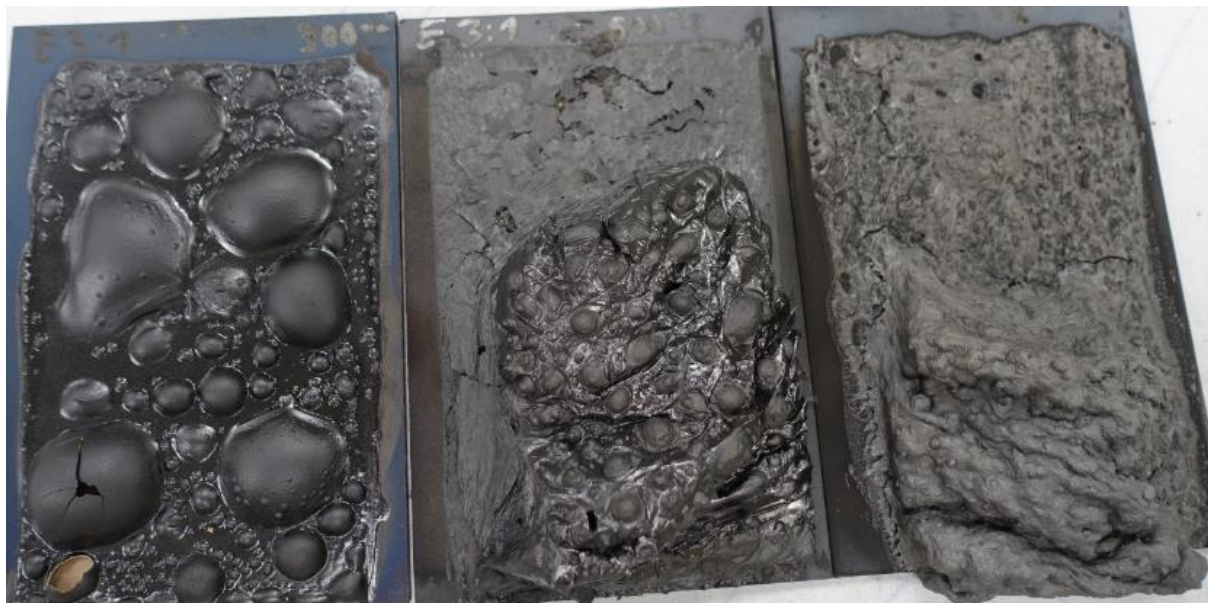


EPOX/3:1

300 °C

500 °C

700 °C



EPOX/3:1 ZP

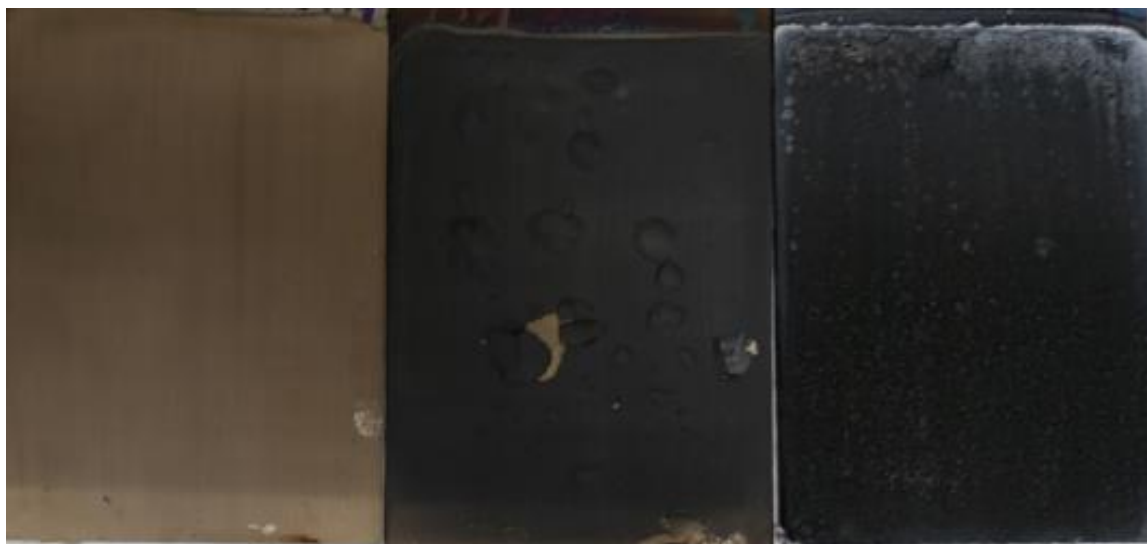
300 °C

500 °C

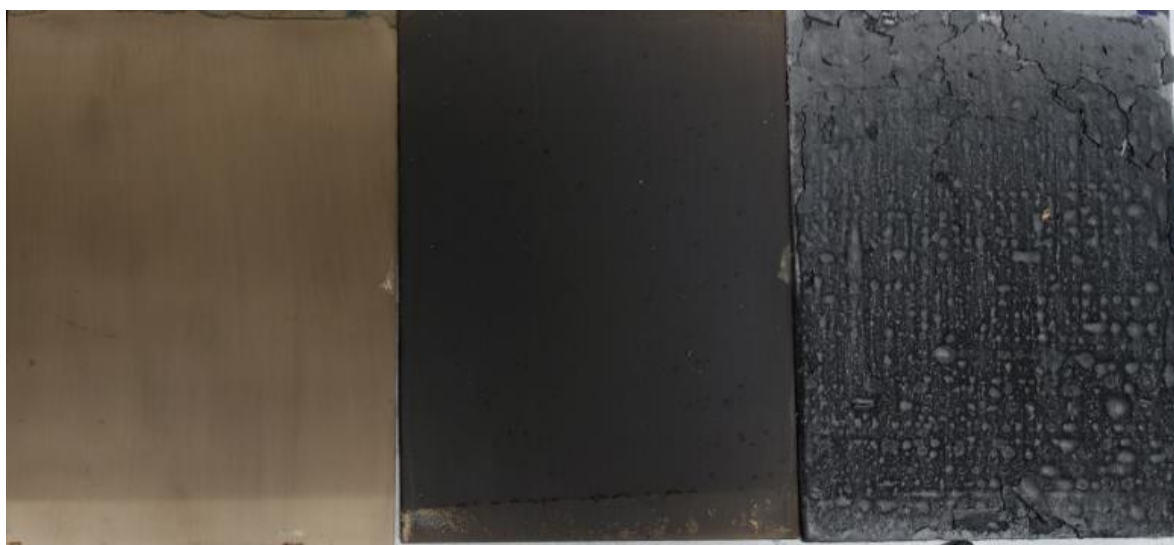
700 °C



300 °C ALK/1,5:1 500 °C 700 °C



300 °C ALK/1,5:1 500 °C 700 °C



300 °C ALK/3:1 500 °C 700 °C



300 °C ALK/3:1 ZP 500 °C 700 °C



EST/1,5:1

300 °C

500 °C

700 °C

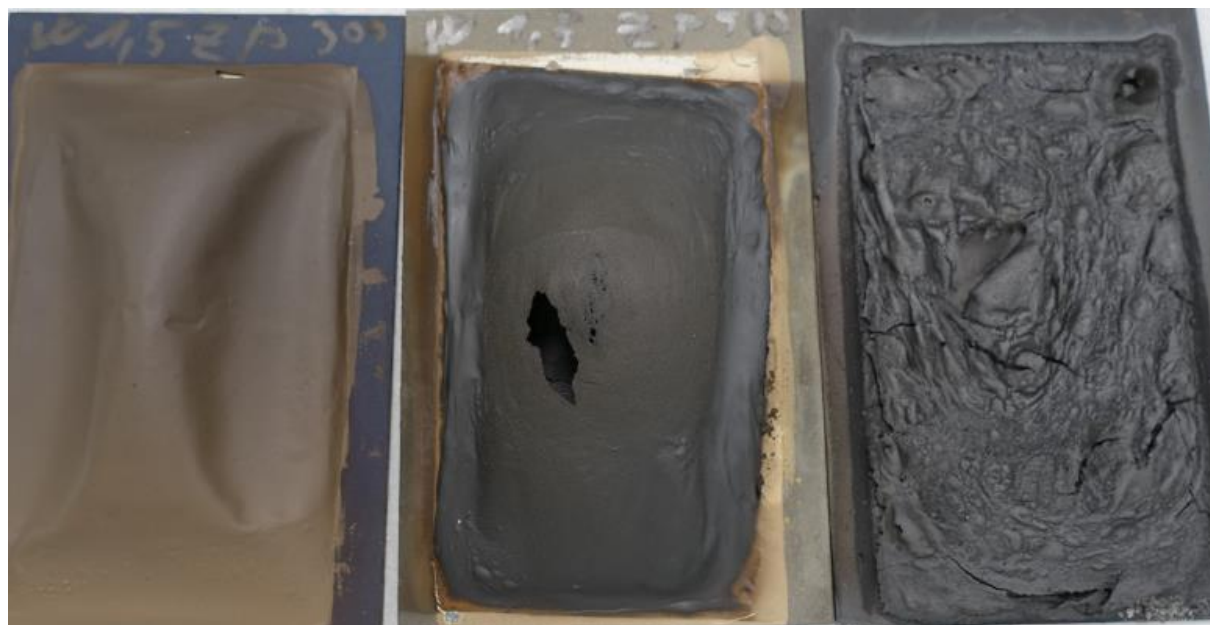


EST/1,5:1ZP

300 °C

500 °C

700 °C



EST/3:1

300 °C

500 °C

700 °C



EST/3:1ZP

300 °C

500 °C

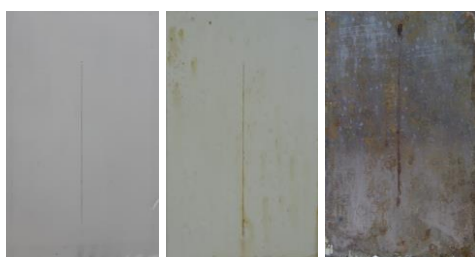
700 °C



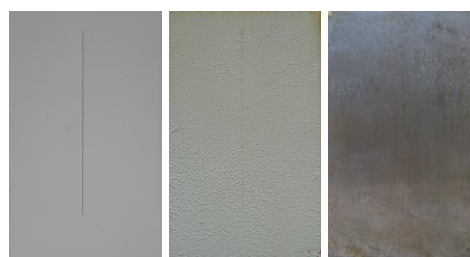
9.2 Vzorky nátěrových filmů před expozicí, po expozici v komoře se solnou mlhou s dobou expozice 168 hodin

Na následujících fotografiích jsou zobrazeny organické povlaky po 168hodinové expozici v atmosféře s 5 % NaCl. Jednotlivé organické povlaky jsou srovnány v pořadí před expozicí, po expozici a po stažení nátěrového filmu.

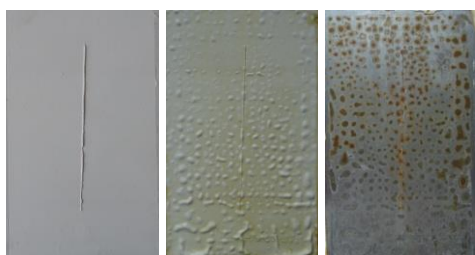
AKR/1,5:1



AKR/1,5:1 ZP



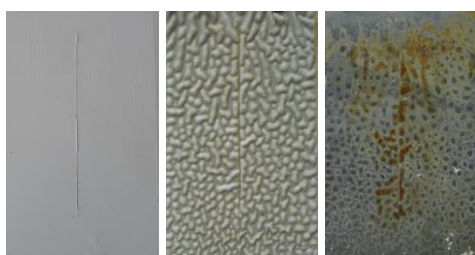
AKR/3:1



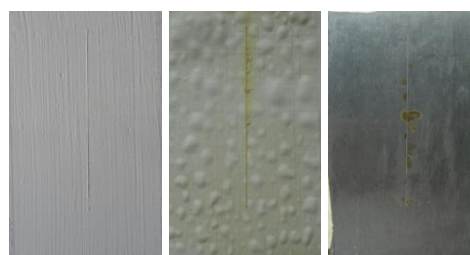
AKR/3:1 ZP



EPOX/1,5:1



EPOX/1,5:1 ZP



EPOX/3:1



EPOX/3:1 ZP



Obrázková příloha

ALK/1,5:1



ALK/1,5:1 ZP



ALK/3:1



ALK/3:1 ZP



EST/1,5:1



EST/1,5:1ZP



EST/3:1

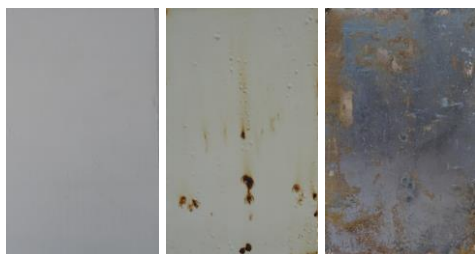


EST/3:1ZP



9.3 Vzorky nátěrových filmů před expozicí, po expozici a po stažení nátěrů v komoře s povšechnou kondenzací s dobou expozice 168 hodin

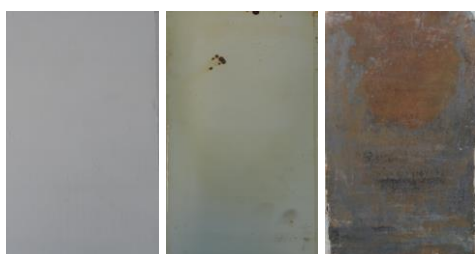
AKR/1,5:1



AKR/1,5:1 ZP



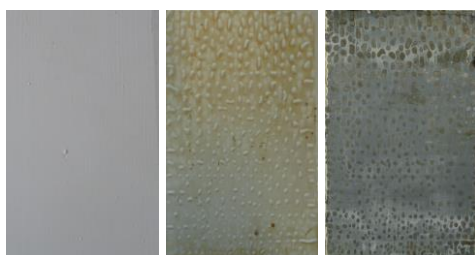
AKR/3:1



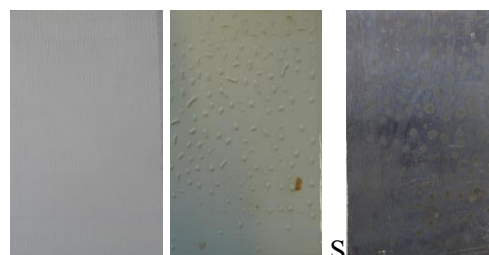
AKR/3:1 ZP



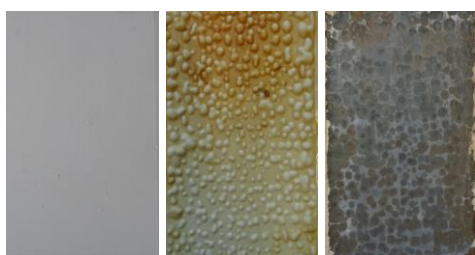
EPOX/1,5:1



EPOX/1,5:1/ZP



EPOX/3:1



EPOX/3:1 ZP



Obrázková příloha

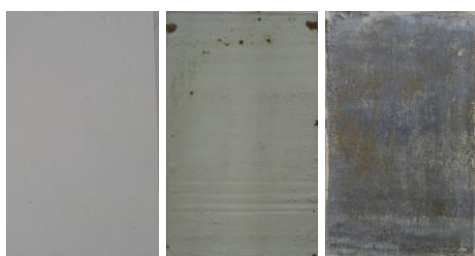
ALK/1,5:1



ALK/1,5:1 ZP



ALK/3:1



ALK/3:1 ZP



EST/1,5:1



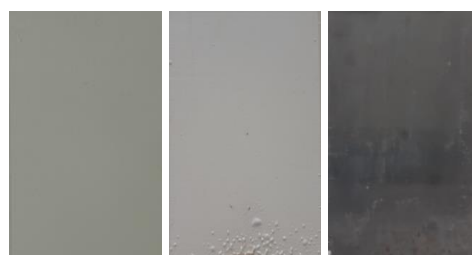
EST/1,5:1ZP



EST/3:1



EST/3:1ZP



Údaje pro knihovnickou databázi

Název práce	Intumescentní povlaky pro protipožární ochranu ocelových konstrukcí
Autor práce	Bc. Adam Plachý
Obor	Organické povlaky a nátěrové hmoty
Rok obhajoby	2024
Vedoucí práce	prof. Ing. Andréa Kalendová, Dr.
Anotace	Tato práce se zabývá přípravou a testováním protipožárních zpěňovacích povlaků na ocelové konstrukce. Organické intumescentní nátěry jsou tenkovrstvé zpěňovatelné nátěry, které jsou založeny na kyselém katalyzátoru (např. polyfosforečnan amonný), organických látkách s vysokým obsahem uhlíku (např. pentaerytritol) a nadouvadle (např. melamin) a to jak ve vodou ředitelných, tak i rozpouštědlových pojivech. V práci byl zkoumán poměr třech základních složek zpěňovatelných nátěrů (donor uhlíku, kyselý katalyzátor a nadouvadlo) v různém typu pojiva, kterými byla vodou ředitelná epoxidová disperze, vodou ředitelná alkydové disperze a rozpouštědlová epoxyesterová pryskyřice. Byl zjišťován vliv přídavku fosforečnanu zinečnatého na kvalitu ochranné vrstvy a na ochranné působení povlaku během jeho životnosti. U protipožárních zpěňovatelných hmot byly testovány fyzikálně mechanické vlastnosti (ohyb, úder, hloubení, přilnavost, tvrdost) a antikoroziní vlastnosti v solné a kondenzační komoře. Navíc byly provedeny testy ohnivzdornosti, byla hodnocena kvalita a síla zpěněné vrstvy. Pro analýzu připravených nátěrových hmot a vzniklých uhlíkatých vrstev byla použita infračervená spektroskopie a také byly použity metody termické analýzy TG a DSC.
Klíčová slova	Zpěňovatelné nátěrové hmoty, požární ochrana, organický povlak, antikoroziní účinnost organických povlaků