

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2016

OLDŘICH ČERNÝ



Antikorozní ochrana svarů u konstrukčních materiálů
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Jiří Votava Ph.D.

Vypracoval:
Bc. Oldřich Černý



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Bc. Oldřich Černý
Studijní program: Zemědělská specializace
Obor: Automobilová doprava

Vedoucí práce: Ing. Jiří Votava, Ph.D.

Název práce: **Antikorozní ochrana svarů u konstrukčních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Popište současné technologie svařování konstrukčních materiálů.
2. Zaměřte se na druhy korozní degradace konstrukčních materiálů.
3. Popište současné trendy v antikorozní ochraně konstrukčních materiálů.
4. Stanovte návrh antikorozních systémů svařovaných konstrukcí.
5. Dle daných parametrů zhotovte vzorky svařenců pro aplikaci antikorozní ochrany.
6. Podrobně vzorky s antikorozní vrstvou zrychleným korozním zkouškám.

Rozsah práce: 50-60 stran

Literatura:

1. VOTAVA, J. Protection of Welded Joints against Corrosion Degradation. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013. sv. 61, č. 6, s. 1897--1904. ISSN 1211-8516.
2. ČERNÝ, M. -- FILÍPEK, J. Synergie korozního působení a defektů ve svarech. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2004. sv. LII, č. 2, s. 105--114. ISSN 1211-8516.
3. DOUBRAVSKÝ, M. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Brno: VUT Brno, 1985. 246 s.
4. KOVAŘÍK, R. *Technologie svařování*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
5. AMBROŽ, O. *Technologie svařování*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2005. 393 s. ISBN 80-85771-81-0.
6. DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa Sobotáles, 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
7. HLUCHÝ, M. -- KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1 : Nauka o materiálu - 1.díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, 1999. 216 s. ISBN 80-7183-150-6.

Datum zadání: říjen 2014

Datum odevzdání: duben 2016

Bc. Oldřich Černý
Autor práce

Ing. Jiří Votava, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Ing. Jiří Čupera, Ph.D.
Vedoucí ústavu

doc. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.
Děkan AF MENDELU

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Antikorozní ochrana svarů u konstrukčních materiálů vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád vyjádřil své díky firmám: BEXIM PALETTEN s.r.o., GALVA s.r.o., K-K METAL a.s., LASKI s.r.o. a SIGNUM spol. s r.o. za poskytnutí jejich technologií, materiálů a informací, bez kterých by nebylo možné tuto práci vytvořit. Vyzdvihl bych zde i obrovskou ochotu a profesionální jednání všech zaměstnanců, kteří přímo či nepřímo napomohli k vytvoření této práce nejenom svojí zručností, ale i cennými informacemi, radami a nápady.

Dále bych zde poděkoval panu Ing. Martinu Brabcovi za možnost využití univerzálního zkušebního stroje pro zkoušku tahem a za obětavé vysvětlení jeho obsluhy.

Nespornou zásluhu na vzniku tohoto díla má i pan Ing. Jiří Votava Ph.D., jakožto vedoucí diplomové práce. Rád bych mu poděkoval nejenom za desítky hodin strávených dohledem nad experimentem, ale i za odborné vedení, pomoc při získávání a zpracování výsledků. Dále bych mu chtěl poděkovat za bezpočet cenných rad, nápadů nýbrž i za všechny poskytnuté materiály a informace.

V poslední řadě bych zde rád poděkoval i své rodině za to, že při mně věrně stála nejenom po celou dobu tvorby této práce, ale i během celé doby mého studia.

ABSTRAKT

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí - teoretické a experimentální. První díl teoretické části uvádí metody svařování doplněné problematikou robotizovaného svařování. Druhý díl se zabývá korozi a druhy korozní degradace materiálů. Třetí a zároveň závěrečný díl pojednává o současných trendech v antikorozi ochraně s detailním popisem vybraných metod.

Experimentální část přenáší poznatky z teoretické části do skutečnosti formou experimentu. Zvolené systémy antikorozi ochrany byly aplikovány na zkušební vzorky obsahující svarový spoj. Poté byly tyto vzorky podrobeny zrychleným korozním zkouškám v solné mlze a několika dílčím experimentům. Zkušební vzorky byly následně podrobeny trhací zkoušce, aby mohl být pozorován vliv korozního poškození na pevnost svaru.

Klíčová slova: svařování, koroze, povrchová úprava, solná komora, zkouška tahem

ABSTRACT

This master's thesis is divided into two parts – theoretical and practical. The first section of the theoretical part lists welding techniques and mentions the problematic of robot welding. The second section deals with corrosion and types of corrosion degradation. Third and final section discusses the current trends in anticorrosive protection, with special focus on several of them.

The practical part applies the theory in form of experiment. Selected anticorrosive protection systems were applied to test samples, which contained a weld. The samples were exposed to accelerated corrosion in salt fog and several other experiments. The samples were then subjected to a tensile test so that the effect of corrosion damage to the weld strength could be measured.

Key words: welding, corrosion, surface finishing, salt chamber, tensile test

OBSAH

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | ÚVOD..... | 9 |
| 2 | CÍL PRÁCE..... | 10 |
| 3 | SOUČASNÉ TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ | 11 |
| 3.1 | Přehled metod svařování | 11 |
| 3.2 | Technologie svařování na průmyslových robotech..... | 13 |
| 3.2.1 | Průmyslové roboty a manipulátory..... | 13 |
| 3.2.1.1 | Historie | 13 |
| 3.2.2 | Technologie robotického svařování..... | 14 |
| 4 | KOROZE A DRUHY KOROZNÍ DEGRADACE | 16 |
| 4.1 | Koroze dle mechanismu korozních dějů | 16 |
| 4.2 | Koroze dle prostředí..... | 18 |
| 4.3 | Druhy korozní degradace | 19 |
| 4.3.1 | Rovnoměrná koroze | 19 |
| 4.3.2 | Nerovnoměrná koroze..... | 19 |
| 5 | SOUČASNÉ TRENDY V ANTIKOROZNÍ OCHRANĚ | 21 |
| 5.1 | Způsoby ochrany povrchů..... | 21 |
| 5.2 | Vybrané antikorozní ochrany..... | 23 |
| 5.2.1 | Elektrochemické pokovování zinkem..... | 23 |
| 5.2.1.1 | Princip galvanického zinkování | 23 |
| 5.2.2 | Žárové pokovování v lázni roztaveného zinku..... | 24 |
| 5.2.2.1 | Způsoby zinkování | 24 |
| 5.2.2.2 | Reakce mezi železem a zinkem..... | 25 |
| 5.2.3 | Elektrostatické práškové lakování | 26 |
| 5.2.3.1 | Rozdělení práškových barev..... | 27 |
| 5.2.3.2 | Postup elektrostatického lakování | 28 |
| 6 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 30 |
| 6.1 | Zhotovení vzorků | 31 |
| 6.1.1 | Výběr materiálu a jeho příprava pro svařování | 31 |
| 6.1.2 | Svařování | 31 |
| 6.1.2.1 | Ruční svařování | 31 |
| 6.1.2.2 | Robotické svařování | 31 |
| 6.1.3 | Příprava vzorků před povrchovými úpravami | 32 |

| | | |
|---------|---|----|
| 6.1.4 | Povrchová úprava | 33 |
| 6.1.4.1 | Povrchová úprava pokovováním | 34 |
| 6.1.4.2 | Termosetické práškové lakování | 35 |
| 6.2 | Vybrané nedestruktivní zkoušky svarů | 37 |
| 6.2.1 | Kapilární zkouška | 37 |
| 6.2.1.1 | Dílčí závěr | 37 |
| 6.2.2 | Zkouška fluorescenční | 38 |
| 6.2.2.1 | Dílčí závěr | 38 |
| 6.3 | Čistota povrchu a stanovení drsnosti povrchu | 39 |
| 6.3.1 | Stanovení drsnosti pomocí vzorkovnic drsnosti | 39 |
| 6.3.2 | Stanovení drsnosti pomocí drsnoměru | 40 |
| 6.3.3 | Dílčí závěr | 41 |
| 6.4 | Mřížková zkouška | 42 |
| 6.4.1 | Dílčí závěr | 43 |
| 6.5 | Odrhová zkouška přilnavosti | 44 |
| 6.5.1 | Provedení zkoušky a stanovení výsledků | 44 |
| 6.5.2 | Metalografické řezy strukturou ochranného povlaku | 47 |
| 6.5.3 | Dílčí závěr | 49 |
| 6.6 | Zrychlené korozní zkoušky v solné mlze | 50 |
| 6.6.1 | Výsledky zkoušky | 50 |
| 6.6.2 | Dílčí závěr | 53 |
| 6.7 | Zkouška tahem | 54 |
| 6.7.1 | Dílčí závěr | 54 |
| 6.8 | Zhodnocení výsledků | 56 |
| 7 | ZÁVĚR | 58 |
| 8 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 59 |
| 9 | SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ | 62 |
| 10 | TABULKA POUŽITÝCH OZNAČENÍ | 63 |
| 11 | SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK | 63 |

1 ÚVOD

S určitou formou korozní degradace se denně setkává každý z nás. Koroze je tedy považována jako problém celosvětového významu, vede k ztrátám funkčnosti zařízení, snižuje jejich účinnost a zvyšuje i náklady na údržbu, které narůstají s dobou odstávky. V neposlední řadě koroze ohrožuje bezpečnost a inhibuje technologický pokrok. Přestože odhadované finanční náklady připisované jen korozi tvoří 3 až 5 % hrubého společenského produktu všech průmyslově vyspělých zemí, náklady spojené s problémy vzniklými díky korozi dosahují mnohonásobně vyšších hodnot. K tomu se přidává stále se snižující zásoby surovin spolu se zvětšujícím se ekologickým myšlením. [11, 24]

Obor povrchových úprav patří z pohledu ekologického k velmi zásadnímu odvětví. Brzdí a omezuje korozní děje, čímž vede k úsporám materiálů a surovin, což směřuje k jejich dokonalejšímu využívání a v konečném důsledku i finanční úspoře. Moderní trendy z tohoto oboru spočívají v bezodpadových automatizovaných nebo robotizovaných technologiích, recyklaci a bezpečných způsobech likvidace nerecyklovatelných materiálů. [24]

Z korozního hlediska patří svarové spoje k velmi problematickým prvkům, protože bývají náchylnější k různým druhům korozního napadení díky změnám struktury základního materiálu. Tyto změny vznikají při samotném svařování, a proto se jim nedá stoprocentně předejít. Abychom co nejvíce oddálili vznik koroze na svarovém spoji, používáme přídatný materiál co nejvíce podobný základnímu. Další možností je, že se snažíme konstrukčními úpravami docílit toho, aby se u svaru nezdržovaly korozně podpůrné látky, jako tomu například bývá ve štěrbině přeplátovaných svarových spojů. Dalším velmi rozšířeným způsobem je použití povrchových ochranných úprav. Tyto úpravy se snaží chránit svarový spoj co nejdéle před působením vnějších vlivů způsobujících vznik a rozvoj koroze, proto se tyto úpravy významně podílí na životnosti svarového spoje. Nevyhovující povrchová úprava může vést k degradaci svarového spoje, což může směřovat až k destrukci celého zařízení nebo konstrukce. Proto je velmi důležité už při návrhu svarového spoje znát povahu prostředí, ve kterém se bude vyskytovat spolu s plánovanou dobou jeho životnosti.

2 CÍL PRÁCE

Hlavní smysl této diplomové práce spočívá ve vytvoření svarových spojů pomocí metody svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu manuálním i robotickým způsobem. Opatření těchto svarů anorganickou kovovou antikorozi ochranou a organickou práškovou antikorozi ochranou s různými druhy povrchové předúpravy. Vystavení těchto vzorků zrychlením korozním zkouškám v prostředí solné mlhy a podrobení zkoušce tahem, aby mohl být porovnán vliv povrchové úpravy na pevnost svarového spoje vystaveného korozní degradaci.

Vedlejšími cíli v teoretické části je charakterizovat současné technologie svařování, zaměřit se na korozi a druhy korozní degradace a popsat současné trendy v antikorozi ochraně.

Vedlejší cíle praktické části spočívají v podrobení svarových spojů kapilárním zkouškám, stanovení drsnosti povrchu materiálu a testování vlastností práškových povlaků pomocí mřížkové a odtrhové zkoušky přilnavosti.

3 SOUČASNÉ TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Svařování, jehož historie sahá celá staletí zpět, je postup spojování materiálů za působení tepla, tlaku nebo obou a to tak, že zůstává zachována podstata spojovaných materiálů. K svařování se může, ale nemusí používat přídavný materiál, jehož teplota tání je blízká teplotě tání základního materiálu. [6]

V současnosti je kladen důraz na zvyšování produkce svařování a její kvality. Kromě toho vzrůstají nároky na snižování odpadů neboli na ekologičnost výroby. Aby firmy splnily tyto požadavky a udrželi si určitou konkurenční schopnost, stále více do výroby zavádějí průmyslové svařovací roboty. Přestože je jejich počet už závratný, nadále se do budoucna očekává jejich nárůst a expanze do menších firem. Napomáhá tomu stále se zvyšující vybavenost robotických systémů, nové možnosti jejich využití i pro specifitější úlohy a stále vyšší cenová dostupnost robotických svařovacích buněk. [4]

3.1 Přehled metod svařování

Obloukové svařování je metoda, u níž je zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Obloukem natavený elektrodový kov přechází sloupcem oblouku do tavné lázně, kde se slévá s nataveným základním materiálem a tím vzniká svar. [6]

Odporové svařování využívá k spojování kovů odporové neboli Jouleovo teplo. Spojovanými materiály prochází svařovací proud, který je součástí svařovacího okruhu. Po dosažení požadované teploty stlačí a tím dojde k jejich svaření. [6]

Plamenové svařování je druh tavného svařování, jenž získává svařovací teplo spalováním hořlavého plynu s kyslíkem ve zvláštním hořáku. [6]

Ultrazvukové svařování je technologický postup, u kterého je svar vytvořen pomocí mechanického kmitání o nízké amplitudě s kmitočty nad hranicí slyšitelnosti. Zmíněné kmitání je převedené na statickou sílu. Svařovací teplota je podstatně nižší, než je teplota, při které se základní materiál taví. [6]

Třecí svařování je technika, u níž se jeden nebo oba svařované kusy vzájemně dotýkají a zároveň se vzájemně pohybují. Třením vzniká teplo ve stykové ploše. Pěchovacím stlačením obou ploch při soudobém zastavení pohybu svařovaných kusů vzniká svar. [6]

Tlakové svařování s plamenovým ohřevem je stará svařovací metoda, která využívá k vytvoření svaru plastickou deformaci stykových ploch svařovaných kusů vytvořenou

pomocí kladiva nebo jinou rázovou silou. Kusy jsou před samotnou deformací ohřívány v kovářské výhni. [6]

Svařování výbuchem slouží k vytvoření přeplátovaných spojů. Svar vzniká stlačením, které je způsobeno výbuchem výbušniny přesně určené k tomuto svařování. [6]

Difuzní svařování je metoda, u níž jsou svařované plochy ohřívány a současně stlačovány stálým tlakem po specifickou dobu. Dojde k vytvoření místní plastické deformace, při které dochází k difuzi atomů kovů a tím se dosahuje spojení materiálů. [6]

Tlakové svařování za studena je principem stejné jako difuzní svařování, akorát nedochází k ohřevu svařovaných ploch. [6]

Aluminotermické svařování začíná zapálením kovových oxidů s jemně mletým hliníkovým práškem. Probíhá chemická reakce, při které vzniká roztavený kov, což je přídavný materiál. [6]

Elektrostruskové svařování je technika, u níž mezi čelními svarovými plochami a vodou chlazenými příložkami postupuje směrem zdola nahoru lázeň roztavené strusky. Energie nutná k svařování se získává z elektrod, také se získává i jako odporové teplo průchodem svařovacího proudu roztavenou stoupající struskou. [6]

Indukční svařování slouží k vytvoření svarového spoje, který vzniká stlačením indukčně ohřátých svarových ploch. [6]

Svařování světelným zařízením je způsob spojování kovů využívající teplo nutné k tavení materiálu. Teplo je tvořeno dopadem svazku světelných paprsků infračerveného záření směřujících na místo svaru. Metoda obvykle nevyužívá přídavný materiál. [6]

Elektronové svařování je technologický postup, u něhož potřebné svařovací teplo vzniká dopadem zaostřeného svazku elektronů na svařované plochy, které jsou tímto taveny. [6]

Svařování CMT (Cold metal transfer) je metoda vyvinutá pro spojování dvou různých kovů, hlavně oceli s hliníkem. Je založena na principu obloukového svařování. Hliníkový základní materiál se taví zároveň s přídavnou elektrodou z hliníku, přičemž smáčí ocelový materiál. Svařovací elektroda ve formě drátu se pohybuje v rychlých intervalech proti směru svého posuvu, což vede ke kontrolovanému uvolnění kapky a zabránění rozstříku kovu. [19]

Svařování LaserHybrid je technologie, která slučuje svařování světelným zařízením se svařováním elektrickým obloukem, neboli laserové svařování s metodami MIG a MAG. Používá se pro svary s velkou hloubkou. Nejprve se svarových ploch dotkne laserový paprsek, což zapříčiní velký přísun tepla a vypařování základního materiálu. V tento

moment do procesu vstoupí MIG nebo MAG proces, který odtavující se elektrodou zajistí dobrou přemostitelnost spáry. [20]

Svařování Plasma-MIG patří mezi hybridní technologie výroby svarů. Využíváno je proudu plasmu pro natavení materiálu a obloukového MIG svařování, které dodává přídatný materiál. Mezi specifika této metody patří vysoká účinnost, dobré přemostění spár a nižší svařovací rychlost. [17]

3.2 Technologie svařování na průmyslových robotech

3.2.1 Průmyslové roboty a manipulátory

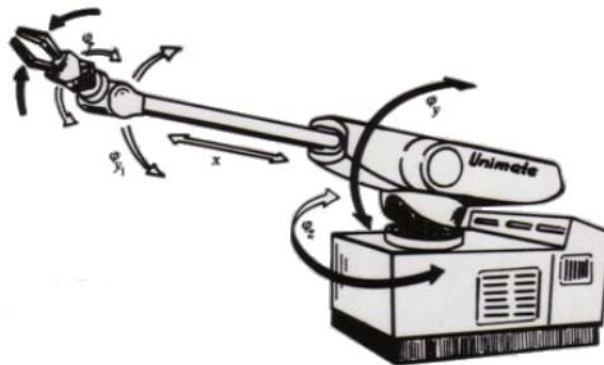
Definice průmyslového robota není jednoznačně celosvětově daná, běžně se používá definice organizace ISO neboli International Organisation for Standardisation. Z této definice vyplývá, že průmyslový robot je automaticky řízený, reprogramovatelný, víceúčelový manipulační stroj umístěný stacionárně nebo na pojezdu, přičemž je primárně určený pro použití v průmyslové automatizaci. Tuto definici splňuje jen zařízení se třemi a více reprogramovatelnými osami. [30]

3.2.1.1 Historie

Robotika patří mezi nejmladší obory. Z kulturního hlediska začíná historie ve 20. a 30. letech 20. století. Tehdy se začali objevovat první stroje s humanoidními rysy. Tito roboti díky technice té doby nebyli programovatelní, a proto sloužili převážně jako atrakce technicky zaměřených výstav. V této době se robotika dostala do povědomí široké veřejnosti díky literárním a filmovým dílům. V tomto povědomí zůstala dodnes. [29]

Z technického hlediska se za zakladatele automatizace považuje F. W. Taylor, který se zabýval normováním práce a racionalizací výroby a H. Ford, který zavedl jako první pásovou výrobu automobilů na světě. K automatizaci zásadně napomohl vynález počítače v roce 1945. Po druhé světové válce došlo k rozvoji výrobních linek, založených na teorii automatického řízení. Roku 1956 G. Devol a J. Engelberger začínají vyvíjet prvního průmyslového robota. Jím sestrojený robot Unimate 1000 je roku 1961 nasazen do společnosti General Motors místo lidské obsluhy slévárenských strojů. Roboti se rychle uchytili, a proto došlo k jejich rozšíření do vyspělých zemí. V 70. letech se začali představovat první variabilní roboti, kteří po mírných úpravách dokázali zpracovávat velké množství variabilních úkonů. S těmito roboty se postupně přešlo k pružné automatizaci, která pomohla ke vzniku lehce přestavitelných linek. 80. léta znamenala pro roboty období

rozmachu obzvláště v automobilovém průmyslu a to u aplikací bodového a obloukového svařování. Od 90. let dochází ke stále masovějšímu nasazování robotů do různých výrobních odvětví. Nejvíce se na tom podílí rozvoj výpočetní techniky, nové aplikace využití průmyslových robotů a především sériová výroba samotných robotů. V současnosti se s roboty počítá už při návrzích samotných výrobků, proto aby bylo od začátku výroby dosaženo co největší produktivity, při stále se zvyšující kvalitě uživatelského prostředí. [14, 30]



Obr. 1 Robot Unimate 1900 [30]

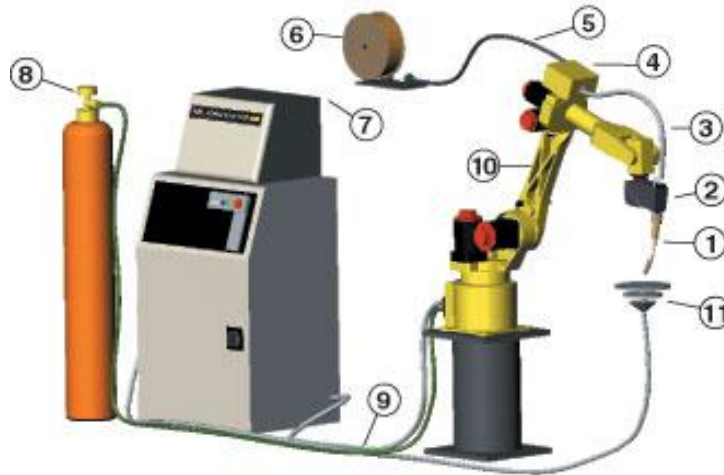
3.2.2 Technologie robotického svařování

Průmysloví svařovací roboti obloukového a bodového svařování patří k nejstarším robotům vůbec. Postupným vývojem dále došlo k robotizaci principů laserového, plazmového, odporového a TIG svařování. Dnešní roboti se vyznačují snadnou i rychlou výměnou upínacích přípravků a nenáročností jejich reprogramování, což umožňuje svařovat malé série i v jednotkách kusů. [15]

Rozdělení svařovacích robotů existuje mnoho. Například Everhart roboty člení dle jejich zřízení na tři základní typy:

- Jednoduché svařovací roboty s více pracovními stoly
- Mnohorobotické svařovací buňky, kde robot pracuje mezi dvěma či více svařovacími místy
- Na portálové robotické tratě, kde se robot pohybuje mezi svařovacími místy nebo po obvodu jednoho svařovacího místa [4]

Výrobou svařovacích robotů a buněk se zabývá jen několik výrobců, jedná se o OTC Daihen, Fanuc, Kuka, Motoman, ABB, Qirox, Kawasaki a Qing Dao Metech. Největší rozdíly mezi produkty těchto společností se objevují v programování a ovládání robotů, protože každý výrobce používá programovací software přímo určený pro své výrobky. Konstrukce robotů jsou principiálně velmi podobné. Obr. 2 zobrazuje základní komponenty, ze kterých je sestaven běžný svařovací systém. [4]



Obr. 2 Základní uspořádání robotického svařovacího GMAW systému [18]

1- rychle vyměnitelný hořák; 2- servopohon hořáku; 3- čtyřkladkový podávací systém; 4- propojovací krabice; 5- izolované vedení svařovacího drátu; 6- cívka svařovacího drátu; 7- digitální svařovací zdroj; 8- zásobník plynu; 9- propojovací kabely; 10- robotické rameno; 11- uzemnění

4 KOROZE A DRUHY KOROZNÍ DEGRADACE

Korozi rozumíme nežádoucí, samovolný a nevratný proces rozrušování tuhých látek pomocí chemických, elektrochemických či biologických vlivů okolního prostředí. Samovolný průběh je způsoben tím, že korozní systém materiál-prostředí pomocí reakcí směřuje do pravděpodobnějšího stavu s menší volnou entalpií. Tyto reakce odlišují korozi od jiných žádoucích reakcí, které jsou záměrně využívány třeba k leptání či rozpouštění kovů. Korozi podléhají kromě kovů i nekovové materiály, jako například sklo, beton, gumy, plasty atd. Poškození materiálu korozi se může projevit změnami vzhledu či porušením celistvosti v celém průřezu, což vede k změnám vlastností napadeného materiálu. Tyto změny jsou zpravidla nežádoucí. [12, 24]

4.1 Koroze dle mechanismu korozních dějů

Chemická koroze se objevuje v plynných prostředích za vyšších teplot a v elektricky nevodivých bezvodých organických kapalinách, jako jsou kapalná paliva, oleje apod. Vyznačuje se vrstvami korozních produktů na povrchu materiálu. Na kvalitě vrstvy korozních produktů a schopnosti proniknutí korozního prostředí touto vrstvou závisí další růst koroze a tím i její rychlost. [12, 24]

Korozi probíhající při styku kovu s plynným prostředím členíme podle povahy plynného prostředí na:

- ***Korozi v oxidačně působících plynech*** – Nejznámějšími zástupci oxidačních plynů jsou kyslík, oxid uhličitý a oxid siřičitý. V těchto prostředích se na povrchu kovů a slitin chemickou reakcí, při které kov nebo slitina ztrácí své valenční elektrony, tvoří korozní vrstvy. Nejběžnější jsou to oxidické vrstvy nebo jiné sloučeniny, například uhličitany, sírany či chloridy. [12, 24]
- ***Korozi v redukčně působících plynech*** – Tyto plyny nejčastěji reprezentují vodík, metan a amoniak. Koroze se vyznačuje proniknutím plynu do kovu s následnými reakcemi. Na povrchu nevznikají žádné korozní zplodiny. Nejběžnějším případem je tzv. vodíková koroze, což je reakce rozpuštěného vodíku s uhlíkem obsaženým v oceli, které způsobuje oduhlíčení oceli. Dalším velmi častým případem je vodíková křehkost. Vodík transkrystalicky difunduje do mřížky materiálu se snahou vytvořit molekulární vodík, jehož hromadění způsobuje křehnutí až praskání kovu. [12, 24]

Elektrochemická koroze vzniká při styku kovů s elektrolytem neboli vodivým roztokem kyselin, zásad a solí. Koroze je dovolena disociací korozního prostředí, při kterém vzniknou ionty. Elektrochemickou korozní reakci známou též jako oxidačně redukční reakci můžeme rozdělit na dvě dílčí reakce – anodickou a katodickou. Anodická reakce způsobuje korozi neboli oxidaci kovu. Katodická reakce redukuje v roztoku některé složky korozního prostředí, tím že spotřebovává elektrony. Obě reakce probíhají souběžně a jsou na sebe přímo vázány díky faktu, že při anodické reakci dojde k uvolnění elektronů, které jsou katodickou reakcí spotřebovány. Platí zde zásada zachování elektroneutality, to znamená, že všechny elektrony získané z anodické reakce musí být katodickou reakcí spotřebovány a tudíž nemohou žádné zůstat nespotebované. [12, 24]

Průběh elektrochemické reakce bývá zásadně ovlivněn:

- **Elektroodovým potenciálem**, což je rozpouštěcí napětí vzniklé mezi kovem a elektrolytem. Ponořením kovu do elektrolytu, dojde k ionizaci kovu a uvolněné atomy povrchu kovu přecházejí do elektrolytu. V něm převládají kladné ionty, povrch kovu je nabit záporně, proto na rozhraní kovu a elektrolytu vzniká určitý potenciální rozdíl. [12, 24]
- **Polarizací a depolarizací**. Polarizace je děj, při kterém dochází k zmenšování potenciálního rozdílu mezi anodou a katodou. Potenciály elektrod se k sobě přibližují a tím dochází ke zpomalení koroze. Depolarizace je opakem polarizace, umožňuje tedy pokračování korozního děje. Běžně bývá způsobena pohybem elektrolytu, přítomností kyslíku nebo vodíkových iontů. [12, 24]
- **Pasivitou**, protože pasivace je děj, při němž dochází k zvýšení korozní odolnosti neušlechtilého kovu pomocí oxidické vrstvy s vyšším elektroodovým potenciálem. [12]
- **Vnitřními faktory souvisejícími s korodovaným kovem**, jako jsou především charakter, chemické složení a struktura napadeného kovu, dále stav povrchu a napětí. [12]
- **Vnějšími faktory souvisejícími s korozním prostředím**, jenž jsou reprezentovány koncentracemi solí v elektrolytu, jeho teplotě a obsahu inhibitorů koroze. [12]

Biologická koroze je poškození kovů způsobené nebo ovlivněné mikrobiologickou činností. Může se jednat o přímý či vedlejší důsledek metabolické činnosti

mikroorganismů, jako jsou bakterie, houby, řasy či další organismy vytvářející na povrchu kovů celé vrstvy. Pod těmito vrstvami klesá koncentrace kyslíku, což dovoluje rozvoj anaerobních bakterií, které redukují sírany a tím urychlují korozi. Mezi nejčastější biologické činitele patří tedy bakterie a houby. Pro bakterie jsou uhlíkové molekuly důležitou živinou, a proto častěji napadají materiály s vyšším obsahem uhlíku. Houby reprezentují kvasinky a plísně. Houby napadají materiály nepřímo, protože se neživí kovovým materiálem, ale vlivem jejich metabolismu dochází k vytváření korozních produktů, které vedou ke korozi nebo k urychlení korozního děje. [11, 12]

4.2 Koroze dle prostředí

Atmosférická koroze je nejběžnější formou koroze, způsobuje až 60 % všech ztrát. Vzhledem k prostředí se jedná o elektrochemickou korozi s kyslíkovou depolarizací. Nejsledovanějším činitelem je stupeň ovlhčení kovového povrchu, který je udáván tloušťkou kondenzované vlhkosti a periodičností dosažení rosného bodu v atmosférických podmínkách. Rychlost tohoto atmosférického korozního děje je závislá na přítomnosti plyných nebo rozpustných tuhých nečistot, jako například jsou oxid siřičitý, chlorid sodný, sulfan, chlór, prach, popílek apod. Na korozi se i velkou měrou podílí kyslík, protože tenké vrstvy vlhkosti kladou minimální překážky pro jeho proniknutí do z kondenzované vlhkosti. Jedinečným faktorem atmosférické koroze je vliv biologických činitelů, kteří zapříčiňují vznik biologické koroze. Biologickými činiteli jsou napadány převážně organické materiály obzvláště pak plastické hmoty. [12, 24]

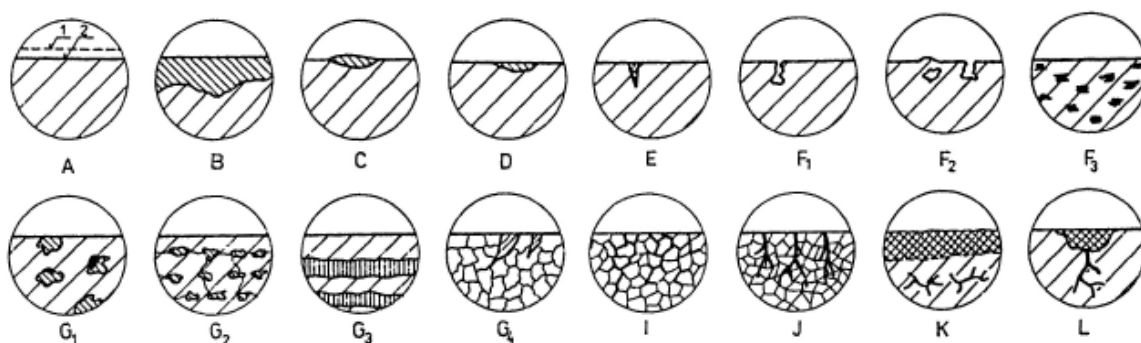
Koroze v kapalinách je další velmi častý případ korozního prostředí. Nejčastěji se setkáváme s korozi ve vodách, v nichž jsou obsaženy různé kyselé i zásadité látky, které bezprostředně ovlivňují rychlost koroze. Voda vede elektrický proud, proto se jedná o korozi elektrochemickou, která ale bývá ovlivněna celou řadou neelektrochemických činitelů. Tyto činitele jsou například chemické děje v roztoku, vliv mechanických nečistot, kavitace či účinek mikroorganismů. Nejvíce vyskytovaným druhem korozní degradace ve vodách je důlkové a rovnoměrné napadení. [12, 24]

Koroze v plynech vzniká působením plyného prostředí na kovový materiál při vzniku kovových sloučenin. Plyné prostředí bývá převážně nevodivé, proto se jedná o korozi chemickou. Nejčastěji se řeší problematika koroze v plynech za vysokých teplot, kde se řeší chemické složení plynu, teplota a hodnota tlaku plynu. [24]

Půdní koroze je velmi specifický druh, protože půda je tvořena třemi fázemi: tuhou, kapalnou a plynnou. Z pohledu koroze se nejvíce zabývá kapalnou fází, protože je složená vodnými roztoky elektrolytů s různými množstvími rozpuštěných plynů. [24]

4.3 Druhy korozní degradace

Jsou závislé na materiálu, obzvláště na jeho druhu, struktuře, vlastnostech a čistotě. Degradace dále závisí na korozním prostředí a podmínkách, kterým je materiál v tomto prostředí vystaven. Nejběžnější typy korozní degradace zobrazuje obr. 3. [24]



Obr. 3 Některé druhy korozní degradace [24]

A- rovnoměrná koroze (1- původní povrch, 2- povrch po napadení); B- nerovnoměrná koroze; C- skvrnitá koroze; D- důlková koroze; E- bodová koroze; F- podpovrchová koroze; G- selektivní koroze; I- mezikrystalová koroze; J- transkrystalová koroze; K- extrakční korozní napadení; L- korozní trhliny

4.3.1 Rovnoměrná koroze

Jak už napovídá název, tento druh napadení způsobuje rovnoměrné úbytky materiálu z celé plochy, která je vystavena korozním vlivům. Pro spolehlivost zařízení je tato koroze nejpříznivější z důvodu možnosti experimentálního stanovení rychlosti úbytku. Díky této eventualitě se s ohledem na rychlost koroze dají zařízení dimenzovat už při návrhu konstrukce. Tato rychlost se zpravidla mění s časem, to znamená, že na počátku je vyšší, než na konci. [24]

4.3.2 Nerovnoměrná koroze

Skvrnitá koroze je nerovnoměrné plošné napadení povrchu. Způsobena je různou aktivitou v soustavě, kde se střetávají vlastnosti kovů a elektrolytu s vlivy prostředí. Známým příkladem tohoto druhu degradace je korozní článek. [12]

Důlková a bodová koroze jsou hloubková napadení způsobená místním zvýšením aktivity kovového povrchu nebo korozních zplodin, což mohou být strukturní nestejnorodosti povrchu nebo poškození pasivních vrstev. Důlková koroze má větší průměr důlku než jeho hloubka, bodová to má přesně naopak, tedy má větší hloubku než je průměr důlku. Tyto druhy koroze jsou obzvláště nebezpečné, protože mohou vést k proděravění tlustých stěn materiálu, což může vést až k odstavení celého zařízení mimo provoz. [12, 24]

Štěrbínová koroze značnou měrou souvisí s bodovou korozí. Objevuje se v jemných kapilárách nebo v místech se špatným oběhem prostředí. Zde dochází ke vzniku koncentračních článků díky rozdílům v obsahu kyslíku na povrchu kovu. [3, 24]

Nitková koroze je zvláštní druh nerovnoměrného nehloubkového napadení, které se především vyskytuje na oceli pod vrstvami organických povlaků. Tato koroze se rozšiřuje pomocí elektrolytu v mikroskopických kanálcích, které jsou mezi povlakem a povrchem kovu. Tvar těchto kanálků připomíná tenké nitky, které se na povrchu vyznačují charakteristickými kresbami. [3, 12]

Selektivní koroze se vyskytuje u kovů nebo slitin s dvou nebo více fázovými strukturami. Toto poškození napadá jen některou fázi slitiny, která se obvykle liší od nekorodujících fází chemickým složením. U tvářených kovů tato koroze rozrušuje vrstvy s koncentrovaným vnitřním pnutím. Vyskytuje se i u kovů s jednofázovou strukturou a to v místech mechanického porušení. [12, 24]

Mezikrystalová koroze se za jistých podmínek objevuje přednostně mezi krystaly podél jejich rozhraní. Krystaly jsou běžně nazývány jako zrna. Mezikrystalové napadení zasahuje jen libovolná místa v povrchu slitiny a jen ty oblasti, kde vlivem strukturních změn došlo ke snížení odolnosti vůči korozi. Napadení je vždy hloubkové a objevuje se zejména u korozivzdorných ocelí, slitin hliníku, slitin niklu apod. [3]

Transkrystalová koroze se vyznačuje trhlinkami napříč krystaly. Trhlinky vznikají při působení elektrochemických vlivů s mechanickým namáháním nebo vnitřním pnutím. Projevem koroze je změna mechanických vlastností materiálu. Stejně jako mezikrystalová koroze se toto napadení zjišťuje metalograficky. [12]

Extrakční korozní napadení bývá vyvoláno korozí jediné fáze slitiny s vícefázovou strukturou. Toto napadení se vyznačuje změnou strukturní mřížky. Tento druh degradace je velmi zrádný, protože napadení může být rovnoměrné se stejnoměrným pronikáním do hloubky, ale taktéž se může jednat o místní napadení či vytváření důlků. [12, 24]

5 SOUČASNÉ TRENDY V ANTIKOROZNÍ OCHRANĚ

Následky korozních degradací způsobují snížení účinnosti a bezpečnosti součástí, což vede k odstávkám zařízení, nákladným údržbám a opravám. Korozí tedy vede k ekonomickým a ekologickým ztrátám. Abychom, co nejvíce eliminovali tyto následky a prodloužili životnost součástí, používáme proti korozi různé druhy antikorozních opatření. S korozi se počítá už při návrhu součástí a zařízení, bere se v potaz plánovaná životnost součástí, míra nebezpečnosti pro okolí při jejím porušení, ekonomická a ekologická hlediska náročnosti výroby apod. Na základě těchto faktorů se stanoví optimální antikorozní ochrana. [11]

5.1 Způsoby ochrany povrchů

Úprava korozního prostředí spočívá v odstranění nebo omezení vlastností činitelů ovlivňujících vývoj koroze. Nejpoužívanějšími způsoby jsou vysoušení, eliminování korozně agresivní látky a omezení depolarizace. [12, 24]

Volba vhodného konstrukčního materiálu patří do základních druhů ochran. Využívají se korozně odolné materiály s různými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. Volba materiálu se řídí funkčními požadavky v daném prostředí při zvažování všech ekonomických hledisek. [12, 24]

Vhodné konstrukční řešení a optimální technologie výroby se zakládá na odstranění nebo omezení ploch, kde by mohlo docházet k brzkému výskytu koroze. Tento způsob ochrany velmi ovlivňuje konečný tvar součástí. Řídí třemi hlavními zásadami. První zásada je maximálně zkrátit dobu styku povrchu s agresivním prostředím. Druhá je o zrovnornění korozních podmínek a zabránění vzniku markočlánků. Poslední zásada vyplývá z požadavku opatřit součást vhodným ochranným povlakem. Tato zásada řeší konstrukční úpravu součástí tak, aby došlo co k nejkvalitnějšímu nanesení a dlouhé životnosti ochranných vrstev. [12, 24]

Elektrochemická ochrana se řídí zákonitostmi elektrochemické koroze, a proto ji dělíme na anodickou a katodickou. Anodická ochrana se uplatňuje u pasivovatelných materiálů. Polarizací u nich dochází k obnově pasivní vrstvy, která je porušována korozi. Kov můžeme udržovat pomocí vnějšího zdroje napětí jako anodu, tím se kov dostane do pasivního stavu, ve kterém má větší korozní odolnost. Jako katodická ochrana se běžně používá tzv. obětovaná anoda. Ta je s chráněným povrchem vodivě spojena. Svým

rozpouštěním vytváří polarizační proud a napětí, jenž zastaví rozpouštění chráněného kovu. [24]

Ochrana pomocí ochranných povlaků a vrstev zahrnuje:

- **Úpravu povrchu před povrchovou ochranou**, která slouží k odstranění nečistot a zajištění dobré přilnavosti ochranného povlaku. Rozeznáváme mechanické a chemické úpravy. Mechanickými úpravami dáváme povrchu požadovanou jakost i kvalitu. Těmito úpravami se rozumí otryskávání, broušení, leštění, omílání, otloukání a kartáčování. Chemické neboli elektrochemické povrchové úpravy slouží především k odstraňování nečistot z povrchu pomocí odmašťování, moření, odrezování a leštění. [12, 24]
- **Ochranné povlaky dlouhodobého charakteru** fungují pokud možno po celou dobu životnosti součásti. Tyto povlaky mohou změnit chemické i elektrochemické vlastnosti kovu, čímž mohou zvýšit korozní odolnost povrchu, nebo zamezit styku korozního prostředí s kovem.
 - Anorganické nekovové povlaky a vrstvy – Tuto skupinu reprezentují keramické a kovokeramické žárově stříkané povlaky, anorganické nátěry, keramické smalty a konverzní vrstvy, zahrnující oxidace kovů, fosfátování a chromátování.
 - Anorganické kovové povlaky a vrstvy – Pro tvorbu kovových vrstev se využívá technologií žárového pokovování v roztavených kovech, žárového stříkání kovů, tepelného a chemicko-tepelného zpracování a pokovení, chemického pokovování, elektrochemického pokovování, fyzikálně a fyzikálně-chemického povlakování a technologií plátování kovů.
 - Organické povlaky a vrstvy – Zamezují styku kovu s korozním prostředím pomocí organických povlaků a nátěrových hmot nebo povlaků z plastů. [12, 24]
- **Ochranné povlaky dočasné** krátkodobě zajišťují ochranu proti korozi, zpravidla během skladování či přepravy. Tyto povlaky zahrnují čištění povrchu součásti a konzervování pomocí konzervačních hmot na bázi ropy nebo pomocí smývatelných nátěrových hmot. Posledním krokem je zabalení nebo uložení součásti do vhodného obalu nebo obalového systému. [12, 24]

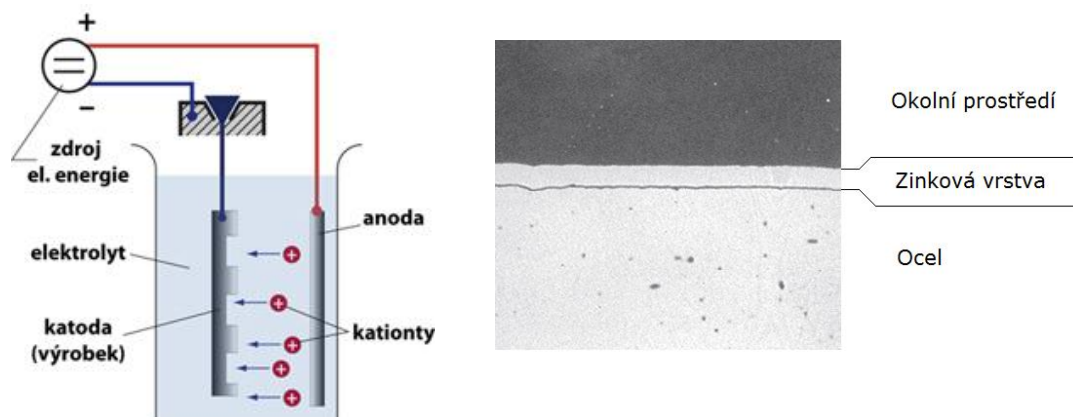
5.2 Vybrané antikorozi ochrany

5.2.1 Elektrochemické pokovování zinkem

Elektrochemické neboli galvanické zinkování je postup, při kterém se povrch součásti za studena opatří ochranným zinkovým povlakem. Zinkový povlak se běžně používá nejen kvůli svým dobrým vlastnostem, ale i pro dostatek zinku. V zemské kůře je to 27. nejběžnější prvek. Zinková ruda se těží převážně v hlubinných dolech, obsahuje 5 až 15 % zinku, proto je nutné ji obohacovat. Ruda se rozdrtí a rozemele, tím se zinek oddělí od ostatních materiálů a dojde ke vzniku zinkového koncentrátu s obsahem 55 % zinku. Ten se praží a spéká, aby vznikl oxid zinečnatý, z nějž se hydrometalurgickým procesem získává kovový zinek. Pro galvanické pokovování se využívá obzvláště vysokojakostní zinek s čistotou 99,99 %. [1]

5.2.1.1 Princip galvanického zinkování

Očištěná, odmaštěná a odmořená ocelová součást se zavěsí do elektrolytu, který tvoří vodný roztok zinečnaté soli. Roztok soli se volí dle použitého elektrolytu, který bývá kyselý, neutrální nebo alkalický. Součást se ke zdroji stejnosměrného proudu zapojí jako katoda. Anodu tvoří desky s obsahem zinku 99,99 %. Zapojením proudu se zinkové desky začnou rozpouštět, vzniklé kationty putují elektrolytem k součásti, kde ulpívají na povrchu. Tento princip je schematicky znázorněn na obr. 4 vlevo. [2]



Obr. 4 Princip galvanického zinkování a řez elektrolytickým povlakem zinku [2, 21]

Jak je vidět na Obr. 4 vpravo vrstva naneseného zinku se vyznačuje velmi jemnozrnnou strukturou. Tato vrstva drží na ocelovém povrchu součásti zcela mechanicky, je hladká a vyznačuje se stříbrným povrchem. Její běžná tloušťka 5 až 8 μm . Tloušťky elektrochemických zinkových povlaků jsou normovány na hodnoty 3, 5, 8, 12 a 20 μm . V některých případech se pozinkované součásti chromátují, aby byly lépe chráněny při

skladování či přepravě. Barvy chromátových vrstev se odvíjí od tloušťky těchto vrstev a složení chromátových lázní, které obsahují trojmocný nebo šestimocný chrom. Zbarvení těchto vrstev dosahuje modré, žluté, zelené barvy, ale mohou být i bezbarvé. [2]

5.2.2 Žárové pokovování v lázni roztaveného zinku

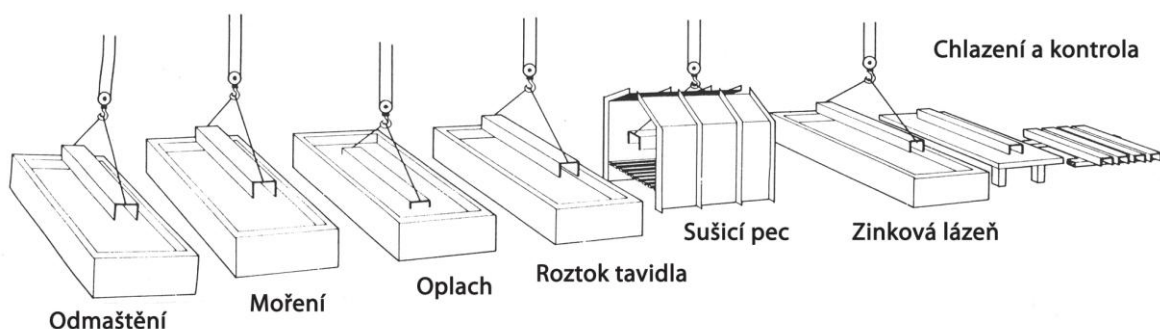
Jinak nazývané též jako žárové zinkování. Je to proces tvorby ochranných povlaků ocelí díky nanášení zinkové vrstvy, která brání korozi ocele. Ocelová součást je při tomto způsobu ponořena do lázni roztaveného zinku na dobu 4 až 5 minut, proto aby mohla proběhnout metalurgická reakce, při které dojde k vzniku zinkového povlaku. [1]

Výhodami žárového zinkového povlaku jsou především dlouhá životnost, rovnoměrný a kvalitní povlak, dobrá odolnost povlaku proti mechanickým vlivům, jednoduchá technologie nanášení a možnost svařování pozinkované ocele. Za nevýhody se považuje nutnost nanášení povlaku pouze v zařízeních tomu určených, omezení rozměrů součástí dané velikostí zinkovacích van, nemožnost výběru barvy zinkové vrstvy a nebezpečí zinkové horečky díky možnosti vdechnutí exhalací při svařování. [2]

5.2.2.1 Způsoby zinkování

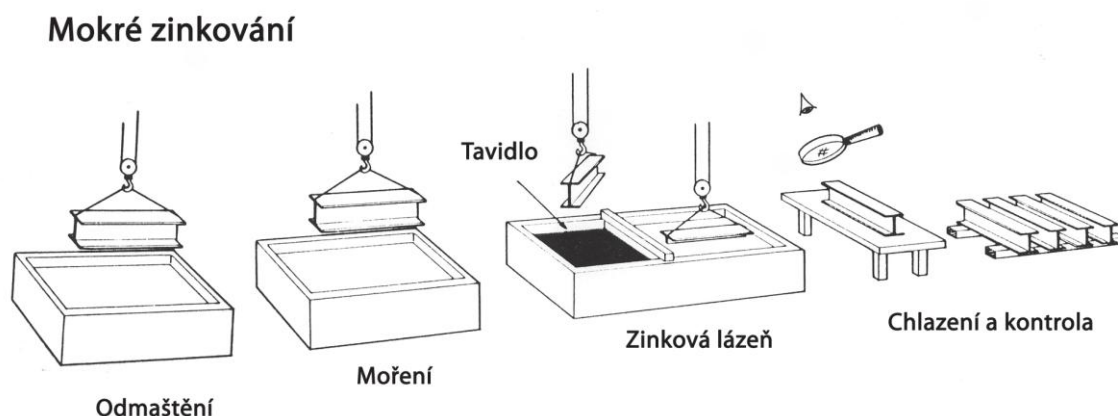
Suchý způsob spočívá v ponoření odmaštěné, odmořené a opláchnuté součásti do tavidlové lázně, která je tvořena roztokem chloridu zinečnatého a chloridu amonného. V lázni dojde na povrchu součásti k vytvoření tenké vrstvy tavidla bránící oxidaci. Tato vrstva tavidla napomáhá i k čištění hladiny roztaveného zinku od oxidů při ponořování součásti do lázně. Součást se po vyjmutí z tavidlové lázně usuší a poté se ponoří do zinkové lázně, která má teplotu v rozmezí od 450 až 460°C. Součást s požadovanou tloušťkou zinkové vrstvy se vyjme z lázně a ochladí se ve vodě nebo se nechá uschnout na vzduchu. Tento způsob je běžnější kvůli možnosti jeho snadné mechanizace. [2]

Suché zinkování



Obr. 5 Technologický postup žárového zinkování suchým způsobem [2]

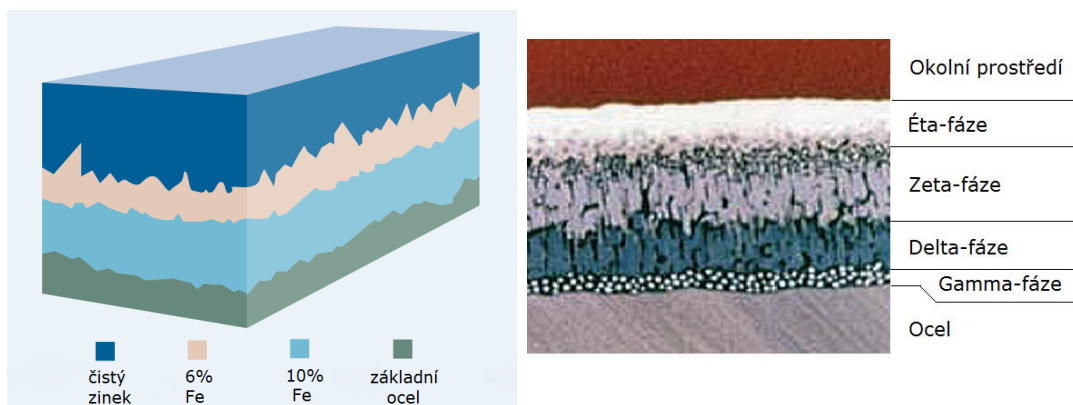
Mokrý způsob využívá zinkovací lázeň, kterou přepážka dělí na dvě části. Hladina první části je tavidlo neboli chlorid amonný, druhou část tvoří zinková lázeň. Očištěná, odmaštěná a odmořená součást se ponoří do části lázně s tavidlem. Odtud plynule přechází do zinkové lázně s teplotou okolo 450°C. Po vytažení z lázně se součást ochladí ve vodě nebo na vzduchu. Tento způsob je z kvalitativního hlediska výsledné zinkové vrstvy rovnocenný jako způsob suchý, ale hůře se mechanizuje, proto nebývá úplně běžný. [2]



Obr. 6 Technologický postup žárového zinkování mokrým způsobem [2]

5.2.2.2 Reakce mezi železem a zinkem

Kontaktem roztaveného zinku s ocelí dojde k reakci, jejímž výsledkem je, že se na povrchu oceli vytvoří slitina železo-zinek. Tato slitina je tvořena z několika železo-zinkových fází, v nichž se s rostoucí vzdáleností od oceli snižuje obsah železa. Nejvzdálenější od oceli je fáze éta s 0,03 % železa. Pod ní se nachází fáze zeta s obsahem 5,8 až 6,7 % železa. Blíže k oceli se nachází fáze delta se 7 až 11 % železa. Mezi touto fází a ocelí se nachází ještě fáze gamma, jenž má nejvíce obsahu železa a to 21 až 28 %. Vlastnosti slitiny jako jsou tloušťka, struktura a vzhled jsou nejenom ovlivněny reakcí ocele se zinkem, ale i rychlostí tuhnutí vnější vrstvy zinku. Průběh reakce je závislý hlavně na tloušťce podkladu, složení a stavu povrchu oceli. Vliv má i chemické složení taveniny, její teplota i celková doba ponoru. Reakce je velmi spletitá a její průběh není dosud zcela objasněný. [2]



Obr. 7 Řezy typického povlaku žárového zinku [1, 2]

5.2.3 Elektrostatické práškové lakování

Je to proces využívající statické elektřiny a stlačeného vzduchu k rovnoměrnému rozložení elektricky nabitého práškového plastu na kovový povrch. Součást s takto naneseným práškem se poté zapéká při specifické teplotě po specifickou dobu. Práškový plast se taví, roztéká se a zároveň se vytvrzuje na tvrdý povlak s výbornou přilnavostí ke kovovému povrchu. [13]

Práškové barvy jsou dodávány ve formě suché směsi s práškovou konzistencí. Tato směs je tvořena z modifikovaných vysokomolekulárních pryskyřic, pigmentů a případně dalších surovin, které barvám dodávají různé vlastnosti, jako tvrdost, lesk, hloubku matu, strukturní povrch apod. Jednotlivé složky směsi jsou smíchány v tavenině, která je vytlačována z výrobního zařízení, aby mohla vychladnout. Vychladlá hmota se mele ve speciálních mlýnech na požadovanou hrubost částic práškové hmoty, která již tvoří hotový produkt. [11, 27]

Produktové portfolio práškových barev je velmi rozsáhlé, protože se barvy vyrábějí v mnoha vzhledových typech a obrovské paletě odstínů. Pro orientaci v odstínech barev se používá mezinárodně uznávaná vzorkovnice RAL. Tato vzorkovnice není jediná, mezi další patří vzorkovnice RAL DESIGN, RAL EFFECTS, NCS, Panhote apod. [27]

Rozmach práškových barev nastal hlavně díky jejich ekonomickým, kvalitativním a ekologickým výhodám. Největší výhodou těchto barev je, že obsahují 100 % pevných částic, což znamená, že neobsahují žádné těkavé látky, co zatěžují životní prostředí. Dále pigmenty těchto barev neobsahují těžké kovy. V neposlední řadě je výhodou i to, že se nevyužitý prášek dá jednoduše použít znovu pomocí jeho recirkulace v aplikačním zařízení, což snižuje odpad. Zbylý odpadní prášek lze recyklovat či ekologicky likvidovat. [27, 29]

5.2.3.1 Rozdělení práškových barev

Barvy můžeme členit kromě barevných odstínů ještě podle mnoha hledisek. Nejvýznamnějším z nich je způsob vytvrzování prášku a dle toho dělíme práškové barvy na:

Termoplastické práškové barvy jsou založeny na bázi termoplastů. To jsou plasty, které lze ohřevem opakovaně převést do stavu taveniny nebo viskózního toku. Ochlazování až do tuhého stavu probíhá při teplotách, které jsou typické pro daný druh termoplastu. Tato vlastnost je základem recyklačních technologií termoplastických hmot. [10]

Barvy z termoplastů tvoří 5 až 10 % z trhu práškových barev. Na součást jsou obvykle aplikovány ve fluidních lázních pro nanášení práškových barev. Aplikace pomocí elektrostatické energie se provádí jen zřídka, protože termoplastické látky mají větší hrubost částic. I přes možnost snadné recyklace a tudíž i snadných oprav povrchů jsou tyto barvy dražší a méně využívané. [13, 22]

Termosetické práškové barvy jsou tvořeny z reaktoplastů neboli termosetů. Tyto plasty při zpracování procházejí chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovaných činidel se formují do hustých prostorově sesíťovaných struktur. V strukturách jsou původní molekuly vzájemně pospojovány kovalentními vazbami. Tento proces se nazývá vytvrzování. Reaktoplast, který prošel vytvrzováním je netavitelný a nerozpustný, proto je jeho recyklace obtížnější a řídí se jinými postupy. [10]

Termosetické barvy rozeznáváme dvojí. S obsahem TGIC, což je triglycidyl isokyanurát, nebo bez něj. TGIC umožňuje dokonalé přilnutí zapékajícího se prášku k povrchu součásti, proto barvy s jeho obsahem lépe drží na povrchu. Díky této látce mají barvy široké spektrum aplikačních možností a efektů. Barvy bez obsahu TGIC jsou stále oblíbenější, díky snadnému skladování, aplikaci, hladkému povrchu a nízkým teplotám vytvrzování. Nevýhodou je velmi tenká tloušťka filmu díky malému procentu vody, co se při zapékání musí odpařit. [22, 23]

Rozdělení termosetických práškových barev dle hlavních složek na:

- **Epoxidové (EP)** – Velmi odolné vůči korozi, mechanickým vlivům a některým chemickým látkám, ale zvětrávají velmi rychle. Proto se tyto barvy díky své velké rezistivitě používají jako podkladové povlaky pro polyesterové práškové barvy.
- **Epoxipolyesterové (PEP)** – Neboli tzv. hybridní. Jsou to směsi polyesteru s epoxidovými pryskyřicemi, nebo s akrylátovými pryskyřicemi. Využívají se

v interiérech, jako ochrana nábytku a spotřebičů, nebo v exteriérech, kde jsou krátkodobě vystaveny povětrnostním vlivům.

- **Polyesterové (PES)** – Tyto barvy jsou díky své odolnosti proti UV záření určeny pro exteriéry, kde jsou vystaveny povětrnostním vlivům. Povlaky z těchto barev se kromě dlouhé barevné stálosti a lesku či matu vyznačují tzv. anti-graffity efektem, což znamená, že na nich nedrží nezapékané barvy.
- **Polyuretanové (PUR)** – Vykazují vysokou odolnost vůči povětrnostním vlivům. Transparentní polyuretanové laky jsou známé svou vysokou číroostí.
- **Akrylátové (AC)** – Využívají se v exteriérech, ale především v automobilovém průmyslu. Mají velmi odolný povrch odolný vůči poškrábání a chemickému poškození. Tyto barvy jsou před vytvrzením velmi náchylné na ostatní práškové barvy. Kontaminace jinou barvou způsobuje krátery v povlaku, což snižuje odolnost celého povlaku. [22, 27]

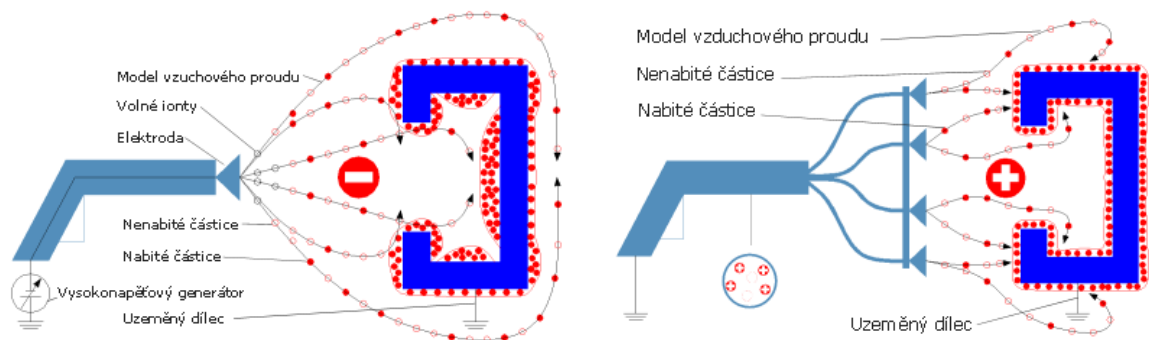
5.2.3.2 Postup elektrostatického lakování

Příprava povrchu se dá rozdělit na chemickou a mechanickou. Chemickou úpravou povrchu odstraňujeme z povrchu součásti mastnotu, rez a jiné chemické látky. Nejběžnějšími přípravami jsou tedy odmašťování a chemické odrezování. Mechanickou přípravou odstraňujeme z povrchu nečistoty a případné zbytky jiných povlaků pomocí kartáčování a broušení. Takto očištěná součást se musí ještě tryskat, aby došlo k zdrsnění povrchu a lepšímu přilnutí práškové barvy. [13]

Nanášení prášku probíhá za pomoci aplikačního zařízení, v němž je barva smíšena se stlačeným vzduchem. Z tohoto zařízení je směs hnána do aplikační pistole, ze které je stříkána na lakovanou součást. K tomu, aby prášek ze součásti nespádl, je mu v aplikační pistolí dodána elektrostatická energie, která využívá principu přitahování opačně nabitých částic. [27, 28]

K dodání elektrostatické energie se využívají dva základní principy. Prvním z nich je elektrostatické nabíjení zvané též STATIKA nebo KORONA. U tohoto způsobu, zobrazeném na obrázku obr. 8 vlevo, je částicím barvy dodána energie pomocí elektrody vysokého napětí, které je umístěné u ústí aplikačního zařízení. Tato metoda je velmi rychlá a efektivní, ale nehodí se pro součásti s hlubokými záhlubněmi. Druhým principem je elektrokinetické nabíjení jinak známé pod pojmem TRIBO. Tento princip je graficky vyobrazen na obrázku obr. 8 vpravo. Elektrostatická energie se částicím dodává pomocí

tření v aplikační pistoli a hadicích, které jsou obvykle vyrobené z teflonu. Tato metoda má stejné klady jako elektrostatische nabíjení, akorát je vhodnější pro součásti se záhlubněmi. [28]



Obr. 8 *Elektrostatické nabíjení (vlevo); elektrokinetické nabíjení (vpravo)* [28]

Vytvrzování prášku probíhá v pecích, nejčastěji v plynových nebo elektrických. Prášek se v peci zapéká určitý čas v rozmezí teplot od 170 do 220°C, přesná teplota a čas záleží na složení práškové barvy a tepelné odolnosti lakované součásti. Po vytvrzení se součást vyjme z pece a nechá vychladnout, pak je ihned připravena k dalšímu využití. Práškové barvy totiž po nanesení a vytvrzení nepotřebují čas k dalšímu schnutí, jako je k tomu třeba u vodou nebo ředidlem ředitelných nátěrů. [13, 27]

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jako diplomový experiment bylo zvoleno zjištění pevnosti svarových spojů v tahu před a po degradaci těchto spojů v prostředí zrychlených korozních zkoušek. Celkem bylo vyrobeno 270 zkušebních vzorků, které byly rozděleny do 30 skupin. Každou z těchto skupin tvořily 3 sady zkušebních vzorků, z nichž každá obsahuje 3 totožné vzorky, aby byla zaručena objektivita naměřených výsledků. Každá skupina je vyrobena odlišným způsobem. Sady v jednotlivých skupinách se od sebe liší dobou vystavení prostředí solné mlhy. Způsob pojmenování a označování jednotlivých skupin a sad spolu s jejich detailním výrobním postupem je uveden v přílohách této diplomové práce.

Svarové spoje byly zhotoveny metodou svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu a to pomocí ručního mechanizovaného obloukového svařovacího stroje a svařovacího obloukového robota. Vzorky s těmito svarovými spoji byly rozděleny do skupin na vzorky bez povrchové úpravy, vzorky s anorganickou kovovou zinkovou povrchovou úpravou a na vzorky s organickou povrchovou úpravou termosetickými prášky. Vzorky s organickou úpravou byly ještě vyrobeny s různými předpovrchovými úpravami. Každá skupina vzorků byla rozdělena do tří sad a to na vzorky co nebyly podrobeny zrychleným korozním zkouškám v prostředí solné mlhy a na vzorky co byly podrobeny těmto zkouškám v rozsahu 70 a 105 dní. Zkušební vzorky z těchto všech sad byly podrobeny zkoušce tahem. Z výsledků bude možné usuzovat vliv korozní degradace zkušebních vzorků na jejich pevnost svaru v tahu.

Zkušební vzorky byly použity i pro dílčí experimenty, jako je odtrhová zkouška přílnavosti nebo tvorba metalografických vzorků. Pro mřížkovou zkoušku a měření drsnosti povrchu byly speciálně vyrobeny zkušební etalony ve tvaru destiček o rozměrech 150×100×2 mm. Třicet etalonů bylo vyrobeno ze stejného materiálu a stejným způsobem přímo se skupinami zkušebních vzorků, takže technologií a podmínkami výroby plně odpovídají zkušebním vzorkům. Pro měření drsnosti povrchu byly zhotoveny tři etalony, každý s drsností povrchu odpovídající jedné sadě zkušebních vzorků před lakováním. Tyto poslední tři etalony nebyly opatřeny žádnou povrchovou ochranou.

6.1 Zhotovení vzorků

Postup zhotovení zkušebních vzorků je popsán v následujících podkapitolách.

6.1.1 Výběr materiálu a jeho příprava pro svařování

Výchozím materiálem pro výrobu všech vzorků byla zvolena za tepla válcovaná nelegovaná konstrukční ocel S235JR+N zhotovená dle normy EN 10025-2:2004. Tento materiál byl vybrán z důvodu své vhodnosti pro ruční i robotické svařování.

Základní materiál ve tvaru tabule plechu o rozměrech 2000×1000×2 mm byl nastříhán pomocí hydraulických nůžek ERMAK CNC HGS 2606 na pásy o rozměrech 60×1000×2 mm a 70×1000×2 mm. Z tabule tedy vzniklo 30 pásů. Před svařováním byly pásy plechu ručně odmaštěny perchlorem.

6.1.2 Svařování

6.1.2.1 Ruční svařování

K ručnímu svaření pásů byl použit svařovací invertor Migatronic Sigma² 500 C-V Pulse se systémem IGC-inteligentní regulace plynu. Tento svařovací zdroj byl opatřený hořákem MV 550 Twist o délce 4 m. Při svařování vzorků byl použit směsný plyn MISON 8, jehož chemické složení společně se svařovacími parametry uvádí tabulka tab. 1.

Tab. 1 Svařovací parametry ručního svařování a složení aktivního plynu

| Svařovací parametry | | Složení plynu | |
|----------------------|-----|---------------------|-------|
| Svařovací proud [A] | 170 | CO ₂ [%] | 8 |
| Svařovací napětí [V] | 20 | Ar [%] | 91,97 |
| Posuv drátu [m/s] | 7,2 | NO [%] | 0,03 |

Přídavným materiálem byl svařovací drát Pittarc G6 NO COPPER o průměru 1 mm, který se běžně používá pro svařování nelegovaných ocelí.

6.1.2.2 Robotické svařování

Pro robotické svaření vzorků bylo použito svařovací rameno Kocks typ: BASIC-TT-N-P100E EWM 400-A-EAS s inverotem EWM typ: PHOENIX 400 EXPERT PLUS forceARC opatřeným chladicím modulem hořáku EWM typ: COOL71 U43. Tento svařovací systém je primárně určený pro svařování ocelí v ochranných atmosférách plynu.

Pro vytvoření vzorků byl využit aktivní směsný plyn Ar+CO₂. Chemické složení tohoto plynu a parametry, za jakých došlo k svaření vzorků, uvádí tabulka tab. 2.



Obr. 9 Svařovací robotická buňka (vlevo) a robotické rameno Kocks typ: BASIC-TT-N-P100E EWM 400-A-EAS (vpravo)

Tab. 2 Svařovací parametry robotického svařování a složení aktivního plynu

| Svařovací parametry | | Složení plynu | |
|-----------------------|-----|---------------------|-------|
| Svařovací proud [A] | 129 | CO ₂ [%] | 18 |
| Svařovací napětí [V] | 19 | Ar [%] | 82 |
| Posuv drátu [m/s] | 6 | NO [%] | ----- |
| Rychlost hlavy [mm/s] | 12 | | |

Jako přídatný materiál byla využita drátová elektroda GOLDARC 2 o průměru 1 mm. Označení odpovídající normě EN ISO 14341-A je G 42 4C1/M21. Tato elektroda se běžně používá pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí metodou MAG nebo MIG.

6.1.3 Příprava vzorků před povrchovými úpravami

Svařené pásy byly nařezány na délku 15 mm s přesností +0,1 mm -0,0 mm. Řezání proběhlo na pásové pile Bomar Pulldown 160.120 G s emulzním chlazením. Emulze byla tvořena 5 % obráběcí kapaliny Paramo EOPS 1030, zbylých 95 % tvořila destilovaná voda. Ostré hrany byly zabroušeny.

Vzhledem k počtu skupin vzorků, bylo nutné tyto skupiny od sebe odlišit pro pozdější identifikaci. Způsob této identifikace je popsán v přílohách diplomové práce.

V tomto okamžiku došlo k rozdělení skupin zkušních vzorků dle identifikace a to na skupiny bez povrchové úpravy, skupiny vzorků určené pokovování a skupiny vzorků

určené pro nános ochranné termosetické vrstvy. Dále je popsána příprava povrchu pro termosetické vrstvy.

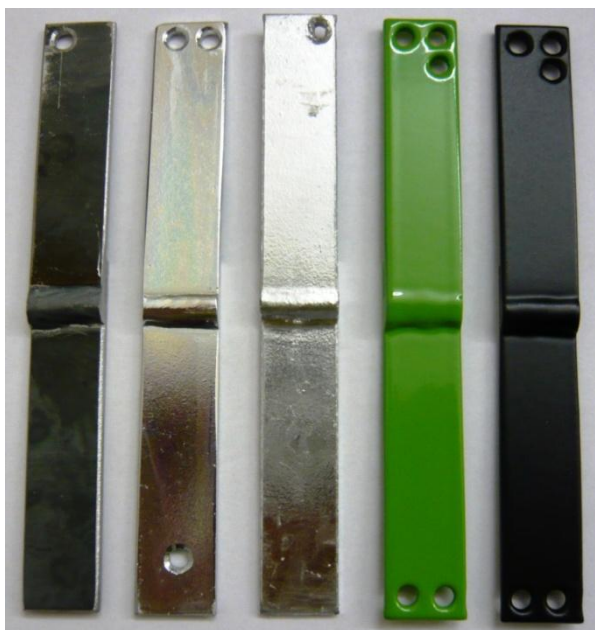
Aby byl dodržen správný technologický postup přípravy povrchu před nanesením termosetické práškové vrstvy, je nutné vzorky odmastit. Vzorky byly rozděleny na dva soubory. První byl odmaštěn ekologickou odmašťovací kapalinou D-SOL 100 za využití odmašťovacího stolu QTS Stabil S2. Druhý soubor byl odmaštěn v lázni z technického benzínu, který je považován za neekologický odmašťovací přípravek. S odmaštěnými vzorky, bylo zacházeno pouze v latexových rukavicích a tak, aby nedošlo k jejich znehodnocení mastnotou či jinými nepříznivými látkami.

Ekologicky i neekologicky odmaštěné vzorky byly rozděleny na další tři třídy. Na vzorky, které se nebudou dále upravovat. A na vzorky, které se budou upravovat tryskáním na drsnost povrchu 6,3 nebo 12,5 μm .

K tryskání povrchu u posledních dvou tříd byla využita kabina pro tlakové tryskání Glemco PULSAR VI D. Abrazivo tvořila ocelová drť G17. Po tryskání byly vzorky ofouknuty stlačeným filtrovaným vzduchem, aby došlo k odstranění všech zbytků abraziva.

6.1.4 Povrchová úprava

Finální povrchová u vzorků s povrchovou úpravou spočívala v galvanickém a žárovém pokovování, dále v práškovém lakování termosetickými prášky.



Obr. 10 Příklady zkušebních vzorků s různými povrchovými úpravami

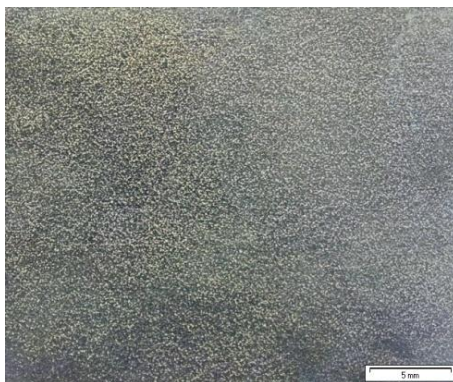
6.1.4.1 Povrchová úprava pokovováním

Elektrochemické zinkování

Tyto skupiny vzorků jsou pozinkovány v souladu s normou ČSN EN ISO 2081. Zinkování bylo provedeno na tyčích. Zkušební vzorky byly pasivovány modrou pasivací, tzn. bez šestimocného chromu. Požadovaná minimální tloušťka zinkového povlaku je 10 μm .

Aby byla u všech vzorků zaručena požadovaná tloušťka povlaku, provedla zinkovna měření tloušťky. Měření se týkalo zinkovnou vybraných zkušebních vzorků, na nichž byla v dvou různých bodech mimo svar měřena tloušťka. Ta se pohybovala v intervalu od 10 až 15 μm , tudíž hodnota tloušťky zinkového povlaku u všech měřených vzorků vyhovuje.

Na makrofotografii obr. 11 pořízené mikroskopem NEOPHOT 21 lze pozorovat povrch galvanicky pozinkovaného vzorku. Vzorek se vyznačuje dobrou drsností, matný vzhled je způsoben pasivací povrchu.



Obr. 11 Makrofotografie povrchu elektrochemicky pozinkovaného vzorku

Žárové zinkování

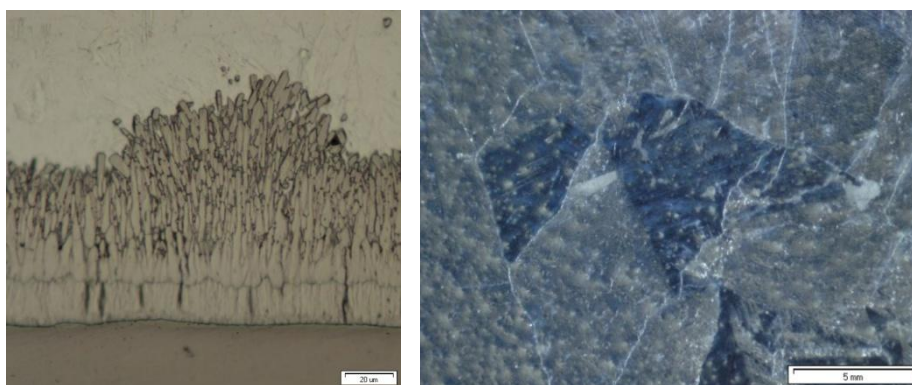
Tento druh povrchové úpravy se řídil normou ČSN EN ISO 1461. Jednalo se o suché neodstředěné zinkování se vzorky zavěšenými na tyčích. Podle tabulek odpovídá zkušebním vzorkům minimální tloušťka povlaku 55 μm .

Měřením tloušťky povlaku v zinkovně byly podrobeny náhodně vytipované vzorky. Měření bylo provedeno opět na dvou náhodných místech mimo svar. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 58 až 82 μm , z čehož vyplývá, že minimální tloušťka povlaku byla dodržena a v některých místech i značně překročena.

Makrofotografie obr. 12 vlevo zobrazuje řez povlakem, na kterém jsou jasně vidět všechny intermetalické fáze žárového zinkového povlaku. Úplně nahoře se nachází fáze éta, která obsahuje nejvíce zinku. Pod ní jsou vidět dlouhé krystaly fáze zeta přecházející

do fáze delta. Poslední viditelnou fází je fáze gamma. Ta se přímo dotýká ocelového povrchu zkušební vzorku.

Na obr. 12 vpravo se nachází makrofotografie povrchu žárového zinku, jež se vyznačuje namodralým kovovým leskem. K vidění zde jsou náhodně orientované krystaly připomínající svým vzhledem „květ“. Tento zinkový „květ“ je jen formou tvorby krystalů zinku, nemá žádný význam z hlediska korozní odolnosti povlaku, ani není zárukou špatně či kvalitně pozinkovaného povlaku. Na fotografii je k vidění i uhlíčitan zinečnatý, který značí přítomnost atmosférické koroze. [2]



Obr. 12 Metalografické snímky žárově pozinkovaného vzorku

6.1.4.2 Termosetické práškové lakování

Na předem připravené skupiny zkušebních vzorků pro termosetické práškové lakování byl elektrostatickou pistolí Prsten 031 v lakovací kabině Kovofiniš INKA 01 R nanesen šedý epoxidový termosetický antikorozi podklad EY-658-7300-001. Tyto vzorky byly umístěny do rozeřáté plynové pece TKS 040.PKZVO, kde se při 200°C 20 minut podklad zapékal. Poté byly vzorky vyjmuty z pece a ponechány na okolním vzduchu, aby došlo k jejich ochlazení.

Ze všech 216 vzorků bylo náhodně vybráno k proměření tloušťky povlaku 14 kusů. Měření se provádělo na čtyřech náhodných místech na vzorku pomocí digitálního tloušťkoměru vrstev CM 8825. Rozpětí naměřených hodnot se pohybovalo v intervalu od 50 do 98 μm . Výrobce termosetického podkladu doporučená tloušťka je cca 60 μm a tudíž byly vzorky uznány jako vyhovující a proto mohly být předány k nanesení finální vrstvy. Výsledky naměřených hodnot uvádí tabulka tab. 3.

Vzorky byly rozděleny na dva soubory. První soubor byl opatřen lesklým zeleným polyesterovým termosetickým práškem – série qualicoat P2-858-6018-010. Na druhý soubor byl nanesen černý matný polyesterový termosetický prášek – série qualicoat

P2-159-9005-020. U obou souborů byly k lakování použity stejné přístroje a postupy jako u antikoroziho podkladu EY-658-7300-001.

Měření tloušťky nalakované vrstvy bylo opět provedeno digitálním tloušťkoměrem vrstev CM 8825. U obou finálních povlaků výrobce doporučuje tloušťku cca 60 μm , proto by se naměřené hodnoty díky antikoroziho podkladu měly pohybovat okolo 120 μm . Z každého souboru bylo vybráno 7 vzorků, u nichž se tloušťka měřila na dvou různých místech. Naměřené hodnoty, které jsou uvedené v tabulkách tab. 4 a 5, se pohybovaly v rozmezí od 105 do 149 μm . K takovým rozdílům v tloušťkách povlaku došlo tím, že při ručním nanášení termosetického prášku nebylo dodrženo stejné množství nanášeného prášku.

Tab. 3 Naměřené tloušťky termosetického antikoroziho podkladu EY-658-7300-001

| Měřené místo | Hodnoty tloušťky povlaku [μm] | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Vzorek | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 1 | 59,4 | 66,4 | 64,1 | 94,2 | 62,6 | 87,1 | 62,4 | 61,7 | 73,8 | 58,0 | 87,9 | 94,3 | 84,2 | 53,7 |
| 2 | 55,6 | 81,4 | 70,1 | 83,9 | 65,0 | 84,0 | 76,4 | 64,2 | 73,2 | 50,1 | 86,6 | 98,0 | 79,5 | 55,8 |
| 3 | 56,0 | 76,4 | 79,6 | 71,7 | 73,4 | 66,9 | 50,3 | 68,6 | 82,0 | 62,3 | 95,0 | 85,2 | 83,0 | 59,2 |
| 4 | 50,0 | 71,2 | 75,4 | 82,2 | 67,8 | 84,3 | 52,6 | 64,4 | 79,4 | 63,4 | 93,3 | 84,0 | 83,4 | 79,3 |
| S_x [μm] | 3,37 | 5,61 | 5,81 | 7,98 | 4,02 | 7,99 | 10,28 | 2,48 | 3,72 | 5,23 | 3,53 | 5,94 | 1,80 | 10,1 |
| v_x [%] | 6,10 | 7,60 | 8,03 | 9,61 | 5,99 | 9,91 | 17,02 | 3,83 | 4,83 | 8,94 | 3,89 | 6,57 | 2,18 | 16,4 |

Tab. 4 Naměřené tloušťky polyesterového termosetického prášku P2-858-6018-010

| Měřené místo | Hodnoty tloušťky povlaku [μm] | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|-------|------|-------|-------|
| | Vzorek | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 133 | 133 | 144 | 112 | 137 | 127 | 131 |
| 2 | 125 | 136 | 139 | 118 | 146 | 133 | 140 |
| 3 | 115 | 137 | 149 | 130 | 141 | 105 | 112 |
| 4 | 121 | 140 | 146 | 144 | 144 | 116 | 128 |
| S_x [μm] | 6,54 | 2,50 | 3,64 | 12,25 | 3,39 | 10,71 | 10,11 |
| v_x [%] | 5,29 | 1,83 | 2,52 | 9,72 | 2,39 | 8,91 | 7,91 |

Tab. 5 Naměřené tloušťky polyesterového termosetického prášku P2-159-9005-020

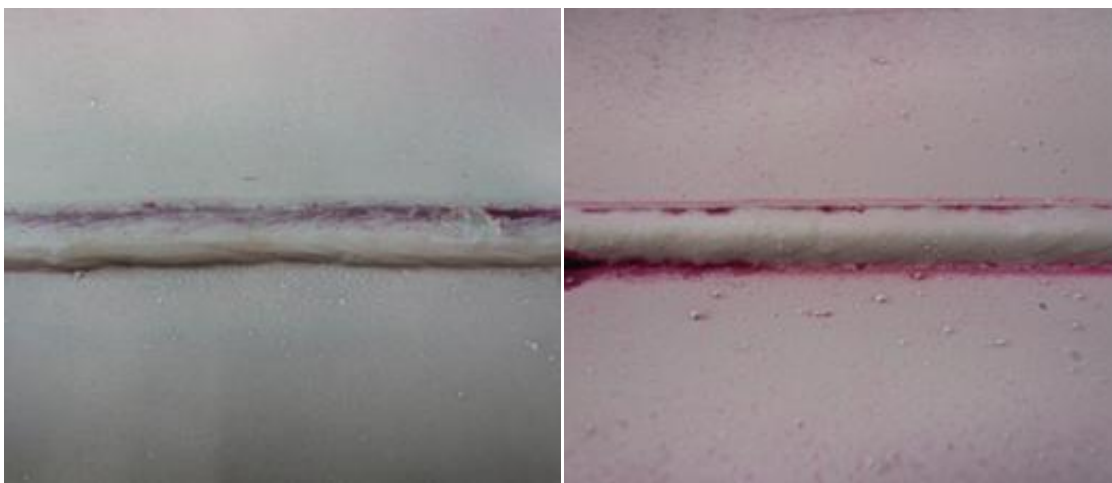
| Měřené místo | Hodnoty tloušťky povlaku [μm] | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | Vzorek | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 147 | 136 | 128 | 124 | 142 | 120 | 137 |
| 2 | 144 | 141 | 134 | 119 | 143 | 122 | 143 |
| 3 | 139 | 139 | 136 | 135 | 139 | 130 | 146 |
| 4 | 148 | 142 | 121 | 129 | 134 | 125 | 133 |
| S_x [μm] | 3,50 | 2,29 | 5,85 | 5,93 | 3,50 | 3,77 | 5,07 |
| v_x [%] | 2,42 | 1,64 | 4,51 | 4,68 | 2,51 | 3,03 | 3,63 |

6.2 Vybrané nedestruktivní zkoušky svarů

6.2.1 Kapilární zkouška

Podstatou této zkoušky je použití vhodné kapaliny s výrazným zbarvením. Tato kapalina pronikne do necelistvostí povrchu svaru. Po odstranění jejího přebytku z povrchu svaru vzlíná barevná kapalina vlivem kapilárních sil k povrchu svaru, který byl mezitím opatřen nástřikem bílé indikační látky, čímž se všechny necelistvosti materiálu na jeho povrchu, jako jsou trhliny anebo studené spoje, stanou jasně pozorovatelnými. [5]

K provedení kapilární zkoušky byla využita sada sprejů NORD TEST od společnosti HELLING GmbH. Zeleným sprejem Reiniger U87 byly svary odmaštěny, poté na jejich povrch byla nanесena červená penetrační kapalina z červeného spreje Kontrastrot U88, která byla v souladu s návodem výrobce na povrchu svaru ponechána 10 minut. Dále následovalo očištění povrchu od červené kapaliny bavlněným hadříkem a nanесení bílé indikační látky Entwicker U89, jež je dodávána ve žlutém spreji. Hned po nanесení indikační látky začala červená penetrační kapalina z necelistvostí povrchu prosakovat ven.



Obr. 13 Kapilární zkouška; ruční svar (vlevo), robotický svar (vpravo)

6.2.1.1 Dílčí závěr

Na ručním svaru, který vyobrazuje obr. 13 vlevo, se vyskytují povrchové příčné trhlinky s jedním studeným spojem. Vzhledem k malému rozměru studeného spoje a drobným délkám trhlínek, které by se odstranili například broušením, je svar považován za vyhovující a po očištění byl opět zařazen k ostatním svarům, ze kterých se staly zkušební vzorky.

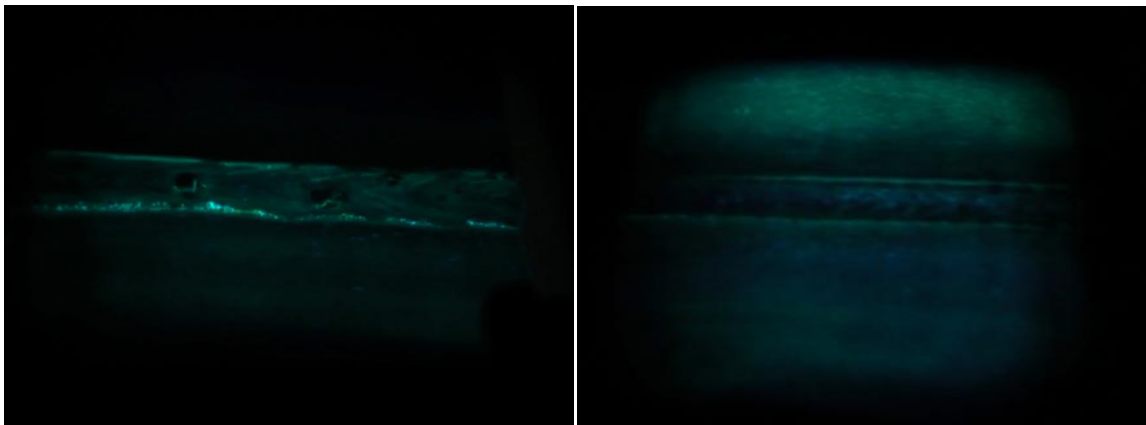
U svaru provedeného robotem na obr. 13 vpravo jsou zřetelně vidět dva souvislé zápaly a rozstřík svarového kovu vedle svaru. Tyto vady bývají obvykle způsobeny nevhodně

zvolenými svařovacími parametry či špatným úhlem hořáku. Svary s takovými vadami byly vyhodnoceny jako nevyhovující a proto nebyly propuštěny k dalšímu zpracování.

6.2.2 Zkouška fluorescenční

Tato zkušební metoda patří mezi kapilární zkoušky, pouze místo barevné detekční kapaliny se používá kapalina fluorescenční. Po odstranění jejího přebytku se povrch svaru osvítil ultrafialovým světlem v tmavém prostředí. Povrchové vady se poté projeví zřetelnou fluorescencí. [5]

Pro zkoušku svarů se použila fluorescenční kapalina Penetrant FP 93 TU a ultrafialová lampa Polichack NDT. Obojí od společnosti HELLING GmbH. Zkouška byla prováděna dle návodu výrobce.



Obr. 14 *Fluorescenční zkouška; ruční svar (vlevo), robotický svar (vpravo)*

6.2.2.1 Dílčí závěr

Obr. 14 vlevo vyobrazuje ručně svařovaný svar nasvícený ultrafialovým světlem. Na svaru jsou jasně zřetelné zápalý, což jsou místa mezi svarem a materiálem, která nejsou vyplněna svarovým kovem. Tato vada obvykle vzniká velkým svařovacím proudem, dlouhým obloukem nebo špatným vedením elektrody. Svar s takovým výskytem zápalů byl automaticky vyřazen.

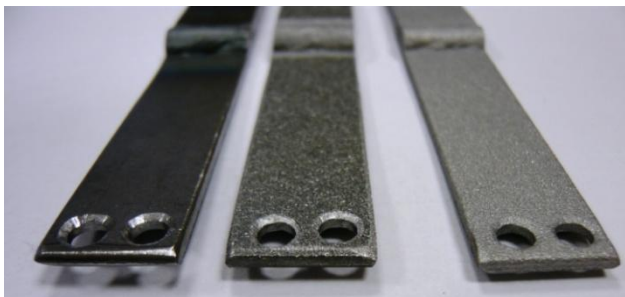
Na robotickém svaru, jenž je k vidění na obr. 14 vpravo, se v přítomnosti ultrafialového světla nezobrazují žádné viditelné povrchové vady. Tento svar je tedy považován za vyhovující, a proto byl očištěn, aby se z něho mohly být nařezány zkušební vzorky.

6.3 Čistota povrchu a stanovení drsnosti povrchu

K odmaštění povrchu vzorků před nanesením antikorozičního podkladu byla zvolena kapalina D-SOL 100 nebo technický benzín. U některých vzorků bylo zvoleno ruční abrazivní tryskání drtí G17 na dvě různé drsnosti povrchu.

Obecně se u povrchů určuje stupeň jeho čistoty, tak i jeho drsnost, která je důležitá k vytvoření kotvícího profilu pro dobré přilnutí povlaku nátěru. Čistota povrchu se dělí do několika stupňů stanovených v normě ČSN ISO 8501-1. Všechny zkušební vzorky odpovídají stupni St 2, což znamená, že při prohlídce povrchu bez zvětšení se nezjistí přítomnost olejů, mastnot a nečistot včetně nepřilnavých vrstev okují, rzi, nátěrů a cizích látek. Tryskané vzorky ještě odpovídají stupni Sa2. Tato úroveň označuje povrch, na kterém se bez zvětšení nezjistí přítomnost olejů, mastnot, nečistot a téměř žádné okuje, rez, nátěry a cizí látky. Všechny zbytky nečistot jsou pevně přilnavé. [16, 26]

Stanovení drsnosti povrchu bylo provedeno na zkušebních etalonech, pomocí lidských smyslů neboli srovnáním povrchu s vzorkovnicemi drsnosti a dále přístrojovým měřením drsnosti povrchu drsnoměrem Mitutoyo SJ-201.



Obr. 15 Různá drsnost povrchu zkušebních vzorků

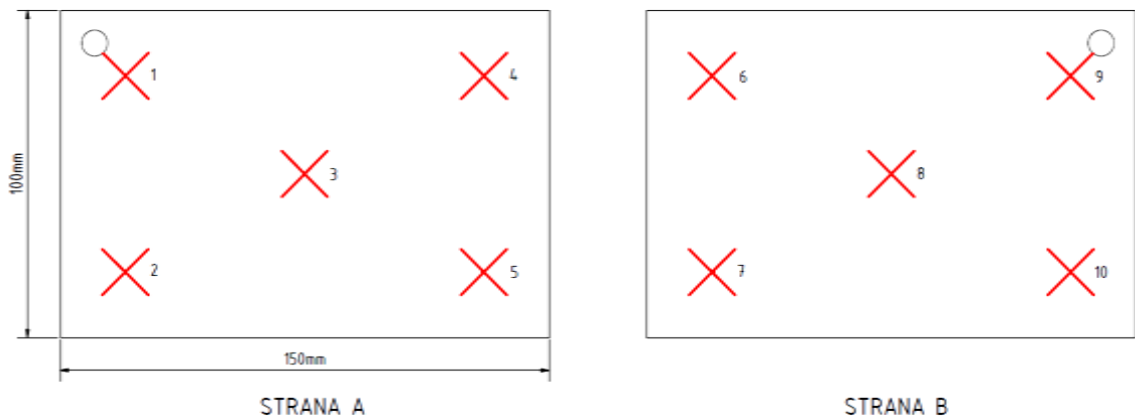
6.3.1 Stanovení drsnosti pomocí vzorkovnic drsnosti

K určení stupně drsnosti povrchu zkušebních vzorků byly využity vzorkovnice RUGOTEST N°3. Tyto vzorkovnice slouží jen k rychlému orientačnímu měření v praxi, protože drsnost povrchu se určuje za pomoci zraku nebo hmatu. Měření probíhalo na zkušebních etalonech po celé jejich ploše.

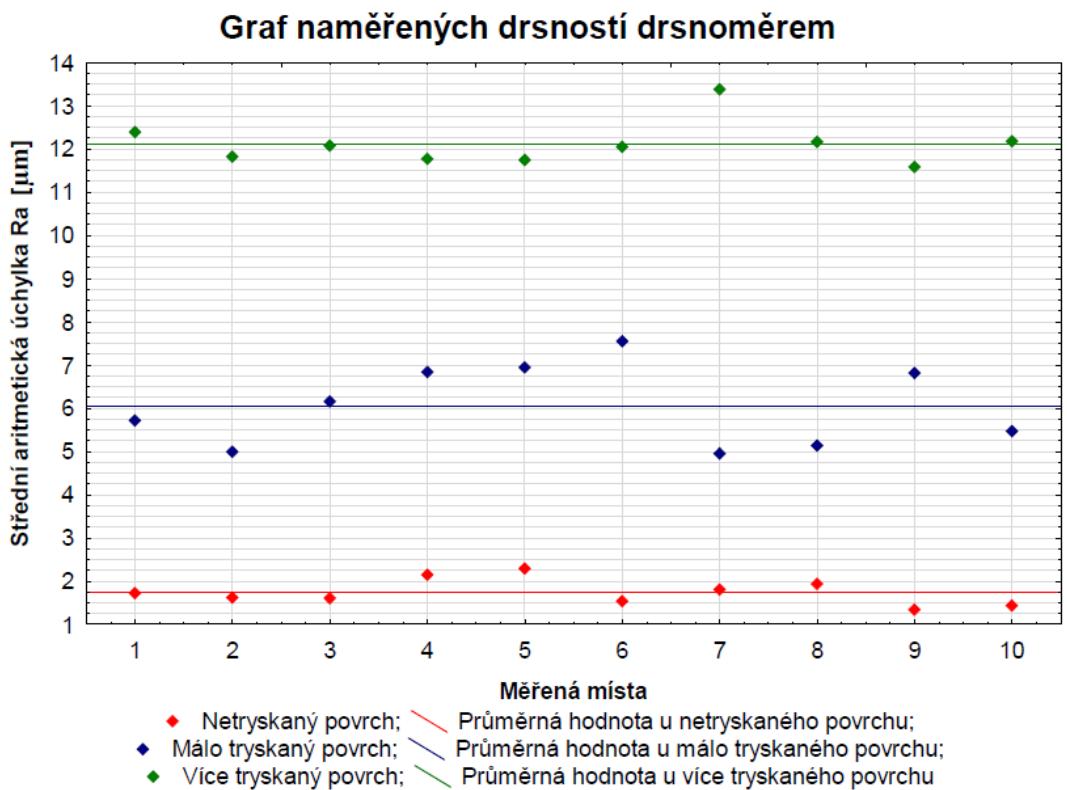
Nejprve se pomocí vzorkovnice určila drsnost netryskaného povrchu. Tento povrch se nejvíce podobal stupni N7 na vzorkovnici, jenž značí střední aritmetickou úchylku Ra 1,6 μm . Subjektivním porovnáním méně tryskaného povrchu se vzorkovnicí se došlo k závěru, že povrch odpovídá stupni N9, což odpovídá hodnotě Ra 6,3 μm . Porovnání více tryskaného povrchu se vzorkovnicí nejvíce odpovídalo stupni N10, který značí drsnost Ra 12,5 μm .

6.3.2 Stanovení drsnosti pomocí drsnoměru

Jako měřicí přístroj byl použit drsnoměr Mitutoyo SJ-201. Drsnost byla měřena na těch samých zkušebních etalonech, které byly srovnávané se vzorkovnicemi. Měření probíhalo na předem stanovených místech, které červenými kříži vyobrazuje schematický obr. 16. Drsnoměr byl na tato místa přiložen a vyrovnán do vodorovné polohy, aby se měřicí hrot drsnoměru během měření vždy dotýkal měřené plochy. Výsledky měření jsou zaneseny v grafu obr. 17, z těchto výsledků byly vypočítány jejich průměrné hodnoty, které jsou také zaneseny v grafu.



Obr. 16 Měřená místa na zkušebních etalonech



Obr. 17 Graf naměřených drsností drsnoměrem Mitutoyo SJ-201

Z grafu obr. 17 je zřejmé, že průměrná drsnost netryskaného povrchu je Ra 1,7 μm , průměrná drsnost méně tryskaného povrchu je Ra 6,1 μm . Poslední měřený etalon, tedy ten nejvíce tryskaný má střední aritmetickou úchylku Ra 12,1 μm .

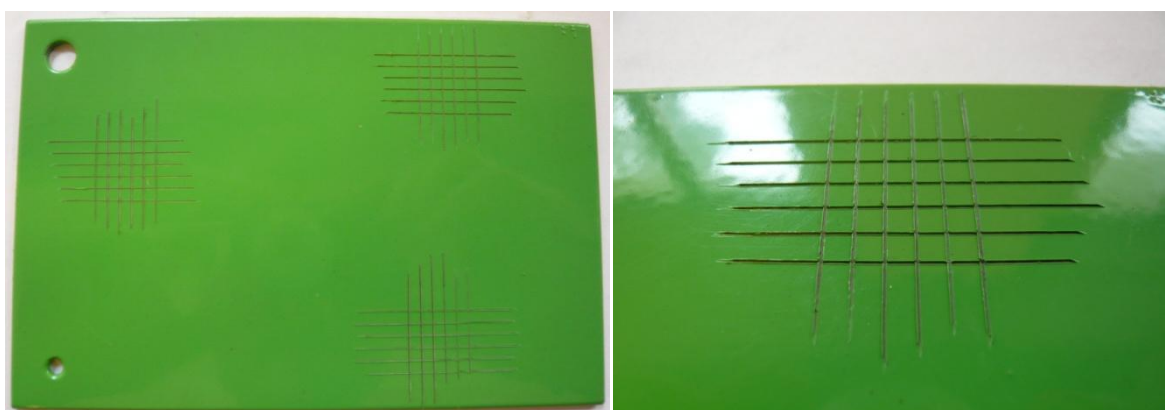
6.3.3 Dílčí závěr

Srovnáním výsledků obou metod se došlo k očekávanému závěru, že měření drsnosti pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ-201 je přesnější, avšak více časově a technologicky náročné. Přesto výsledky srovnávání drsnosti se vzorkovnicí se od měření drsnoměrem příliš neliší. Srovnávací metodou byly stanoveny tyto drsnosti 1,6; 6,3 a 12,5 μm . U měření drsnosti drsnoměrem s následným zprůměrováním hodnot se došlo k číslům 1,7; 6,1 a 12,1 μm . Z porovnání výsledků obou metod vyplývá, že se výsledky od sebe liší v řádu desetin, a proto je v praxi při stanovování drsnosti povrchu před nanesením povrchové úpravy výhodnější používat vzorkovnice drsnosti, protože je tato metoda velmi rychlá, málo finančně náročná a přináší dobré výsledky.

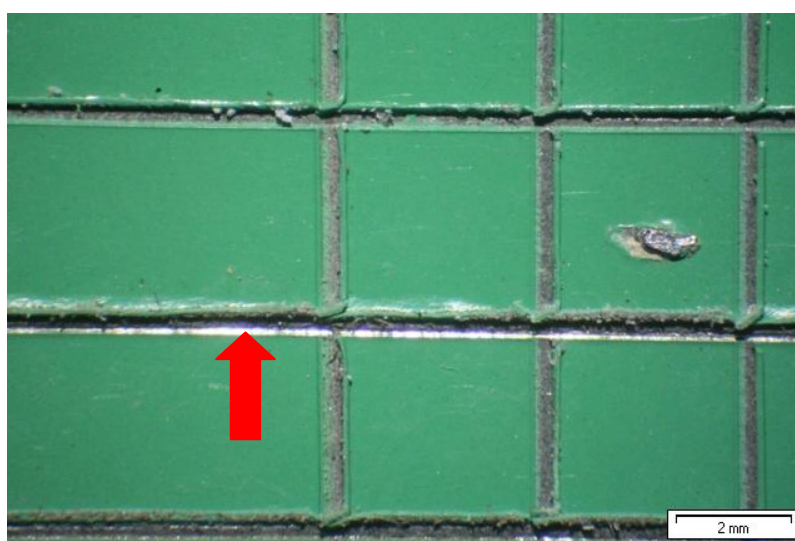
6.4 Mřížková zkouška

K zjištění odolnosti termosetického nátěru k jeho oddělení od podkladu bylo využito mřížkové zkoušky, kterou udává norma ČSN EN ISO 2409. Tato norma stanovuje metodiku zkoušení odolnosti nátěru k oddělení od podkladu, když je nátěr proříznut mřížkou až k podkladu, jenž v našem případě tvoří ocelové vzorky s různou drsností. [7]

Zkouška byla provedena na zkušebních etalonech. Aby se mohla začít řezat mřížka, je zapotřebí nejprve znát tloušťku vrstvy termosetického povlaku. Tloušťka byla změřena digitálním tloušťkoměrem vrstev CM 8825 a pohybovala se v intervalu od 118 do 141 μm . Díky těmto hodnotám bylo z normy vyčteno, že bude zapotřebí provádět 6 rýh s 3 mm rozestupem. Pro zaručení symetrie rýh byla použita šablona pro mřížkovou zkoušku Masterpaintplate Qualicheck. Na každé destičce byly vyřezány tři mřížky přibližně v místech, jak je znázorněno na obr. 18 vlevo. Postup aplikace normované adhezivní pásky pro mřížkovou zkoušku a její odtržení se provádělo v souladu s normou.



Obr. 18 Zkušební destička po mřížkové zkoušce (vlevo); detail mřížky (vpravo)



Obr. 19 Makrofotka zkušební mřížky

Na obr. 19 je vyobrazena makrofotografie pořízená mikroskopem NEOPHOT 21. Tento snímek byl primárně pořízen pro ověření, zda došlo k prořezání povlaku až na kov. K prořezání skutečně došlo po celé délce řezu, tuto skutečnost vyobrazuje červená šipka. Dále tento snímek deklaruje geometricky správně provedené prořezání povlaku, díky čemuž mohly vzniknout rovnoměrné čtverce.

Tato fotografie byla pořízena až po provedení mřížkové zkoušky a je z ní patrné, že nedošlo k oddělení povlaku od podkladu ani v rozích čtverců, což jsou nejnáchylnější místa, v nichž obvykle dochází k oddělování nátěrů od podkladů.

Na snímku je také možné zřetelně vidět pevně přilnavou kovovou nečistotu, která by bez zvětšení mikroskopem byla velmi obtížně pozorovatelná.

6.4.1 Dílčí závěr

Ani u jedné ze zkušebních destiček nedošlo k odtržení barvy od materiálu normovanou páskou. K odtržení nedošlo ani v rozích čtverců, proto všechny destičky bez ohledu na použitý druh odmašťovací kapaliny a jejich drsnosti povrchu před nanesením povlaku spadají do tzv. Klasifikace 0, kterou stanovuje norma ČSN EN ISO 2409. Z výsledků provedených mřížkových zkoušek tedy plyne, že kombinace použitého termosetického antikoroziního povlaku EY-658-7300-001 s naneseným zeleným povlakem P2-858-6018-010, nebo s černým povlakem P2-159-9005-020 je velmi odolná k oddělení od kovového podkladu.

6.5 Odrhová zkouška přilnavosti

Tato zkušební metoda spočívá v měření minimálního napětí v tahu potřebného k oddělení nebo odtržení nátěru ve směru kolmém k podkladu. Metoda je standardizována normou ČSN EN ISO 4624. Na výsledku zkoušky se podílí nejen mechanické vlastnosti zkoušeného nátěru, ale i způsob přípravy podkladu, způsob nanášení nátěrových hmot, podmínky zasychání atp. [8]

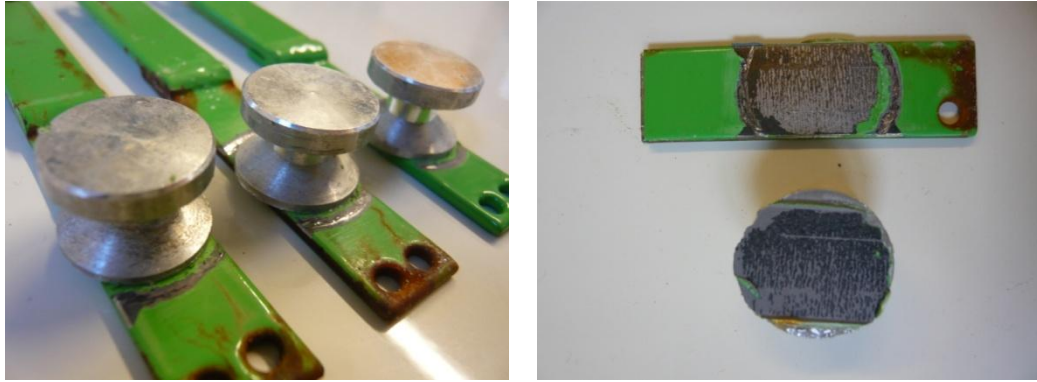
Zkouška byla provedena na skupinách zkušebních vzorků se zeleným polyesterovým práškem P2-858-6018-010. Zkoušeny byly všechny sady těchto skupin, tedy i ty, které byly vystaveny prostředí solné mlhy po dobu 70 a 105 dní. Cílem zkoušky bylo porovnat mezi sebou skupiny vzorků s různými předpovrchovými úpravami v závislosti na době expozice v prostředí solné mlhy. Parametry, při kterých vzorky byly ponechány účinkům mlhy v solné komoře, jsou uvedeny v kapitole 6.6 Zrychlené korozní zkoušky v solné mlze.

6.5.1 Provedení zkoušky a stanovení výsledků

Na zkušební vzorky byly pomocí kyanoakrylátového lepidla MC 1500 nalepeny odtrhové panenky o průměru 20 mm. Po vytvrzení lepidla byl ochranný povlak nacházející se okolo panenek ořezán, aby při odtrhu došlo jen k odtržení požadované plochy povlaku. Takto připravené vzorky jsou k vidění na obr. 20 vlevo. Dalším krokem bylo upravení zkušebních vzorků na pásové pile, proto aby splňovali požadavky řádného měření na mechanickém odtrhoměru Elcometer 106. Poté tímto měřícím zařízením došlo k odtržení zkušebních panenek od zkušebních vzorků. Na panenkách zůstal přilepen ochranný povlak, tento jev je možné vidět na obr. 20 vpravo. U každého zkušební vzorku byly odečtené hodnoty napětí ze stupnice mechanického odtrhoměru zaznamenány. Následně byly tyto hodnoty ze všech tří vzorků v sadě zprůměrovány. Průměrné hodnoty byly zaneseny do tabulky průměrných hodnot tab. 6.

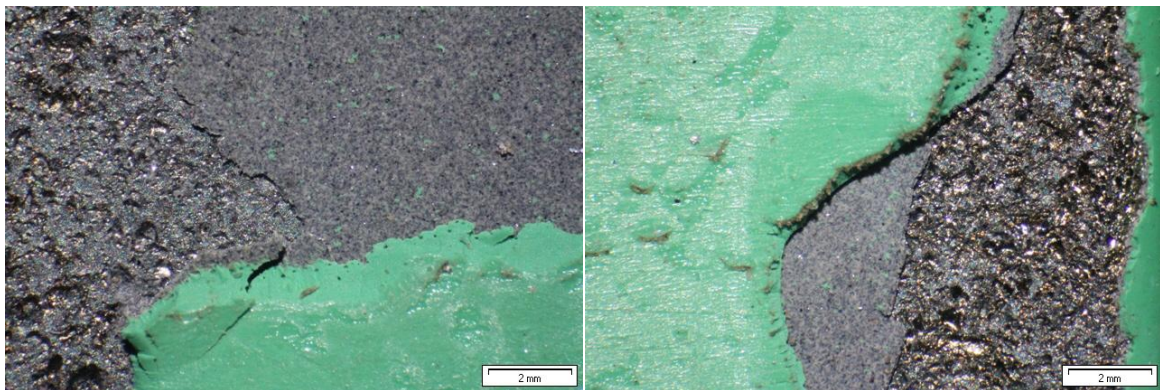
Tab. 6 *Tabulka průměrných hodnot*

| Počet týdnů v komoře | Hodnoty napětí σ [MPa] | | | | | |
|----------------------|-------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| | 4MAG | 6MAG | 8MAG | 10MAG | 12MAG | 14MAG |
| 0 | 3,80 | 3,30 | 5,00 | 4,80 | 5,20 | 5,10 |
| 10 | 2,60 | 1,10 | 3,00 | 3,10 | 4,40 | 4,60 |
| 15 | 2,20 | 0,90 | 2,40 | 2,90 | 3,90 | 4,00 |



Obr. 20 Nalepené panenky s oříznutými okraji; odtržený povlak od zkušebního vzorku

Plochy zkušebních vzorků po odtržení odtrhových panenek byly vyfotografovány mikroskopem NEOPHOT 21 a tím vznikly snímky obr. 21. Na těchto snímcích je zřetelně vidět otryskaný povrch spolu s jednotlivými ochrannými vrstvami. Na levém snímku se nachází jasně viditelný přechod mezi antikoročním podkladem a vrchním povlakem. Přechod se vytvořil díky slabé adhezi mezi podkladem a povlakem. Bílá vrstva na zeleném povlaku P2-858-6018-010 jsou zbytky lepidla MC 1500, kterým se lepila odtrhová panenka ke zkušebnímu vzorku.



Obr. 21 Makrofotky povrchu po odtrhové zkoušce přilnavosti

Jak je patrné z obr. 20 vlevo, styčná plocha panenek je větší, než plocha zkušebních vzorků, a proto jsou naměřené hodnoty zkreslené. Aby byly výsledky měření přesné, musela se vypočítat skutečná kontaktní plocha mezi panenkami a vzorky. Pomocí této skutečné plochy došlo k přepočtu naměřených hodnot na hodnoty reálné.

Výpočet skutečné plochy

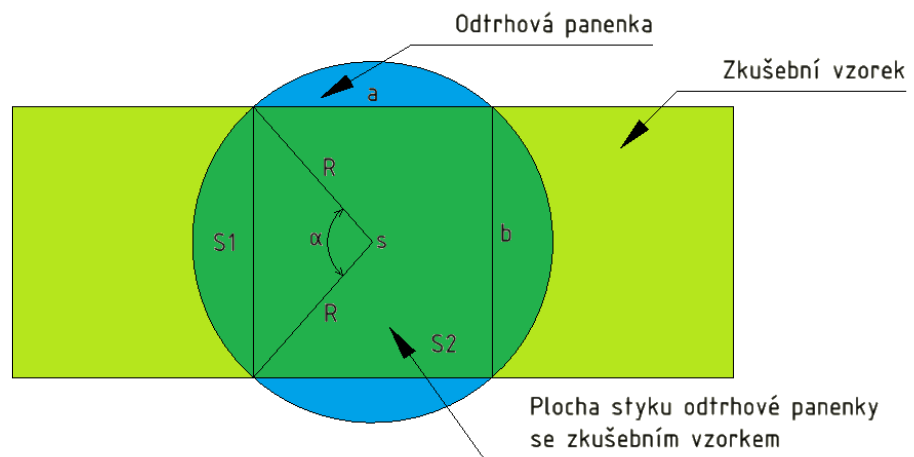
Za pomoci níže uvedených rovnic R1-R4 byl proveden výpočet skutečné stykové plochy mezi zkušebním vzorkem a odtrhovými panenkami. Pro orientaci při výpočtu poslouží schematický obr. 22, v němž jsou graficky uvedena označení rozměrů a jejich známé hodnoty.

$$a = \sqrt{(2 \times R)^2 - b^2} \text{ [mm]} \quad (\text{R1})$$

$$S1 = a \times b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{R2})$$

$$S2 = \frac{1}{2} \times R^2 \times \left(\frac{\pi \times \alpha}{180} - \sin \alpha \right) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{R3}) \text{ [25]}$$

$$S = S1 + 2 \times S2 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{R4})$$



Obr. 22 Výpočet skutečné plochy - schematický obrázek

Přepočet hodnot

S využitím níže uvedených rovnic R5 a R6 se přepočítala naměřená data na data přepočtená, která odpovídají skutečné stykové ploše mezi zkušebním vzorkem a odtrhovou panenkou.

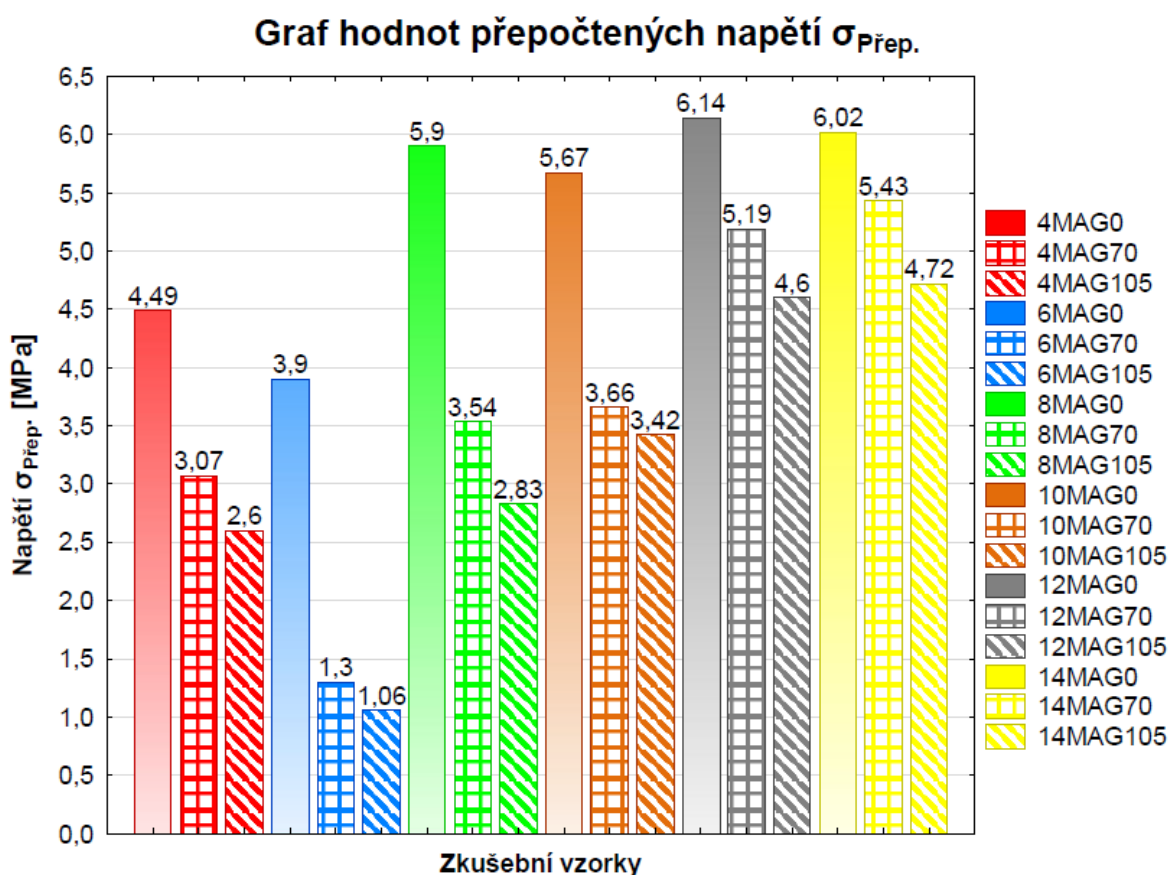
$$F = \sigma \times A \text{ [N]} \quad (\text{R5}) \text{ [8]}$$

$$\sigma_{\text{přep.}} = \frac{F}{S} \text{ [N]} \quad (\text{R6})$$

Tab. 7 Tabulka přepočtených hodnot

| Počet týdnů v komoře [-] | Hodnoty napětí $\sigma_{\text{Přep.}}$ [MPa] | | | | | |
|-----------------------------|--|------|------|-------|-------|-------|
| | 4MAG | 6MAG | 8MAG | 10MAG | 12MAG | 14MAG |
| 0 | 4,49 | 3,90 | 5,90 | 5,67 | 6,14 | 6,02 |
| 10 | 3,07 | 1,30 | 3,54 | 3,66 | 5,19 | 5,43 |
| 15 | 2,60 | 1,06 | 2,83 | 3,42 | 4,60 | 4,72 |

Hodnoty z tabulky tab. 7 byly vyneseny do grafu obr. 23, aby bylo jejich srovnání srozumitelnější a přehlednější.



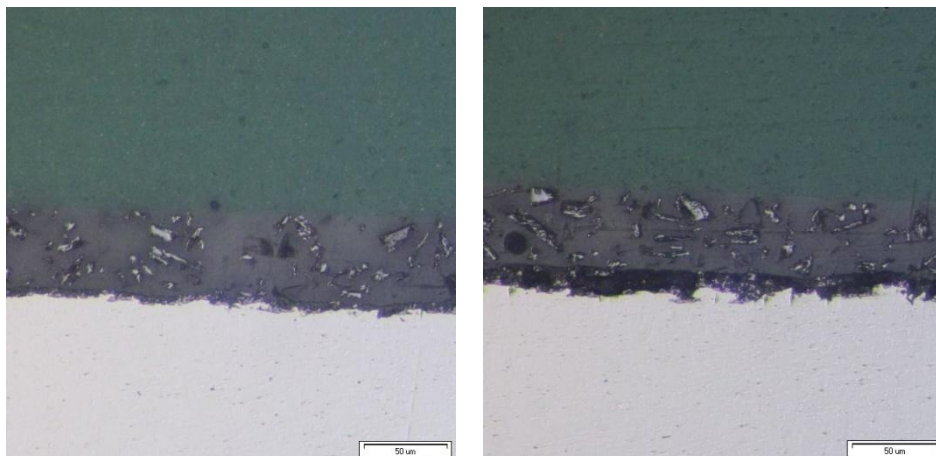
Obr. 23 Graf hodnot přepočtených napětí

6.5.2 Metalografické řezy strukturou ochranného povlaku

Pro potvrzení výsledků odtrhové zkoušky přilnavosti byly zhotoveny řezy vzorků s nanesenou povrchovou úpravou z termosetických plastů. Makrofotky byly pořízeny mikroskopem NEOPHOT 21.

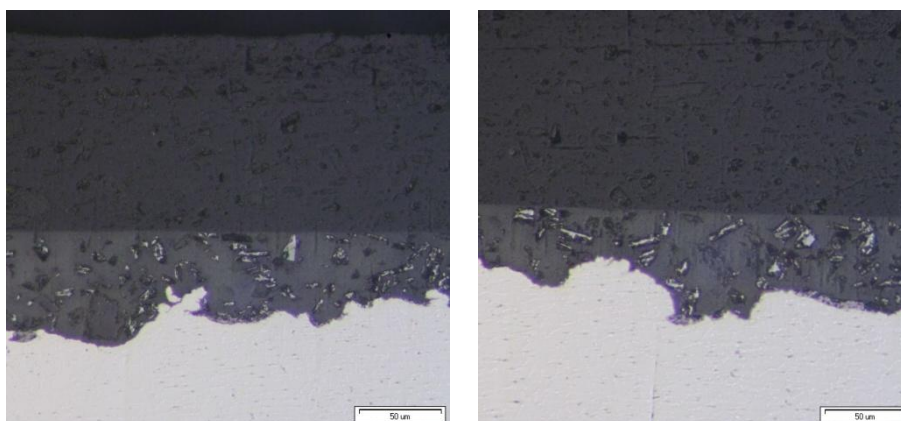
Řez vzorkem ze sady 6MAG0 je zobrazen na obr. 24. Na první pohled je znát, že vzorek neprošel mechanickou povrchovou úpravou tryskáním. Malá drsnost tohoto netryskaného povrchu má za následek špatný kotvicí profil povlaku. Na obrázku vpravo je

zřetelně vidět malá adheze a koheze antikorozičního podkladu EY-658-7300-001 se základním materiálem. Antikoroziční podklad tedy dostatečně nepřilnul k základnímu materiálu, a proto je potřeba velmi malé síly k jeho oddělení od základního materiálu.



Obr. 24 Špatný kotvící profil vzorku ze sady 6MAG0

Makrofotky rozříznutého vzorku ze sady 13ROB0 jsou k vidění na obr. 25 a zcela jasně zobrazují kvalitní kotvící profil mezi podkladem EY-658-7300-001 a základním materiálem. Takto kvalitního profilu se dosáhlo tryskáním povrchu na drsnost 12,5 µm ještě předtím, než byl nanesen šedý antikoroziční podklad EY-658-7300-001.



Obr. 25 Dobrý kotvící profil vzorku ze sady 13ROB0

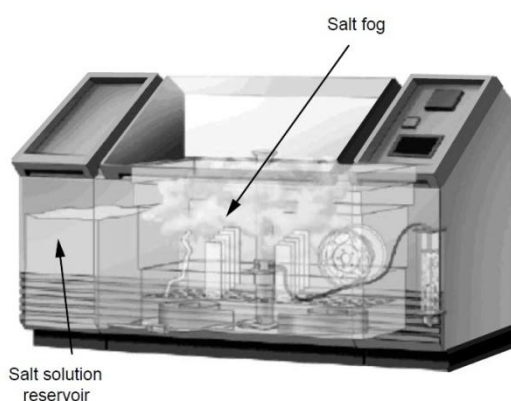
Z makrofotek obr. 24 a 25 je ještě patrná dobrá adheze a koheze mezi antikorozičním podkladem EY-658-7300-001 a polyesterovými prášky P2-858-6018-010 a P2-159-9005-020. Jednotlivé ochranné vrstvy u obou případů drží pevně u sebe což kromě nesnadnosti jejich oddělení od sebe, značí i správně provedený technologický postup nanášení ochranných vrstev na sebe.

6.5.3 Dílčí závěr

Z histogramu obr. 23 vyplývá, že čím více byly zkušební vzorky vystaveny prostředí solné mlhy, tím více klesala odtrhová pevnost potřebná k udržení povlaku na základním materiálu. Nejvyšší hodnoty tahového napětí byly naměřeny u skupin 12 MAG a 14MAG. Vzorky v těchto skupinách byly při výrobě tryskány na hodnotu 12,5 μm , čímž došlo k vytvoření kvalitního kotvícího profilu, což potvrzují makrosnímky obr. 25. Naopak nejmenších hodnot napětí v tahu bylo dosaženo u skupin 4MAG a 6MAG neboli vzorků, které nebyly vůbec tryskány drtí. Ponechání původního povrchu způsobilo malou adhezi a kohezi mezi základním materiálem a antikoročním podkladem EY-658-7300-001, a to vedlo k malému odporu při odtrhávání. Toto tvrzení dokazují i makrosnímky na obr. 24, které zobrazují špatný kotvící profil mezi základním materiálem a antikoročním povlakem.

6.6 Zrychlené korozní zkoušky v solné mlze

Tyto zkoušky patří k nejstarším a nejrozšířenějším vůbec. Solná komora je zařízení, jež tvoří mlhu s vysokým obsahem soli v uzavřeném prostředí. Testovací vzorky jsou této mlze vystaveny z určitých míst a úhlů. Testování v solné mlze se řídí normou ČSN EN ISO 9227 o korozních zkouškách v umělých atmosférách. Mimo jiné tato norma nedoporučuje pokládat výsledky zkoušek za přímou informaci o korozní odolnosti zkoušeného vzorku pro jakákoli prostředí, ve kterých se tyto vzorky mohou používat. Je to dáno tím, že zřídka existuje přímý vztah mezi odolností proti působení solné mlhy a korozní resistencí v jiných prostředích. [9, 11]



Obr. 26 Řez solnou komorou (vlevo) [11]; Solná komora S400-TR (vpravo)

Dvě ze tří sad ve skupině zkušebních vzorků byly podrobeny zrychleným korozním zkouškám. Tyto dvě sady se od sebe liší dobou jejich expozice v neutrální solné mlze. První sada byla účinkům mlžného prostředí vystavena 70 dnů, druhá sada 105 dnů. Použitá mlha odpovídala normě ČSN EN ISO 9227, která stanovuje následující parametry: teplota při zkoušce byla $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, koncentrace roztoku chloridu sodného v nahromaděném roztoku odpovídala $50 \text{ g/l} \pm 5 \text{ g/l}$, pH v nahromaděném roztoku se pohybovalo mezi 6,5 až 7,2 a průměrná rychlost hromadění rozprašované mlhy z vodorovné sběrné plochy 80 cm^2 byla $1,5 \text{ ml/h} \pm 0,5 \text{ ml/h}$. [9]

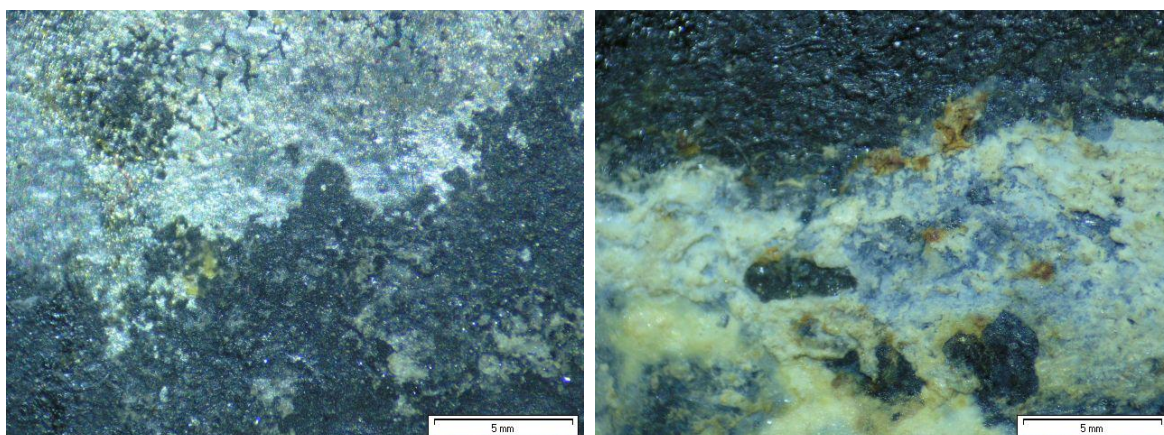
6.6.1 Výsledky zkoušky

Na vzorcích neopatřených žádnou povrchovou úpravou došlo k velmi rychlému vzniku koroze. Růst korozních produktů zapříčinil velmi významnou změnu vzhledu, objemu i hmotnosti zkušebních vzorků. Takto korozně poškozený vzorek je vidět na obr. 27 nahoře, dole se nachází zkušební vzorek nepodrobený agresivnímu prostředí solné mlhy.



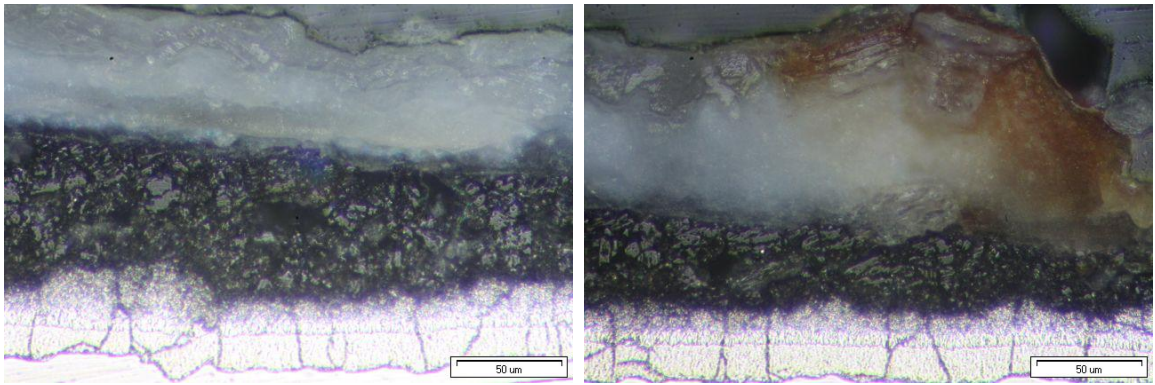
Obr. 27 Srovnání zkušební vzorku před a po 105 dnech v prostředí solné mlhy

Galvanicky pozinkované vzorky po 70 dnech v solné komoře jsou zobrazeny na fotografiích obr. 28, pořízených mikroskopem NEOPHOT 21. Perforace zinkového povlaku je zřetelně vidět na obr. 28 vpravo. Proděravěná místa se vyznačují hnědočerveným zabarvením, jež značí červenou korozi. Ta vzniká jen v místech propojení oceli s agresivní atmosférou potažmo vlhkostí.



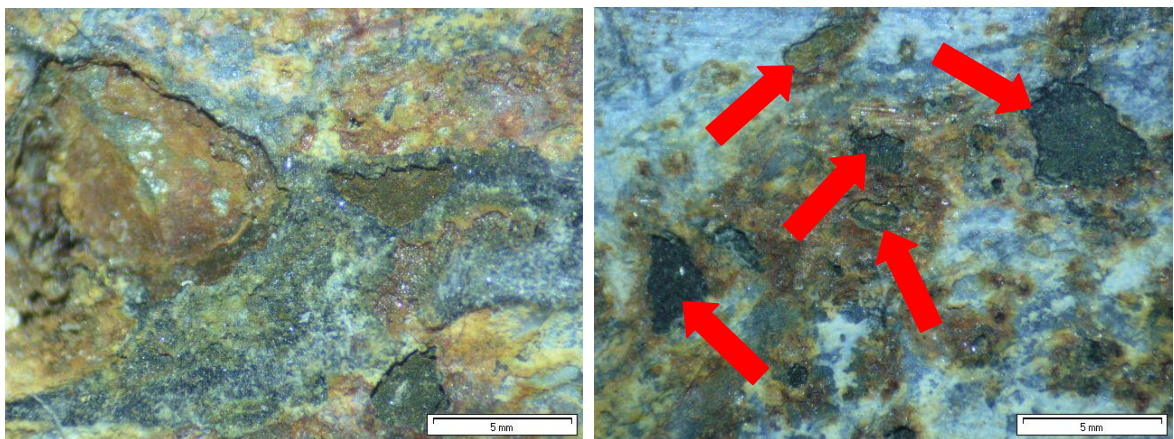
Obr. 28 Korozní napadení elektrochemicky pozinkovaného vzorku

Na další straně uvedené makrosnímky metalografických výbrusů obr. 29 jasně dokazují, že zinkový povlak se pasivuje v celém svém průřezu a úbytek ochranné galvanické vrstvy je rovnoměrný. Pravý makrosnímek výbrusu zřetelně vyobrazuje červenou korozi na povrchu korozních produktů. Bohužel snímek nezobrazuje přesné místo, ve kterém došlo k propojení ocelového povrchu s neutrální solnou mlhou.



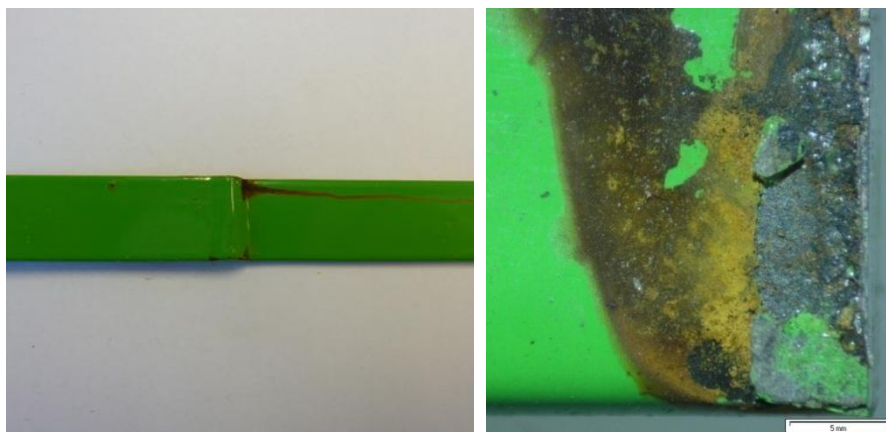
Obr. 29 Makrosnímky elektrochemicky pozinkovaného vzorku

Na obr. 30 se nachází žárově pozinkovaný vzorek po 10 týdnech v solném prostředí. Na první pohled je zřejmé, že je povrch vzorku silně zasažen nerovnoměrnou důlkovou korozi. Pro ilustraci jsou na pravém obrázku největší důlky znázorněné červenými šipkami.



Obr. 30 Korozní napadení žárově pozinkovaného vzorku

U skupin vzorků opatřených termosetickými práškovými barvami ani po 70 dnech vystavení prostředí solné mlhy nedošlo k žádným významným perforacím povrchu. Jediným místem výskytu koroze se stal přelátovaný spoj, který je rozříznutý vidět na obr. 31 vpravo. V tomto místě nebyla nanесena povrchová ochrana a díky tomu mohla koroze začít volně bujet, protože technologií nanášení termosetických prášků nelze docílit, aby byl prášek nanесen i v takto nepřístupných místech. Pokud bychom se chtěli vyhnout korozi v těchto místech, museli bychom změnit technologii povrchové úpravy nebo nahradit přelátovaný svarový spoj jiným druhem svaru.



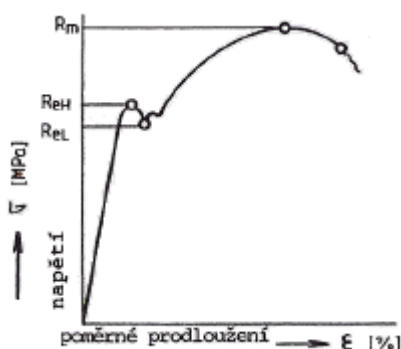
Obr. 31 Korozní napadení vzorku s termosetickým práškem

6.6.2 Dílčí závěr

Z porovnání skupin zkušebních vzorků očekávaně nejhůře dopadly skupiny bez povrchové úpravy díky obrovskému nárůstu korozních produktů. Po nich následovaly žárově zinkované skupiny, u nichž se ve velké míře objevila nerovnoměrná důlková koroze. U galvanicky zinkovaných skupin vzorků došlo také k perforaci zinkové vrstvy, ale v mnohem menší míře než u žárově pozinkovaných vzorků. Nejlepší výsledky vykazovaly termosetické práškové ochrany bez ohledu na druh jejich předpovrchové úpravy. K proniknutí solné mlhy k základnímu ocelovému materiálu docházelo jen velmi zřídka, když nepočítáme přeplátované spoje, ve kterých nešlo díky technologii práškového lakování nanést ochranné povlaky.

6.7 Zkouška tahem

Destruktivní tahová zkouška spočívá v plynulém zatěžování zkušební vzorku s příčně vytvořeným svarovým spojem do té doby, než dojde k přetržení vzorku. Touto zkouškou zjišťujeme čtyři mechanické vlastnosti svarového spoje a to: mez kluzu R_e (MPa), mez pevnosti R_m (MPa), tažnost A (%) a kontrakci Z (%). První dvě lze vyčíst z pracovního diagramu nelegované oceli s nízkým obsahem uhlíku, jak je vidět na obr. 32. V praxi se běžně udává horní mez kluzu R_{eH} , spodní mez kluzu R_{eL} je důležitým parametrem pro výpočet svařovaných konstrukcí. Při zvyšujícím se napětí bude dosaženo mezi pevnosti R_m , což je největší napětí zjistitelné zkouškou, protože poté se začne vzorek zužovat, až dojde k jeho přetržení. [5]



Obr. 32 Pracovní diagram zkoušky tahem [5]

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZDM 5/51 s měřicím rozsahem ± 50 kN. Nastavení posuvu příčnicku bylo nastaveno na hodnotu $10 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$. Každý zkušební vzorek byl upnut do čelistí stroje a následně byl přetržen. Naměřené hodnoty maximální působící síly F (N) a dráhy s (mm) byly zaznamenány pomocí programu M-TEST do počítače. Tato data ze všech tří vzorků v sadě byla zprůměrována a pro přehlednost vynesena do grafů, jež se nachází v přílohách diplomové práce.

6.7.1 Dílčí závěr

Z porovnání všech grafů vytvořených zprůměrováním naměřených hodnot vyplývá, že u všech skupin zkušebních vzorků dosáhly nejvyšší meze pevnosti R_m ty sady, které nebyly vystaveny prostředí solné mlhy, protože tím nedošlo k narušení struktury ocelového materiálu.

Menších hodnot mezi pevnosti dosahovaly sady vystavené solné mlze 70 dní. U těchto vzorků vlivem agresivní atmosféry došlo k poškození ochranného povlaku, pokud jím byly

vzorky opatřeny, což vedlo k rozvoji koroze, což vyústilo k nižším hodnotám mezi pevnosti, než u vzorků, které vůbec nebyly vystaveny solné mlze.

Nejmenších naměřených hodnot mezi pevnosti dosáhly sady, které měly vzorky 105 dnů v prostředí solné mlhy, protože u těchto vzorků koroze nejvíce poškodila strukturu oceli. Toto poškození negativně ovlivnilo výsledné vlastnosti oceli a svarového spoje.

Ze všech skupin nejmenších pevností u vzorků ze solné komory dosáhly skupiny vzorků 1MAG a 1ROB. Tento výsledek se dal očekávat, protože tyto vzorky nebyly opatřeny žádnou antikorozií ochranou a tudíž rychlému rozvoji korozní degradace nic nebránilo.

U skupin zkušebních vzorků opatřenými organickými práškovými antikoroziími ochranami mez pevnosti dosahovala velmi podobných hodnot. Nebyl zjištěn významný rozdíl mezi manuálně a robotem vytvořeným svarovým spojem. Dále se neprojevila žádná závislost ekologického či neekologického odmašťovacího prostředku spolu s různými drsnostmi povrchu na výslednou mez pevnosti. Z těchto zjištění plyne závěr, že způsob vytvoření svarového spoje a vliv předpovrchové úpravy na pevnost vzorků v tahu nehrály žádnou roli.

Skupiny vzorků s anorganickou zinkovou ochranou dosáhly obdobných hodnot mezi pevnosti jako skupiny vzorků s organickou ochranou. Opět se zde neprojevilo význačné rozdíly mezi způsoby výroby svarových spojů, a proto rozdíl mezi skupinami vzorků s těmito kovovými povrchovými povlaky a úpravami z plastických hmot je na hodnoty pevnosti v tahu bez významu.

6.8 Zhodnocení výsledků

Experimentální část diplomové práce je tvořena praktickým experimentem, který měl za cíl stanovit vliv korozní degradace na pevnost svaru v tahu. Celkem bylo vytvořeno 270 zkušebních vzorků a 33 zkušebních etalonů pro dílčí zkoušky. Vzorky byly rozděleny do 30 skupin, dle způsobu jejich výroby. Každá ze skupin byla rozdělena do tří sad, z nichž dvě byly podrobeny korozním zkouškám v prostředí solné mlhy odpovídající normě ČSN EN ISO 9227 po nestandardní testovací dobu 70 a 105 dní. Následně byly všechny vzorky podrobeny analýze na univerzálním zkušebním stroji, naměřené hodnoty vzorků z jednotlivých sad byly zprůměrovány a vyneseny do grafů.

Z těchto grafů je na první pohled patrné, že nejvyšších hodnot meze pevnosti dosáhly sady vzorků, které nebyly vystavené prostředí solné mlhy, naopak nejnižších mezi pevnosti se vyznačují sady vzorků vystavené solné mlze 105 dní neboli 15 týdnů. Došlo i k porovnání pro experiment zvolených antikorozních úprav. Za tyto úpravy bylo zvoleno elektrochemické pokovování zinkem, žárové pokovování v lázni roztaveného zinku a elektrostatické práškové lakování s různými druhy předúprav povrchu. Pro porovnání byly k testovacímu procesu zařazeny skupiny vzorků, které neobsahovaly žádnou povrchovou ochranu. Po vystavení agresivnímu prostředí solné mlhy nejmenších hodnot mezi pevnosti dosáhly očekávaně skupiny vzorků bez povrchové úpravy. Výsledky skupin vzorků s anorganickými i organickými povrchovými úpravami se od sebe hodnotami mezi pevnosti příliš nelišily. Na tomto faktu nehrála žádnou roli rozdílná předúprava ani rozdílné vrchní vrstvy u elektrostaticky nanesených vrstev.

Vizuálně se skupiny vzorků lišily výskytem korozního napadení po vystavení sad prostředí solné mlhy. Z tohoto hlediska nejhorších výsledků dosáhly skupiny vzorků neošetřené žádnou povrchovou úpravou. Následně se umístily žárově pokovované vzorky, protože u nich došlo ve velké míře k porušení zinkové ochranné vrstvy, což zapříčinilo častý výskyt nerovnoměrné důlkové koroze. Elektrochemicky pozinkované skupiny vzorků také začaly během pobytu v solném prostředí vykazovat perforaci zinkového povlaku s výskytem červené koroze. Množství těchto perforovaných míst bylo několikanásobně nižší než u skupin žárově pozinkovaných vzorků a proto je tato ochrana lépe hodnocena. Nejlepších výsledků dosáhly vzorky s elektrostaticky nanesenými práškovými povlaky bez ohledu na použitou vrchní vrstvu. Za celých 105 dní v solné mlze došlo k perforacím povrchu jen výjimečně, zpravidla jen na rizikových místech, jako jsou hrany svarového spoje, přeplátovaný spoj nebo samotné hrany zkušebních vzorků.

Z výsledků zkoušky tahem a z výsledků zrychlených korozních zkoušek je patrné, že nejlepších výsledků dosáhly skupiny vzorků s práškovými povlaky. Bohužel ale z těchto zkoušek není zřejmé, který druh provedené předpovrchové úpravy je nejlepší. K vyřešení tohoto problému posloužila odtrhová zkouška přilnavosti a mřížková zkouška.

Mřížková zkouška dle normy ČSN EN ISO 2409 byla vzhledem k svým požadavkům provedena na zkušebních etalonech, které byly vyrobeny přímo a stejným způsobem jako zkušební skupiny, a proto jim po výrobní stránce plně odpovídají. U všech zkušebních etalonů nedošlo k odtržení barvy ani v rozích čtverců, proto je barva hodnocena jako velmi odolná k oddělení od kovového podkladu. Z výsledků této zkoušky ale nebylo zjištěno, který druh zvolené předúpravy je nejvíce odolný k oddělení, a proto bylo zapotřebí další zkoušky.

Tou byla odtrhová zkouška přilnavosti normována dle ČSN EN ISO 4624. Vyhodnocením se došlo k závěru, že nejvyšší odtrhové pevnosti dosáhly nejvíce tryskané vzorky s drsností povrchu 12,5 μm před lakováním. Díky takto drsnému povrchu se dosáhlo kvalitního kotvícího profilu, který se vyznačuje velkou adhezí mezi ocelí a antikorozním podkladem. Proto bylo zapotřebí vyvinout větší sílu nutnou k odtržení povlaku od základního materiálu.

I když nebyl prokázán vliv korozní degradace, základního materiálu přes ochranný povlak, na pevnost v tahu se jako nejlepší antikorozní ochrana ukazuje elektrostatické práškové lakování s předúpravou povrchu tryskáním na hodnotu 12,5 μm . Elektrostatická ochrana dosáhla velmi dobrých výsledků v prostředí solné mlhy bez ohledu na použitou finální ochranu. Tyto vrstvy mají tedy stejně účinné ochranné schopnosti, které jsou nezávislé na barevném pigmentu, lesku či matu vrchní vrstvy. Z výsledků odtrhové zkoušky přilnavosti plyne, že nejvyšších hodnot odtrhové pevnosti dosáhly vzorky s vysokou drsností povrchu před lakováním. Z tohoto zjištění je zřejmé, že je drsnost povrchu velmi důležitá na výsledné mechanické vlastnosti práškového povlaku. I když nebylo v této práci prokázáno, zda je lepší ekologické či neekologické odmašťovadlo je s ohledem na životní prostředí vždy lepší využívat ekologické přípravky, které jsou v přírodě snadno odbouratelné.

7 ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce s tématem: Antikorozní ochrana svarů u konstrukčních materiálů by se dala rozdělit do tří částí. První se zabývá současnými technologiemi svařování, popisuje jednotlivé metody a stručně rozvíjí tematiku robotizovaného svařování. Druhá část díla řeší problematiku koroze a druhů korozní degradace. Poslední díl teoretické části plynule navazuje na předchozí část o korozi a zabývá se současnými trendy v antikorozní ochraně. Zde jsou popsány běžně využívané způsoby ochrany povrchů a vybrané antikorozní ochrany, které byly využity v experimentální části. Konkrétně se jedná o elektrochemické pokovování zinkem, žárové pokovování v lázni roztaveného zinku a elektrostatické práškové lakování.

Experimentální část tvoří praktický experiment, jehož cílem bylo stanovit nejlepší povrchovou ochranu svarových spojů v závislosti na korozní degradaci s následným podrobením zkoušce tahem. Za zvolené povrchové úpravy byly použity již uvedené metody, které jsou blíže popsány v teoretické části.

Porovnáním grafů zkoušek tahem, vytvořených ze zprůměrovaných naměřených hodnot, nebyl prokázán znatelný rozdíl mezi pevností ručně zhotoveného a robotem vyrobeného svaru. Přesto se zdá být výhodnější robotem zhotovený svar, protože na jeho vytvoření bylo použito méně přídavného drátu s ochranným plynem, což šetří finanční náklady na výrobu. Musíme ale brát v potaz fakt, že robotické svařování je finančně velmi výhodné jen u velkých sérií svařenců, protože variabilní náklady, při udržení stejné jakosti výroby, s velikostí sérií výrazněji klesají než u manuálního svařování.

Z výsledků experimentální části dále vyplývá, že nejlepší povrchovou úpravou se dle využitých zkušebních metod stal elektrostatický práškový povlak s drsností povrchu před lakováním 12,5 μ m. Vliv odmašťovacího prostředku a použité vrchní ochranné vrstvy nebyl ve výsledcích experimentu nijak prokázán. Přesto je s ohledem na ekologii a vztah k životnímu prostředí za nejlepší úpravu povrchu považován elektrostatický práškový povlak s předpovrchovou úpravou spočívající v odmaštění ekologickým odmašťovadlem.

Z myšlenky celé diplomové práce plyne, že je vždy dobré si předem uvědomit, jakému prostředí bude součást či svařenec vystaven a jaké nároky na spolehlivost i životnost bude muset splňovat. Od této úvahy by se měly vždy odvíjet konstrukční úpravy, zvolená povrchová ochrana a hlavně důslednost při dodržování technologického postupu.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AČSZ, 2008: *ZINKOVÁNÍ A UDRŽITELNÁ VÝSTAVBA*. AČSZ, Ostrava, 48s.
- [2] AČSZ, 2011: *PŘÍRUČKA ŽÁROVÉHO ZINKOVÁNÍ*. AČSZ, Ostrava, 56s.
- [3] Černý M. a kolektiv, 1984: *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. SNTL, Praha, 264s. DT 620.193:669.018
- [4] Everhart T. C., 2014: *A Welder's Handbook to Robotic Programming*. Amazon Fulfillment, Wrocław, 246s. ISBN-10: 1499396899, ISBN-13: 978-1499396898
- [5] Malina Z., 2010: *Základní kurz svařování MIG/MAG se souborem testových otázek*. ZEROSS, Ostrava, 144s. ISBN: 80-86698-16-5
- [6] Minařík V., 2011: *Přehled metod svařování*. ZEROSS, Ostrava, 82s. ISBN: 80-86698-18-1
- [7] Norma ČSN EN ISO 2409, 2013: *Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 20s.
- [8] Norma ČSN EN ISO 4624, 2003: *Nátěrové hmoty – Odtrhová zkouška přilnavosti*. Český normalizační institut, 20s.
- [9] Norma ČSN EN ISO 9227, 2007: *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Český normalizační institut, Praha, 24s.
- [10] Ptáček L. a kolektiv, 2002: *Nauka o materiálu II*. CERM, Brno, 392s. ISBN: 80-7204-248-3
- [11] Roberge P. R., 1999: *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill, Martinsburg, 1172s. ISBN: 0-07-076516-2
- [12] Ščerbejová M., 1993: *Strojírenská technologie*. Vysoká škola zemědělská v Brně, Brno, 132s. ISBN: 80-7157-083-4
- [13] Zurschmeide J., 2015: *Powder Coating: A How-to Guide for Automobile, Motorcycle, Bicycle and Other Parts*. CarTech, North Branch, 128s. ISBN: 978-1-61325-142-3

Seznam použitých internetových zdrojů

- [14] ABB s.r.o., 2016: *Roboti.cz – Historie a vývoj*. Online [cit. 2016-03-19]. Dostupné na: <http://www.roboti.cz/historie-vyvoj>
- [15] ABB s.r.o., 2016: *Roboti.cz – Roboty ve svařování a kovovýrobě*. Online [cit. 2016-03-17]. Dostupné na: <http://www.roboti.cz/robotizace-v-prumyslu/svarovani-kovovyroba>
- [16] C.P.O.-pískování, s.r.o. 2009: *Tryskání (pískování)*. Online [cit. 2016-03-08]. Dostupné na: <http://www.cpo-piskovani.cz/tryskani-piskovani>
- [17] European Aluminium Association & University of Liverpool, 2010: *Hybrid Plasma-MIG Welding*. Online [cit. 2016-03-06]. Dostupné na: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=202&pageid=2144416830>
- [18] FMA Communications, Inc., 2016: *Basic components of a robotic GMAW system*. Online [cit. 2016-03-20]. Dostupné na: <http://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/the-challenge-of-robotic-welding-aluminum>
- [19] Fronius International GmbH., 2016: *CMT*. Online [cit. 2016-03-05]. Dostupné na: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-22781F45-BEC84A36/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm
- [20] Fronius International GmbH., 2016: *LaserHybrid*. Online [cit. 2016-03-05]. Dostupné na: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-4A8F2CC4-4860341D/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3923.htm
- [21] Galvanovna Omega, s.r.o., 2016: *Galvanické pokovení*. Online [cit. 2016-03-16]. Dostupné na: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>
- [22] Gardner Business Media, Inc., 2011: *Powder Chemistries*. Online [cit. 2016-03-16]. Dostupné na: <http://www.pfonline.com/articles/powder-chemistries>
- [23] Kratochvíl F., 2016: *Triglycidyl isokyanurát*. Online [cit. 2016-03-10]. Dostupné na: <http://www.epitesty.cz/pasports/T%20028.pdf>
- [24] Kraus V., 2000: *Povrchy a jejich úpravy*. Online [cit. 2016-02-25]. Dostupné na: <http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>

- [25] Matematické vzorce Výpočty online, 2012: *Obsah kruhové výseče*. Online [cit. 2016-03-11]. Dostupné na: <http://vzorce-matematika.sweb.cz/vzorce-obsahu-obrazcu.php>
- [26] Nevěčný P., 2012: *Stupně přípravy ocelového podkladu dle ČSN ISO 8501-1 a podobných norem*. Online [cit. 2016-03-08]. Dostupné na: http://www.povrchoveupravy.cz/PDF/Nevecny_PU2.pdf
- [27] OK-COLOR spol. s r.o., 2016: *Technologie*. Online [cit. 2016-03-25]. Dostupné na: <http://www.okcolor.cz/technologie/>
- [28] Press Agency spol. s r.o., 2006: *Práškové lakování v kostce*. Online [cit. 2016-03-15]. Dostupné na: <http://www.salum.cz/index.php/salum-praskove-lakovani-praskova-lakovna-komaxitovani-komaxit-5/35-salum-praskove-lakovani-v-kostce>
- [29] Press Agency spol. s r.o., 2007: *Výhody práškového lakování*. Online [cit. 2016-03-25]. Dostupné na: <http://www.salum.cz/index.php/salum-praskove-lakovani-praskova-lakovna-komaxitovani-komaxit-5/30-salum-vyhody-praskoveho-lakovani>
- [30] Skařupa J., 2007: *Průmyslové roboty a manipulátory*. Online [cit. 2016-02-26]. Dostupné na: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf

9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Robot Unimate 1900 [30] | 14 |
| Obr. 2 Základní uspořádání robotického svařovacího GMAW systému [18]..... | 15 |
| Obr. 3 Některé druhy korozní degradace [24]..... | 19 |
| Obr. 4 Princip galvanického zinkování a řez elektrolytickým povlakem zinku [2, 21]..... | 23 |
| Obr. 5 Technologický postup žárového zinkování suchým způsobem [2]..... | 24 |
| Obr. 6 Technologický postup žárového zinkování mokřím způsobem [2]..... | 25 |
| Obr. 7 Řezy typického povlaku žárového zinku [1, 2]..... | 26 |
| Obr. 8 Elektrostatické nabíjení (vlevo); elektrokinetické nabíjení (vpravo) [28]..... | 29 |
| Obr. 9 Svařovací robotická buňka (vlevo) a robotické rameno Kocks typ: BASIC-TT-N- P100E EWM 400-A-EAS (vpravo)..... | 32 |
| Obr. 10 Příklady zkušebních vzorků s různými povrchovými úpravami..... | 33 |
| Obr. 11 Makrofotografie povrchu elektrochemicky pozinkovaného vzorku | 34 |
| Obr. 12 Metalografické snímky žárově pozinkovaného vzorku | 35 |
| Obr. 13 Kapilární zkouška; ruční svar (vlevo), robotický svar (vpravo) | 37 |
| Obr. 14 Fluorescenční zkouška; ruční svar (vlevo), robotický svar (vpravo) | 38 |
| Obr. 15 Různá drsnost povrchu zkušebních vzorků | 39 |
| Obr. 16 Měřená místa na zkušebních etalonech | 40 |
| Obr. 17 Graf naměřených drsností drsnoměrem Mitutoyo SJ-201 | 40 |
| Obr. 18 Zkušební destička po mřížkové zkoušce (vlevo); detail mřížky (vpravo)..... | 42 |
| Obr. 19 Makrofotka zkušební mřížky | 42 |
| Obr. 20 Nalepené panenky s oříznutými okraji; odtržený povlak od zkušební vzorku | 45 |
| Obr. 21 Makrofotky povrchu po odtrhové zkoušce přilnavosti..... | 45 |
| Obr. 22 Výpočet skutečné plochy - schematický obrázek | 46 |
| Obr. 23 Graf hodnot přepočtených napětí | 47 |
| Obr. 24 Špatný kotvící profil vzorku ze sady 6MAG0..... | 48 |
| Obr. 25 Dobrý kotvící profil vzorku ze sady 13ROB0 | 48 |
| Obr. 26 Řez solnou komorou (vlevo) [11]; Solná komora S400-TR (vpravo) | 50 |
| Obr. 27 Srovnání zkušební vzorku před a po 105 dnech v prostředí solné mlhy..... | 51 |
| Obr. 28 Korozní napadení elektrochemicky pozinkovaného vzorku..... | 51 |
| Obr. 29 Makrosnímky elektrochemicky pozinkovaného vzorku | 52 |
| Obr. 30 Korozní napadení žárově pozinkovaného vzorku | 52 |
| Obr. 31 Korozní napadení vzorku s termosetickým práškem..... | 53 |
| Obr. 32 Pracovní diagram zkoušky tahem [5] | 54 |

10 TABULKA POUŽITÝCH OZNAČENÍ

Níže uvedená tabulka udává význam a veličiny jednotlivých označení použitých v kapitole: 6.5 Odrthová zkouška přilnavosti.

| Označení | Veličina | Popis |
|--------------------|-----------------|---|
| a | mm | Strana |
| A | mm ² | Celkový obsah stykové plochy odtrhové panenky |
| b | mm | Strana |
| F | N | Odrthová síla |
| R | mm | Poloměr stykové plochy odtrhové panenky |
| s | - | Střed kružnice |
| S | mm ² | Vypočtená plocha styku odtrhové panenky se zkušebním vzorkem |
| S ₁ | mm ² | Obdélníková plocha styku odtrhové panenky se zkušebním vzorkem |
| S ₂ | mm ² | Plocha kruhové výseče styku odtrhové panenky se zkušebním vzorkem |
| α | ° | Úhel |
| σ | MPa | Odrthové napětí |
| σ _{Přep.} | MPa | Přepočtené odtrhové napětí |

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Svařovací parametry ručního svařování a složení aktivního plynu | 31 |
| Tab. 2 Svařovací parametry robotického svařování a složení aktivního plynu..... | 32 |
| Tab. 3 Naměřené tloušťky termosetického antikorozičního podkladu EY-658-7300-001 | 36 |
| Tab. 4 Naměřené tloušťky polyesterového termosetického prášku P2-858-6018-010 | 36 |
| Tab. 5 Naměřené tloušťky polyesterového termosetického prášku P2-159-9005-020 | 36 |
| Tab. 6 Tabulka průměrných hodnot..... | 44 |
| Tab. 7 Tabulka přepočtených hodnot | 47 |