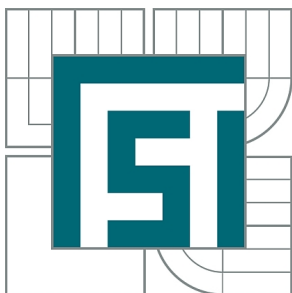


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ ŽÁROVÉHO NÁSTŘIKU AL PRO ABSORPČNÍ VRSTVY SOLÁRNÍCH ABSORBÉRŮ

THE USE OF THERMAL SPRAYING AL LAYER FOR ABSORPTIVE LAYER OF SOLAR
ABSORBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN URBANOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Urbanovský

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití žárového nástřiku Al pro absorpční vrstvy solárních absorbérů

v anglickém jazyce:

The use of thermal spraying Al layer for absorptive layer of solar absorbers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Důležitým prvkem pro solární absorbéry na ohřev TUV je selektivní absorpční vrstva, která mění dopadající sluneční záření na teplo. Tyto vrstvy jsou většinou tvořeny oxidy některých kovů. Úkolem je technologické ověření možnosti vytvoření takovéto vrstvy pomocí žárového nástřiku hliníkem a její následnou anodickou oxidací s přidavkem dalších prvků.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii žárových nástřiků kovů. Navrhnout metodiku experimentu. Provést nástřik s různými procesními parametry. Provéřit absorpční vlastnosti vytvořených vrstev.

Seznam odborné literatury:

1. MOHYLA, M. Technologie povrchových úprav kovů. 3vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 2006. 156s. ISBN 80-248-1217-7.
2. SEDLÁČEK, V. Povrchy a povlaky kovů. 1vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha. 1992. 176s. ISBN 80-01-00799-5.
3. PODJUKLOVÁ, J. Speciální technologie povrchových úprav I. 1vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8.
4. Povrchová úprava (online). Cit. 2014-11-19. Dostupné z www.povrchovauprava.cz.
5. Katedra materiálů a strojírenské metalurgie (online). Cit. 2014-11-19, dostupné z <http://www.kmm.zcu.cz/CD/>.

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

URBANOVSKÝ Jan: Využití žárového nástřiku Al pro absorpční vrstvy solárních absorbérů.

V teoretické části se práce zabývá konstrukcí solárních kolektorů, dále pak teorií žárových nástřiků a anodické oxidace. V praktické části práce je uveden postup výroby spektrálně selektivního povlaku, vhodného pro solární absorbéry. Na závěr jsou prověřeny vlastnosti zhotovených vzorků pomocí snímků z termovizní kamery.

Klíčová slova: Žárový nástřik, solární absorbér, anodizace, selektivní povrch, emisivita

ABSTRACT

URBANOVSKÝ Jan: The use of thermal spraying Al layer for absorptive layer of solar absorbers.

The thesis engage in structure of solar collectors in theoretical part. Secondly, theory of thermal spraying coating and anodizing is subscribed. In practical part of thesis is proposition of producing a spectral selective surface suitable for solar absorbers. Finally the properties of the samples are checked by thermographic camera shots.

Keywords: Thermal spraying, solar absorber, anodizing, selective surface, emissivity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBANOVSKÝ, Jan. *Využití žárového nástřiku Al pro absorpční vrstvy solárních absorbérů*. Brno, 2015. 59s, 1 příloha, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití žárového nástřiku Al pro absorpční vrstvy solárních absorbérů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jan Urbanovský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a především své manželce Věře Urbanovské za podporu během studia.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Prohlášení

Poděkování

ÚVOD	9
1 SOLÁRNÍ KOLEKTORY	10
1.1 Konstrukce kolektoru	11
1.2 Vývoj	14
2 ROZBOR SOUČASTNÉHO STAVU	15
2.1 Možnosti výroby povrchu pro solární absorber	15
3 SPEKTRÁLNĚ SELEKTIVNÍ POVLAK	18
3.1 Emisivita	19
3.2 Typy selektivních povrchů	20
4 TECHNOLOGIE ŽÁROVÝCH NÁSTŘIKŮ	21
4.1 Proces a vlastnosti nástřiku	21
4.2 Rozdělení žárových nástřiků	23
4.2.1 Nástřik plamenem	23
4.2.2 Nástřik elektrickým obloukem	24
4.2.3 Nástřik plazmou	25
4.2.4 Nástřik detonací	26
4.2.5 Nástřik laserem	26
4.2.6 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)	27
4.3 Infrastruktura	28
4.4 Předúprava povrchu základního materiálu	29
4.5 Kvalita povlaku	31
4.6 Konstrukční zásady pro žárově stříkané součásti	33
4.7 Použití nástřiků	34
5 ELEKTROCHEMICKÁ MODIFIKACE HLINÍKU	35
5.1 Technologický postup anodizace	35
6 MĚŘENÍ EMISIVITY TERMOTVIZNÍ KAMEROU	36
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
7.1 Žárový nástřik	37
7.2 Anodická oxidace	40
7.2.1 Výsledky anodizace:	43
7.3 Měření emisivity	46
7.3.1 Výsledky měření emisivity	47
8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	55
9 ZÁVĚRY	59

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

SEZNAM PŘÍLOH

ÚVOD [5]

V dnešním ekonomicky stále náročnějším světě je zapotřebí hledat nové ekologické zdroje energie nebo alespoň zvyšovat účinnost zdrojů již dostupných. Mezi hlavní a dobře známé obnovitelné zdroje patří voda, vítr, slunce, dále pak biomasa, bioplyn a geotermální energie. To jsou zdroje použitelné v podmínkách ČR.

Obnovitelný zdroj s největším potenciálem je u nás vodní energetika. Tyto zdroje však nejsou dostatečně konkurenceschopné, a proto se využívají zatím pouze jako doplněk k výkonným tepelným a jaderným elektrárnám.

Jednou z možností, jak využít obnovitelný zdroj energie, je instalace solárního kolektoru (obr. 1). Ten pomocí tzv. fototermální přeměny mění dopadající sluneční záření na tepelnou energii. Zařízení je tak schopno v klimatických podmínkách ČR ročně vyprodukovat přibližně 250-500 kWh/m² a ušetřit tak náklady na ohřev vody a vytápění. Solární kolektory nabízejí v porovnání s fotovoltaickými články až pětinasobnou účinnost a tím i vyšší návratnost, která se dnes pohybuje kolem jednoho roku.



Obr. 1 Plochý solární kolektor [5].

1 SOLÁRNÍ KOLEKTORY [1, 17, 20, 25, 28]

Solární kolektory jsou zařízení pohlcující sluneční záření, které následně přeměňují na tepelnou energii. Ta je předávána teplotonosné látce protékající kolektorem a dále využívána např. pro ohřev vody, vzduchu atd.

Přeměna energie slunečního záření v tepelnou energii patří mezi nejjednodušší využití slunečního záření. Proces se nazývá fototermální přeměna a spočívá v absorpci záření na povrchu tuhých látek a kapalin, kde se energie dopadajících fotonů mění v teplo neboli pohyb molekul.

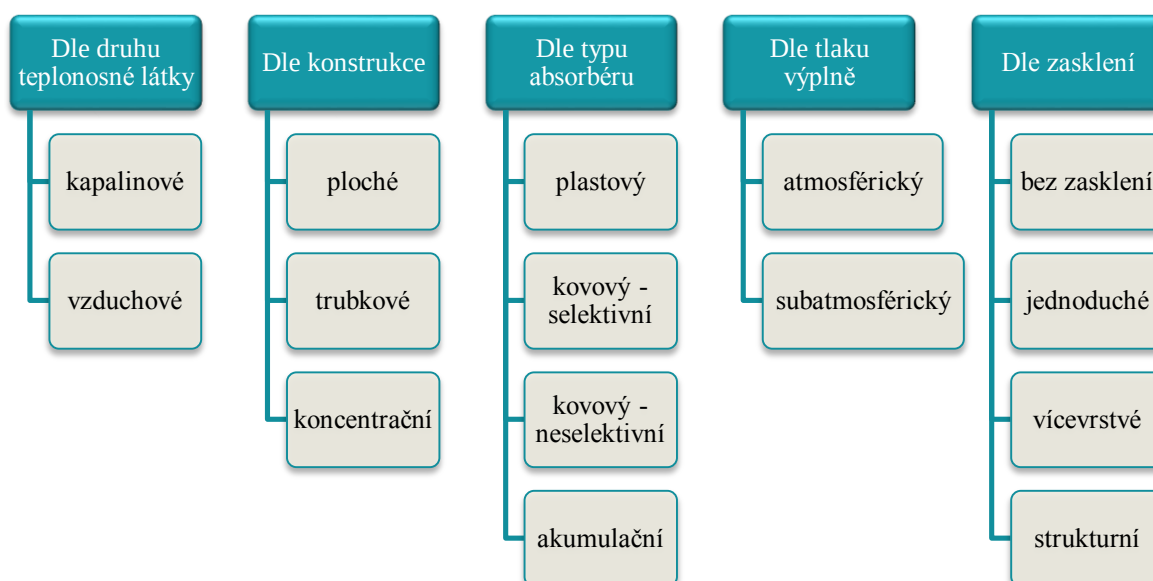


Obr. 2 Schematický řez solárním kolektorem [28].

Důležité části kolektoru (obr. 2):

- Tmavý, sluneční energii pohlcující povrch absorbéru, jenž přenáší pohlcenou energii do teplotonosné látky.
- Kanálková soustava odvádějící tepelnou energii z povrchu absorbéru teplotonosnou látkou (nemrznoucí směs, voda), nejčastěji ve formě trubkového registru.
- Ochranná část, která nebrání průchodu slunečního záření nad povrchem absorbéru a zároveň snižuje ztráty tepla konvekci.
- Tepelná izolace na zadní části a bocích kolektoru, která snižuje ztráty kondukci.

Rozdělení kolektorů:



1.1 Konstrukce kolektoru [1, 17, 20, 25]

➤ Absorbér

Energie elektromagnetického vlnění dopadající na těleso se dělí na tři části: odraženou, pohlcenou a část, která tělesem projde (viz obr. 3). Dále je však nutné počítat také s energií, kterou těleso samo o sobě vyzařuje a jejíž intenzita je funkcí jeho teploty.

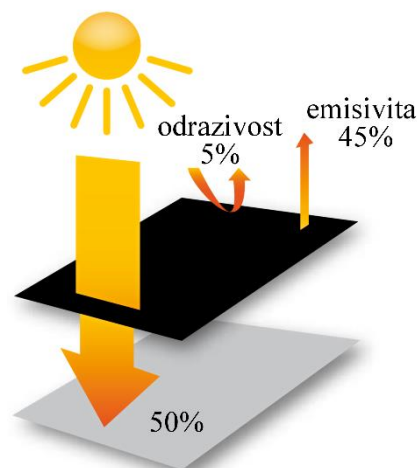
Jelikož je u kovů podíl elektromagnetického vlnění, které tělesem prochází nevýznamný, zavádíme jen 2 podíly energie dopadající na těleso. Poměrnou odrazivost ρ a poměrnou pohltivost α . Při zanedbání zmíněné propustnosti platí $\rho + \alpha = 1$ pro všechny vlnové délky, ale poměr $\alpha : \rho$ se s délkou vln významně mění, stejně jako při rozdílné jakosti povrchu.

U soustav pro přeměnu slunečního záření na teplo jsou vrchní vrstvy tvořeny materiálem o vysoké pohltivosti záření o vlnové délce 0,3–2,5 μm . Posuzuje se u nich poměr hodnot koeficientu pohltivosti α a emisivity ε . Je požadováno, aby α byla vysoká pro délky 0,3–2,5 μm a emisivita nízká v oblasti vlnových délek nad 2,5 μm .

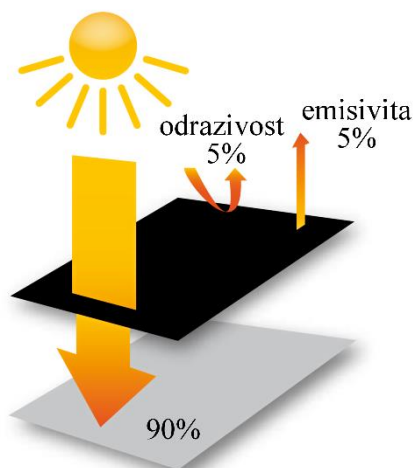
Poměr $\alpha : \varepsilon$ vyjadřuje vhodnost pro toto využití a nazývá se selektivitou. Pro výrobu selektivních povrchů se používají některé kovy jako ocel, Cr, Al, Ni, Cu nebo jejich sloučeniny a slitiny Ni-Zn-S, Ni-Cd, Ni-Co, zpravidla vylučované galvanicky, případně povrchově a chemicky upravené pro zvýšení hodnot α (u Ni se používá moření v HNO_3 u Cu roztok NaOH a NaClO_2). Tak se dosahuje hodnot α 0,9–0,95 a ε 0,1–0,17.

Absorbér bývá vyroben ve formě lamel nebo jako celoplošný. U plochých solárních kolektorů je pro konstrukci zásadním parametrem součin tepelné vodivosti absorbéru a jeho tloušťky, který významně ovlivňuje účinnost. Čím nižší je tepelná vodivost absorbéru, tím větší musí být jeho tloušťka. Pro zajištění maximální účinnosti se používají absorbéry vyrobené z kovů s vysokou tepelnou vodivostí o tloušťce několika desetin milimetru (Cu – 0,2mm; Al – 0,3mm). V případě použití plastových absorbérů je nutné použít tloušťku absorpčního povrchu v řádech několika mm.

Běžný povrch



Selektivní povrch



Obr. 3 Srovnání selektivního povrchu s běžným nátěrem [1].

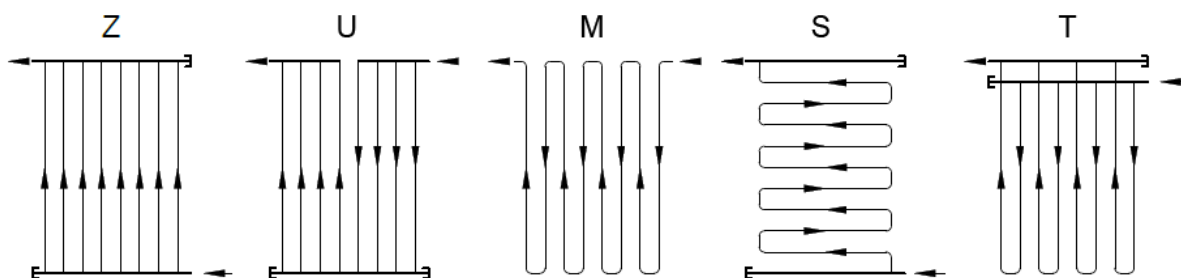
➤ Odvod tepla z absorberu

Druhy chladičů: -trubkový registr

-plně průtočná soustava

-výparník tepelné trubice

Nejčastějším provedením chladiče absorberu je trubkový registr. Jedná se o síť potrubí ve tvaru meandru, lyry, U-registrů nebo jejich kombinací. Aby docházelo k rovnoměrnému odvodu tepla ze všech částí absorberu, je nutné mít registr hydraulicky vyvážen. Při špatném vyvážení se místa s horším odvodem tepla přehřívají a snižují tak účinnost využití sluneční energie v kolektoru.



Obr. 4 Typy registrů [17].

Dobré zatékání teplotnosné kapaliny v kolektorovém poli zajišťuje především serpentinový typ registru S (viz obr. 4), který má sice vysokou tlakovou ztrátu, ovšem v případě zapojení více kolektorů do pole se již tato ztráta významně nezvyšuje a zároveň zajišťuje vysokou hydraulickou stabilitu. Těchto druhů registru je možné zapojit paralelně až 10ks. U konfigurace typu Z a T se možný počet kolektorů v jednom poli pohybuje kolem 6 ks. Typy U a M nejsou vhodné pro zapojování do polí s více jak 3 kolektory, neboť sériové zapojení zvyšuje tlakové ztráty celého pole nad 50 kPa.

Účinnost odvodu tepla z absorberu je dána:

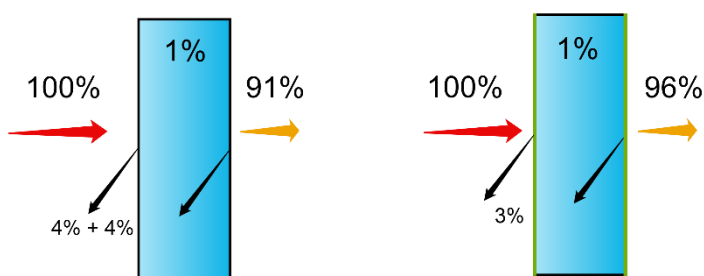
- tepelnou vodivostí absorpční plochy a vzdáleností míst pro odvod tepla
- tepelným odporem spoje
- tepelným odporem vůči přestupu tepla z vnitřního povrchu stěny trubky do pracovní látky
- tepelným odporem stěny trubky

➤ Zasklení kolektoru

Zasklení slouží především pro snížení tepelných ztrát absorberu a ochraně proti vnějším vlivům. Na druhé straně snižuje množství sluneční energie dopadající na absorber odrazem na jednotlivých fázových rozhraních a pohlcením ve vlastním materiálu zasklení. Pro efektivní využití sluneční energie je tedy nutná dostatečná propustnost v oblasti vlnových délek slunečního záření. Z tohoto důvodu se používají skla s nízkým obsahem oxidu železa, které pohltí méně než 1% slunečního záření.

Významnější jsou ztráty na fázovém rozhraní vzduch-sklo. Tyto ztráty odrazem jsou dány rozdílem mezi indexem lomu materiálu zasklení a okolního prostředí. Pro maximální efektivitu se na zasklení aplikují antireflexní povlaky (viz obr. 5).

Antireflexními povlaky mohou být porézní tenkovrstvé povlaky na bázi SiO_2 nebo TiO_2 s indexem lomu pod 1,3 a tloušťkou pod 100nm. Běžné antireflexní povlaky při aplikaci na obou površích zasklení zvyšují propustnost slunečního záření jednoduchého zasklení o 4–5%.



Obr. 5 Změna vlastností použitím antireflexní úpravy [17].

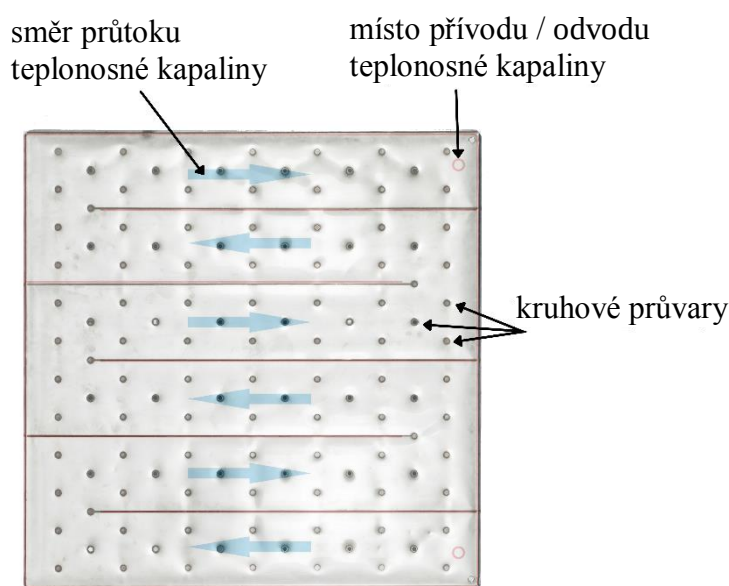
Mezi nejčastější typ zasklení patří jednoduché zasklení, které vymezuje vzduchovou mezeru před absorberem. Tímto zasklením uniká z kolektoru až 75% tepla, neboť další strany jsou tepelně izolovány. Tepelný odpor zasklení lze zvýšit jeho znásobením či rozdělením vzduchové vrstvy. Na druhé straně se ovšem sníží propustnost sluneční energie.

➤ Skříň kolektoru

Skříň vytváří vnější obal solárního kolektoru a chrání jej před nepříznivými vlivy. Je nosnou konstrukcí pro jednotlivé části kolektoru. Bývá vyrobena utěsněná nebo s větracími otvory pro odvod vlhkosti. Zadní a boční strany skříně jsou zaizolovány materiálem odolným proti vysokým teplotám, které se mohou v kolektoru vyskytnout. Tímto materiálem bývá minerální vlna či polyuretanová pěna.

1.2 Vývoj [20]

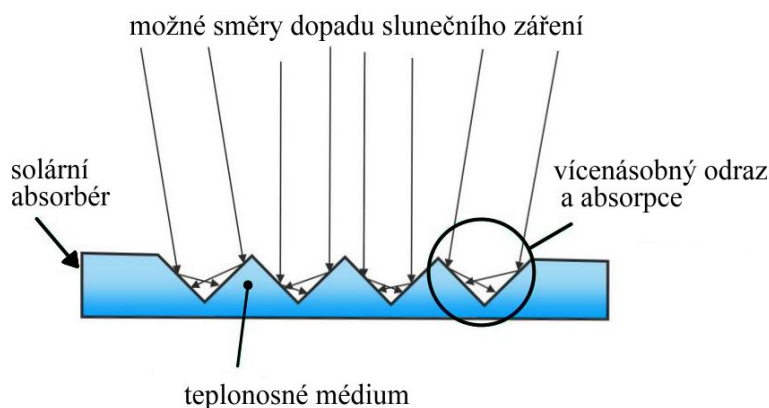
V současné době je vyvíjen nový typ absorberu (viz obr. 6), jehož základem je tzv. podušková struktura. Ta vzniká průvarem dvou plechů a následným vydutím kapalinou pod vysokým tlakem. Teplonosná kapalina je tak v kontaktu s takřka celým povrchem absorberu a tím je minimalizován odpor přestupu tepla mezi absorberem a kapalinou. Vzhledem k použitým technologiím svařování a tváření je použita korozivzdorná ocel ČSN EN X5CrNi18-10 (17 240). Rozměry absorberu jsou 1000x1000mm s objemem 3–4 litry.



Obr. 6 Poduškový absorber.

Během svařování je použit speciální upínací přípravek, zajišťující dokonalý kontakt svařovaných plechů. Využívá se při tom průmyslový vláknový laser o výkonu 2000 W se svařovací hlavou Precitec YW30. Systémem řízených svarů lze vytvářet požadovaný průtok teplosměnného média, měnit průtočnou délku, tlakovou ztrátu, hydraulický odpor a odolnost absorberu vůči přetlaku (běžně přetlak cca 2 bary). Právě pro zvýšení odolnosti vůči přetlaku jsou na absorberu zhotoveny kruhové průvary.

Pro další zvýšení účinnosti absorberu se experimentuje s vícenásobným odrazem slunečního záření v jehlancovité či kuželové struktuře (viz obr. 7), která v porovnání s rovinným povrchem vykazuje vyšší účinnost.



Obr. 7 Princip vícenásobného odrazu a absorpce [20].

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU [13, 15, 16, 32, 33, 36, 41]

Solární kolektory o rozměrech 1000 x 1000 mm jsou umístěny na místě s nejpříznivějším slunečním dopadem na budově. V současném stavu je absorbér, popsáný v kapitole 1.2, opatřen komerčním nátěrem Rabsorb5, který se však ukázal jako ne zcela vyhovující. Po delším časovém intervalu můžeme, vlivem vyšších teplot a solárního záření, pozorovat na povrchu defekty. Jde především o nízkou adhezi nátěru k podkladovému materiálu a následné sloupávání povlaku. Součástí této práce je experiment, při kterém bude vyroben a otestován vhodnější povrch pro tento účel.

2.1 Možnosti výroby povrchu pro solární absorbér [13, 15, 16, 32, 33, 36, 41]

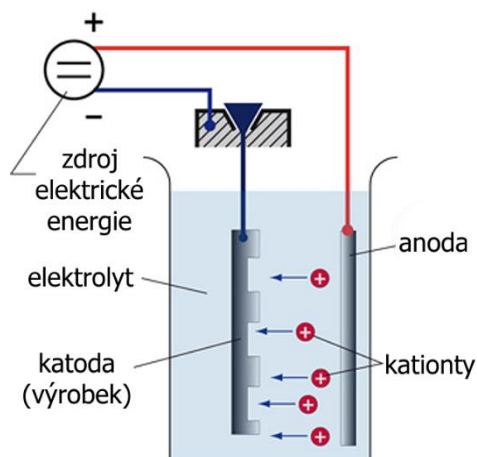
Existuje několik způsobů, jak vytvořit spektrálně selektivní povrch, o kterém bude psáno dále v kapitole 3. Jedná se především o:

- Vakuové pokovování. Metoda, při které dochází k napařování kovů na základní materiál za velmi nízkých tlaků (10^{-4} – 10^{-2} Pa) ve vakuovacím stroji (viz obr. 8). Odpařovaný kov, nejčastěji ve formě drátu, je umístěn na výparníku z vysokotavitelného kovu, nejčastěji W, Ta, Mo, ve tvaru vlákna či lodičky. Předměty musí být umístěny ve vzdálenosti menší, než je volná dráha molekul par kovu. Nejčastěji se nanáší hliník, lze však nanášet i další kovy jako Co, Ni, Fe. Dosahované tloušťky vrstvy při pokovení jsou 0,1 až 1 μm . Struktura vrstev a jejich vlastnosti závisí na kvalitě vakua.



Obr. 8 Zařízení na vakuové pokovení [13].

- Galvanické pokovování. Jedná se o nejrozšířenější elektrolytický děj, během kterého se na požadovaném předmětu zapojeného jako katoda, elektrochemicky vyloučí povlak z rozpuštěné anody, viz princip metody na obr. 9. Jako anoda se používá především zinek, nikl, cín. Celý proces probíhá v alkalické lázni – elektrolytu. Tloušťka povrchu je až 25 μm .



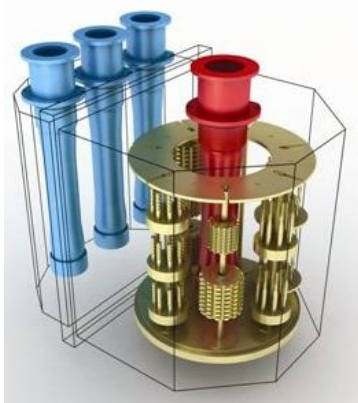
Obr. 9 Princip galvanického pokovení [13].

- CVD technologie. Chemická depozice vrstev je metoda výroby povlaků o tloušťce 5–20 μm. Materiál povlaku je nanášen v komoře (viz obr. 10) pomocí pracovního plynu tzv. prekursoru při teplotě 700–1100 °C. Ten se rozkládá, případně reaguje s dalšími plyny a vytváří heterogenní reakcí povlak na základním materiálu. Mezi obvykle nanášené materiály patří TiC, TiCN, TiN, Al₂O₃. Výhodou povlaku je vysoká odolnost proti opotřebení, možnost povlakovat nepřístupné dutiny a možnost vytvářet poměrně složité vrstvy. Tyto výhody jsou využívány u absorberů nejvyšších kvalit, nelze však přehlédnout nevýhody metody jako jeho energetickou náročnost a ekologicky nevyhovující pracovní směs.



Obr. 10 Řez CVD reakční komorou [15].

- PVD technologie. Na rozdíl od CVD dochází k odpařování/odprašování materiálu z pevného terče. Dále je do zařízení puštěn aktivní plyn reagující s kovovými parami. Ty následně tvoří sloučeniny, které tvoří tenkou přilnavou vrstvu. Proces probíhá ve vakuu za teplot 150–500 °C v povlakovací komoře (viz obr. 11). Lze vytvářet velmi tenké vrstvy Ti, Al, Si, Cr. Jedná se o ekologickou metodu, bez použití toxických látek. Povlak má nízký koeficient tření, velkou odolnost a lze snadno kontrolovat jeho tloušťku.



Obr. 11 Povlakovací komora s rotační válcovou katodou [26].

- Oxidace. Anodická oxidace využívá vysoké afinity hliníku ke kyslíku. Při tomto procesu se využívá stejnosměrného či střídavého proudu, jehož průchodem lázní vhodného složení dochází k disociaci lázně. Na povrchu součásti, zapojené jako anoda, dochází k oxidaci povrchu a v případě hliníku ke tvorbě stabilní porézní oxidické vrstvy Al₂O₃. Teplota lázně je 15–25 °C, při proudové hustotě 1–2 A/dm². Doba eloxování se pohybuje mezi 10–30 min. Tato technologie umožňuje vytvoření povlaku s širokým rozmezím pracovních podmínek v různých barevných provedeních (viz obr. 12).



Obr. 12 Vzorokly hliníkových trubek po anodické oxidaci [3].

- Nátěrové hmoty. Selektivní nátěry mají potenciál v nízké ceně oproti jiným uvedeným povlakům. Nevýhodou je absorbování infračerveného záření pojivem nátěru a tedy jejich vyšší emisivita, která dosahuje až 80 %. Vhodných výsledků bylo dosaženo s oxidy železa, manganu a mědi a silikonovým pojivem. Kromě objemu tuhých částic a tloušťky má na solární selektivitu vliv i disperze částic v matrici. Mezi prodávané nátěry patří například Solarect–Z, ThurmaloX (viz obr. 13) již zmíněný Rabsorb a SolkoteHI/SORB-IITM.



Obr. 13 Nátěr ThurmaloX [10].

- Technologie žárového nástřiku (viz obr. 14). Metoda využívá zdroj tepla k roztavení materiálu ve formě drátu, tyče nebo prášku. Roztavený materiál je pak unášen směrem k součásti pracovním plynem. Jednotlivé částice dopadají na podklad, na kterém se vlivem tepelné a kinetické energie pevně spojí, opakovanými dopady roztavených částic pak vzniká povlak. Lze nanášet kovy, keramiku, karbidy atd. Tloušťka povlaků bývá v rozmezí 100–750 μm i více. Výhodou technologie je metalurgicky neovlivněný základní materiál, nízká cena a snadná aplikace.

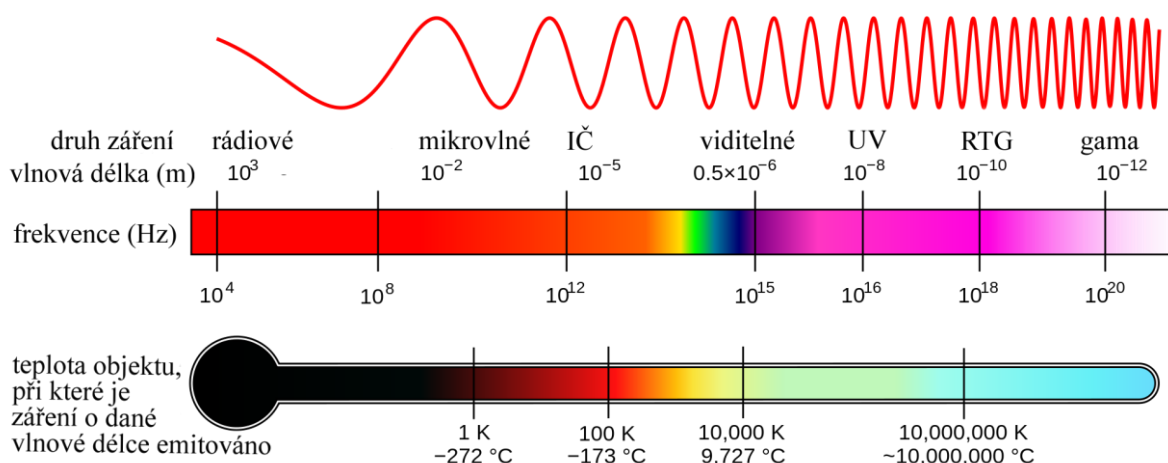


Obr. 14 Žárový nástřik [7].

Z technologických (nutnost použití dobře svařitelného a tvářitelného plechu) a ekonomických důvodů jsme zvolili metodu, při které bude nejprve na základní materiál z korozivzdorného ocelového pásu nanesena vrstva hliníku technologií žárového nástřiku plamenem. Tato vrstva bude dále chemicky upravena anodickou oxidací, během které dojde ke zvýšení odolnosti hliníkového povrchu. Experimentálně bude dále vyzkoušena metoda galvanického pokovení již anodizovaného povrchu niklem a cínem. Tímto by měl být vytvořený povrch odolný proti podmínkám solárního kolektoru a díky vyloučenému niklu/cínu by měl dostatečně absorbovat sluneční záření při nízké tepelné emisivitě a splňovat tak požadovanou spektrální selektivitu.

3 SPEKTRÁLNĚ SELEKTIVNÍ POVRCH [4, 14, 18, 21, 24, 33, 39]

Pro správné pochopení principu spektrálně selektivního povrchu absorberu je nutné znát spektrum slunečního záření a spektrum černého tělesa při dané teplotě. Většina slunečního záření dopadající na zemský povrch se pohybuje v rozsahu vlnových délek mezi 0,3–3 μm. Lidské oko je schopné z celého slunečního spektra zaznamenat pouze jeho viditelnou část, jak lze vidět na rozložení elektromagnetického záření z obr. 15.



Obr. 15 Elektromagnetické spektrum záření [21].

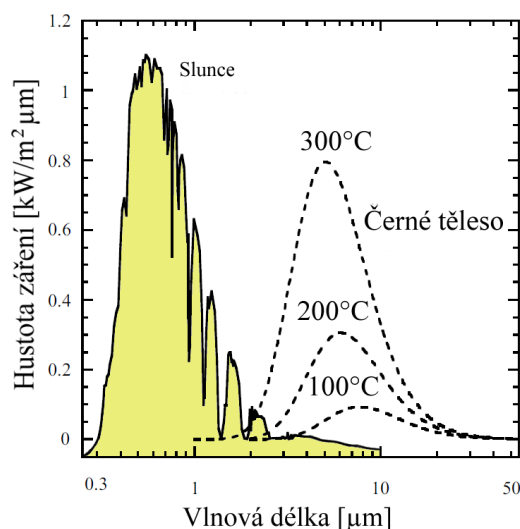
Na obr. 16 je zobrazeno množství slunečního záření dopadajícího na zemský povrch po průchodu atmosférou za daných podmínek podnebí. Ty jsou převzaty z normy ISO pro případ, kdy je slunce 42° nad obzorem. Spektrum se skládá z přímého a difuzního záření, jelikož obě složky přispívají k ohřevu povrchu absorberu.

Solární pohltivost $\alpha_{\text{SOL}}(\lambda, \theta)$ je jedním z parametrů, jenž charakterizuje výkon solárního absorberu. Definuje se jako část dopadajícího záření, při dané vlnové délce, které je absorbováno. Pro neprůhledný materiál může být spektrální absorpce vyjádřena z hlediska celkové odrazivosti $\rho(\lambda, \theta)$ jako:

$$\alpha_{\text{SOL}}(\lambda, \theta) = 1 - \rho(\lambda, \theta) \quad (3.1)$$

kde: λ [μm] ... je vlnová délka

θ [rad] ... úhel dopadajícího slunečního záření na povrch absorberu.



Obr. 16 Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [33].

Pohltivost solárního záření se poté získá poměrem spektrální absorpce k množství záření dopadající na absorber pod daným úhlem. Je tedy dána integrací přes vlnovou délku v závislosti na solárním spektru $G(\lambda)$:

$$\alpha_{\text{SOL}}(\theta) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [1 - \rho(\lambda, \theta)] \cdot G(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G(\lambda) d\lambda} \quad (3.2)$$

kde: λ_1 [μm] je horní vlnová délka dopadajícího slunečního záření.

λ_2 [μm] je dolní vlnová délka dopadajícího slunečního záření

Jelikož spektrum černého tělesa slunce a sluneční záření na povrchu země nejsou stejné, nemůžeme použít spektrum ideálně černého tělesa slunce pro výpočet absorpce povrchu absorberu.

Solární odrazivost se měří v rozmezí $0,3\text{--}3\mu\text{m}$ pro kolmý úhel dopadu, za použití standartních spektrofotometrů (viz obr. 17). Při šikmém dopadu záření, musí být pohltivost solárního záření absorbérem modifikována pomocí modifikátoru úhlu dopadu.



Obr. 17 Spektrofotometr Photolab 6000 [39].

Optické vlastnosti reálného tělesa v infračerveném rozsahu vlnových délek ($0,75\mu\text{m}\text{--}1\text{mm}$) jsou charakterizovány jako množství vyzařeného tepla v porovnání s ideálním černým tělesem. Obr. 16 ukazuje spektrum černého tělesa ve třech rozdílných teplotách, vypočítané z Planckova zákona. Se vzrůstající teplotou roste celkové množství záření.

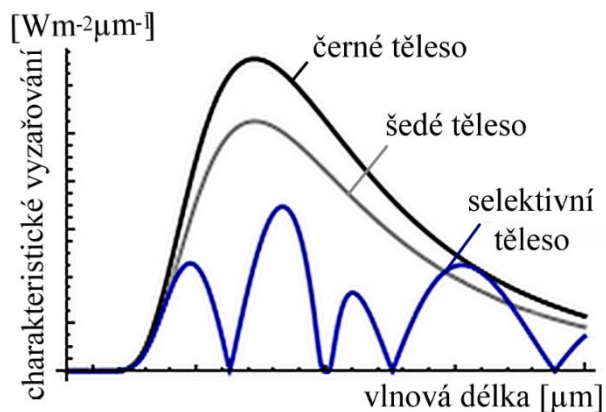
Spektrum černého tělesa pro teploty od 50° do 100°C a spektrum solárního záření se nepřekrývají v žádném rozsahu vlnových délek, jak naznačuje obr. 16. Z tohoto důvodu je tedy možné navrhnout povrch, absorbující maximální možné množství z dopadajícího slunečního záření, který nebude absorbovanou energii opětovně vyzařovat. Ideální spektrálně selektivní povrch má tedy v oblasti solárního záření minimální odrazivost a v oblasti infračerveného záření minimální emisivitu.

3.1 Emisivita [4, 24, 33]

Emisivita povrchu je definována jako poměr záření z daného povrchu k množství záření vyzařeného z absolutně černého tělesa při stejné teplotě. Černé těleso je ideální těleso, jenž pohlcuje veškeré záření. Spektrální rozložení intenzity vyzařování černého tělesa je dáno Planckovým zákonem. Emisivita je závislá na teplotě, vlnové délce a směru záření.

Jak můžeme zjistit z přílohy č. 1, emisivita Al_2O_3 se výrazně mění s teplotou. Pro naše použití se však bude reálný povrch nacházet v oblasti teplot do 100°C . V tomto rozmezí se emisivita blíží konstantním hodnotám, a proto k němu budeme přistupovat jako k reálně šedému povrchu.

Z hlediska závislosti emisivity na vlnové délce (viz obr. 18), rozlišujeme povrchy selektivní, viz kapitola 3, reálně šedé a šedé. U šedých povrchů není emisivita závislá na vlnové délce záření. Reálně šedé povrchy v podstatě neexistují, jelikož se všechny povrchy chovají jako selektivní. Některé se však velmi přibližují k záření dokonale šedého tělesa, a proto je označujeme jako reálně šedé.



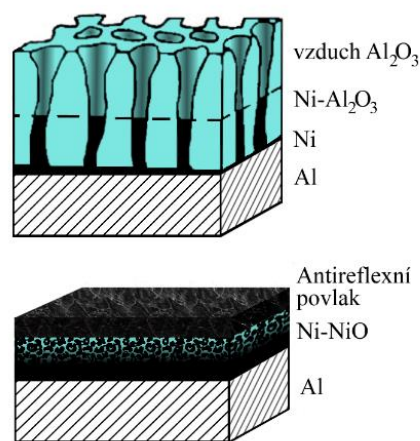
Obr. 18 Porovnání povrchů z hlediska emisivity [4].

Jelikož se jedná o vlastnost materiálu, emisivita závisí také na typu měřeného materiálu (plast, kov, polovodič...), chemickém složení, struktuře a stavu povrchu.

3.2 Typy selektivních povrchů [14, 18, 33]

Nejběžnější typ selektivního povrchu a také komerčně nejpoužívanější je vytvořen spojením dvou materiálů. Jeden s vysokou pohltivostí solárního záření a druhý s nízkou emisivitou infračerveného záření.

- Přírozené. Jedná se o materiály, které jsou selektivní již v jejich základní formě. Jde především o boridy, karbidy a silicidy, ovšem ani nejlepší z nich nedosahuje požadovaných vlastností účinného selektivního povrchu. Např. ZrB_2 má solární absorpci 77 % zatímco tepelná emisivita při 100°C je 8 %.
- Polovodičové. Selektivní zdvojené povlaky, kde polovodič absorbuje vlnové délky menší než šířka zakázaného pásma „bandgap“, zatímco kovový podklad má nízkou tepelnou emisivitu. K získání maximální absorpce slunečního záření musí mít polovodič co nejmenší index lomu. Toho lze docílit pomocí další antireflexní vrstvy, přičemž vznikne vícevrstvý povrch. Jedná se např. o oxidy germania na měděném podkladu. Tento povrch má absorpci 85 % s emisivitou 7,3 % při teplotě 500°C.
- Vícevrstvé. Jsou založeny na ovlivnění vlastností mezi vrstvami z rozdílných materiálů. Např. lze uvést vrstvy Al_2O_3 a Mo, které dosahují absorpce 91 % a emisivity 16 % při teplotě 538°C.
- Strukturované povlaky. Selektivní povrch může být vytvořen aplikací vhodné struktury na povrchu vysoce odrážejícím sluneční záření. Zdrsňený povrch absorbuje záření pomocí vícenásobného odrazu a absorpce. Pro větší vlnové délky je povrch relativně hladký, vyzařuje tedy zpětně pouze málo energie. V praxi se používá např. dendritická struktura rhenia, wolframu a niklu vyrobená metodou CVD nebo textura mědi a niklu vyrobená leptáním na nerezové oceli. Dalším typem je slitina Al-Si, nanesená odpařováním jejich složek pomocí elektronového paprsku na skleněný podklad vyleptaný v NaOH vytvoří nepravidelně texturovaný povrch. Tento povrch je vlivem leptání fáze hliníku tmavý.
- Kompozitní povlaky. Jedná se o povrchy, vytvořené z malých kovových částic zalitých v dielektrické matrici, nanesené na základní materiál, odrážející infračervené záření. V závislosti na tloušťce povlaku, množství částic kovu, jejich tvaru a optických vlastností jednotlivých složek lze optimalizovat propustnost a tak i absorpci solárního záření. Např. cermet z Molybdenu a SiO_2 má absorpci slunečního záření 94 % a emisivitu infračerveného záření kolem 13 % při 580°C. Typická tloušťka povlaku se pohybuje od 0,5–1,0 μm , lze vytvořit i povlaky o větší tloušťce s menším obsahem kovových částic, ovšem s větší emisivitou.



Obr. 19 Schéma kompozitních povlaků [33].

Na obr. 19 je znázorněn schématický průřez dvěma kompozitními povlaky. Jeden s odstupňovanou mikrostrukturou a druhý s rovnoměrně rozmístěnými částicemi v matrici. V obou případech plní horní vrstva antireflexní úlohu a snižuje tak index lomu. U plochých solární kolektorů se běžně používají dielektrické absorbéry s povrchem z $Mo-Al_2O_3$, Ni-NiO nanášené naprašováním.

4 TECHNOLOGIE ŽÁROVÝCHNÁSTŘÍKŮ [2, 23, 25, 34]

Nanášení roztavených kapiček kovů a slitin na různé součásti je metoda známá již od začátku 20. století. Optimální technologií vytváření povlaků jsou různé způsoby žárového nástřiku, charakterizované tepelně mechanickým procesem. Přídavný materiál ve formě jemných natavených částic kovu či nekovu s dostatečnou kinetickou energií se přenese na předem připravený povrch základní součásti, kde po ztuhnutí tvoří příslušný povlak. Teplota součásti v místě nástřiku zůstane hluboko pod teplotou tavení a zpravidla nepřesáhne teplotu 150°C.

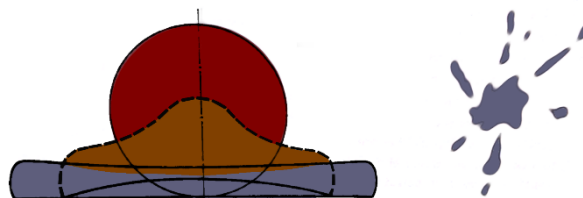
Hlavní výhodou žárově nanášených povlaků je velmi široká škála přídavných materiálů a jejich nanášení bez vysokého tepelného příkonu. To umožňuje použít i materiály s vysokým bodem tání jako např. wolfram na jemně obrobené materiály bez tepelného ovlivnění a deformací tvaru. Ve většině případů lze nástřik po opotřebení odstranit a znovu nanést na původní podklad. Nelze však nanášet povlak do malých hlubokých otvorů, dále je nutné povlakovanou součást natáčet, pro přímý dosah stříkácí pistole.

4.1 Proces a vlastnosti nástřiku [2, 23, 25, 34]

Proces žárového nástřiku lze rozdělit do těchto fází:

1. Vznik a stabilizace tepelného zdroje, přívod přídavného materiálu.
2. Interakce zdroje tepla s částicemi přídavného materiálu, přičemž se část energie do těchto částic přenáší.
3. Ukládání částic přídavného materiálu na předem připravený povrch součástí, při kterém se tepelná a kinetická energie částic přenáší na součást.

Z hlediska vzniku a vlastností povlaků je nutné věnovat pozornost dopadu letící kapky materiálu na povrch podložky a interakci s ní (viz obr. 20). Při nárazu letící roztavené částice na povrch součásti se její kinetická energie mění na tepelnou a deformační, část tepla se předá podložce v místě styku, částice se rychle ochlazuje a tuhne. Kinetická energie vyvolá změnu tvaru letící kapky na plochý disk o malé tloušťce, způsobí tlakovou vlnu a rozstříknutí materiálu.



Obr. 20 Schéma deformace dopadající kapky materiálu [23].

Při dopadu kapičky nanášeného materiálu se tvoří tenká vrstva či lamela nazývaná splat, která ulpí na podkladu. Ztuhlé kapičky se na sebe rychle vrství část po části, což lze vidět na obr. 21, až do vzniku souvislé vrstvy povlaku. Jednotlivé splaty jsou tenké cca 1-20 μm a ochlazují se rychlostí nad 106 K s⁻¹ (platí pro kovy) za vzniku jednotného, jemně zrnitého a polykrystalického povlaku.

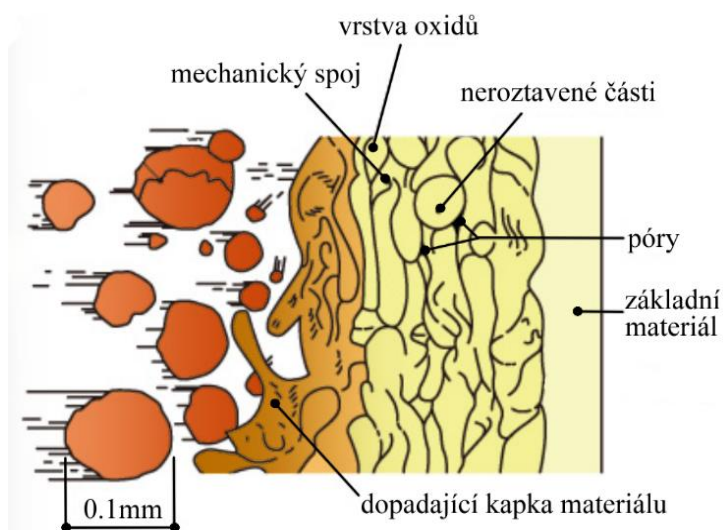
Jak znázorňuje obr. 22, stříkané povlaky nejsou homogenní a obsahují určitý stupeň poréznosti, běžně mezi 0 - 10 %, neroztavené či částečně natavené částice, metastabilní fáze a oxidy. Oxidy zde mohou být užitečné, neboť zvyšují tvrdost a odolnost proti opotřebení povlaku.



Obr. 21 Detail struktury povlaku [2].

Na druhou stranu může nadměrné množství oxidů vést od snížení odolnosti proti korozi až po selhání soudržnosti povlaku. Proto je třeba vždy správně vybrat materiály a parametry zpracování, které umožní výrobu struktury přijatelné pro danou aplikaci.

Vstupní surovina je obvykle v práškové formě. V případě použití tyče či drátu mohou vznikat vlivem nerovnoměrného ohřevu také nerovnoměrně velké částice roztaveného materiálu. S tím souvisí i nerovnoměrné smykové síly odtrhující kapičky materiálu z tyče / drátu.



Obr. 22 Znáznornění povlakové vrstvy [34].

Mezi faktory ovlivňující termicky nanášené povlaky patří příprava povrchu, použité povlakové materiály, použitá technologie a dodatečné zpracování nástřiku (tepelné/mechanické zpracování)

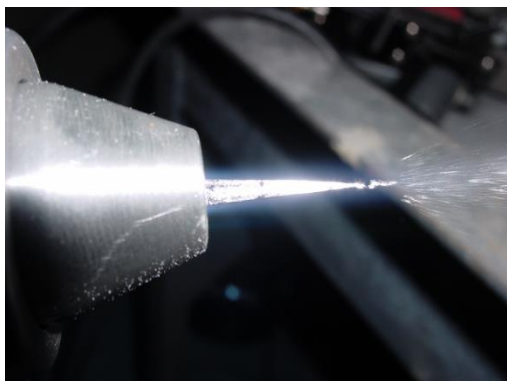
4.2 Metody žárových nástřiků

4.2.1 Nástřik plamenem [2, 6, 19, 23, 42]

Při žárovém nástřiku plamenem (viz obr. 23) se používá jako zdroj tepla kyslíko-acetylenový plamen dosahující teploty až 3200K, což omezuje rozsah použitelných přídavných materiálů. Teplota závisí na poměru vstupních plynů. Přídavné materiály mohou být ve formě prášku, drátu či tyčinek. Materiál se přivádí do plamene, kde se taví (viz obr. 24) a dynamickým účinkem



Obr. 23 Žárový nástřik plamenem [19].



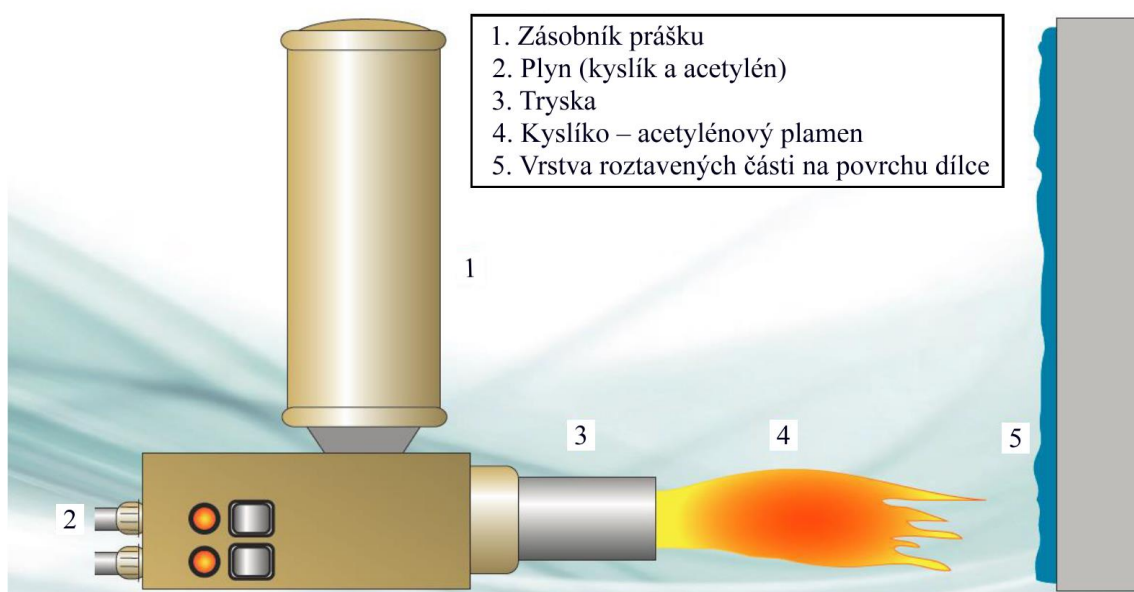
Obr. 24 Tavení přídavného materiálu [42].

plamene se nanáší na povrch součásti. Zařízení je provozně spolehlivé a jednoduché konstrukce, jak lze vidět na obr. 25 znázorňující schématické rozmístění jednotlivých částí zařízení. Povrchová teplota podkladu může být relativně vysoká (95–205°C), z důvodu nadměrného vstupu energie potřebné pro tavení. Ve většině metod žárového nástřiku se ve skutečnosti pro roztavení přídavného materiálu používá méně než 10 % vstupující energie.

Dopadová rychlost = cca 80ms⁻¹ / při použití stlačeného vzduchu až 200ms⁻¹

Výkon = 10 kg/h

Adheze max. 20MPa



Obr. 25 Schéma nástřiku plamenem [6].

4.2.2 Nástřik elektrickým obloukem [2, 6, 19, 23]

Zdrojem tepla je elektrický oblouk mezi dvěma přídavnými materiály ve formě drátu. Z principu této metody (viz obr. 26) je přídavný materiál omezen na elektricky vodivé kovy a slitiny. Teplota elektrického oblouku dosahuje až 5000K, což dostačuje pro natavení všech významných kovů a slitin nanášených touto metodou. Proud vzduchu vhání roztavený kov směrem k podkladu (viz obr. 27). Tento proces je energeticky efektivní a z žárových metod nanášení povlaků nejvýkonnější, neboť veškerá vstupní energie je použita k tavení materiálu. Jelikož na podklad nesměřuje žádný proud horkého plynu, jeho teplota bývá nízká. Tato technologie může být navíc provedena pod inertními plyny.

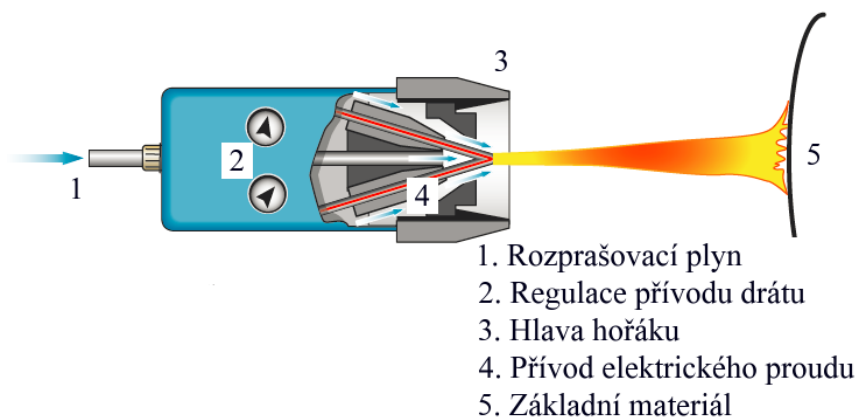


Obr. 26 Nástřik elektrickým obloukem [19].

Dopadová rychlost = $150\text{--}200\text{ms}^{-1}$

Výkon nanášení = $4,5\text{kg}/100\text{A/h}$

Adheze = $10\text{--}20\text{MPa}$



Obr. 27 Schéma nástřiku elektrickým obloukem [6].

Dále uváděné metody jsou výčtem možností této technologie, avšak pro jejich vlastnosti se nehodí k nanášení zvoleného materiálu. Pro účel diplomové práce byla zvolena metoda žárového nástřiku plamenem z důvodu nízké teploty tavení hliníku, jednoduchosti metody a finančním nárokům.

4.2.3 Nástřik plazmou [6, 19, 23, 25]

Zdrojem tepla je plazmový oblouk, jehož teplota dosahuje až 30000K (běžně 5000-11000K). Umožňuje tak natavení jakéhokoli typu přídavného materiálu. Přídavný materiál se používá vesměs ve formě prášku. Čas setrvání prášku v plazmě je velmi krátký – 10^{-4} až 10^{-2} s a rychlost pohybu natavených částic prášku je přímo úměrná rychlosti plazmového paprsku. Zařízení pracují na principu stabilizovaného oblouku plynem nebo vodou (viz obr. 28).



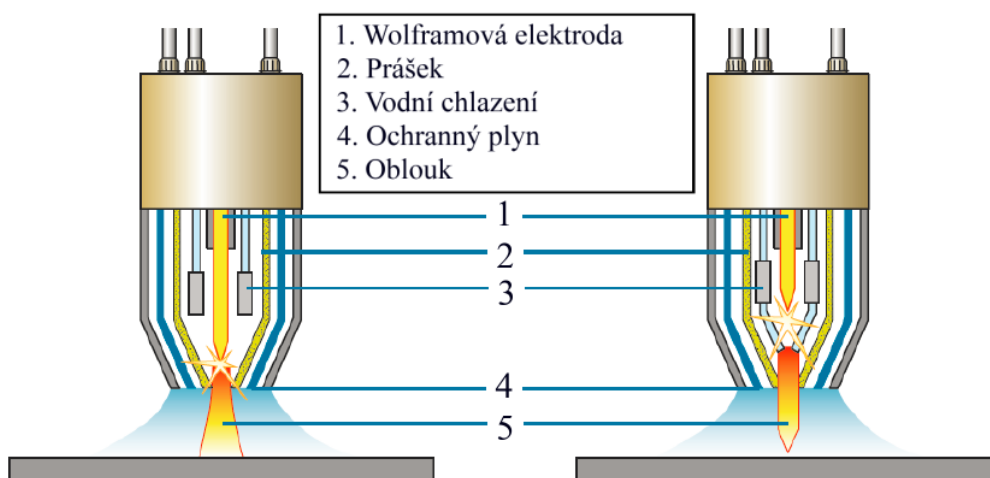
Obr. 28 Proces plazmového nástřiku [19].

U plynem stabilizovaných hořáků se používá Ar, H a He, u kapalinou stabilizovaných hořáků se používá upravená voda. Proces s plynovou stabilizací umožňuje nástřik oxidovatelných materiálů, zatímco proces s kapalinou stabilizací se používá pro materiály nepodléhající oxidaci v plazmatu (keramika). Technologie se nejčastěji používá v kombinaci s robotizovaným pracovištěm umožňujícím přesnou a bezpečnou manipulaci s hořákem (viz obr. 29).

Dopadová rychlost = $200\text{--}300\text{ms}^{-1}$

Výkon nanášení = $20\text{--}30\text{kg/h}$ pro vodní stabilizaci/ $3\text{--}4\text{kg/h}$ pro plynovou stabilizaci

Adheze = 35MPa pro vodní stabilizaci/ 70MPa pro plynovou stabilizaci



Obr. 29 Schéma nástřiku plazmou [6].

4.2.4 Nástřik detonací [23, 25]

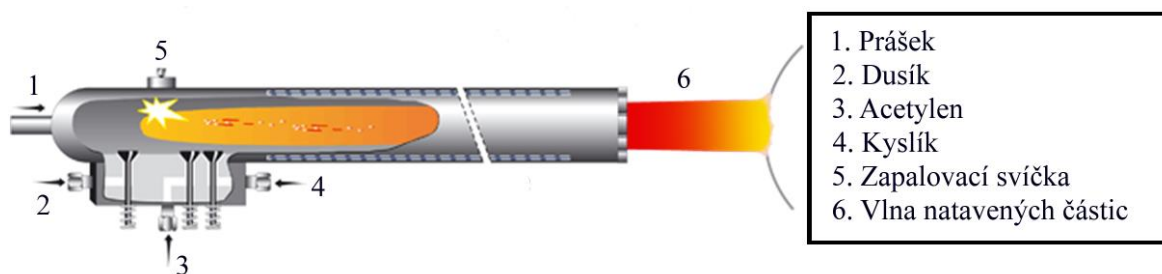
Princip využívá energie stlačené detonační vlny, která vzniká explozí směsi hořlavého plynu (C_2H_2) a kyslíku. Směs, přivedena pod tlakem čtyřmi tryskami do spalovací komory, je zažehnuta spalovací svíčkou. Trysky koncentrují plamen a umožňují středový přívod práškového materiálu v nosném plynu dusíku. Expandující proud hořícího plynu je veden uvnitř hořáku chlazeného vodou, spolu s unášeným práškem kde dosahuje nadzvukové rychlosti (viz obr. 30).

Plamen dosahuje teploty až 3000K. Frekvence detonačních vln se pohybuje v závislosti na požadované tloušťce a typu povlaku v rozmezí 1–10 vln/s. Komora se na konci cyklu proplachuje dusíkem, aby se odstranily zbytky rozžhavených prachových částí, které by mohly způsobovat nepravidelné zažehnutí.

Dopadová rychlost = $500ms^{-1}$

Adheze = do 120MPa

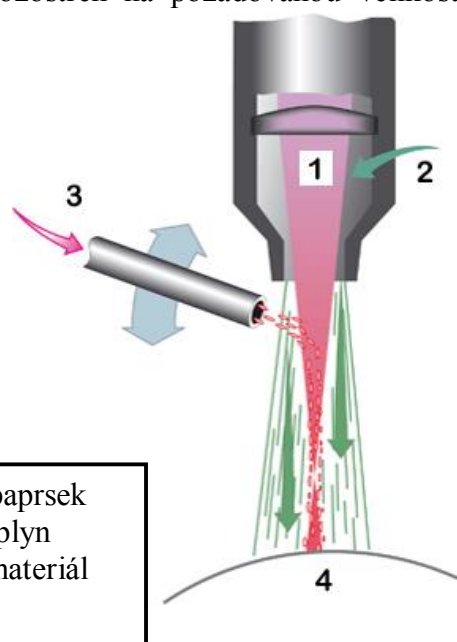
Výkon = 10kg/h



Obr. 30 Schéma nástřiku detonací [25].

4.2.5 Nástřik laserem [25, 38]

Při této metodě je laserový paprsek na součásti rozstřen na požadovanou velikost, přídavný materiál ve formě prášku či drátu je unášen skrze trysky inertním plynem do laserového paprsku, který směřuje na metalizovanou součást. Prášek pohlcuje energii z laserového paprsku, za letu se taví a usazuje na povrchu součásti, jak ukazuje obr. 31. Část energie z laseru je absorbována povrchem a způsobuje kontrolované tavení tenké vrstvy základního materiálu. Tím je zaručena metalurgická vazba mezi povlakem a součástí a minimální porosita. Toto zředění dvou materiálů musí být však co nejmenší, aby byly zachovány vlastnosti nanášeného materiálu, kvůli kterým je proces prováděn.



Obr. 31 Schéma nástřiku laserem [38]

4.2.6 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF) [6, 19, 25]

Jedná se o nejmodernější metodu nástřiku, kde zdroj tepla - směs kyslíku a kerosinu. Kyslík a kerosin je axiálně napouštěn do spalovací komory kde dojde k jejich zažehnutí od zapalovací svíčky. Spaliny jsou pak urychlovány na nadzvukové rychlosti.

Materiál ve formě prášku se spolu s nosným plynem (dusíkem) přivádí radiálně do difuzoru, kde dochází k natavování a přes trysku urychlení k povlakovanému povrchu, jak znázorňuje obr. 33 či reálný příklad na obr. 32. Termodynamické děje v proudu spalín vedou ke vzniku expanzních a kompresních vln, tzv. šokových diamantů, které lze spatřit v plameni vycházejícím z hořáku.



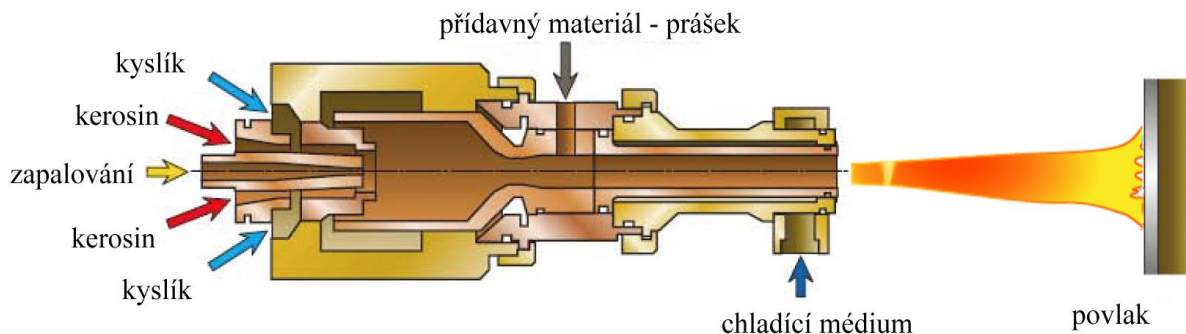
Obr. 32 Příklad povlakování metodou HVOF [19].

Relativně nízká teplota plamene znemožňuje nástřik keramických povlaků. Na rozdíl od jiných technologií žárových nástřiků tato metoda vytváří povlaky s tlakovým pnutím, které významně zvyšují přilnavost nástřiku k podkladu.

Dopadová rychlost = $600\text{--}1000\text{ms}^{-1}$

Přilnavost povrchu = do 80MPa

Výkon = 3–6kg/h

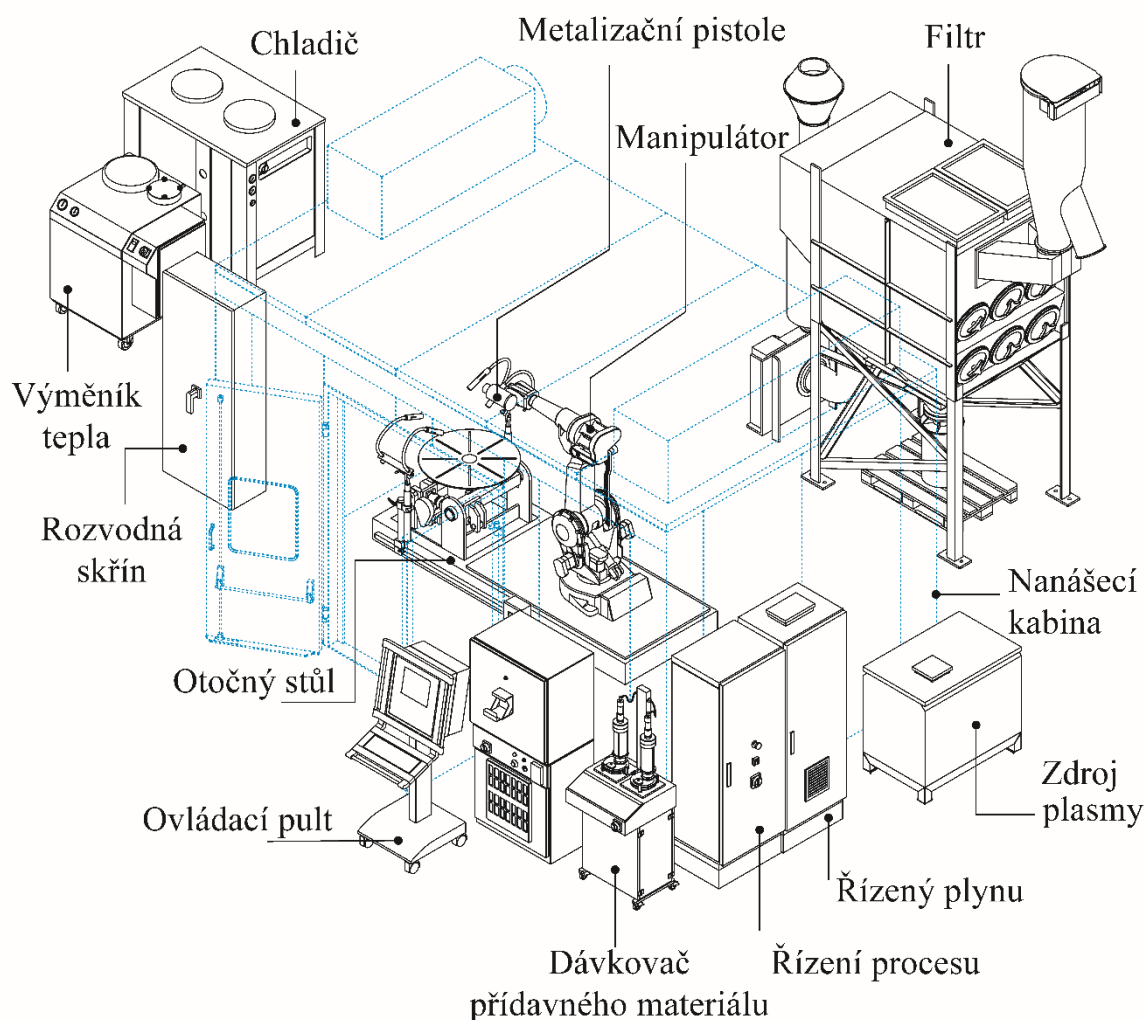


Obr. 33 Schéma vysokorychlostního nástřiku [6].

4.3 Infrastruktura [25, 29]

Kromě hlavní části povlakového systému - metalizační pistole, existuje mnoho dalších položek, které jsou v průmyslovém prostředí nezbytné. Obr. 34 ukazuje povlakovací systém. Stříkací kabina slouží jako izolace pro zvuk a prach produkovaný ze stříkací pistole při žárovém nástřiku. Kabina má vstupy pro napájení, dodávku plynu a monitorování a řízení procesu. Metalizační pistole obvykle bývá připevněna na robotovi s programovaným pohybem, specifickým pro danou součást. Ta bývá upevněna na manipulátoru, jako např. otočný talíř. Je tedy možné aplikovat žárový nástřik i na složitou geometrii, která však musí splňovat určité zásady, viz kapitola 4.7.

Ventilační systém má filtrační jednotku, potřebnou pro zachycení prahových částic nástřiku, které neulpí na povrchu součásti. Tyto prachové částice by se v opačném případě mohly vznítit, proto je celý systém odolný proti požáru a výbuchu.



Obr. 34 Rozmístění zařízení na pracovišti žárového nástřiku [29].

4.4 Předúprava povrchu základního materiálu [2, 9, 22, 25, 37, 40, 42]

Předúprava povrchu základního materiálu je nutná doplňující technologie procesu žárových nástřiků. Doporučuje se, aby byl nástřik proveden co nejdříve (max. do 4 hodin) po předúpravě, pro zabránění kontaminace a oxidaci povrchu. Úprava povrchu zahrnuje odmaštění, zdrsňení a očištění plochy tryskáním, případně nástřikem mezivrstvy či provedením předehřevu. Po otryskání se povrchové vrstvy základního materiálu nachází ve zpevněném stavu, což charakterizuje velká hustota dislokací, značné množství nahromaděné energie a specifická struktura.

K odmaštění se využívá organických rozpouštědel, alkoholů, ketonu, acetonu nebo uhlovodíků. Proces lze provádět za studena, kdy jsou díly ponořeny do rozpouštědla. Druhou variantou je odmašťování v parách. Zde se rozpouštědlo ohřevem odpařuje z nádrže a zpětně kondenzuje na povrchu chladných dílů, uložených v uzavřené komoře. Díly se tak odmastí a rozpouštědlo následně odkape pryč.

Dále lze k odmaštění použít alkalické roztoky tvořené hydroxidy či kyselinami NaCO_3 , Na_3PO_4 . Díly se ponoří, případně postříkují za teploty $50\text{--}90^\circ\text{C}$, do roztoků o koncentraci 1–10 %. Délka odmaštění je závislá na znečištění dílů, běžně se pohybuje od 5 do 10 minut.

Pro otryskání povrchu se běžně používá Al_2O_3 ve formě brusné drti, méně často pak také písek, drcená ocel a karbidy křemíku. Písek se používá na velké venkovní prvky jako mosty, potrubí, věže. Zkrátka tam, kde je navrácení tryskáč drti nepraktické. Ocelová drť (běžně dostupná v tvrdosti 65 HRC) se používá pro přípravu ocelových konstrukcí. Karbid křemíku je použit tam, kde hrozí nebezpečí kontaminace nebo pro velmi tvrdé materiály.

Tryskání může být provedeno v metacích strojích (viz obr. 35a), které se vyznačují vysokým výkonem a obvykle otryskávají více součástí najednou. Tryskací kabiny (viz obr. 35b) se používají pro čištění malých dílů v malých sériích. Mobilní jednotky (viz obr. 35c), čistí povrchy ocelových konstrukcí ve volném prostoru nebo tryskacích halách.



a) metací stroj



b) tryskáč kabina



c) mobilní jednotka

Obr. 35 Tryskací zařízení [40].

Při výběru typu materiálu pro otryskání je třeba brát v úvahu materiál podkladu. Stopy po otryskání a chemická kompatibilita může nepříznivě ovlivnit výsledný povlak. Al_2O_3 , písek a hlavně karbid křemíku se může vrýt do měkčích podkladů jako Al, Cu a jejich slitin. Pro tyto podklady se používá proud vzduchu o menším tlaku.

Velikost částic tryskaného materiálu ovlivňuje výslednou drsnost povrchu a tedy i výslednou tloušťkou povlaku. Drsnost je také ovlivňována tlakem vzduchu, který se pohybuje v rozmezí 210–620kPa a pracovní vzdálenost od 50mm do 150mm. Nerovnosti, které vznikají na povrchu základního materiálu, jsou důležité nejen z hlediska mechanického, ale i na zvětšení dotykové plochy povrchu mezi materiálem nástřiku a podložky.

Po otryskání je třeba zbavit povrch zbytkového prachu a nečistot. Lze použít čistý suchý vzduch.

V normě ČSN ISO 8501-1 jsou stupně úpravy tryskáním rozděleny dle finálního vzhledu povrchu do tří kategorií (viz obr. 36):

- Sa 3 – Vizuálně čistý ocelový povrch. Při prohlížení bez zvětšení se na povrchu nezjistí přítomnost olejů, mastnot, rez a dalších cizích látek. Povrch musí vykazovat jednotný kovový vzhled s pravidelným reliéfem.
- Sa 2,5 – Velmi důkladné otryskání. Všechny zbylé stopy nečistot musí vykazovat pouze lehké zabarvení ve formě skvrn nebo pruhů.
- Sa 2 – Důkladné tryskání. Všechny zbytky nečistot na povrchu musí být pevně přilnavé.



Sa 3

Sa 2,5

Sa 2

Obr. 36 Stupně úpravy tryskáním dle ČSN ISO 8501-1 [9].

4.5 Kvalita povlaku [6, 25, 37]

Lze využít pouze omezené množství nedestruktivních zkoušek, které by mohly být provedeny na hotovém povlaku. Z tohoto důvodu se více než finálních testů používá kontroly procesních parametrů. Toto vyžaduje přesné, spolehlivé zařízení a kalibrované veškeré připojené měřicí přístroje. Taktéž použité materiály jsou přísně kontrolovány. Je třeba přesně dodržovat provozní parametry určené pro daný nástřik.

Aby byl nástřik pod kontrolou, používá se v praxi malého vzorku, na který se nanese nástřik pomocí standartních parametrů pro metalografické zkoušky. Poté se na vzorku porovnává mikrostruktura a mikrotvrдость s normovaným vzorkem. Je třeba však mít na paměti, že výsledné parametry na skutečné součásti se mohou lišit vlivem proměnné vzdálenosti povrchu od trysky, úhlu dopadu, chlazení atd. Použitý vzorek zajistí pouze kontrolovaný proces.

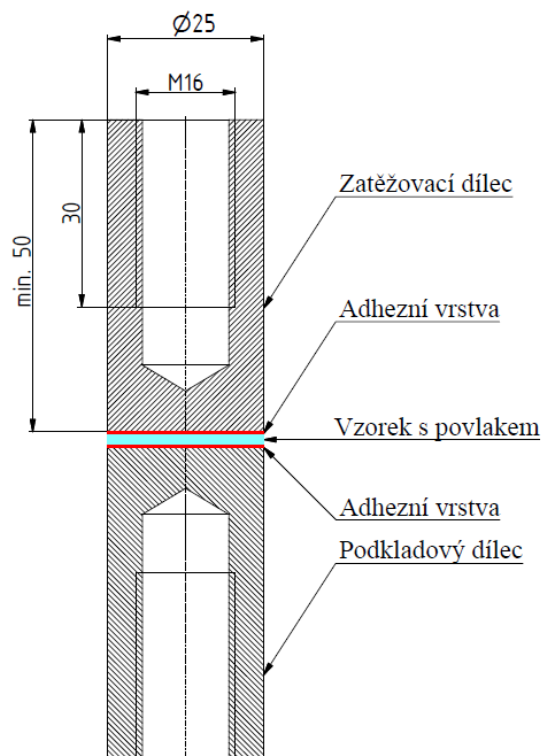
➤ Přílnavost povlaku

Pod pojmem přílnavost rozumíme souhrn povrchových sil, kterými se navzájem přitahují částice různých látek. Z hlediska technologie žárových nástřiků je výraz přílnavost použitý i na označení síly potřebné na odtržení plošné jednotky vrstvy od základního materiálu.

Dobré spojení mezi povlakem a základním materiálem je pro využití rozhodující. Spolu s vývojem nových technologií se věnuje pozornost i vývoji metod pro měření či hodnocení jakosti spojení povlaku se základním materiálem.

Mezi nejjednodušší patří mechanická zkouška přílnavost v tahu, viz ČSN EN 582. Podstatou je určení tahové síly nutné pro odtržení povlaku určité plochy od základního materiálu. Zkouška vyžaduje připojení tyčí k povlaku i základnímu materiálu tak, aby upnutím do zkušebního zařízení bylo možno určit sílu potřebnou pro odtržení (viz obr. 37). Přílnavost v tahu R_H je pak zjištěna zkouškou tahem, vypočítaná jako podíl maximálního zatížení F_m a průřezu vzorku v místě lomu.

Metoda vnikací vychází z měření napětí potřebných pro překonání vazby mezi povlakem a základním materiálem a to při statickém zatlačování indentou nebo při podélném vrypu. Vtlačíme-li indentu do tělesa s povlakem, pak při určitém zatížení vzniknou v okolí vtisku trhliny mezi povlakem a základním materiálem. Odpor proti šíření této trhliny je měřítkem adheze a určují ho parametry lomové mechaniky a pevnosti, přičemž pevnost je ovlivněna poruchami i pnutími v povlaku.



Obr. 37 Schéma zkoušky přílnavosti povlaku v tahu [6].

➤ Tvrdost

Pro zajištění odpovídajících vlastností povlaku lze měřit tvrdost povrchu a tvrdost v průřezu nástřiku. Pro zaručení správných výsledků měření je třeba, v případě měření povrchové tvrdosti, zvážit tloušťku povlaku a tvrdost základního materiálu. Z tohoto důvodu se častěji používá měření mikrotvrdosti v průřezu povlaku.

Dále lze povlaky hodnotit způsoby, které více vystihují namáhání či použití, jakému bude hotový produkt vystaven. V případě otěruvzdorných povlaků lze mluvit o měření otěruvzdornosti. Pokud bude snahou zhotovit povlak odolný vůči korozi, bude v oblasti zájmu množství oxidických vměstků a pórovitost. Přehled zkoušek jakosti stříkaných povlaků je znázorněn v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled zkoušek stříkaných povlaků a jejich normy [25].

	Kontrolované znaky kvality	Metoda zkoušení	Norma
NEDESTRUKTIVNÍ	vzhled	vizuálně	ČSN EN ISO 2063 ČSN EN ISO 14923
	tloušťka	magneticky elektromagneticky	ČSN ISO 2178 ČSN EN ISO 2360 ČSN EN 3543 ČSN EN ISO 3868
	drsnost povrchu	profilová přímá	ČSN EN ISO 13565-1 ČSN EN ISO 3274 ČSN EN ISO 4287
	zjišťování trhlin v povrchu	kapilární	ČSN EN ISO 3452-1
	tvrdost	dle Rockwella	ČSN EN ISO 6508-1
DESTRUKTIVNÍ	struktura, výskyt pórů, trhlin atd.	metalografie	ČSN EN ISO 14923
	tloušťka	Mikroskopicky profilometricky brousící metodou	ČSN EN ISO 1463 ČSN ISO 4518 ČSN EN 1071-2
	pevnost spoje	Mřížkovou zkouškou přilnavost v tahu odtrhem ohybem, vrypem	ČSN EN ISO 2063 ČSN EN 582 ČSN EN ISO 14923 ČSN EN 1071-3
	odolnost proti otěru	tribologická	ČSN EN ISO 14923
	korozní odolnost	solnou mlhou	ČSN EN ISO 9227

4.6 Konstrukční zásady pro žárově stříkané součásti [8, 29]

V případě použití žárového nástřiku je třeba brát v úvahu jisté konstrukční úpravy (viz obr. 38) již v samotném návrhu součásti, aby bylo zajištěno úplné a stejnosměrné nanesení povlaku. Z tohoto důvodu jsou v normě ČSN EN ISO 14713-2 dány jisté konstrukční zásady:

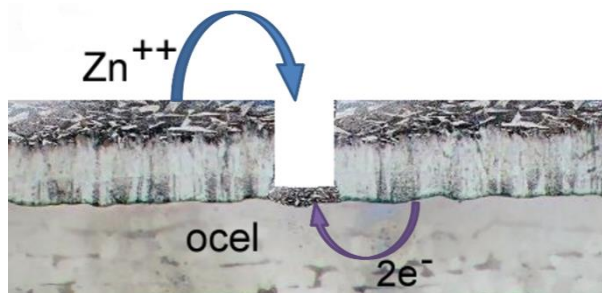
- Nepoužívat konstrukční prvky, které vytvářejí stín pro tryskační médium i vlastní nástřik. Minimální prostor před upravovanou plochou je 300 mm pro manipulaci tryskační a stříkační pistolí.
- Zohlednit požadavek dopadu tryskačního média i částic nástřiku v úhlu kolem 90° , mezní úhel dopadu je 45° .
- Nepoužívat úzké štěrbiny, které neumožňují stejnoměrnou přípravu a provedení nástřiku.
- Používat zaoblené rohy a hrany.
- Používat tupé spoje.

Neproveditelné	Proveditelné	Preferované provedení

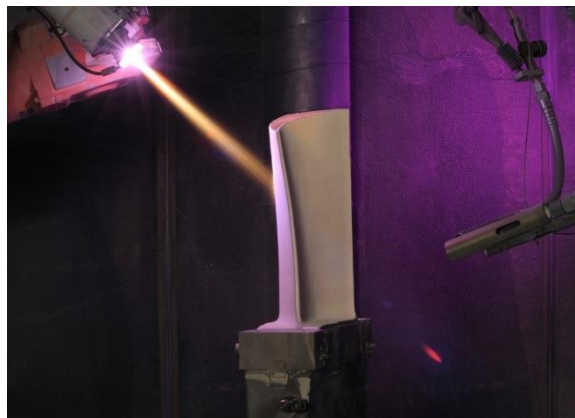
Obr. 38 Konstrukční úpravy součástí pro žárový nástřik [29].

4.7 Použití nástřiků [2, 35, 37, 43]

- Odolnost proti opotřebení. Je jednou z nejdůležitějších vlastností nástřiků. Povlaky takto zhotovené běžně odolávají všem formám opotřebení včetně abraze a adheze. Obecně platí, že odolnost vůči opotřebení se zvyšuje s hustotou povlaku a rostoucími kohezními silami, tzn., že nejvyšší odolnost proti opotřebení získáme použitím vysokorychlostních nástřiků, např. detonační nástřik.
- Třecí vlastnosti. Žárové nástřiky se v některých případech používají pro zajištění požadovaného tření, které lze v širokých mezích nastavit.
- Ochrana proti korozi. Hliníkové a zinkové nástřiky se používají pro ochranu mostů, lodí a dalších konstrukcí proti korozi. V tomto případě se využívá katodické ochrany podkladu (viz obr. 39), kdy se povlak chová jako anoda. Ta vysílá do prostředí elektrolytu více iontů, než sama přijímá a rozpouští se. Katoda přijímající ionty není ovlivněna nebo nabývá. Je třeba mít povlak utěsněn, a to např. epoxidem nebo slinováním.
- Renovace. Povlaky se používají také na obnovení opotřebovaných částí. Běžně se používá měkčích levnějších materiálů, kterými jsou opotřebovaná místa vyplněna, a na ně je pak nanášena tenká vrstva odolnějšího materiálu. Materiál povlaku bývá zcela odlišný od materiálu součásti. Z tohoto důvodu nelze počítat se zvýšením pevnosti a při větších opravách může dojít ke snížení únavové pevnosti součásti.
- Tepelné aplikace. Dále lze použít nástřiků jakožto tepelných bariér. Zejména zirkonové povlaky jsou používány na spalovací komory plynových turbín, ventilů a spalovacích prostorů motorů pro zvýšení efektivity a snížení teplot (viz obr. 40). Povlaky lze také použít pro rozptýlení tepla jako povrchové vodiče. Tepelná vodivost je díky lamelární mikrostruktuře a porézности anizotropní a výrazně nižší než u slinutých kovů stejného druhu materiálu.
- Povlaky oxidů lze použít jako izolátory.
- Dále se nástřiky používají pro výrobu vysokoteplotních termočlánků a tenzometrů.



Obr. 39 Princip katodické ochrany [43]



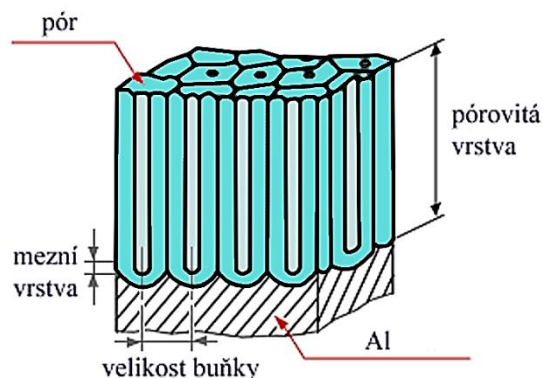
Obr. 40 Žárový nástřik tepelné bariéry na lopatku turbíny [35].

5 ELEKTROCHEMICKÁ MODIFIKACE HLINÍKU [12, 30, 36, 42]

Tato technologie, nazývána jako anodizace či eloxování je elektrochemický proces, při kterém se na daném povrchu vytváří mezní nepórovitá vrstva a vrstva oxidu hlinitého s hexagonální strukturou a centrálně uloženým pórem (viz obr. 41).

Anodická vrstva vrůstá do materiálu a vytváří tak vrstvu oxidů přímo z hliníkového substrátu. Maximální dosažitelná tloušťka mezní vrstvy je do $1\mu\text{m}$. Na mezní vrstvu navazují hexagonální buňky Al_2O_3 .

Parametry oxidické vrstvy jsou závislé především na druhu elektrolytu a času expozice. Velikost pórů se pohybuje v rozmezí $0,01\mu\text{m}$ až $0,02\mu\text{m}$ při pórovitosti cca 12 %. Povlak je z hlediska mechanického namáhání křehký a při deformacích dochází k trhlinám, které mohou zasahovat až do základního materiálu.



Obr. 41 Model anodizovaného povrchu [30].

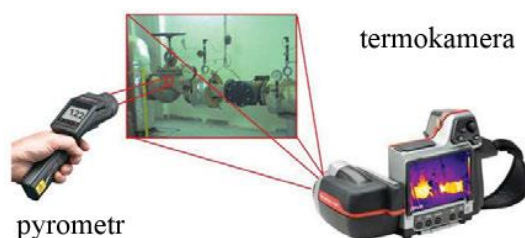
5.1 Technologický postup anodizace [12, 36, 42]

- Odmaštění. Výrobek je před povrchovou úpravou nutné očistit a odmastit. Pro tento proces se používá alkalických či kyselých roztoků. Na hliník jsou nejčastěji použity média na alkalické bázi např. NaOH při teplotě $50\text{--}60^\circ\text{C}$.
- Moření. Jde o odstranění přírodní oxidické vrstvy hliníku a naleptání povrchu kovu.
- Vyjasnění. Používá se, aby byl povrch před samotnou anodickou oxidací čistý a lesklý. Po moření se na hliníku může objevovat stíratelná vrstva na bázi intermetalického křemíku, která je tímto odstraněna. Lázeň se skládá z 5% kyseliny dusičné či speciálních aditiv.
- Anodická oxidace. Při elektrochemickém procesu je v elektrolytické lázni vzorek zapojen jako anoda. Katodu tvoří čistý hliník a její velikost má být rovna ploše oxidované součásti. Lázni prochází stejnosměrný proud o proudové hustotě $1,2\text{--}6\text{ A/dm}^2$ a napětí $10\text{--}100\text{V}$. Nejpoužívanější lázeň tvoří $10\text{--}20\%$ kyselina sírová při teplotě -5 až 22°C , dále se používají lázně, H_3PO_4 , H_2CrO_4 nebo jejich kombinace. Je nutné zabezpečit dokonalé spojení anodizovaného předmětu s přívodním vodičem, jinak mezi nimi hrozí riziko tvorby izolační vrstvy Al_2O_3 a zastavení procesu. Úpravou provozních parametrů, především doby eloxování, lze měnit tloušťku povlaku.
- Vypírání oxidické vrstvy. Při tomto procesu se odstraňují zbytky kyseliny z pórů oxidické vrstvy. Důležitým parametrem je čas, kdy doba vypírání je minimálně 30minut. Při neodstranění všech zbytků kyseliny, mohlo by dojít k porušení vrstvy a rozleptání materiálu.
- Elektrolytické barvení. Využívá se zde pórovitosti anodické vrstvy. Do pórů jsou ukládány sloučeniny z roztoků solí kovů jako Sn, Ni nebo Cu.
- Utěsnění vrstvy. Cílem procesu je zvýšení odolnosti pórovitého povrchu. Probíhá v destilované vodě při min. 97°C za vzniku hydroxidu hlinitého. Utěsněním pórů lze významně změnit finální vlastnosti povrchové úpravy (změna kluzných vlastností, odolnost proti korozi).

6 MĚŘENÍ EMISIVITY TERMOVIZNÍ KAMEROU [4, 24]

Jak je uvedeno v kapitole 3, každé těleso vyzařuje energii ve formě elektromagnetického záření nazvanou tepelné záření. Intenzita tohoto záření závisí na povrchové teplotě měřeného objektu, a proto lze změřením této intenzity stanovit i danou povrchovou teplotu.

Ke zjištění množství záření se používá termokamera, která snímá rozložení teploty na celém povrchu objektu a jejímž výstupem je termogram, nebo pyrometr, který měří teplotu v určité obvykle kruhové oblasti a jehož výstupem je číselná hodnota teploty (viz obr. 42). Termokamery lze tedy chápat jako univerzální přístroje použitelné pro více aplikací, zatímco pyrometry jsou obvykle specializované na určitý druh měřených objektů.



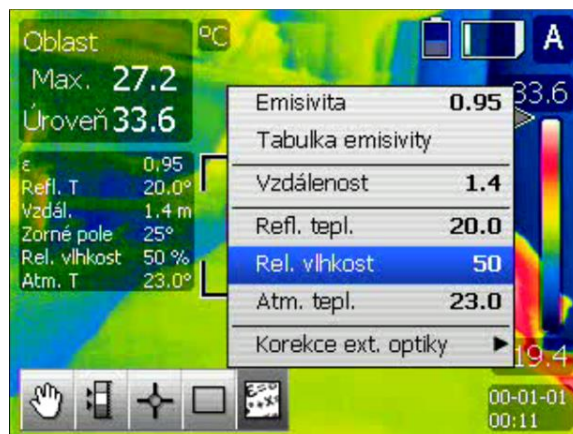
Obr. 42 Srovnání termokamery a pyrometru [24].

Protože pyrometr i termokamera měří intenzitu záření a požadovaná veličina – teplota se stanovuje výpočtem, je nezbytné nastavit hodnoty parametrů měření.

- Parametry měření: emisivita (viz kapitola 3.1)
- zdánlivá odražená teplota [°C]
- teplota atmosféry [°C]
- relativní vlhkost atmosféry [%]
- vzdálenost mezi objektem a měřícím zařízením [m]

Pro správné výsledky měření je třeba zohlednit vlastní chybu termokamery udanou výrobcem, která se obvykle pohybuje kolem +/-2% z měřeného údaje, správně určit emisivitu (viz kapitola 3.1), zdánlivou odraženou teplotu a útlum atmosféry. Tyto parametry se běžně nastavují v menu kamery, které zobrazuje obr. 43. Důležité je také dodržet postup měření určený výrobcem termokamery.

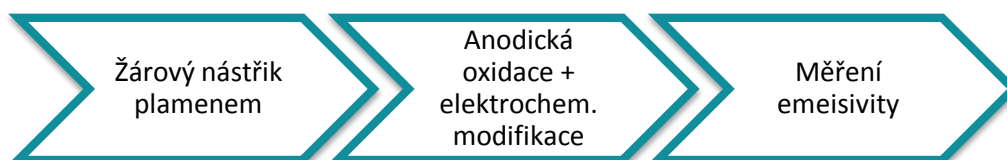
Zdánlivá odražená teplota je tepelné záření, jenž se odráží od měřeného objektu a dopadá na termokamery. Ta tak není schopna rozlišit odražené záření od vlastního záření objektu a dochází k chybám v měření. Měření se provádí dle ČSN EN 18434-1 pomocí infračerveného odražeče.



Obr. 43 Menu termokamery [24].

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [27]

Tato kapitola popisuje přípravu vzorků pro solární absorbery. Experiment je rozdělen do tří částí. První popisuje přípravu vzorků žárovým nástřikem. V další části se pak vzorky podrobují elektrochemické modifikaci – anodické oxidaci viz kapitola 5. Na závěr jsou jednotlivé vzorky z předchozích částí podrobeny měření emisivity pomocí termokamery.

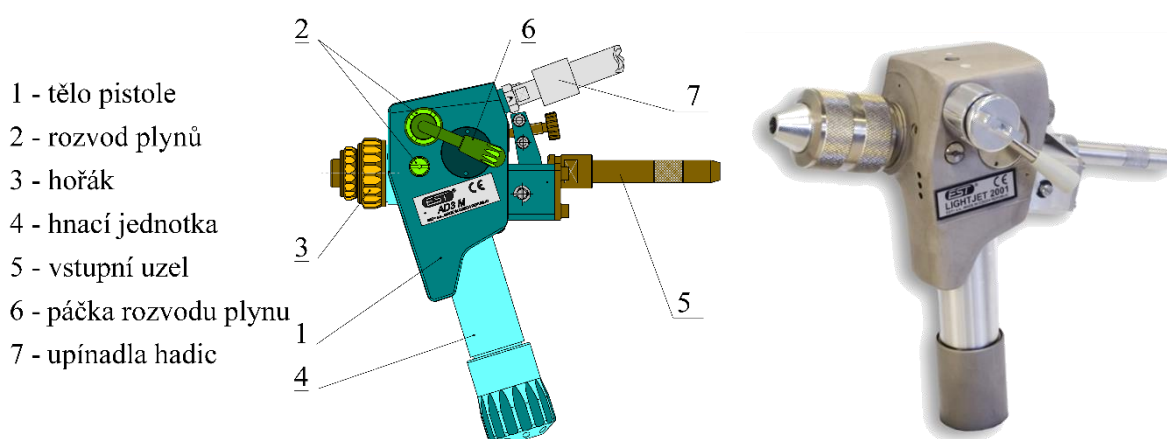


7.1 Žárový nástřik [27]

K dosažení co nejvyšší účinnosti solárního kolektoru je zapotřebí mít kvalitní selektivní povrch. K našemu účelu jsme použili vrstvu hliníku, zhotovenou žárovým nástřikem plamenem. Přestože na povrch jako takový nebudou kladeny žádné zvýšené nároky na mechanickou odolnost, je zapotřebí, aby byl povrch stálý a i při vyšších teplotách soudržný se základním materiálem. Povrch tedy nesmí nést známky nízké adheze k podkladovému materiálu či se samovolně odlupovat.

➤ Popis použité metalizační pistole pro žárový nástřik:

Metalizační pistole AD3 M (viz obr. 42), je ruční pistole pro žárové stříkání kovů. Konstrukčně je určena především pro antikoroziční nástřiky – zinkem, hliníkem a zinkokrem. Ostatní materiály jako např. ocel, nerez, molybden, mosaz a měď se používají jen k renovačnímu a dekorativnímu nástřiku. Aplikační materiál dopravovaný do prostoru hořáku ve formě drátu je taven směsí kyslík-acetylen. Roztavený kov je ve formě drobných částíček vrhán proudem stlačeného vzduchu na upravený povrch viz kapitola 4.4



Obr. 44 Schéma metalizační pistole AD3 M [27].

Metalizační pistole je tvořena dvěma základními funkčními okruhy. Prvním okruhem je okruh podávání drátu, který je tvořen naváděcím ústrojím, přitlačným ústrojím včetně vodící kladky a hnací jednotkou s předlohou zakončenou podávací kladkou. Hnací jednotka je vhodná na podávání drátů nízko tavitelných materiálů a slouží zároveň jako rukojeť. Druhý okruh, přívod spalných plynů do prostoru tavení, je tvořen upínadly hadic, rozvody plynů a hořákem.

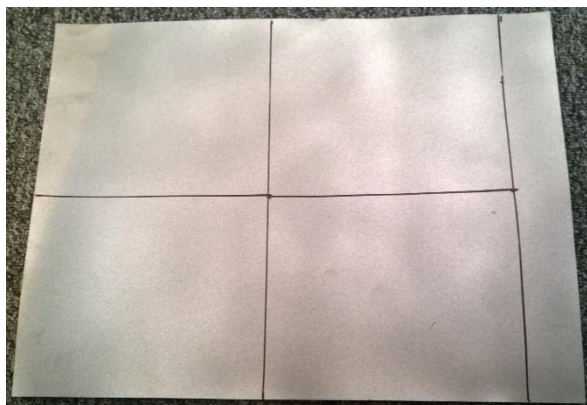
Pistole má pět regulačních a ovládacích prvků. Na levé straně těla pistole ve směru nástřiku se nachází ovládací páka rozvodu plynů. Správné navedení drátu do osy hořících plynů zajišťuje naváděcí a přitlačné ústrojí spolu s vložkou hořáku. Dílce namáhané otěrem jsou vyrobeny z otěruvzdorného materiálu, přičemž pro různé průměry drátu jsou vyměnitelné.

Technické parametry: Rozměry:	délka	205 mm
	šířka	85 mm
	výška	190 mm
Hmotnost:	bez připojovacích prvků	1 377 g
	s připojovacími prvky	1 422 g
Připojovací rozměry:	pro kyslík	hadice kyslíková, Ø6 mm
	pro acetylén	hadice acetylénová, Ø6 mm
	pro vzduch	hadice vzduchová, Ø10 mm
Pracovní tlaky:	tlak vzduchu	0,4MPa
	tlak kyslíku	0,4–0,6 MPa
	tlak acetylenu	0,1–0,15 MPa
Spotřeba plynů:	vzduch	570 l/min
	kyslík	46 l/min
	acetylen	20 l/min
Průměr drátu:		3,00 mm
		2,50 mm

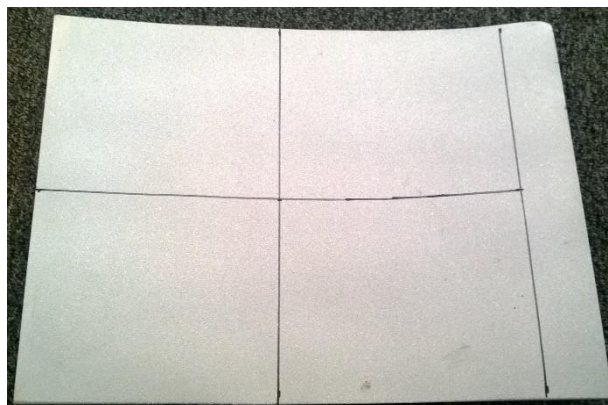
Vzorky o velikosti 320x250mm se nejprve odmastí v organickém rozpouštědle ponořením do lázně. Dále prochází tryskáním na stolovém tryskači ŠKODA TS 2/1, pomocí hnědého korundu o zrnitosti 0,6-1mm. Tryskáním bylo dosaženo stupně Sa3 dle ISO 8501-1 (viz kapitola 4.4).

Nástřik probíhal na popisovaném zařízení Ad3 EST s přidavným materiálem o průměru 2,5mm z hliníku o čistotě 99,5 %. Tlak vzduchu byl nastaven na hodnotu 0,6MPa. Tlak acetylénu a kyslíku byl nastaven v poměru 1:4, toto nastavení odpovídá doporučenému nastavení od výrobce metalizační pistole. Umožňuje tak efektivní odtavování použitého hliníkového drátu aniž by docházelo k jeho špatnému tavení. Tryska byla ve vzdálenosti 200 a 250 mm od vzorků, čímž byly získány dva typy vzorků. Jeden označován jako nástřik DARK, druhý označován jako nástřik LIGHT. Toto označení bylo zvoleno z důvodů rozdílného odstínu povrchu nástřiku způsobeného změnou vzdálenosti trysky. Vzorky po nástřiku jsou zobrazeny na obr. 42.

Tyto ocelové pásy jsou základem jednotlivých vzorků určených pro další úpravu, které získáme rozdělením na jednotlivé kusy, viz naznačené řezy na obr. 45. Konečný rozměr jednotlivých vzorků je 150mm x 125mm.



DARK



LIGHT

Obr. 45 Vzorky po žárovém nástřiku plamenem.

7.2 Anodická oxidace

Po nástřiku byla provedena anodická oxidace, kterou jsme cíleně vytvořili vrstvu Al_2O_3 na povrchu materiálu. Tuto vrstvu jsme následně modifikovali niklem a cínem.

➤ Popis použitého zařízení:

Laboratorní zdroj Manson NP-9615 (viz obr. 46). Jedná se o zdroj stejnosměrného proudu s jedním regulovatelným (0–5A; 0–30V) a dvěma pevnými výstupy (5V/0.5A; 12V/0.5A). Rozměry zdroje jsou 205 x 115 x 280mm a hmotnost 6,5kg.



Obr. 46 Zdroj Manson NP-9615.

Autotransformátor DIAMETRAL RA1F250.100. Jedná se o zdroj střídavého napětí v rozsahu 5–230V s maximálním odběrem proudu 10A. Zařízení je vybaveno analogovými měřicími přístroji pro zjištění hodnoty výstupního proudu a napětí.

Konfokální laserový řádkovací mikroskop Lext OLS 3100 (viz obr. 47). Tento typ mikroskopu umožňuje zobrazení povrchů materiálů a součástí s rozlišením $0.12\mu\text{m}$ a zvětšením 120x–150 000x. Mikroskop využívá laserový paprsek pro optické řezy v rovině X-Y. Díky definovanému posuvu v ose Z lze poté jednotlivé řezy poskládat a vytvořit tak 3D model povrchu.



Obr. 47 Lext OLS 3100.

Vzorky byly nejprve odmaštěny v louhu NaOH a poté opláchnuty v čisté vodě. Následovalo ponoření do lázně 20% H_2SO_4 (viz obr. 48) při teplotě 20°C , ve které protékal stejnosměrný proud o velikosti 3A. Vzorek byl zapojen jako anoda, viz kapitola 5.1.1. Dobu anodizace jsme nastavili na 30 minut. Pro zamezení vzniku lokálního ohřevu lázně jsme lázeň neustále promíchávali. Po dokončení anodizace následovala stabilizace eloxované vrstvy vyvařením v destilované vodě po dobu 30 minut a vysušení vzorků. Byly tak zhotoveny vzorky anodické oxidace na čistém hliníku (bez nástřiku) označené ELOX, vzorky anodické oxidace na nástřiku označené ELOX 5 - DARK a ELOX 1 - LIGHT dle použitého nástřiku.



Obr. 48 Vzorky v lázni při eloxování.

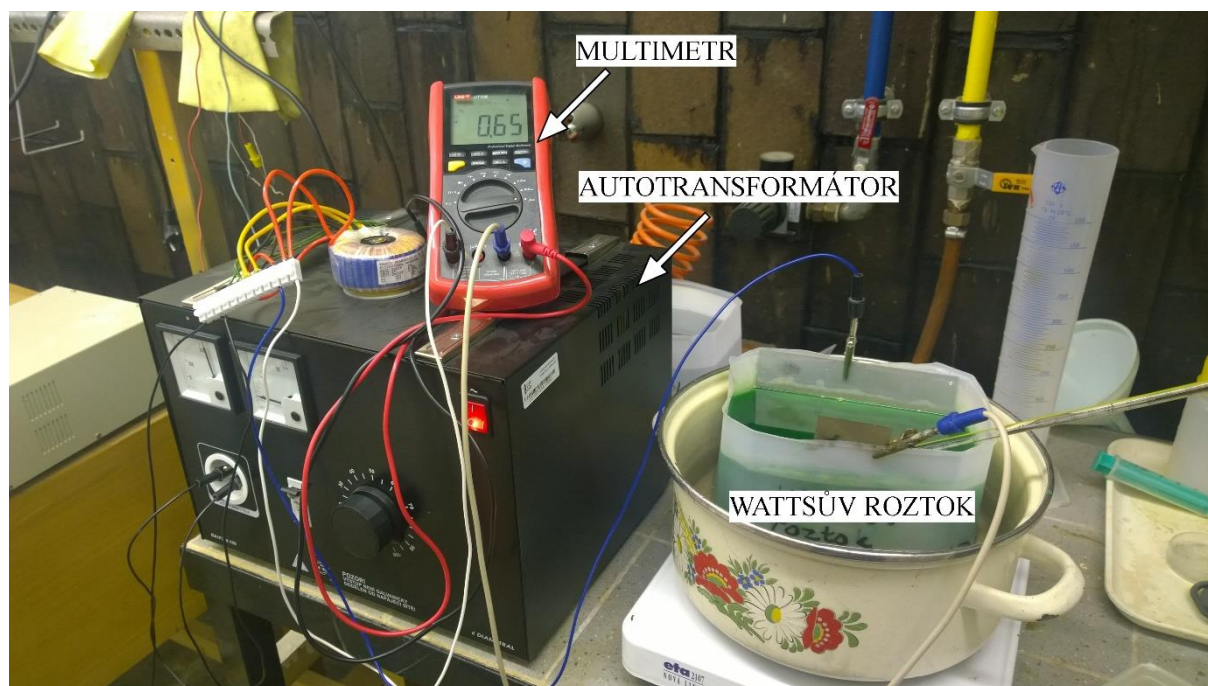
Dále následovalo elektrochemické barvení. Za tímto účelem byla připravena tzv. Wattsova lázeň, jejíž typické složení a provozní podmínky jsou v tabulce 2.

Tabulka 2 Složení Wattsovy lázně.

Složení elektrolytu [g/l]	
Síran nikelnatý, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	310
Chlorid nikelnatý, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	45
Kyselina boritá, H_3BO_3	40
Teplota, [°C]	50 - 65
Míchání	Vzduchem nebo mechanicky

Vzorek byl zapojen na zdroj stejnosměrného proudu jako katoda, přičemž anodou je niklový pás. Proudová hustota je v rozmezí 3–8 A/dm². Bylo vyzkoušeno i zapojení na zdroj střídavého proudu (viz obr. 49), ovšem při tomto postupu nebylo docíleno vyloučení niklových částic na povrchu.

Poslední vzorky byly získány z firmy LARS Chemie, která pro barvení použila lázeň ze soli cínu. Byly tak zhotoveny vzorky na čistém hliníku bez nástřiku, tedy pouze s anodickou oxidací + barvením označené LARS AL1, LARS AL2 a vzorek se žárovým nástřikem, anodizací a barvením označen LARS Sn. Nutno dodat, že vzorky se žárovým nástřikem bylo nutné po hranách opatřit lakem pro zabránění kontaktu korozivzdorného plechu (podkladu vzorků) s lázní. V opačném případě by došlo k rozpouštění podkladu.

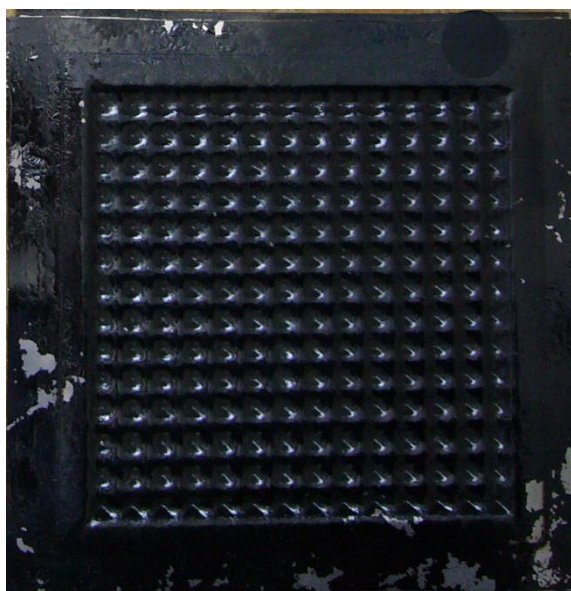


Obr. 49 Elektrolytické barvení – střídavé napětí

Seznam všech získaných vzorků je v tabulce 3, včetně vzorků, kdy je povrch absorbéru opatřen nátěrem Rabsorb5 pro porovnání s komerčními produkty. Vzorky s tímto nátěrem jsou na obr. 50.

Tabulka 3 Seznam vzorků a jejich popis.

NÁZEV VZORKU	POPIS
NÁSTŘIK DARK	Žárový nástřik ze vzdálenosti 200mm
NÁSTŘIK LIGHT	Žárový nástřik ze vzdálenosti 250mm
ELOX	Anodická oxidace na hliníkovém vzorku
ELOX 5 - DARK	Anodická oxidace na vzorku NÁSTŘIK DARK
ELOX 1 - LIGHT	Anodická oxidace na vzorku NÁSTŘIK LIGHT
WATTS AL	Vyloučení částic niklu na vzorku ELOX
LARS Al 1	Anodická oxidace + modifikace Sn na hliníkovém vzorku
LARS Al 2	Anodická oxidace + modifikace Sn na hliníkovém vzorku
LARS Sn LIGHT	Vyloučení částic cínu na vzorku NÁSTŘIK LIGHT
LARS Sn DARK	Vyloučení částic cínu na vzorku NÁSTŘIK DARK
RABSORB	Korozivzdorný plech + nátěr RABSORB 5
RABSORB - KUŽEL	Korozivzdorný plech + nátěr RABSORB 5



RABSORB KUŽEL

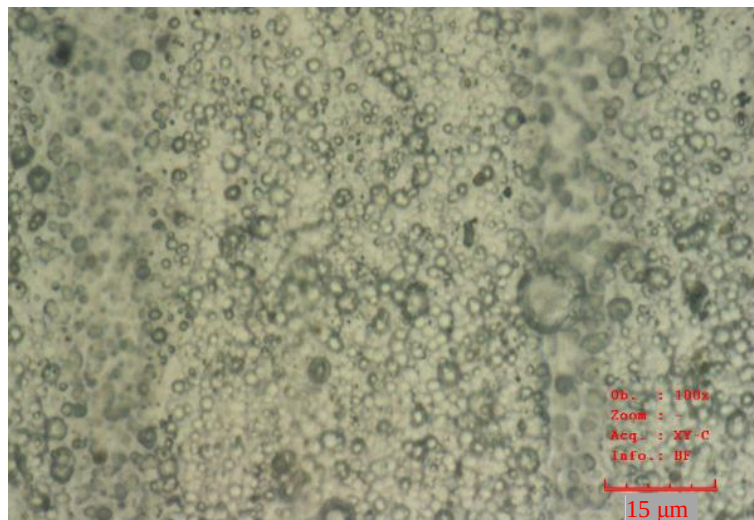


RABSORB

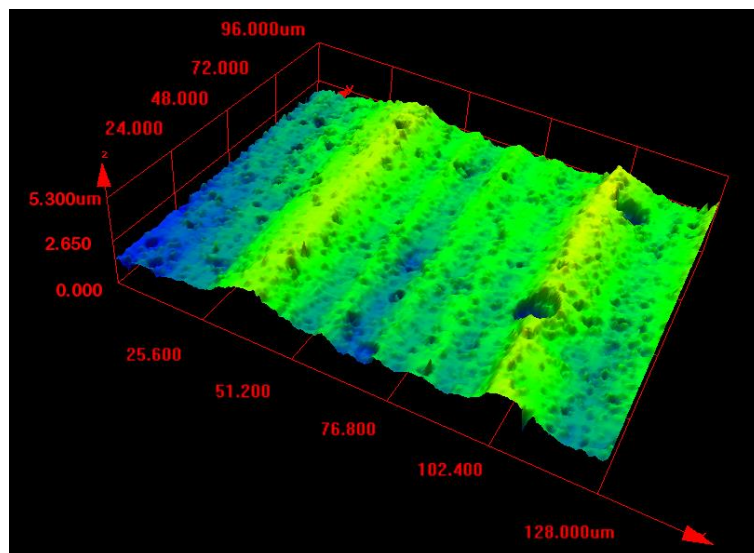
Obr. 50 Vzorky opatřené nátěrem Rabsorb5.

7.2.1 Výsledky anodizace:

Na snímcích z konfokálního mikroskopu lze vidět výslednou strukturu oxidické vrstvy hliníku, viz obr. 51 a obr. 52, která byla vytvořena na vzorku ELOX. Jsou zde zřetelně viditelné póry oxidu hlinitého, z čehož usuzujeme, že eloxování bylo provedeno za správných provozních podmínek. Tyto podmínky byly následně aplikovány i na další vzorky, čímž by měla být zajištěna reprodukovatelnost výsledků.

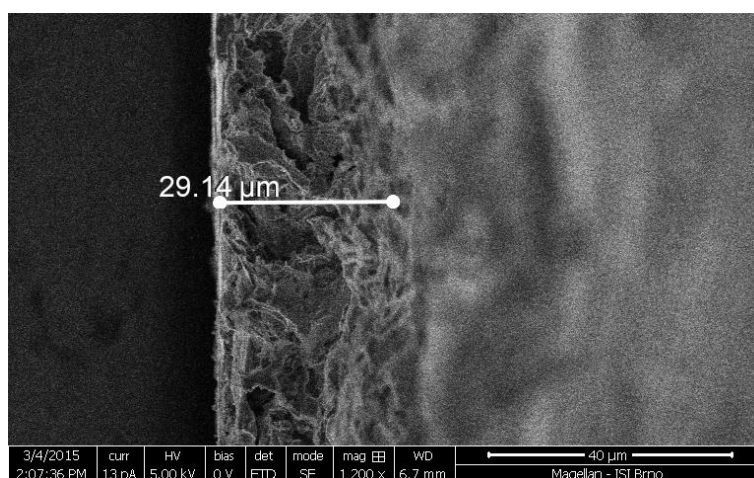


Obr. 51 Anodická oxidace na vzorku z čistého Al.



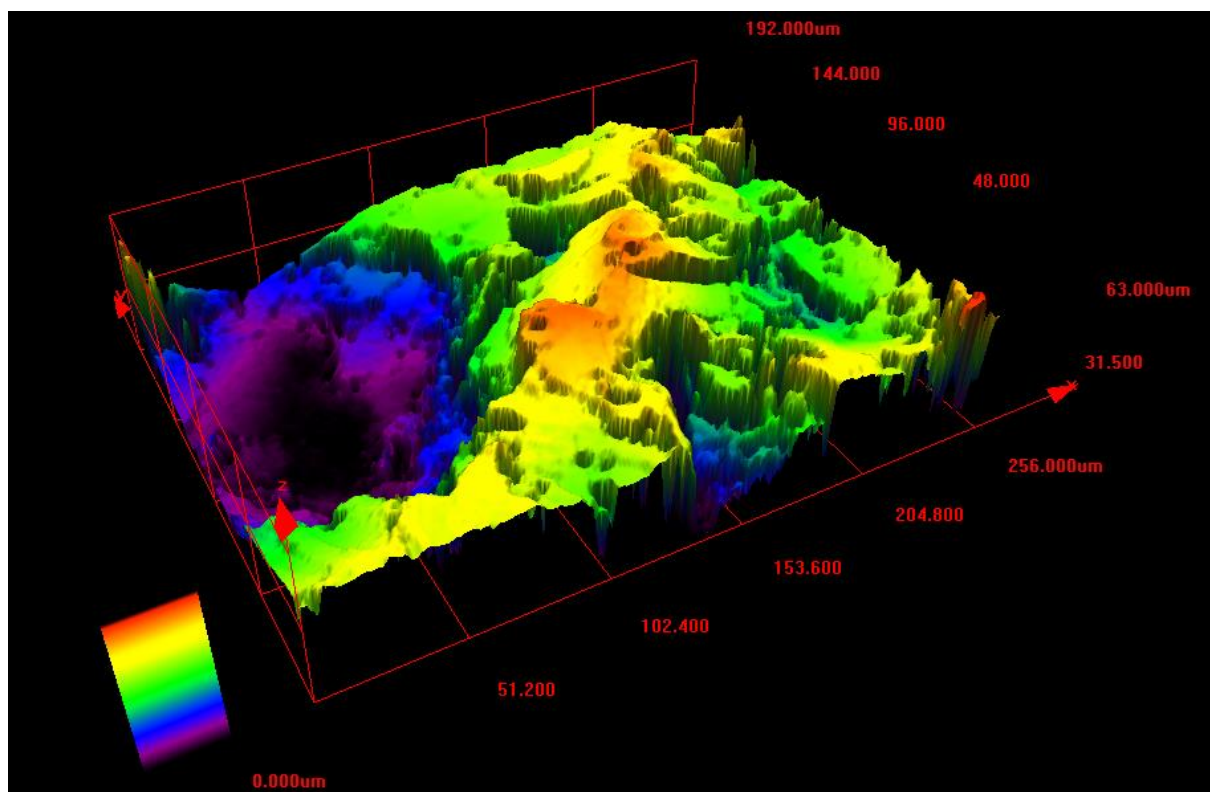
Obr. 52 Povrch vzorku ELOX pod konfokálním mikroskopem.

Po rozřezání vzorku metalografickou pilou a následném změření pod řádkovacím elektronovým mikroskopem byla zjištěna tloušťka anodizované vrstvy cca 30 μm (viz obr. 53).

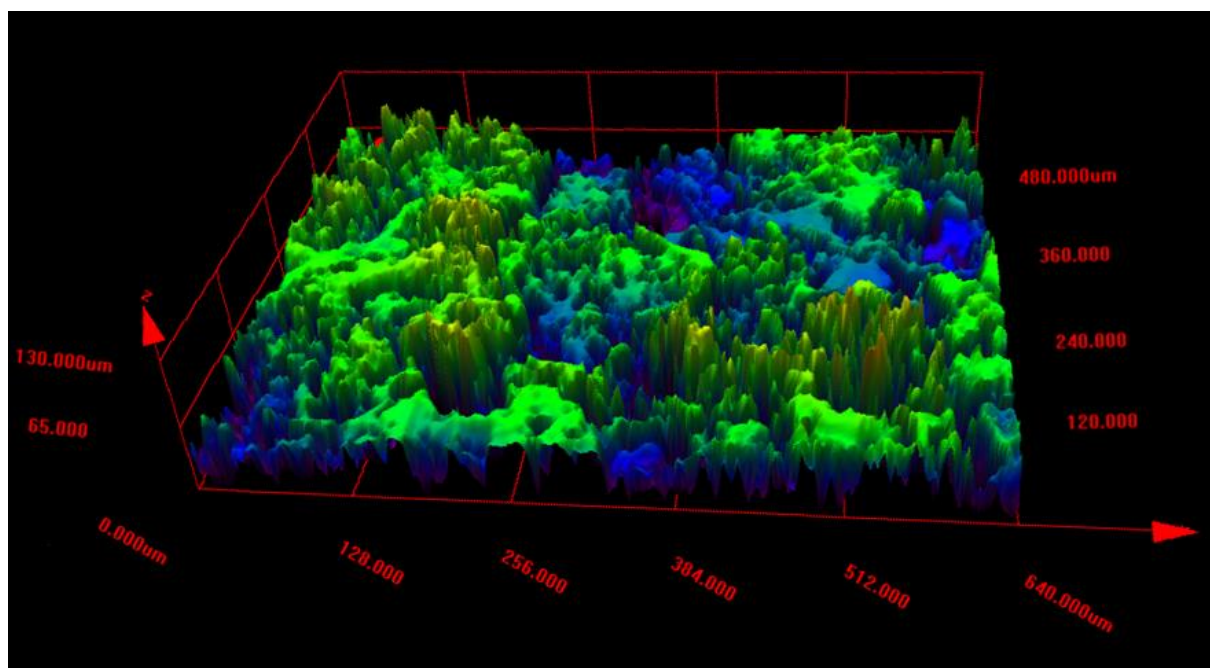


Obr. 53 Tloušťka vrstvy Al_2O_3 .

Na snímcích vzorků (s termickým nástríkem) nelze strukturu jednotlivých pórů s danou aparaturou pozorovat jako na obrázcích výše díky nerovnostem způsobených žárovým nástríkem. Kvůli tomu nebylo možné zaostřit na konkrétní místo. Jak však lze vidět na obr. 54 (ELOX 5 - DARK) a obr. 55 (ELOX 1 - LIGHT), jednotlivé povrchy se výrazně liší, přičemž vzorek 2 má takřka dvojnásobnou hloubku reliéfu, způsobenou rozdílnými parametry nástríku.



Obr. 54 Vzorek ELOX 5 - DARK pod konfokálním mikroskopem.

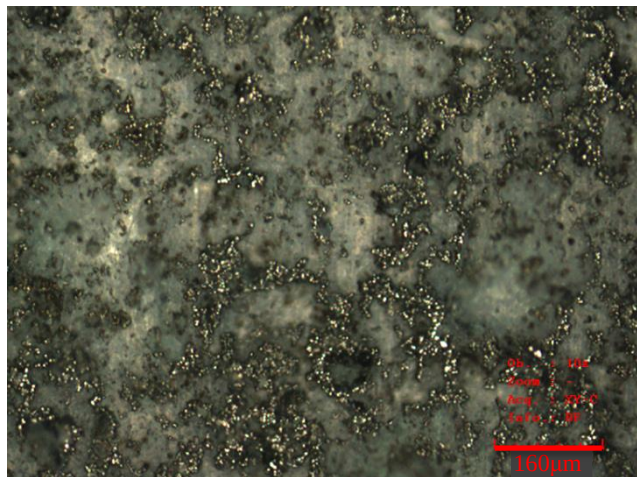


Obr. 55 Vzorek ELOX 1 - LIGHT pod konfokálním mikroskopem.

Na obr. 56 je vzorek WATTS AL, na kterém můžeme po zvětšení pozorovat vyloučené částice niklu (viz obr. 57). Byl proveden i experiment, jak již bylo zmíněno, kdy jsme do Wattsovy lázně vložili vzorek ihned po eloxování – bez stabilizace vrstvy, nicméně na tomto vzorku se nepodařilo dosáhnout požadovaných výsledků (viz obr. 58) a vzorek byl vyřazen.



Obr. 56 WATTS AL.



Obr. 57 Detail povrchu vzorku WATTS AL s viditelnými částicemi niklu.



Obr. 58 Vzorek po Wattsově lázni bez vyloučeného niklu.

Na vzorcích, které byly ve firmě LARS chemie, došlo k výraznému rozleptání žárových nástřiků a k rozpadnutí povrchové vrstvy. Dokončen byl pouze jeden vzorek LARS Sn LIGHT (viz obr. 59). Tento vzorek však nesplňuje kvality povrchu pro absorbér, neboť i při běžné manipulaci s ním dochází k opadávání povrchu a odhalování podkladového materiálu. Jedná se pravděpodobně o důsledek rozrušení podkladového materiálu lázní. Ta se na něj dostane přes pórovitost nástřiku, proto nebylo účinné ani zalakování hran.



Obr. 59 Vzorek LARS Sn je viditelně rozleptán použitou lázní.

Byly zhotoveny i vzorky LARS Al 1 a LARS Al 2 viz obr. 55, které jsou bez žárového nástřiku. Tyto vzorky byly dopovány cínem bezprostředně po anodické oxidaci a výsledný povrch již odpovídá požadované kvalitě.



Obr. 60 LARS Al 1–vlevo a LARS Al 2–vpravo.

7.3 Měření emisivity

V poslední části experimentu byla měřena emisivita jednotlivých vzorků.

➤ Popis použitého zařízení

Termovizní kamera FLIR A310 (viz obr. 61). Jedná se o profesionální stacionární kameru s rozlišením 320 x 240 pixelů, teplotní citlivostí 0,05°C, přesností $\pm 2^\circ\text{C}$ a rozsahem teplot od -20°C do 350°C . Spektrální rozsah je od $7,5\mu\text{m}$ do $13\mu\text{m}$. Kamera byla uchycena na stativu Manfrotto 190XPROB.

Samolepicí štítek Thermaspot. Jedná se o kruhové štítky bílé/černé barvy o známé emisivitě $\varepsilon = 0,96$.

Sušárna Memmert UFE 400 (viz obr. 62). Je sušárna s nucenou cirkulací vzduchu nastavitelnou v 10% krocích. Sušárna má objem 53 l, rozměry jsou 400x400x330mm. Přesnost pro nastavené hodnoty ohřevu je $0,5^\circ\text{C}$.

Před začátkem měření byla termovizní kamera FLIR upevněná na stativu Manfrotto tak aby byla kolmo nad snímaným povrchem, (viz obr. 63). Všechny vzorky byly polepeny štítky Thermaspot od firmy TMV SS a vloženy do sušárny, kde byly předeřívány na teplotu 75°C . Poté byl vždy jeden vzorek položen do snímaného prostoru a nasnímán termokamerou s nastavenou emisivitou dle štítků na 0,96.

Po nasnímání všech vzorků byla provedena korekce emisivity dle nyní známé teploty a emisivity štítku, neboť teplota štítku je totožná s teplotou vzorku. Na vzorku se tedy vybere požadovaná oblast zájmu. Software dostupný k termovizní kameře vyhodnotí minimální, maximální a průměrnou teplotu v této oblasti.

Nyní, pomocí změn hodnoty emisivity, je cílem dosáhnout stejné průměrné teploty ve vybrané oblasti, jaká byla zjištěna na štítku s původní emisivitou 0,96.



Obr. 61 Termovizní kamera FLIR A310.



Obr. 62 Sušárna Memmert UFE 400.



Obr. 63 Popis měření termovizní kamerou.

7.3.1 Výsledky měření emisivity

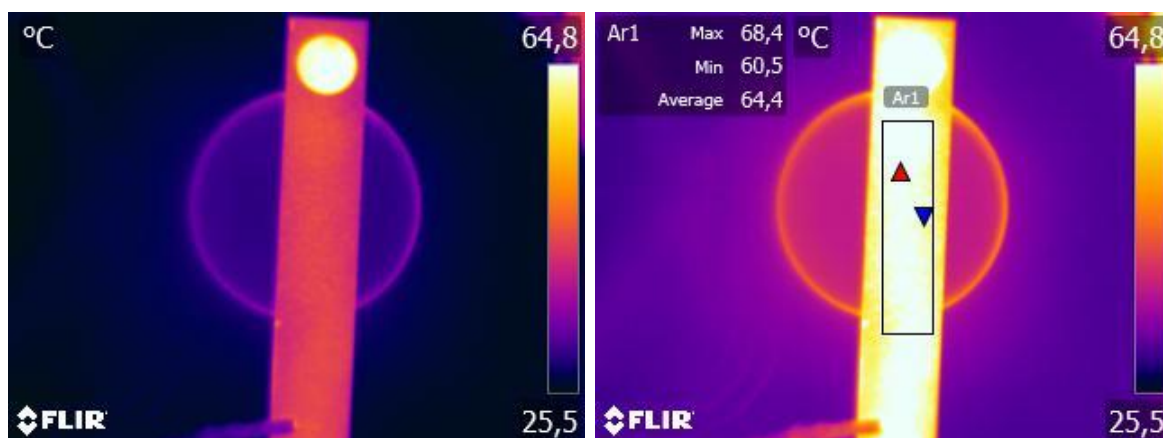
Odhad, zda získaný povrch bude vhodný či ne, lze udělat již z rozdílu světlosti plochy štítku a vzorku. Čím větší rozdíl, tím menší emisivitu povrch má a tím vhodnější bude pro použití na absorbéru.

Vzorek: NÁSTŘIK DARK

Teplota štítku při emisivitě 0,96: 64,8 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 64,4 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízká teplotě štítku: 0,49



před korekcí

po korekcí

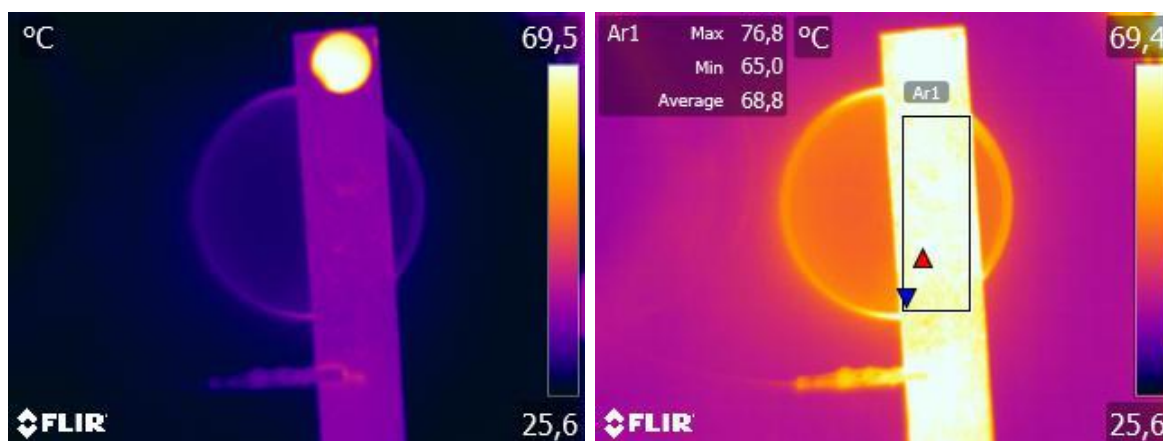
Obr. 64 Snímek vzorku NÁSTŘIK DARK z termokamery.

Vzorek: NÁSTŘIK LIGHT

Teplota štítku při emisivitě 0,96: 69,5 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 68,8 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízká teplotě štítku: 0,29



před korekcí

po korekcí

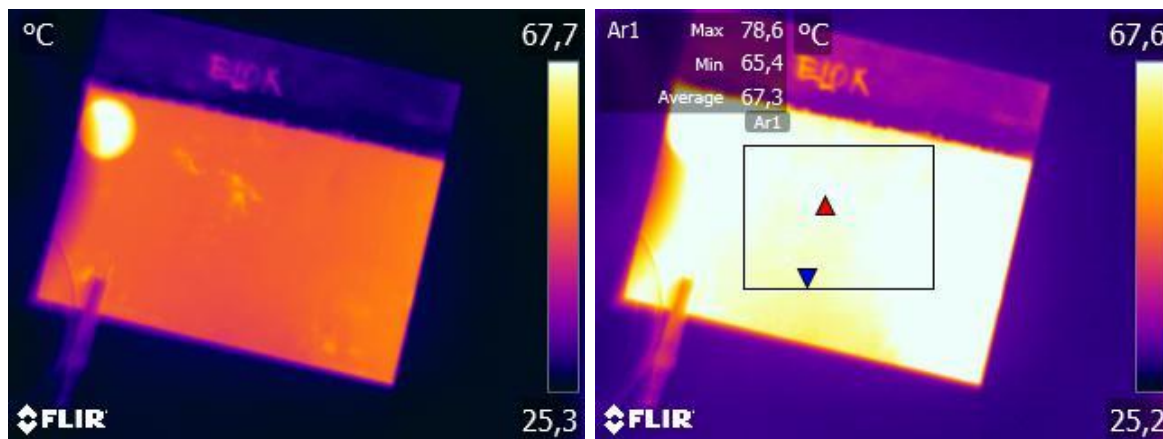
Obr. 65 Snímek vzorku NÁSTŘIK LIGHT z termokamery.

Vzorek: ELOX

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 67,7 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 67,3 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítu: 0,54



před korekcí

po korekci

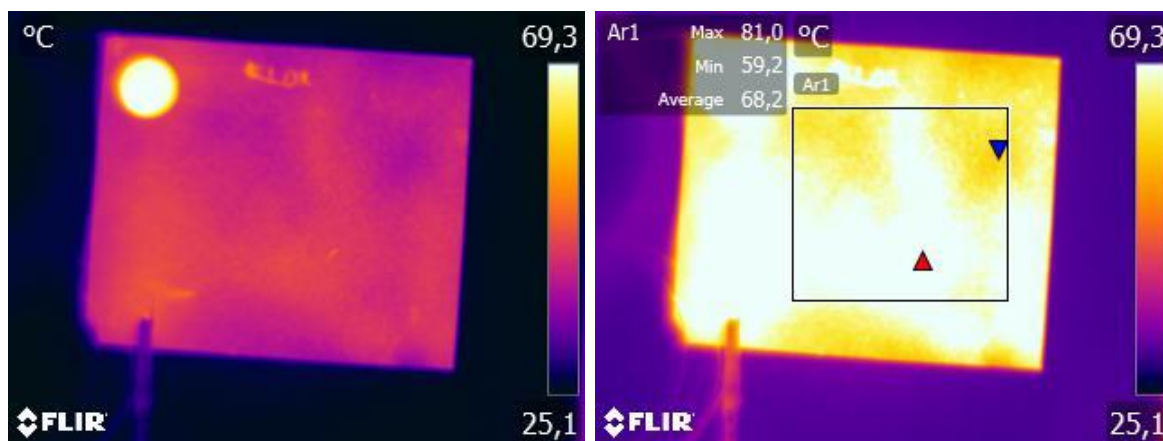
Obr. 66 Snímek vzorku ELOX z termokamery.

Vzorek: ELOX DARK

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 69,3 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 68,2 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítu: 0,44



před korekcí

po korekci

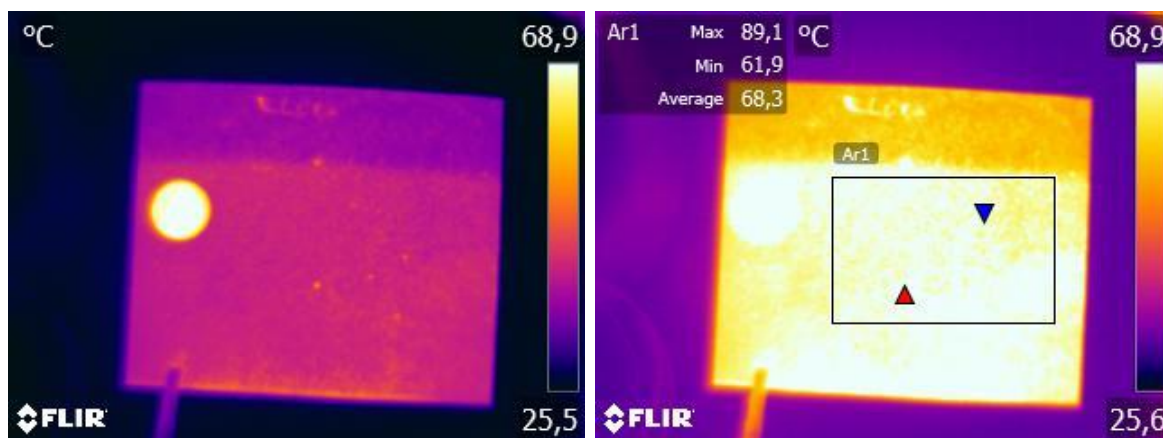
Obr. 67 Snímek vzorku ELOX DARK z termokamery.

Vzorek: ELOX LIGHT

Teplota štítku při emisivitě 0,96: 68,9 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 68,3 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítku: 0,42



před korekcí

po korekci

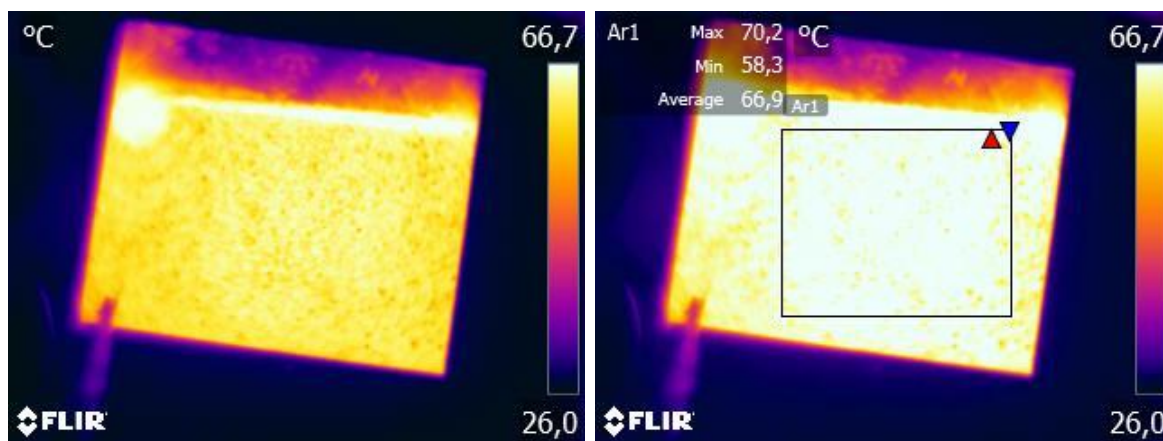
Obr. 68 Snímek vzorku ELOX LIGHT z termokamery.

Vzorek: WATTS AL

Teplota štítku při emisivitě 0,96: 66,7 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 66,9 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítku: 0,86



před korekcí

po korekci

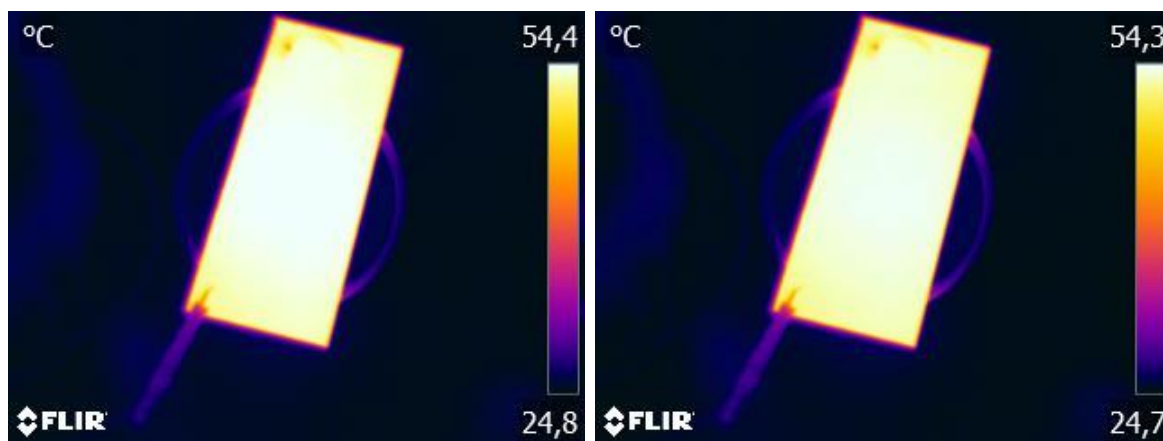
Obr. 69 Snímek vzorku ELOX LIGHT z termokamery.

Vzorek: LARS AL 1

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 54,4 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 54,3 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítu: 0,96



před korekcí

po korekci

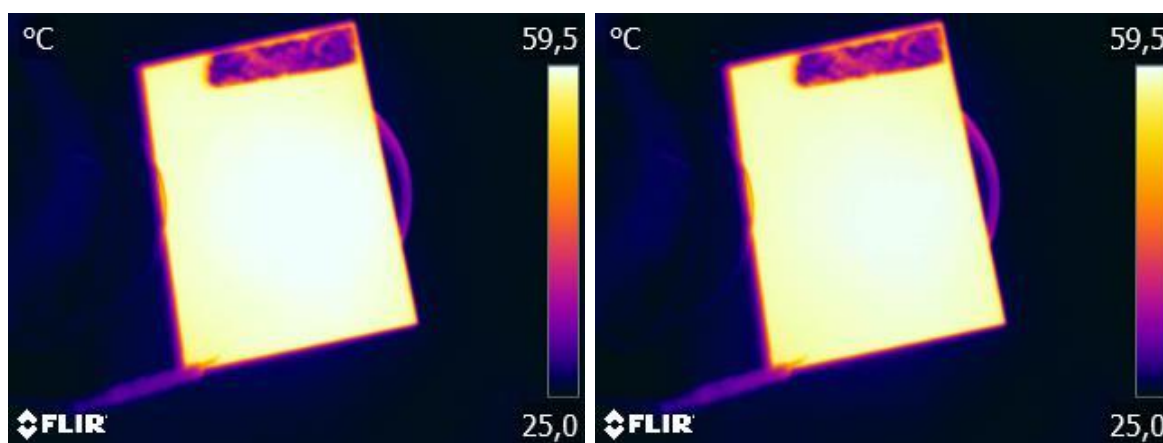
Obr. 70 Snímek vzorku LARS AL 1 z termokamery.

Vzorek: LARS AL 2

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 59,5 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 59,5 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítu: 0,96



před korekcí

po korekci

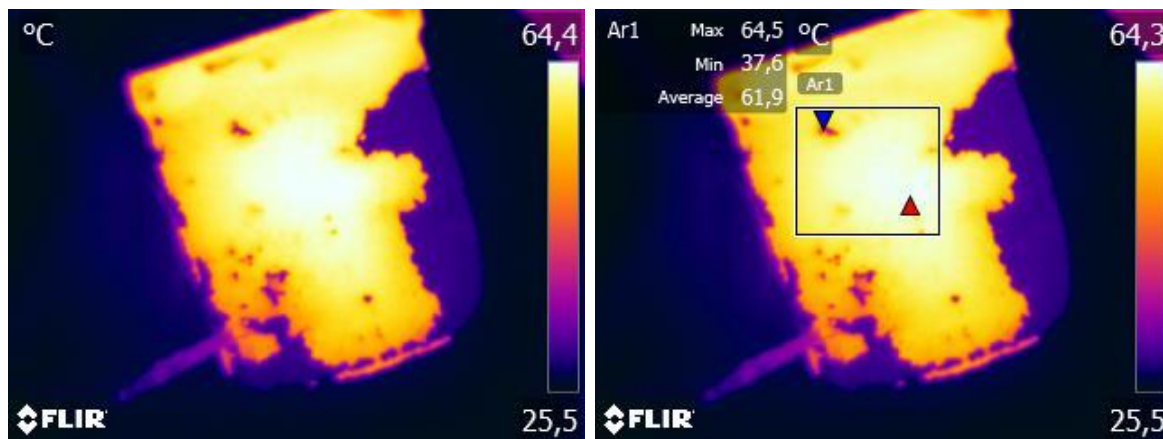
Obr. 71 Snímek vzorku LARS AL 2 z termokamery.

Vzorek: LARS Sn

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 64,4 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 61,9 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízká teplotě štítu: 0,96



před korekcí

po korekci

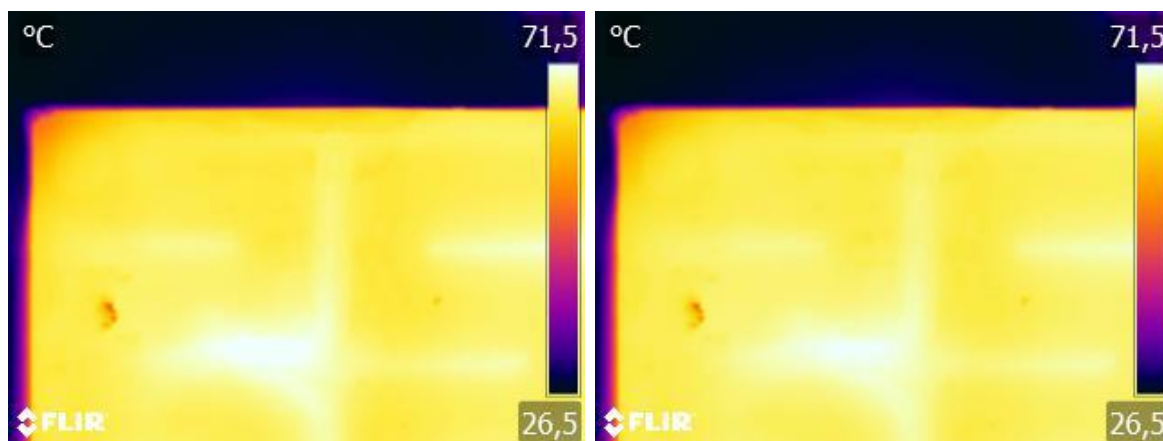
Obr. 72 Snímek vzorku LARS Sn z termokamery.

Vzorek: RABSORB

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 71,5 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 71,5 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízká teplotě štítu: 0,96



před korekcí

po korekci

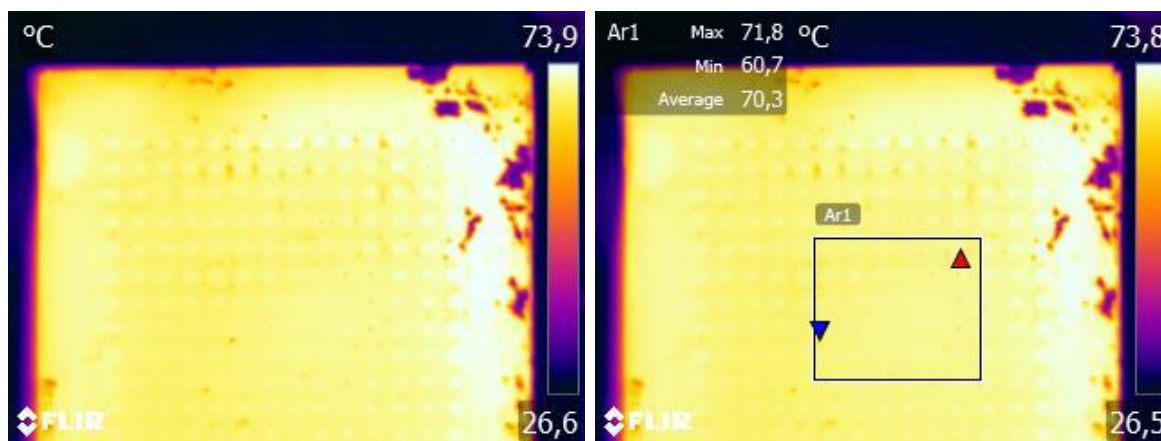
Obr. 73 Snímek vzorku RABSORB z termokamery.

Vzorek: RABSORB KUŽEL

Teplota štítu při emisivitě 0,96: 73,9 °C

Průměrná teplota vybrané oblasti: 70,3 °C

Emisivita, při které je průměrná teplota blízka teplotě štítu: 0,96



před korekcí

po korekci

Obr. 74 Snímek vzorku RABSORB KUŽEL z termokamery.

Pro názornost a ucelený přehled jsou nyní vzorky seřazeny podle velikost emisivity v tab. 4.

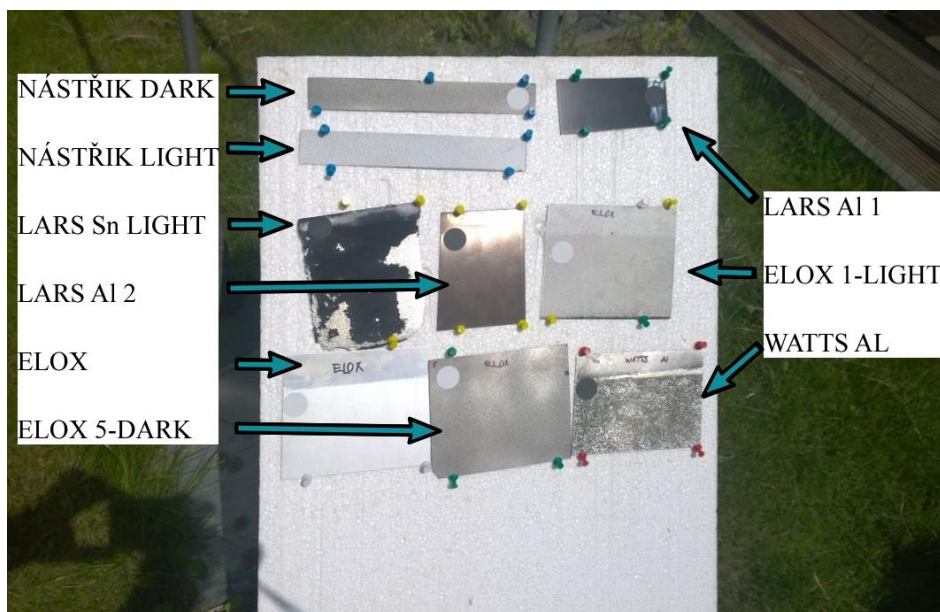
Tabulka 4 Přehled vzorků a jejich emisivity.

NÁZEV VZORKU	EMISIVITA
LARS Al 1	0,96
LARS Al 2	0,96
LARS Sn LIGHT	0,96
RABSORB	0,96
RABSORB - KUŽEL	0,96
WATTS AL	0,86
ELOX	0,54
NÁSTŘIK DARK	0,49
ELOX 5 - DARK	0,44
ELOX 1 - LIGHT	0,42
NÁSTŘIK LIGHT	0,29

Jak můžeme vidět v tabulce 4, nejnižší emisivitu jsme naměřili na vzorku pod názvem NÁSTŘIK LIGHT. Nicméně jeho světlá barva již napovídá, že jeho solární absorpce nebude velká. Tzn., že i přes nejnižší emisivitu z testovaných vzorků nemusí mít také nejlepší selektivitu povlaku, o níž je podrobněji psáno v kapitole 1.1.

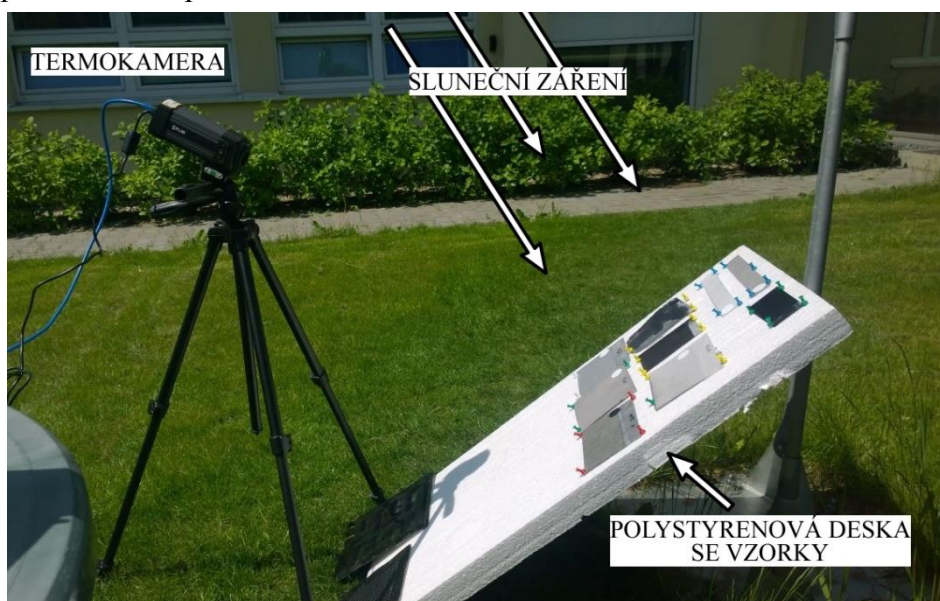
Pro zjištění nejvýhodnější selektivity povlaku je zapotřebí změřit solární absorpci jednotlivých vzorků (viz obr. 75). K tomu je však zapotřebí spektrometru. K našemu účelu jsme jednoduchou metodou porovnali absorpci vzorků mezi sebou.

Postup metody spočívá v umístění vzorků na izolační materiál pro zabránění ohřevu vzorku z podložky. V tomto konkrétním případě byla použita polystyrenová deska o tloušťce 50mm. Koeficient tepelné vodivosti tohoto materiálu běžně dosahuje hodnot kolem 0,037–0,043 W/mK. Náklon desky je cca 45° tak, aby na něj sluneční záření dopadalo kolmo.



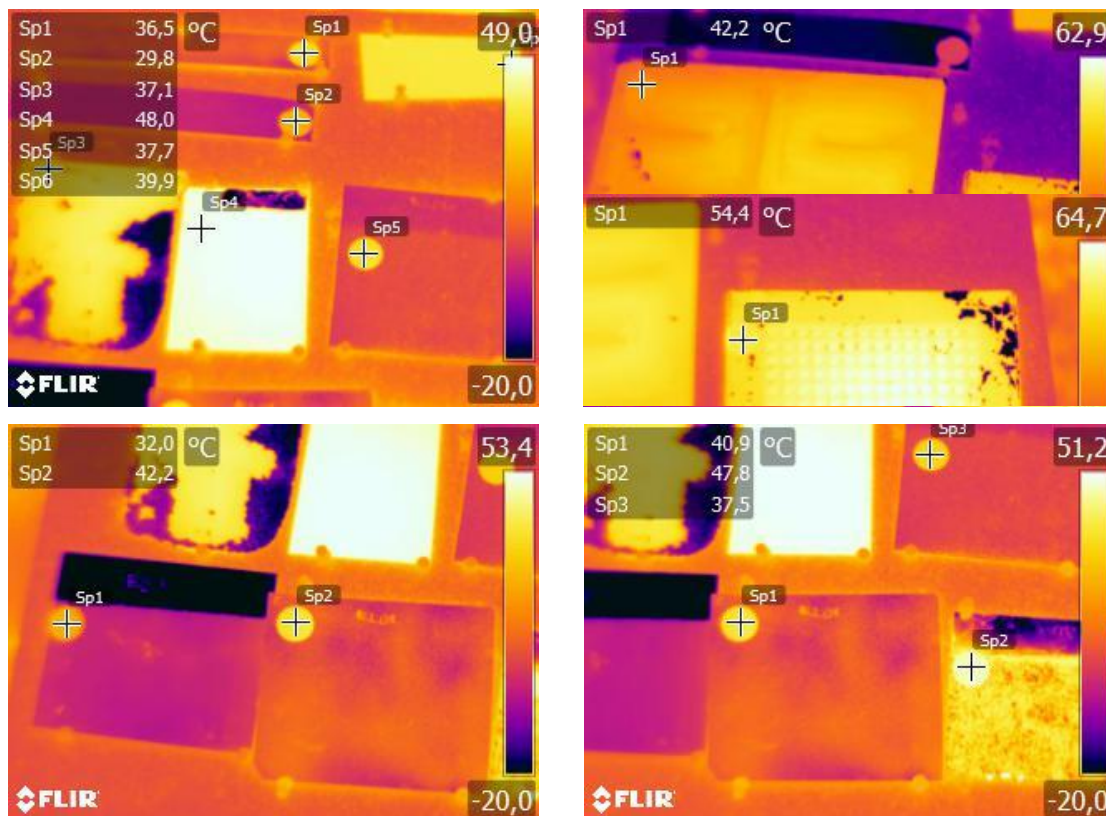
Obr. 75 Umístění vzorků na izolační desce.

Dále se vzorky vystaví slunečnímu záření a měří se jejich teplota. K tomu jsme využili nalepených termoštítků a vzorky nasníмали pomocí termokamery (obr. 76). Při okolní teplotě 19°C byla expozice na slunci 30minut. Poté se nasníмaly jednotlivé termogramy, ze kterých lze vyčíst povrchovou teplotu vzorků.



Obr. 76 Měření solární absorpce.

Vzorky RABSORB a RABSORB KUŽEL byly umístěny ve spodní části desky, jak ukazuje obr. 76. Termovizní snímky vzorků na obr. 77 ukazují již na první pohled zřetelné rozdíly v absorpci solárního záření. Pro větší přehlednost jsou teploty zaznamenány do tabulky, jak tomu bylo i u měření emisivity.



Obr. 77 Snímky vzorků z termovizní kamery s nastavenou emisivitou 0,96.

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků bylo zhotoveno celkem 5 termogramů vždy tak, aby kamera směřovala kolmo na vzorek. Je třeba brát v úvahu i nepřesnost termokamery, která se pohybuje v $\pm 2^\circ\text{C}$, což můžeme vidět i z různých naměřených teplot např. na vzorku ELOX 5 - DARK (Sp2 - $42,2^\circ\text{C}$ a Sp1 - $40,9^\circ\text{C}$).

Předchozí hodnocení vzorku s nejnižší emisivitou se nyní potvrdilo a naměřená absorpce je nejnižší ze všech vzorků. Nejlépe je na tom s absorpcí naopak nátěr Rabsorb. Avšak absorpce zde byla ovlivněna i tím, že se již jedná o hotové vzorky absorberu s upraveným tvarem povrchu.

Dále se tedy zaměříme především na vzorky LARS Al 2, WATTS AL a ELOX 5 – DARK, přičemž pouze poslední zmiňovaný vzorek se skládá z korozivzdorného plechu s nástřikem hliníku – jak bylo původně zamýšleno.

Tabulka 5 Přehled vzorků a jejich teploty.

NÁZEV VZORKU	TEPLOTA
LARS Al 1	$39,9^\circ\text{C}$
LARS Al 2	$48,0^\circ\text{C}$
LARS Sn LIGHT	$37,1^\circ\text{C}$
RABSORB	$42,2^\circ\text{C}$
RABSORB - KUŽEL	$54,4^\circ\text{C}$
WATTS AL	$47,8^\circ\text{C}$
ELOX	$32,0^\circ\text{C}$
NÁSTŘIK DARK	$36,5^\circ\text{C}$
ELOX 5 - DARK	$42,2^\circ\text{C}$
ELOX 1 - LIGHT	$37,5^\circ\text{C}$
NÁSTŘIK LIGHT	$29,8^\circ\text{C}$

8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V experimentu bylo dokázáno, že rozdíly mezi jednotlivými povlaky jsou značné. Ovšem není důležité jít pouze za dosažením co nejvyšší účinnosti povrchu a potažmo celého absorberu, ale je potřeba brát v úvahu i cenu. I při získání neobvykle výhodných vlastností materiálu bude mít produkt jako takový problémy, pokud bude jeho výrobní cena vysoká. Z tohoto důvodu je třeba analyzovat výrobní metody a technologie tak, aby si našly své místo na trhu.

V tabulce 6 jsou uvedeny získané parametry jednotlivých typů vzorků, v porovnání s jejich výrobními cenami. Jelikož se běžně udávají ceny povlaků a nátěrů za 1m^2 je níže uvedený přehled v těchto jednotkách. Je třeba zdůraznit, že použité ceny jsou pouze orientační a jejich celkový vliv na ekonomičnost zkoumané metody je třeba brát s rezervou.

Cena žárového nástřiku včetně předúpravy povrchu tryskáním činí cca 450Kč / m^2 (cena vychází z ceníku firmy Trybox).

Cena nátěru Rabsorb5 o objemu 1000 ml je cca 300Kč, přičemž na 1m^2 se spotřebuje 100ml barvy. Barvu je třeba nanášet ve dvou vrstvách, tzn. cena činí 60Kč / m^2 pokud budeme brát cenu aplikace rovnou ceně nátěru, vychází celková suma za povrchovou úpravu 120Kč / m^2 (cena vychází z ceníku firmy MOVYCHEM Stavební chemie).

Cena čistého eloxování se pohybuje kolem 60Kč / m^2 (cena vychází z ceníku firmy Galvanika Fiala).

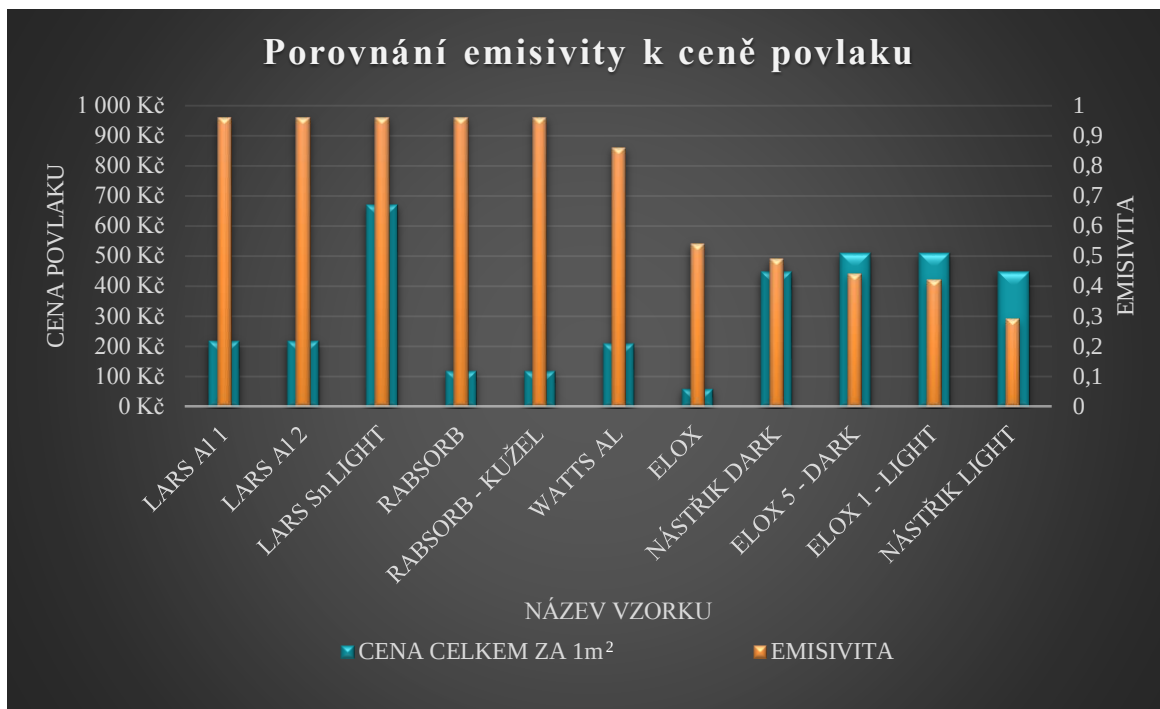
Cena elektrolytického barvení cínem / niklem je cca 130 / 120Kč za m^2 (cena vychází z ceníku firmy Galvanika Fiala).

Tabulka 6 Srovnání cen s vlastnostmi povlaků.

NÁZEV VZORKU	EMISIVITA	TEPLOTA	POVRCHOVÁ ÚPRAVA	CENA ZA 1m^2 JEDNOTLIVÉ TECHNOLOGIE	CENA CELKEM ZA 1m^2
LARS Al 1	0,96	39,9 °C	eloxování + barvení cínem	90Kč + 130Kč	220 Kč
LARS Al 2	0,96	48,0°C	eloxování + barvení cínem	90Kč + 130Kč	220 Kč
LARS Sn LIGHT	0,96	37,1 °C	žárový nástřik hliníku + eloxování + elektrolytické barvení cínem	450Kč + 90Kč + 130Kč	670 Kč
RABSORB	0,96	42,2 °C	nátěr Rabsorb5	120 Kč	120 Kč
RABSORB - KUŽEL	0,96	54,4 °C	nátěr Rabsorb5	120 Kč	120 Kč
WATTS AL	0,86	47,8 °C	eloxování + barvení niklem	90Kč + 120Kč	210 Kč
ELOX	0,54	32,0 °C	eloxování	60 Kč	60 Kč
NÁSTŘIK DARK	0,49	36,5 °C	žárový nástřik	450 Kč	450 Kč
ELOX 5 - DARK	0,44	42,2 °C	žárový nástřik + eloxování	450Kč + 60Kč	510 Kč
ELOX 1 - LIGHT	0,42	37,5 °C	žárový nástřik + eloxování	450Kč + 60Kč	510 Kč
NÁSTŘIK LIGHT	0,29	29,8 °C	žárový nástřik	450 Kč	450 Kč

➤ Srovnání z hlediska emisivity

Graf 1 porovnává jednotlivé ceny vzorků a jejich emisivitu. Při bližším pohledu můžeme vyvodit fakt, že pokud hodláme použít na absorbér levnější povlak s dobrou absorpcí, který však bude mít kvůli vysoké emisivitě značné tepelné ztráty, použijeme na absorbér nátěr Rabsorb5. V případě výroby absorbérů o nižší emisivitě, ale na druhou stranu i nižší absorpci slunečního záření, zvolíme z dostupných vzorků žárový nástřík, který lze případně modifikovat eloxováním. Tím sice nedojde dle naměřených hodnot ke zvýšení účinnosti absorbérů, ale povrch bude odolnější proti vnějším vlivům.



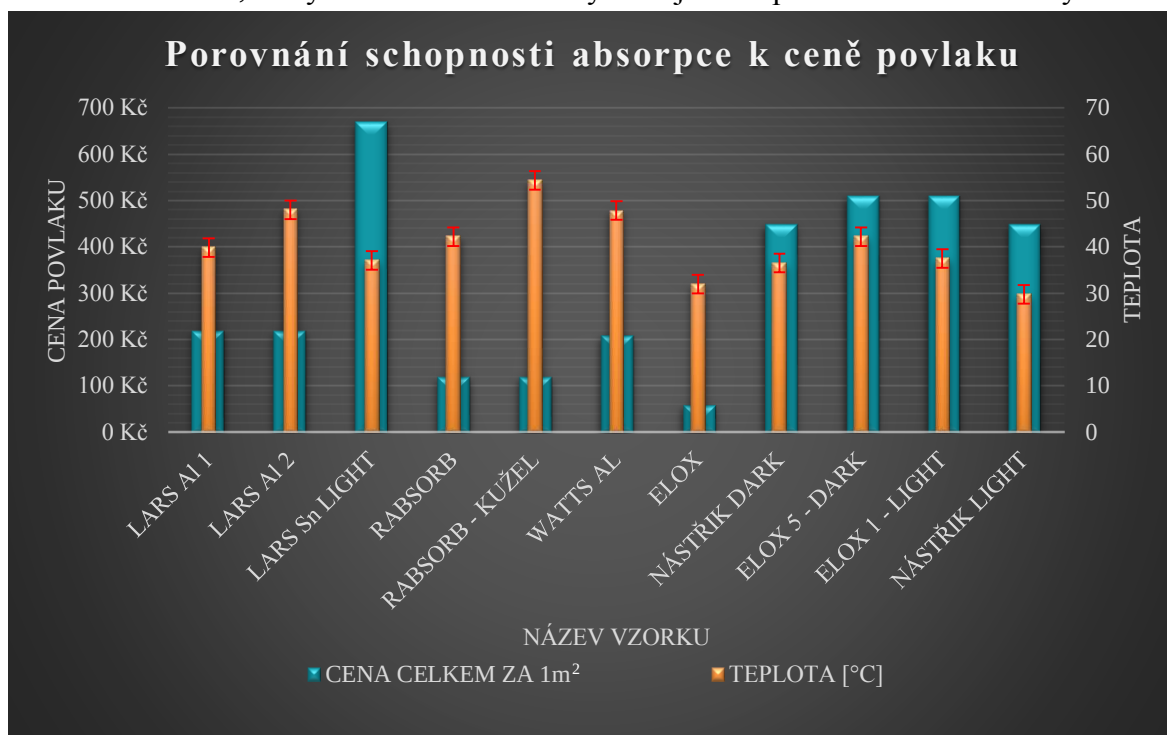
Graf 1 Porovnání emisivity a ceny povlaku.

Vzorky ELOX 5-DARK a ELOX 1-LIGHT mají přibližně stejnou naměřenou emisivitu. Naproti tomu u vzorků před eloxováním, tzn. NÁSTŘÍK DARK a NÁSTŘÍK LIGHT pozorujeme v emisivitě výrazný rozdíl, kdy vzorek DARK má takřka dvojnásobnou emisivitu.

Z tohoto výsledku se domníváme, že nízká emisivita vzorku NÁSTŘÍK LIGHT je způsobená především tvarem reliéfu povrchu. Ten obsahuje kuželovité tvary „mikroprohlubní“, ve kterých vzniká vícenásobný odraz, jako je tomu na obr. 7 v kapitole 1.2. Anodickou oxidací jsou tyto „výstupky“ rozpouštěny, čímž se povrch stává rovnějším a odraz se tak snižuje. Natřením vzorku barvou by mělo za výsledek zatření „mikroprohlubní“ v povlaku a tím dosažení stejného efektu. Proto nemůže být natření vzorku, pro zvýšení absorpce záření, doporučeno. Anodickou oxidaci lze doporučit v případě potřeby zvýšené odolnosti povlaku.

➤ Srovnání z hlediska absorpce

Jak již bylo psáno, k měření absorpce by bylo zapotřebí spektrometru, pro zjednodušení jsme tedy přistoupili k metodě, která jednotlivé absorpce vzorků porovnává. V grafu 2 tedy nevidíme absorpci jako takovou, ale pouze teplotu, na kterou se vzorek ohřál po vystavení slunečnímu záření, s chybou měření $\pm 2^\circ\text{C}$ vycházející ze specifikací termokamery.



Graf 2 Porovnání schopnosti absorpce a ceny povlaku.

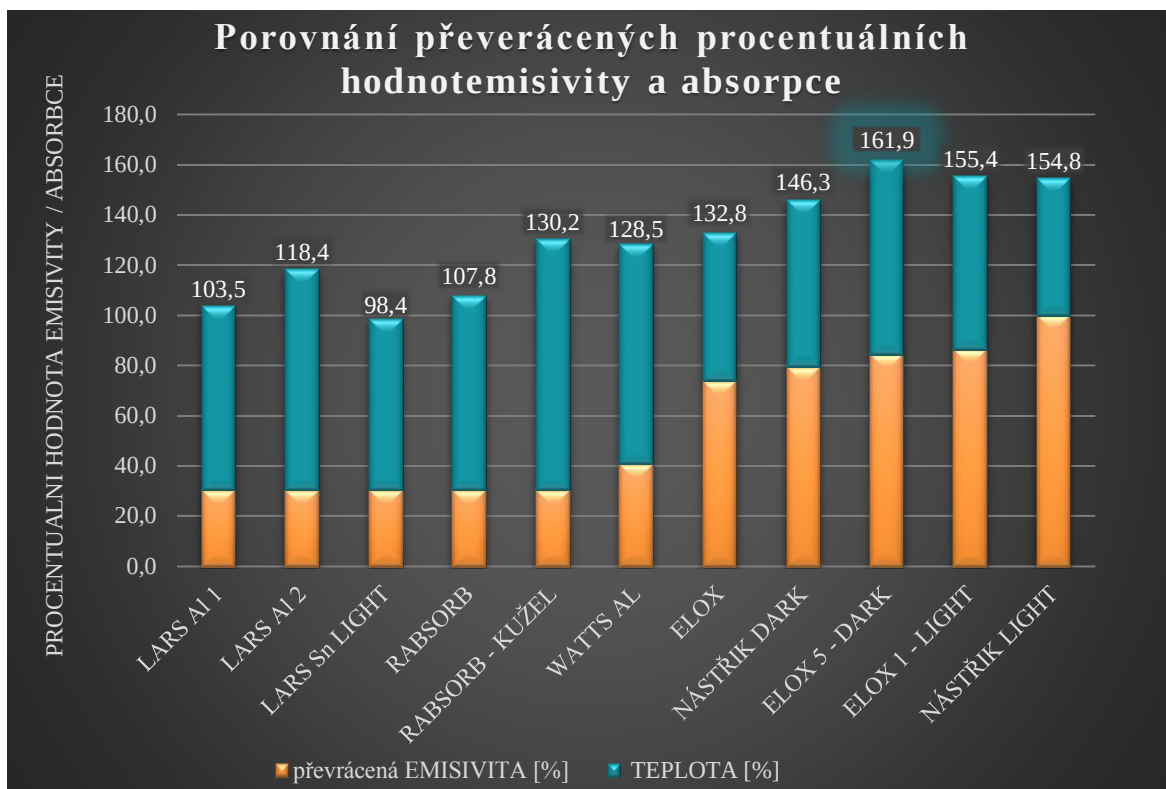
➤ Celkové srovnání vzorků dle vlastností

Dříve uvedené grafy dobře interpretují poznatky, jenž byly v průběhu experimentu zaznamenávány. Jako nejdůležitější je však zobrazit i porovnání emisivity a „absorpce“ vzorků. Nejprve je však nutné převést naměřené hodnoty na procenta. Abychom docílili přehlednosti grafu, jsou dále procentuální hodnoty emisivity převráceny tak, aby nejvíce procent měl vzorek s nejmenší emisivitou, tzn. je nejvýhodnější viz tabulka 7.

Tabulka 7 Celkové porovnání vzorků.

NÁZEV VZORKU	EMISIVITA	EMISIVITA [%]	převrácená EMISIVITA [%]	TEPLOTA [°C]	procentuální TEPLOTA [%]
LARS Al 1	0,96	100,0	30,2	39,9	73,3
LARS Al 2	0,96	100,0	30,2	48	88,2
LARS Sn LIGHT	0,96	100,0	30,2	37,1	68,2
RABSORB	0,96	100,0	30,2	42,2	77,6
RABSORB - KUŽEL	0,96	100,0	30,2	54,4	100,0
WATTS AL	0,86	89,6	40,6	47,8	87,9
ELOX	0,54	56,3	74,0	32	58,8
NÁSTŘIK DARK	0,49	51,0	79,2	36,5	67,1
ELOX 5 - DARK	0,44	45,8	84,4	42,2	77,6
ELOX 1 - LIGHT	0,42	43,8	86,5	37,5	68,9
NÁSTŘIK LIGHT	0,29	30,2	100,0	29,8	54,8

Z takto upravených hodnot (tab. 6) jsme nyní sestrojili graf, který sčítá převrácené procentuální hodnoty emisivity a procentuální zvýšení teploty.



Graf 3 Porovnání převrácených procentuálních hodnot emisivity a absorpce.

Nyní lze vyslovit verdikt, kdy jako nejvhodnější vzorek určený pro další zkoumání se prokazuje vzorek ELOX 5 – DARK. Tento vzorek vykazuje nejlepší poměr absorpce k emisivitě. Dále se jako výhodný jeví i vzorek ELOX 1 – LIGHT a NÁSTŘÍK LIGHT, který navíc není třeba eloxovat, což jak je vidět z grafu 4 či tabulky 6, snižuje náklady na výrobu.



Graf 4 Orientační porovnání cen povrchové úpravy.

9 ZÁVĚRY

V současné době vyvíjený solární absorber poduškového typu je nutné opatřit selektivním povlakem. Dříve použitý nátěr se ukázal jako nepříliš vhodný. Odolává sice podmínkám provozu solárního kolektoru, ale jeho potvrzená vysoká emisivita a po delší době nízká adheze k základnímu materiálu snižuje účinnost absorberu a vyžaduje po jistém čase regeneraci povrchu.

Za účelem ověření výroby nového selektivního povrchu, který nahradí dříve použitý nátěr, bylo zhotoveno celkem 11 vzorků, které podstoupily další modifikování. Po vyhodnocení experimentu v předchozí kapitole lze konstatovat, že povrch absorberu vytvořený pomocí žárového nástřiku může být použit jako vhodná alternativa ke komerčním produktům. Touto technologií jsme na výchozím podkladu vytvořili povlak o nejnižší emisivitě $\varepsilon = 0,29$. Jako nejvýhodnější však pro svou selektivitu vychází vzorek ELOX 5-DARK, s emisivitou 0,44. Výhodou je především jeho nízká cena (v porovnání s absorberem zhotoveným metodou PVD) a vysoká odolnost, zvýšená anodickou oxidací. Další modifikace povrchu se již ukázaly jako nevyhovující a požadované vlastnosti byly horší než u samotného nástřiku, viz LARS Sn LIGHT. Technologie je vhodná i proto, že nedochází k ovlivnění základního materiálu a ten si tak ponechává své původní vlastnosti.

Nicméně je nutné říct, že jsme nedosáhli hodnot, jakých dosahují moderní dostupné absorbery. U nich se emisivita pohybuje kolem 6% se solární absorpcí cca 93%. Jsou však nejčastěji vytvořeny poměrně drahou PVD technologií. Je tedy nutné zvážit, zda se v závislosti na množství absorberů a jejich konečné účinnosti vyplatí použít komerční produkt nebo povlak zhotovený žárovým nástřikem popsaným v této práci.

Pro další pokračování experimentu bych navrhoval provést další žárový nástřik. Měl by být zhotoven ze vzdálenosti trysky od základního materiálu 300 a 350mm, čímž bychom měli dostat vzorky s větší drsností povrchu. V případě neprokázání lepších výsledků absorpce/emisivity s další rostoucí drsností je zde pak možnost strukturu částečně zatříť barvou či elektrochemicky obarvit a přebytečnou drsnost snížit na požadovanou hodnotu. Tímto by se získal vzorek se strukturou povrchu odpovídající vzorku NÁSTŘIK LIGHT, avšak s výhodou obarveného povrchu, který jak jsme zjistili na vzorku NÁSTŘIK DARK, má větší absorpci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Alluminio - ALMECO GROUP: TiNOX energy. 2014. *Alluminio - ALMECO GROUP* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.almecogroup.com/en/pagina/53-tinox-energy-cu>
2. *ASM handbook*. 2013. Materials Park: ASM International, xiii, 398 s. ISBN 978-1-61503-996-8.
3. AST GROUP. 2014. *Aluminum Surface Tech: Conventional Anodizing* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://surfacetech.ca/conventional-anodizing/>
4. BAMBER, Jonathan. 2012. An introduction to the principles of satellite remote sensing. *University of Bristol* [online]. Bristol [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://seis.bris.ac.uk/~ggjlb/teaching/rsp/rsp%20lectures%20with%20figs.htm>
5. BECHNÍK, Bronislav. 2013. Příprava teplé vody. *Tzb-info* [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/10453-priprava-teple-vody-fotovoltaika-nebo-solarni-tepelne-kolektory>
6. BOHLER-UDDEHOLM. 2014. *Prášky a trubičkové dráty pro žárový nástřik*. Praha. Dostupné také z: www.bohler-uddeholm.cz/media/zarove_nastriky.pdf
7. CASTOLIN EUTECTIC. 2015. *Castolin Eutectic: Our Technologies* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.castolin.com/content/our-technologies>
8. ČSN EN ISO 14713. *Ochrana železných a ocelových konstrukcí proti korozi - Povlaky zinku a hliníku - Směrnice*. 1999. Praha: Český normalizační institut.
9. ČSN ISO 8501-1. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu - Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků*. 2007. Praha: Český normalizační institut.
10. DAMPNEY COMPANY. 2015. *Dampney Engineered Coatings: Solar Selective Coating* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.dampney.com/ProductLine/tabid/123/AT/View/PID/2/Thurmalox-250.aspx>
11. DUFFIE, John A William A BECKMAN. 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley, xix, 908 s. ISBN 978-0-471-69867-8.
12. FICKOVÁ, Zuzana a Jan KUDLÁČEK. 2014. Technologie v kosmickém výzkumu – část II. *Povrcháři* [online]. 12(1): 4-9 [cit. 2015-01-10]. DOI: 1802-9833. Dostupné z: www.povrchari.cz
13. GALVANOVNA OMEGA. 2013. *Galvanovna Omega: Galvanické pokovení* [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>
14. GRANQVIST, Claes G. 1989. *Spectrally selective surfaces for heating and cooling applications*. Bellingham, Wash., USA: SPIE Optical Engineering Press, viii, 119 p. ISBN 08-194-0228-1.
15. KURT J. LESKER COMPANY. 2015. *Kurt J. Lesker Company: CVD (Chemical Vapor Deposition) Vacuum System Platforms* [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: http://www.lesker.com/newweb/vacuum_systems/deposition_systems_cvd.cfm
16. MADHUKESHWARA, a E. S. PRAKASH. 2012. An investigation on the performance characteristics of solar flat plate collector with different selective surface coatings. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*. Karnataka:

- International Energy & Environment Foundation, s. 99 - 108. 3. ISSN 2076-2909. Dostupné také z: <http://www.ijee.ieefoundation.org/>
17. MATUŠKA, Tomáš. 2013. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 254 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
 18. MCENANEY, Kenneth. 2010. *Modeling of Solar Thermal Selective Surfaces and Thermoelectric Generators* [online]. Massachusetts Institute of Technology, 107 s. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://dspace.mit.edu>. téze. Massachusetts Institute of Technology.
 19. METALLISATION. 2013. *Metal Spray Equipment: Metal Spray Process* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.metallisation.com/process/>
 20. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK, Zdeněk LIDMILA, Kamil PODANÝ a Jaroslav KUBÍČEK. 2014. Solární absorber se strukturovaným povrchem – možná cesta ke zvýšení účinnosti. In: *Sborník příspěvků z konference AZE 2014*. Kroměříž: AZE, s. 119 - 127
 21. NASA. 2007. *MY NASA DATA* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://mynasadata.larc.nasa.gov/science-processes/electromagnetic-diagram/>
 22. NEVĚČNÝ, Petr. 2012. Stupně přípravy ocelového podkladu dle ČSN ISO 8501-1 a podobných norem. *Povrchové úpravy: odborný časopis pro průmysl, stavebnictví a řemeslníky* [online]. Praha: Press agency, 14(2): 2-5 [cit. 2015-04-25]. ISSN 0551-7354. Dostupné z: http://www.povrchoveupravy.cz/PDF/Nevecny_PU2.pdf
 23. PODJUKLOVÁ, Jitka. 1994. *Speciální technologie povrchových úprav I: Určeno pro posl. 5. roč. Fak. strojní*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 71 s. ISBN 80-707-8235-8.
 24. Princip a funkce | Průvodcem světem termokamer. 2013. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>
 25. SEDLÁČEK, Vladimír. 1992. *Povrchy a povlaky kovů*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 176 s. ISBN 80-010-0799-5.
 26. SHM. 2013. *PVD technologie* [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/vav-centrum/pvd-technologie/>
 27. STEEL COLOR TECHNOLOGY. 2009. *Pieskovačky na pieskovanie, všetko pre pieskovanie* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.est.sk/spolocnost.php>
 28. STICKNEY, Bristol a Boaz SOIFER. 2012. Innovations & Advances in Solar Thermal Systems. *Home power* [online]. (148): 92 - 99 [cit. 2015-04-06]. ISSN 1050-2416. Dostupné z: <http://www.homepower.com>
 29. SULZER METCO. 2013. *An Introduction to Thermal Spray*. USA. Dostupné také z: http://www.upc.edu/sct/en/documents_equipment/d_324_id-804-2.pdf
 30. Surface Finishing Tutorial: Structure of Anodizing Layer. 2011. *Technical Tutorial - MISUMI | Empowering Engineers around the world* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.misumi-techcentral.com/tt/en/surface/2011/07/087-structure-of-anodizing-layer.html>
 31. ŠTAJNRT, Pavel. 2014. *Úvod do práce s termokamerou Flir i7*. Opava. Dostupné také z: http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/termokamera/Prace_s_termokamerou.pdf
 32. Technologie. 2015. *Ionbond* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.ionbond.cz/cz/technologie/>

33. TESHAMICHAEL, by Tuquabo. 2000. *Characterization of selective solar absorbers: experimental and theoretical modeling*. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis. ISBN 91-554-4772-4.
34. Thermal Spraying. 2013. OSAKA FUJI Corporation | overlay welding, thermal spraying, machining technology [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: http://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/
35. Thermal-insulating layer for record-breaking turbine: Press Pictures. 2009. Siemens Global Website [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.siemens.com>
36. Tvrdá anodická oxidace hliníku a jeho slitin. 2008. Povrcháři [online]. 2(1) [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801_povrchari.pdf
37. Vacuum and Controlled-Atmosphere Coating and Surface Modification: Thermal Spray Coatings. 2002. ASM handbook: Surface Engineering Vol 5. USA: ASM International, s. 1446-1471. ISBN 161503827223.
38. WAS IST THERMISCHES SPRITZEN. 2009. GTS Gemeinschaft Thermisches Spritzen [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.gts-ev.de/html_d/ts-info.htm
39. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE WERKSTÄTTEN. 2012. Lab and Field Instrumentation. Germany. Dostupné také z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/wtw/lab-field-instrumentation-2012/24590-45232.html#open>
40. WISTA S.R.O. 2014. Technologie pro povrchové úpravy tryskání, lakování a metalizace [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.wista.cz/>
41. YAHYA, Doaa. 2013. Vlastnosti vakuově napařovaných kovových vrstev. Elektro. Praha: Kavka Print, 23(5): 10-11. Dostupné také z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/05/Elektro_05_2013_output/web/Elektro_05_2013_opf_files/WebSearch/page0012.html
42. Zinc Thermal Spraying. 2011. Zinc | Zinc Benefits, Uses, Facts, Events & Programs | IZA | International Zinc Association [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.zinc.org/info/zinc_thermal_spraying
43. Životnost a záruka povlaků žárového zinku. 2012. MM Průmyslové spektrum. Praha: Vogel Publishing, (4): 54. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zivotnost-a-zaruka-povlaku-zaroveho-zinku.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
θ	[rad]	úhel dopadajícího slunečního záření
α	[-]	poměrná pohltivost (absorpce)
α_{SOL}	[-]	solární pohltivost
ε	[-]	emisivita
λ	[μm]	vlnová délka
λ_1	[μm]	horní vlnová délka dopadajícího slunečního záření
λ_2	[μm]	dolní vlnová délka dopadajícího slunečního záření
ρ	[-]	poměrná odrazivost

Symbol	Jednotka	Popis
G	[μm]	solární spektrum

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obr. 1 Plochý solární kolektor [5].	9
Obr. 2 Schematický řez solárním kolektorem [28].	10
Obr. 3 Srovnání selektivního povrchu s běžným nátěrem [1].	11
Obr. 4 Typy registrů [17].	12
Obr. 5 Změna vlastností použitím antireflexní úpravy [17].	13
Obr. 6 Poduškový absorbér.	14
Obr. 7 Princip vícenásobného odrazu a absorpce [20].	14
Obr. 8 Zařízení na vakuové pokovení [13].	15
Obr. 9 Princip galvanického pokovení [13].	15
Obr. 10 Řez CVD reakční komorou [15].	16
Obr. 11 Povlakovací komora s rotační válcovou katodou [26].	16
Obr. 12 Vzorky hliníkových trubek po anodické oxidaci [3].	16
Obr. 13 Nátěr ThurmaloX [10].	16
Obr. 14 Žárový nástřik [7].	17
Obr. 15 Elektromagnetické spektrum záření [21].	18
Obr. 16 Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [33].	18
Obr. 17 Spektrofotometr Photolab 6000 [39].	19
Obr. 18 Porovnání povrchů z hlediska emisivity [4].	19
Obr. 19 Schéma kompozitních povlaků [33].	20
Obr. 20 Schéma deformace dopadající kapky materiálu [23].	21
Obr. 21 Detail struktury povlaku [2].	21
Obr. 22 Znázornění povlakové vrstvy [34].	22
Obr. 23 Žárový nástřik plamenem [19].	23
Obr. 24 Tavení přídavného materiálu [42].	23
Obr. 25 Schéma nástřiku plamenem [6].	23
Obr. 26 Nástřik elektrickým obloukem [19].	24
Obr. 27 Schéma nástřiku elektrickým obloukem [6].	24
Obr. 28 Proces plazmového nástřiku [19].	25
Obr. 29 Schéma nástřiku plazmou [6].	25
Obr. 30 Schéma nástřiku detonací [25].	26
Obr. 31 Schéma nástřiku laserem [38].	26
Obr. 32 Příklad povlakování metodou HVOF [19].	27
Obr. 33 Schéma vysokorychlostního nástřiku [6].	27
Obr. 34 Rozmístění zařízení na pracovišti žárového nástřiku [29].	28
Obr. 35 Tryskací zařízení [40].	29
Obr. 36 Stupně úpravy tryskáním dle ČSN ISO 8501-1 [9].	30
Obr. 37 Schéma zkoušky přilnavosti povlaku v tahu [6].	31
Obr. 38 Konstrukční úpravy součástí pro žárový nástřik [29].	33
Obr. 39 Princip katodické ochrany [43].	34
Obr. 40 Žárový nástřik tepelné bariéry na lopatku turbíny [35].	34
Obr. 41 Model anodizovaného povrchu [30].	35
Obr. 42 Srovnání termokamery a pyrometru [24].	36
Obr. 43 Menu termokamery [24].	36
Obr. 44 Schéma metalizační pistole AD3 M [27].	37
Obr. 45 Vzorky po žárovém nástřiku plamenem.	39
Obr. 46 Zdroj Manson NP-9615.	40
Obr. 47 Lext OLS 3100.	40

Obr. 48 Vzorky v lázni při eloxování.	40
Obr. 49 Elektrolytické barvení – střídavé napětí	41
Obr. 50 Vzorky opatřené nátěrem Rabsorb5.	42
Obr. 51 Anodická oxidace na vzorku z čistého Al.	43
Obr. 52 Povrch vzorku ELOX pod konfokálním mikroskopem.	43
Obr. 53 Tloušťka vrstvy Al_2O_3	43
Obr. 54 Vzorek ELOX 5 - DARK pod konfokálním mikroskopem.	44
Obr. 55 Vzorek ELOX 1 - LIGHT pod konfokálním mikroskopem.	44
Obr. 56 WATTS AL.	45
Obr. 57 Detail povrchu vzorku WATTS AL s viditelnými částicemi niklu.	45
Obr. 58 Vzorek po Wattsově lázni bez vyloučeného niklu.	45
Obr. 59 Vzorek LARS Sn je viditelně rozleptán použitou lázní.	45
Obr. 60 LARS Al 1–vlevo a LARS Al 2–vpravo.	45
Obr. 61 Termovizní kamera FLIR A310.	46
Obr. 62 Sušárna Memmert UFE 400.	46
Obr. 63 Popis měření termovizní kamerou.	46
Obr. 64 Snímek vzorku NÁSŘIK DARK z termokamery.	47
Obr. 65 Snímek vzorku NÁSŘIK LIGHT z termokamery.	47
Obr. 66 Snímek vzorku ELOX z termokamery.	48
Obr. 67 Snímek vzorku ELOX DARK z termokamery.	48
Obr. 68 Snímek vzorku ELOX LIGHT z termokamery.	49
Obr. 69 Snímek vzorku ELOX LIGHT z termokamery.	49
Obr. 70 Snímek vzorku LARS AL 1 z termokamery.	50
Obr. 71 Snímek vzorku LARS AL 2 z termokamery.	50
Obr. 72 Snímek vzorku LARS Sn z termokamery.	51
Obr. 73 Snímek vzorku RABSORB z termokamery.	51
Obr. 74 Snímek vzorku RABSORB KUŽEL z termokamery.	52
Obr. 75 Umístění vzorků na izolační desce.	53
Obr. 76 Měření solární absorpce.	53
Obr. 77 Snímky vzorků z termovizní kamery s nastavenou emisivitou 0,96.	54
Tabulka 1 Přehled zkoušek stříkaných povlaků a jejich normy [25].	32
Tabulka 2 Složení Wattsovy lázně.	41
Tabulka 3 Seznam vzorků a jejich popis.	42
Tabulka 4 Přehled vzorků a jejich emisivity.	52
Tabulka 5 Přehled vzorků a jejich teploty.	54
Tabulka 6 Srovnání cen s vlastnostmi povlaků.	55
Tabulka 7 Celkové porovnání vzorků.	57
Graf 1 Porovnání emisivity a ceny povlaku.	56
Graf 2 Porovnání schopnosti absorpce a ceny povlaku.	57
Graf 3 Porovnání převrácených procentuálních hodnot emisivity a absorpce.	58
Graf 4 Orientační porovnání cen povrchové úpravy.	58

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Table of total emissivity [16]



Príloha 1 [16]

Table of Total Emissivity

These tables are presented for use as a guide when making infrared temperature measurements with the OMEGASCOPE® or other infrared pyrometers. The total emissivity (ϵ) for Metals, Non-metals and Common Building Materials are given.

Since the emissivity of a material will vary as a function of temperature and surface finish, the values in these tables should be used only as a guide for relative or delta measurements.

The exact emissivity of a material should be determined when absolute measurements are required.

METALS

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity	Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity	Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Alloys			Polished	100 (38)	.03	Monel, Ni-Cu Oxid. at 1110°F (599)		.46
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	392 (200)	.90	Highly Polished	100 (38)	.02	Nickel		
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	932 (500)	.97	Rolled	100 (38)	.64	Polished	100 (38)	.05
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	518 (270)	.89	Rough	100 (38)	.74	Oxidized	100-500 (38-260)	.31-.46
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	1040 (560)	.82	Molten	1000 (538)	.15	Unoxidized	77 (25)	.05
80-Ni, 20-CR, Oxidized	212 (100)	.87	Molten	1970 (1077)	.16	Unoxidized	212 (100)	.06
80-Ni, 20-CR, Oxidized	1112 (600)	.87	Molten	2230 (1221)	.13	Unoxidized	932 (500)	.12
80-Ni, 20-CR, Oxidized	2372 (1300)	.89	Nickel Plated	100-500 (38-260)	.37	Unoxidized	1832 (1000)	.19
Aluminium			Dow Metal	0.4-600 (-18-316)	.15	Electrolytic	100 (38)	.04
Unoxidized	77 (25)	.02	Gold			Electrolytic	500 (260)	.06
Unoxidized	212 (100)	.03	Enamel	212 (100)	.37	Electrolytic	1000 (538)	.10
Unoxidized	932 (500)	.06	Plate (.0001)			Electrolytic	2000 (1093)	.16
Oxidized	390 (199)	.11	Plate on .0005 Silver	200-750 (93-399)	.11-.14	Nickel Oxide	1000-2000 (538-1093)	.59-.86
Oxidized	1110 (599)	.19	Plate on .0005 Nickel	200-750 (93-399)	.07-.09	Palladium Plate (.00005		
Oxidized at 599°C (1110°F)	390 (199)	.11	Polished	100-500 (38-260)	.02	on .0005 silver)	200-750 (93-399)	.16-.17
Oxidized at 599°C (1110°F)	1110 (599)	.19	Polished	1000-2000 (538-1093)	.03	Platinum	100 (38)	.05
Heavily Oxidized	200 (93)	.20	Haynes Alloy C,			"	500 (260)	.05
Heavily Oxidized	940 (504)	.31	Oxidized	600-2000 (316-1093)	.90-.96	"	1000 (538)	.10
Highly Polished	212 (100)	.09	Haynes Alloy 25,			Platinum, Black	100 (38)	.93
Roughly Polished	212 (100)	.18	Oxidized	600-2000 (316-1093)	.86-.89	"	500 (260)	.96
Commercial Sheet	212 (100)	.09	Haynes Alloy X,			"	2000 (1093)	.97
Highly Polished Plate	440 (227)	.04	Oxidized	600-2000 (316-1093)	.85-.88	" Oxidized at 1100°F	500 (260)	.07
Highly Polished Plate	1070 (577)	.06	Inconel Sheet	1000 (538)	.28	"	1000 (538)	.11
Bright Rolled Plate	338 (170)	.04	Inconel Sheet	1200 (649)	.42	Rhodium Flash (0.0002		
Bright Rolled Plate	932 (500)	.05	Inconel Sheet	1400 (760)	.58	on 0.0005 Ni)	200-700 (93-371)	.10-.18
Alloy A3003, Oxidized	600 (316)	.40	Inconel X, Polished	75 (24)	.19	Silver		
Alloy A3003, Oxidized	900 (482)	.40	Inconel B, Polished	75 (24)	.21	Plate (0.0005 on Ni)	200-700 (93-371)	.06-.07
Alloy 1100-0	200-800 (93-427)	.05	Iron			Polished	100 (38)	.01
Alloy 24ST	75 (24)	.09	Oxidized	212 (100)	.74	"	500 (260)	.02
Alloy 24ST, Polished	75 (24)	.09	Oxidized	930 (499)	.84	"	1000 (538)	.03
Alloy 75ST	75 (24)	.11	Oxidized	2190 (1199)	.89	"	2000 (1093)	.03
Alloy 75ST, Polished	75 (24)	.08	Unoxidized	212 (100)	.05	Steel		
Bismuth, Bright	176 (80)	.34	Red Rust	77 (25)	.70	Cold Rolled	200 (93)	.75-.85
Bismuth, Unoxidized	77 (25)	.05	Rusted	77 (25)	.65	Ground Sheet	1720-2010 (938-1099)	.55-.61
Bismuth, Unoxidized	212 (100)	.06	Liquid	2760-3220 (1516-1771)	.42-.45	Polished Sheet	100 (38)	.07
Brass			Cast Iron			"	500 (260)	.10
73% Cu, 27% Zn, Polished	476 (247)	.03	Oxidized	390 (199)	.64	"	1000 (538)	.14
73% Cu, 27% Zn, Polished	674 (357)	.03	Oxidized	1110 (599)	.78	Mild Steel, Polished	75 (24)	.10
62% Cu, 37% Zn, Polished	494 (257)	.03	Unoxidized	212 (100)	.21	Mild Steel, Smooth	75 (24)	.12
62% Cu, 37% Zn, Polished	710 (377)	.04	Strong Oxidation	40 (104)	.95	Mild Steel,		
83% Cu, 17% Zn, Polished	530 (277)	.03	Strong Oxidation	482 (250)	.95	Liquid	2910-3270 (1599-1793)	.28
Matte	68 (20)	.07	Liquid	2795 (1535)	.29	Steel, Unoxidized	212 (100)	.08
Burnished to Brown Colour	68 (20)	.40	Wrought Iron			Steel, Oxidized	77 (25)	.80
Cu-Zn, Brass Oxidized	392 (200)	.61	Dull	77 (25)	.94	Steel Alloys		
Cu-Zn, Brass Oxidized	752 (400)	.60	Dull	660 (349)	.94	Type 301, Polished	75 (24)	.27
Cu-Zn, Brass Oxidized	1112 (600)	.61	Smooth	100 (38)	.35	Type 301, Polished	450 (232)	.57
Unoxidized	77 (25)	.04	Polished	100 (38)	.28	Type 301, Polished	1740 (949)	.55
Unoxidized	212 (100)	.04	Lead			Type 303, Oxidized	600-2000 (316-1093)	.74-.87
Cadmium	77 (25)	.02	Polished	100-500 (38-260)	.06-.08	Type 310, Rolled	1500-2100 (816-1149)	.56-.81
Carbon			Rough	100 (38)	.43	Type 316, Polished	75 (24)	.28
Lampblack	77 (25)	.95	Oxidized	100 (38)	.43	Type 316, Polished	450 (232)	.57
Unoxidized	77 (25)	.81	Oxidized at 1100°F	100 (38)	.63	Type 316, Polished	1740 (949)	.66
Unoxidized	212 (100)	.81	Gray Oxidized	100 (38)	.28	Type 321	200-800 (93-427)	.27-.32
Unoxidized	932 (500)	.79	Magnesium	100-500 (38-260)	.07-.13	Type 321 Polished	300-1500 (149-815)	.18-.49
Candle Soot	250 (121)	.95	Magnesium Oxide 1880-3140 (1027-1727)		.16-.20	Type 321 w/BK Oxide	200-800 (93-427)	.66-.76
Filament	500 (260)	.95	Mercury	32 (0)	.09	Type 347, Oxidized	600-2000 (316-1093)	.87-.91
Graphitized	212 (100)	.76	"	77 (25)	.10	Type 350	200-800 (93-427)	.18-.27
Graphitized	572 (300)	.75	"	100 (38)	.10	Type 350 Polished	300-1800 (149-982)	.11-.35
Graphitized	932 (500)	.71	"	212 (100)	.12	Type 446, Polished	300-1500 (149-815)	.15-.37
Chromium	100 (38)	.08	Molybdenum	100 (38)	.06	Type 17-7 PH	200-600 (93-316)	.44-.51
Chromium	1000 (538)	.26	"	500 (260)	.08	Type 17-7 PH		
Chromium, Polished	302 (150)	.06	"	1000 (538)	.11	Polished	300-1500 (149-815)	.09-.16
Cobalt, Unoxidized	932 (500)	.13	"	2000 (1093)	.18	Type C1020,		
Cobalt, Unoxidized	1832 (1000)	.23	" Oxidized at 1000°F	600 (316)	.80	Oxidized	600-2000 (316-1093)	.87-.91
Columbium, Unoxidized	1500 (816)	.19	" Oxidized at 1000°F	700 (371)	.84	Type PH-15-7 MO	300-1200 (149-649)	.07-.19
Columbium, Unoxidized	2000 (1093)	.24	" Oxidized at 1000°F	800 (427)	.84	Stellite, Polished	68 (20)	.18
Copper			" Oxidized at 1000°F	900 (482)	.83	Tantalum, Unoxidized	1340 (727)	.14
Cuprous Oxide	100 (38)	.87	" Oxidized at 1000°F	1000 (538)	.82	"	2000 (1093)	.19
Cuprous Oxide	500 (260)	.83	Monel, Ni-Cu	392 (200)	.41	"	3600 (1982)	.26
Cuprous Oxide	1000 (538)	.77	Monel, Ni-Cu	752 (400)	.44	"	5306 (2930)	.30
Black, Oxidized	100 (38)	.78	Monel, Ni-Cu	1112 (600)	.46	Tin, Unoxidized	77 (25)	.04
Etched	100 (38)	.09	Monel, Ni-Cu Oxidized	68 (20)	.43	"	212 (100)	.05
Matte	100 (38)	.22				Tinned Iron, Bright	76 (24)	.05
Roughly Polished	100 (38)	.07				"	212 (100)	.08