



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ČIŠTĚNÍ POVRCHU LASEREM

LASER SURFACE CLEANING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Macháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D.,

IWE

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Macháček**
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2022/23

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 bakalářské práce:

Čištění povrchu laserem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laser jako nekonvenční výrobní technologie a jeho aplikace nacházejí stále více uplatnění nejen ve strojírenství ale i ve strojírenské technologii. Cílem této bakalářské práce bude popsat literární řešení konkrétní aplikace čištění zoxidovaného povrchu laserem M200 od společnosti 4Jet. Zkušenosti z provedeného experimentu zhodnotit v možnostech klasických metod čištění zkorodovaného povrchu, včetně použití laseru k čištění i jiných povrchů. Součástí práce bude výčet typů povrchů a materiálů – specifikace, které lze daným typem zařízení čistit a v jaké kvalitě.

Cíle bakalářské práce:

Literární řešení laseru a čistících laserů.
Literární řešení koroze a materiálů vhodných k čištění laserem.
Studie proveditelnosti čištění laserem na zoxidovaném povrchu.
Vyhodnocení čištění laserem.
Porovnání s klasickými metodami čištění zoxidovaných povrchů.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

FASTOVSKIJ, B. G., MAYER, Josef, ed., 1952. Čištění oceli plamenem: využití plamene a elektrického oblouku k čištění povrchu oceli v těžkém průmyslu. Přeložil Alois VÁCLAVEK. Praha: Práce. Technické příručky Práce.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá proveditelností čištění laserovým zařízením na různých typech nečistot a povrchových úprav. V teoretické části jsou popsány základní principy laseru, představení zařízení použitého pro praktickou část (M200 společnosti 4Jet), koroze a povrchových úprav. V praktické části byl popsán proces přípravy vzorků, průběh a vyhodnocení úspěšnosti čištění, které se zaměřovalo na proveditelnost operace. Poslední část práce se věnuje porovnání konvenčních technologií čištění povrchu a technologie laserového čištění. Závěr shrnuje a uceluje získané poznatky.

Klíčová slova

laser, laserové čištění, povrchová úprava, koroze, chemické čištění, mechanické čištění

ABSTRACT

This thesis covers feasibility of laser cleaning applied to various types of surface contaminations and treatments. In theoretical part of the theses are described basic principles of laser, a machine used in practical section (M200 by 4Jet) is introduced and corrosion and surface treatments are depicted. In practical part of the theses is described the preparation process of testing samples, the cleaning procedure and the results thereof are evaluated with emphasis on feasibility of the operation. The last section of the thesis focuses on comparison between conventional cleaning technologies and that of laser cleaning. Conclusion of the thesis summarises gained insights.

Keywords

laser, laser cleaning, surface treatment, corrosion, chemical cleaning, mechanical cleaning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁČEK, Martin. *Čištění povrchu laserem* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149436>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Čištění povrchu laserem vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Martin Macháček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D., IWE, za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce a za čas, který mi při tom věnoval. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Josefu Izákovi za pomoc s přípravou a zajištěním vzorků pro praktickou část práce. A konečně děkuji i společnosti 4Jet za svolení k realizaci testování na jejich zařízení a firmě StrojeJMK za poskytnutí čistícího zařízení a jejich spolupráci.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	11
2 TEORIE laseru	12
2.1 Komponenty laseru.....	12
2.2 Princip laseru	13
2.3 Laser M200 společnosti 4Jet	14
2.3.1 Popis	14
2.3.2 Technické parametry	15
2.3.3 Princip čištění	15
2.3.4 Bezpečnost práce	16
2.3.5 Výhody laserového čištění.....	16
3 koroze a Povrchové úpravy	17
3.1 Koroze	17
3.1.1 Vnitřní mechanismy	17
3.1.2 Korozní prostředí	17
3.1.3 Druh korozního napadení	18
3.2 Povrchové úpravy	18
3.2.1 Zinkování.....	19
3.2.2 Eloxování.....	20
3.2.3 Práškové lakování.....	20
3.2.4 Mokrý lakování.....	20
4 Praktická část.....	22
4.1 Příprava vzorků	22
4.1.1 Vzorky připravené společnostmi	22
4.1.2 Samostatně připravené vzorky.....	23
4.2 Průběh a hodnocení laserového čištění.....	25
4.2.1 Mokře lakované vzorky	26
4.2.2 Korozní vzorky	28
4.2.3 Zinkované vzorky	29
4.2.4 Práškově lakované vzorky	29
4.2.5 Eloxované vzorky	30
4.3 Vyhodnocení výsledků	31
5 Porovnání technologií čištění povrchů	32
5.1 Chemické čištění	32

5.1.1 Čištění vodou a odmašťování	32
5.1.2 Moření	32
5.2 Mechanické čištění	33
5.2.1 Ruční a mechanizované	33
5.2.2 Tryskání	33
5.2.3 Omílání	34
ZÁVĚR.....	35

Seznam použitých zdrojů

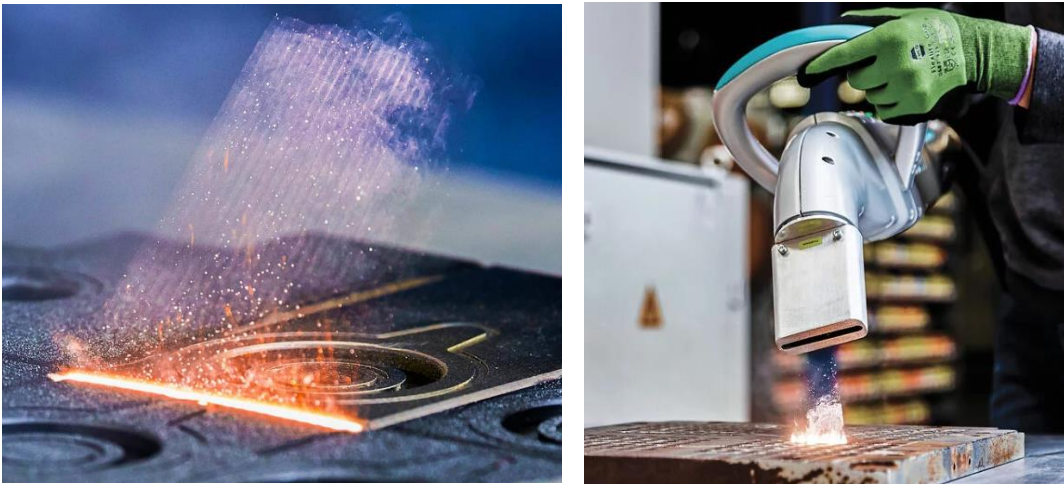
Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

V rámci přípravy na povrchové úpravy nových, nebo renovace již roky sloužících strojů, nástrojů a forem je třeba zahrnout čištění povrchu jednotlivých součástí. Požadavky na dosaženou kvalitu povrchu se může lišit díl od dílu a je třeba na ně dávat dostatečný důraz při výběru adekvátní technologie z rozsáhlé nabídky dnešního trhu. U funkčních součástí převažuje potřeba zachovat geometrické a rozměrové tolerance dílu a drsnost povrchu, což nemusí být zaručeno použitím například tryskání nebo broušení. Velkým faktorem při výběru technologie čištění povrchu také hraje typ nečistot, které je třeba odstranit. Nejčastější z nich mohou být mastnoty, koroze, nátěry či povlaky. Metody na bázi chemických látek mohou mít rozdílné postupy a účinky na jiné typy nečistot, jejich použití tak nemusí být univerzální. A hlavně v posledních letech se klade stále větší důraz na ekologičnost všech procesů. S tímto aspektem se příliš neslučují technologie tryskání, omílání a chemického čištění.

Jednou z možností čištění povrchu je bezkontaktní laserové čištění. Jedná se o nekonvenční technologii, která se dostává do povědomí stále více společností a získává si svou zaslouženou popularitu. Mezi hlavní přednosti se řadí jednoduchá manipulace se zařízením a jeho mobilita, vysoká ekologičnost, minimální provozní náklady a vysoká šetrnost k čištěnému povrchu. [1; 2]



Obr. 1 – Ukázka laserového čištění [3]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Aplikací pro čistící technologie je nespočet a jednotliví výrobci se neustále snaží své produkty zdokonalovat, aby co nejvíce vyhovovaly potřebám trhu. Důvody k čištění také mohou být rozličné, od renovace starého strojního zařízení, přes přípravy povrchu k dalším úpravám až po odstraňování škod po požáru, či restaurování historických památek. [1; 2]

Při výběru vhodné metody je nutné vědět, zda bude vůbec účinná. Rozdílné povrchy a materiály nečistot v případě bezkontaktního čištění laserem mohou reagovat jinak, u některých je téměř zaručena dobrá účinnost, jiné jsou odolnější a některé není možné odstranit vůbec. Nejčastějším řešením je demonstrační ukázka na konkrétním případě v prostorách firmy, zkouška aplikace na konkrétním problému a vyhodnocení účinnosti. Z důvodu urychlení procesu vyhodnocení vhodnosti metody byla sjednána tato bakalářská práce. Jejím hlavním cílem je vyzkoušení vlastností laseru jako čistícího zařízení a sestavení základní použitelnosti.

V první teoretické části je rozebrána teoretická stránka laserového paprsku, tedy jeho vznik, základní konstrukční komponenty, jednotlivé typy a rozbor zařízení použitého v praktické části práce. Druhá část se zabývá teorií úprav povrchů, připravených pro praktickou část, jak nečistot, tak obvyklých finálních operací včetně rozboru jejich teoretické vhodnosti pro čištění laserem. Praktická část popisuje proces vytváření jednotlivých nečistot a povlaků, průběh jejich odstraňování a rozbohem úspěšnosti. Poslední díl práce je věnován stručnému porovnání zkoumané technologie s jinými konvenčními metodami na trhu z různých hledisek.

Výrobce čistícího laseru je německá firma 4Jet, která byla založena v roce 2006. Její hlavní zaměření spočívá v optických a laserových zařízeních a jejich integraci do různých oblastí průmyslu. Společnost sídlí v severní části Německa, ve městě Alsdorf poblíž Cách a je dodnes vedena jejím zakladatelem Jörgem Jetterem. [2; 3]

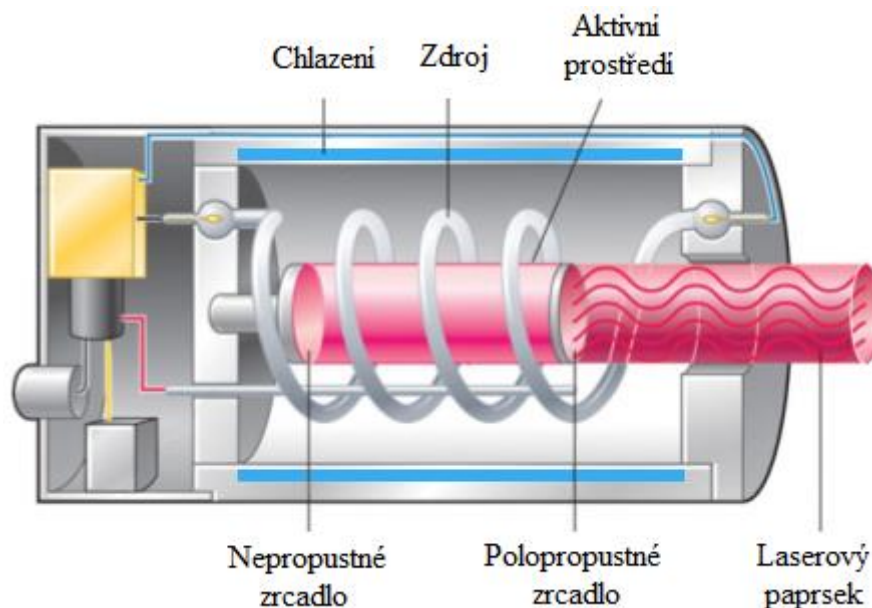
V České republice a na Slovensku 4Jet exkluzivně zastupuje firma StrojeJMK, která pro praktickou část zařízení zapůjčila. Byla založena roku 2008 nynějším majitelem, Jiřím Macháčkem, který měl předchozí zkušenosti v oblasti prodeje strojů. Firma se zbývá obchodní a servisní činností, zprostředkovává komunikaci mezi zákazníkem a dodavatelem a zakládá si na udržování jejich dlouhodobého vztahu. Produkty, na něž se specializuje patří do oblasti broušení, výroby forem a nástrojů a speciálních technologií, jako je např. laserové čištění. [2; 4]

2 TEORIE LASERU

Laser je optické zařízení, které je schopné produkovat koherentní světelný svazek. Jeho název vyplývá ze spojení prvních písmen anglického pojmenování – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tedy v překladu zesílení světla stimulovanou emisí záření. První teoretické základy laseru popsal již v roce 1917 Albert Einstein. První funkční zařízení však sestrojil až v roce 1960 Teodor Maiman. Brzy poté započala integrace do řady průmyslových odvětví a dnes se jedná o velmi potřebný a často nenahraditelný nástroj. Jeho aplikace zasahuje do obyčejných aplikací, jako laserové ukazovátko, čtečky čárových kódů, přes medicínské aplikace, např. laserové operace očí, až po technické aplikace, ku příkladu řezání, gravírování, nebo právě čištění povrchů. [5]

2.1 Komponenty laseru

Základem konstrukce laseru je tzv. aktivní prostředí. To je ohrazené dvěma zrcadly (často jsou označován jako rezonátor), jedno z nich je polopropustné, druhé nepropustné. energii do systému dodává zdroj, často v podobě vodivého vlákna, omotaného kolem aktivního prostředí. Vzhledem ke ztrátám energie uvnitř laseru, která se přeměňuje na ztrátové teplo, je u výkonnějších typů nutné dodávat dostatečné chlazení. Základní podoba laseru je vyobrazená na obrázku 2. Velmi významnou a složitou součástí laseru je jeho optická soustava. Další komponenty jsou doplňkové a slouží pro řízení a stabilizaci laserového paprsku a samotného zařízení, popřípadě pro změnu parametrů paprsku. Patří mezi ně kalibrační přístroje, měřiče výkonu, měniče vlnové délky světelného paprsku a další. [5; 6]



Obr. 2 – Schéma laseru [5]

Zrcadla jsou umístěna naproti sobě přesně paralelně, jejich vychýlení má za následek nechtěné ztráty energie. Nepropustné zrcadlo se vyznačuje svou vysokou odrazivostí, která dosahuje až 99 %. Použitý materiál závisí na aktivním prostředí laseru, nejčastěji se však využívají křemíkové destičky s leštěným kovovým povlakem (zlato, molybden) či dielektrika. Odrazivost polopropustných zrcadel je menší, dosahuje kolem 80 %. K propouštění světelného paprsku dochází až ve chvíli, kdy se v systému naakumuluje dostatečná energie. [6]

Aktivní prostředí je látka, které zdroj dodává energii a je to také část laseru, kde probíhají stimulované emise fotonů. Pro tyto účely se používá velká škála látek a jejich vlastnosti významně ovlivňují parametry laserového svazku, především vlnovou délku a výkon. Různé

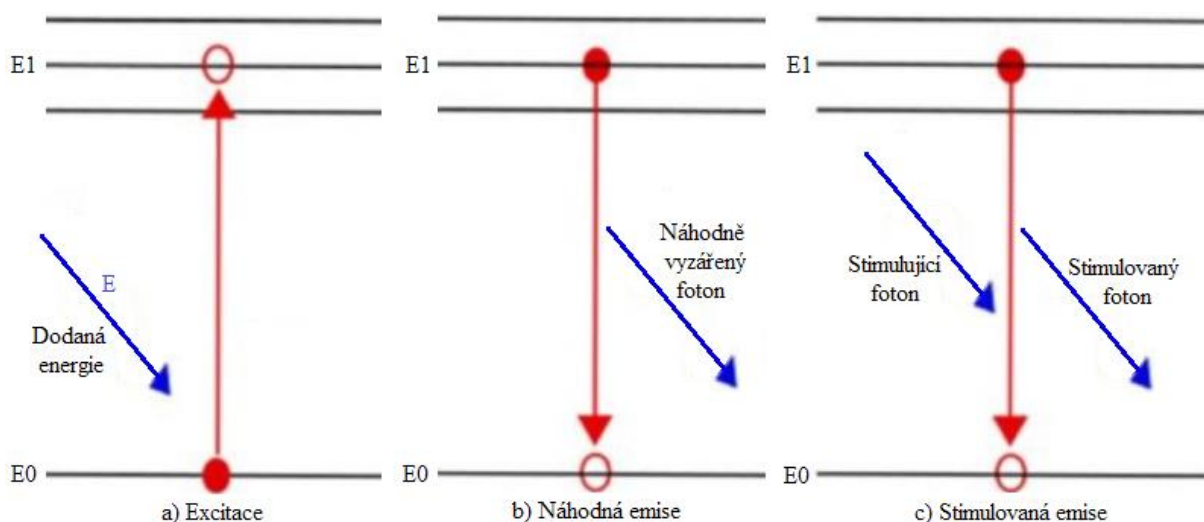
aplikace tedy mohou vyžadovat rozdílná aktivní prostředí. Historicky první laser byl sestaven s aktivním prostředím z rubínu, následovala éra plynových a kapalinových modelů, které však začaly strádat za pevnolátkovými hlavně z důvodu nedostatečného výkonu, složitosti konstrukce a špatné manipulovatelnosti se zařízením. Dnes se jako aktivní prostředí užívá více než tisíc různých druhů látek. Lasery se podle jejich skupenství rozdělují na 3 typy: [6; 7]

- plynové lasery, nejpoužívanějšími jsou oxid uhličitý, argon, helium-neon
- kapalinové lasery, většinou se jedná o organická barviva rozpuštěná v kapalných rozpouštědlech
- pevnolátkové lasery, nejčastěji užívané prostředí je Nd:YAG
 - tyčové
 - diskové, velmi jednoduché chlazení, vysoký výkon, kontinuální provoz
 - vláknové, jednoduché vedení, dlouhý dosah
 - diodové, levné, kompaktní stroje, nízké provozní náklady

Ve valné většině aplikací je nutné tvar výchozího laserového paprsku upravit. Nejčastější požadavek spočívá v soustředění energie do jednoho bodu, tzv. ohniska. Je však i možné jej protáhnout do linky, nebo kruhového tvaru pro nějaké plošné operace. Pro tyto účely se používá optických soustav. [6; 8]

2.2 Princip laseru

V aktivním prostředí se nachází atomy, jejichž elektrony se mohou pohybovat v různých energetických hladinách. V přirozeném stavu se nachází v nulové hladině. Pokud tyto elektrony pohltnou energii, mohou zvýšit svoji energetickou hladinu, dostanou se tak do tzv. excitovaného stavu. Elektron pak může vstřebanou energii náhodně opět vyzářit, emituje tak foton s náhodným směrem rychlosti, a vrátit se opět na nulovou energetickou hladinu. Tento proces se nazývá spontánní emise a za normálních podmínek nastává jen v zanedbatelném množství, je tedy třeba pomocí zdroje dodat energii aktivnímu prostředí, čímž se značná část populace atomů dostává do excitovaného stavu. Tento proces se nazývá inverze populace. Spontánní emise jsou tak četnější. Když se pak některý z fotonů pohybuje těsně kolem excitovaného atomu, vyvolá tzv. stimulovanou emisi. Elektron opět vyzáří energii v podobě fotonu a sníží svůj energetický stav zpět na nulovou hladinu. Foton vyvolaný touto interakcí však má shodné vlastnosti jako ten, který ji vyvolal. [5; 6; 9]



Obr. 3 – Typy interakcí elektronů [5]

Fotony, které mají směr rychlosti jiný, než kolmý na povrchy zrcadel na koncích aktivního prostředí jsou pohlceny v obalu laseru, vzniká tak ztrátové teplo, které se případně odvádí chladičem. Ty, které však zaujmají trajektorii kolmou na zrcadla se odráží, cestou vyvolávají další stimulované emise a vytvářejí tak identické fotony. Dochází k řetězové reakci a při dosažení potřebného množství energie fotony opouští aktivní prostředí skrze polopropustné zrcadlo ve formě laserového paprsku, koherentního světelného svazku s jednotnou vlnovou délkou a vysokou energií. [5; 6; 9]

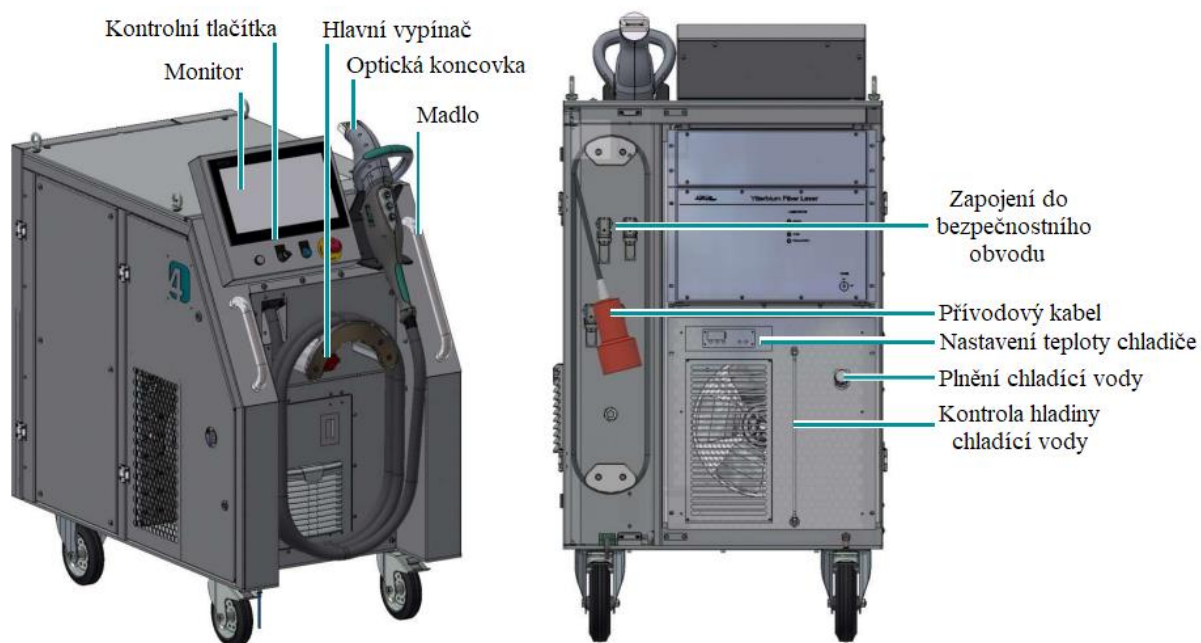
2.3 Laser M200 společnosti 4Jet

Společnost 4Jet nabízí na trhu několik typů čistících laserů. Rozdíly mezi jednotlivými typy spočívají v maximálním dosažitelném výkonu, ohniskové vzdálenosti laserového paprsku, variabilita nastavení, cena a mnoha dalších aspektech, na nichž závisí volba vhodného zařízení pro danou aplikaci. V praktické části bude využit a ozkoušen typ M200. [10]

2.3.1 Popis

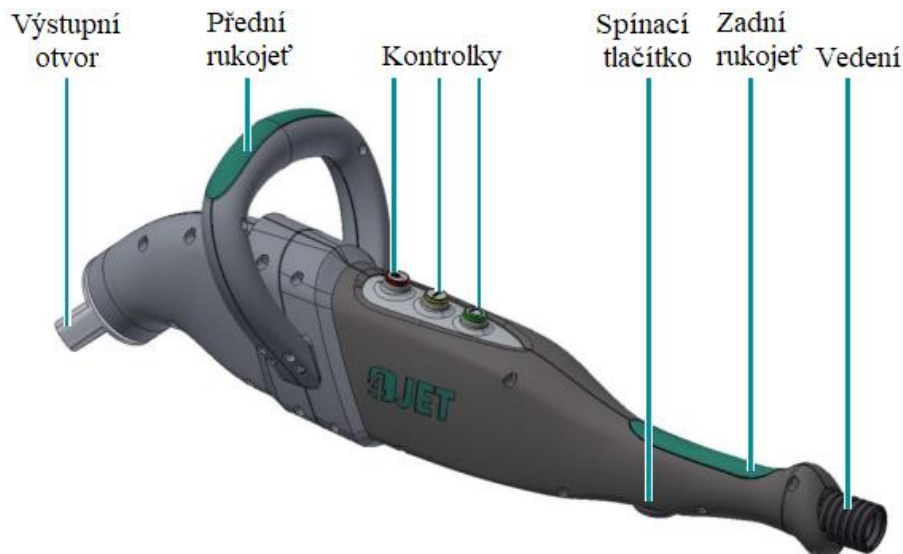
Zařízení laseru se skládá ze dvou hlavních částí. První je napájecí skříň, která obsahuje elektrický zdroj, přívod stlačeného vzduchu a zdroj samotného laseru. Druhou je optická koncovka laseru, kterou manuální obsluha manipuluje a míří na čistěný povrch. Celá sestava váží přibližně 370 kg. [10]

Na přední straně napájecí skříně se nachází dotykový monitor, sloužící k ovládání parametrů laseru a kontrole jeho činnosti. Pod monitorem je umístěno kontrolní tlačítko, které bliká v případě poruchy nebo chyby, tlačítko nouzového vypnutí, po jehož stisknutí se laser okamžitě vypíná a zastaví se přívod stlačeného vzduchu a klíčový spínač pro aktivaci softwaru a spuštění laseru. Hlavní vypínač se nachází pod držákem na vedení laseru. Pro jednodušší manipulaci jsou po stranách umístěna kovová madla v kombinaci se zajistitelnými kolečky na spodní straně nosného rámu. Zadní strana je vybavena přívodovým kabelem, jehož nutná voltáž se pohybuje v rozmezí 380 V až 480 V, rozhraním pro zapojení zařízení do bezpečnostního obvodu provozovatele, displej teploměru a nastavení teploty chladiče, otvor pro doplňování chladicí kapaliny a vizor pro kontrolu její hladiny. Obě strany skříně jsou vyobrazeny na obr. 5. [4; 10; 11]



Obr. 5 – Přední a zadní strana napájecí skříně [10]

Optická koncovka laseru, znázorněna na obr. 6, je zakončením 10 m dlouhého napájecího vedení a je určena k obouručnímu používání, proto se na ní nachází dvě rukojeti. Paprsek samotný vychází z výstupního otvoru, který slouží jako ochrana čočky, kolem níž je také veden proudící stlačený vzduch. Také plní ochrannou funkci, zabraňuje odpařovaným nečistotám prostupovat výstupním otvorem k čočce a zabraňuje tak jejich potencionálnímu usazování na jejím povrchu. Tři kontrolky umístěné na horní straně informují o aktuálním stavu laseru, zelená kontrolka svítí, je-li zařízení zapnuto, žlutá, pokud je připraveno vydávat laserový paprsek a červená na znamení, že je vydáváno laserové záření. Aby se tak stalo, je nutné stisknout a podržet tlačítko na spodní straně optické koncovky. Mezi jeho stisknutím a počátkem produkce laseru je patrná krátká prodleva, která slouží jako bezpečnostní opatření, pokud je však tlačítko uvolněno, paprsek je okamžitě přerušen. [4; 10; 11]



Obr.6 – Optická koncovka laseru [10]

2.3.2 Technické parametry

Čistící laser typů M200 dosahuje maximálního výkonu 200 W. Laserový paprsek se generuje v pevném aktivním prostředí vláknového typu. Generovaná vlnová délka se pohybuje kolem 1 μm , frekvenci pulsů lze nastavit od 2 do 50 Hz. Optická vlákna jej vedou do koncové hlavy, kde se nachází zabudovaná čočka, která paprsek usměřuje. Ohnisková vzdálenost čočky se rovná 400 mm, pracovní vzdálenost je tak přibližně 320 mm od výstupního otvoru, tato vzdálenost však nemusí být přesná, tolerance se pohybuje v rozmezí 40 mm. Jeho šířka je nastavitelná, obvyklá šířka se však pohybuje kolem 100 mm. [10]

2.3.3 Princip čištění

Vlnová délka laseru je nastavena na hodnoty, díky kterým je dobře pohlcovaná rzi, mastnotou a řadou dalších nečistot, méně však čištěným materiálem, což většinou bývá kov. Paprsek také nezáří kontinuálně, na rozdíl od jiných aplikací laseru, ale je přerušován na pulsy s délkou trvání pouhých desítek nanosekund. Tak se selektivně a nárazově ohřeje cílená nečistota, která nabytím velké dávky energie buď změní své skupenství na plynné (sublimuje), nebo se šokem odloupe a je možné ji následně mechanicky jednoduše otřít. Faktorem, který značně ovlivňuje čištění materiálu je jeho schopnost pohlcovat laserové záření produkované laserem. Zařízení však dovoluje jeho vlastnosti (vlnovou délku, frekvenci pulsů) pozměnit, a tak potencionálně zvýšit rychlost a účinnost procesu. [4; 11; 12]

2.3.4 Bezpečnost práce

Pracovníci obsluhující zařízení se musí řídit bezpečnostními předpisy, laser jako takový se řadí do třídy 4, tedy přímé vystavení i odlesky mohou způsobit poranění očí a kůže a mohou vznítit objekty v nebezpečné vzdálenosti. Jako opatření musí být každý pracovník proškolen o bezpečnosti práce s laserem a vybaven bezpečnostními brýlemi, rukavicemi a prostor kolem čištění se doporučuje zakrýt nehořlavými a světlo nepropustnými závěsy, aby se minimalizovalo riziko odrazu. Pracovníci by také měli po celou dobu čištění mít ochranu dýchacích cest, aby se zamezilo vdechování odpařovaných zplodin. [3; 9; 13]



Obr. 7 – Ukázka bezpečnostní výbavy obsluhy čistícího laseru [3]

2.3.5 Výhody laserového čištění

Technologie s sebou nese velkou řadu výhod, ať už ekonomických, aplikačních, nebo ekologických. Velmi důležitým aspektem je možnost zachování struktury povrchu a jeho geometrické tolerance. Vypařovaná vrstva je velmi tenká, pohybuje se v rozměrech pouhého 1 μm . Díky tomu je možné pracovat i s velmi přesnými uloženími, jako klikové hřídele, ozubená soukolí, vstřikovacích forem a podobně. Vyčištěný povrch není ani třeba nijak následně oplachovat, nebo vysávat, většina nečistot se jednoduše vypaří. [4; 12; 13]

Zařízení jako takové je velmi mobilní. Přemísťování pomocí koleček umožňuje variabilitu a jednoduché přemísťování až k součásti. Koncová hlava má vysoký dosah a díky manuální obsluze je možné čistit i jinak špatně přístupná místa. Účinnost laseru nezávisí na rovnosti povrchu. Nerovnoměrné a složité díly tak nepředstavují problém. [4; 12; 13]

Nemalou přednost představuje i jednoduchost ovládání. Společnost 4Jet doporučuje pouze jednodenní bezpečnostní školení pro obsluhu samotného zařízení, poté by měl být pracovník schopen samostatně zařízení obsluhovat, což dovoluje značnou flexibilitu při výběru zaměstnanců. Zařízení také pracuje bez přídavných materiálů, jediné nutné vstupní požadavky tvoří přívod elektrické energie předepsaného napětí a stlačený vzduch. [4; 12; 13]

3 KOROZE A POVRCHOVÉ ÚPRAVY

3.1 Koroze

Jako koroze se označuje postupné samovolné degradování materiálu vlivem vnějších činitelů. Procesy, které ji zapříčiňují, mají různý charakter. Ve většině případů však mají chemický původ, zkombinovaný s fyzikálním, biologickým, aj. [15]

Účinky koroze na materiál nabývají různých podob. Často nepříliš závadnou formou je ztráta estetických vlastností, typicky změnou nebo vyblednutím barvy či ztrátou lesku. V horších případech nastává k porušování materiálu jako celku, od vydrolování korodujících částí, přes ztrátu mechanických vlastností až po úplné porušení součásti v celém průřezu. Ačkoliv existují způsoby, jak její účinky zpomalit, úplné zastavení/zamezení koroze není ve skutečnosti možné. [15; 16]

Koroze označuje celou řadu odlišných procesů. Jejich dělení je složité, jednotlivé kategorie se vzájemně překrývají a hranice mezi nimi nejsou zcela pevné. Nejjednodušší kategorie jsou tři, které dělí korozi podle [15; 16; 17]:

- vnitřního mechanismu
- korozního prostředí
- druhu korozního napadení

3.1.1 Vnitřní mechanismy

Prvním z mechanismů je koroze chemická. Probíhá typicky v elektricky nevodivém prostředí a v plynech jako chemická reakce mezi atomy korodující součásti a okolním prostředím. Běžným případem je koroze kovů, kdy z něj elektrony přímo přestupují na povrch a tvoří tzv. korozní zplodinu (látka vznikající jako důsledek koroze), obvykle oxidy daného kovu. Nemusí být vždy nežádoucí, některé kovy vytváří souvislou zkorodovanou vrstvu, která na povrchu zůstává a výrazně zpomaluje postup další degradace materiálu. [15; 16; 17]

Druhý mechanismus, koroze elektrochemická, probíhá jako elektrolytický děj. Předpokladem pro jeho vznik je přítomnost elektrolytu (látka schopná vést ionty), který obklopuje elektrody. Dochází tak k přenosu proudu. Jestliže proud prochází samovolně bez připojení vnějšího stejnosměrného zdroje, nazýváme tento systém jako galvanický, koncentrační či korozní článek. Pokud je na elektrody připojený vnější zdroj stejnosměrného proudu, soustavu označujeme jako elektrolytický článek. [15; 16; 17]

Intenzita i rychlost koroze závisí na spoustě faktorů, nejvíce však na materiálu elektrod a elektrolytu samotného. Elektrody tvoří nejčastěji kovy, není to však pravidlem, vodivé nekovy jsou také dostačující, např. grafit. Elektrolyt tvoří ve většině případů voda. [15; 16]

Vnitřní mechanismy koroze jsou často podpořeny i vnějšími činiteli, které vznikají kvůli vlivům prostředí nebo funkcí součásti. Tyto vlivy mohou mít různé podoby, nejčastější z nich jsou vibrace, mechanické namáhání materiálu, jeho únava, prouděním prostředí a další. [16; 17]

3.1.2 Korozní prostředí

Je zřejmé, že rozdílná prostředí ovlivňují rychlost koroze jiným způsobem. Pokrytí všech faktorů je však zdlouhavé a složité, proto se používá rozdělení pro tři nejčastější prostředí. [15; 16; 17]

Prvním z těchto prostředí tvoří vzduch, jedná se tedy o atmosférickou korozi. Materiály v čistém ovzduší by korodovaly zanedbatelnou rychlostí, atmosféra sama o sobě agresivní není. Voda a v ní rozpuštěné složky atmosféry (oxid siřičitý, amoniak atd.) a teplota vzduchu však hrají hlavní roli v rychlosti degradace materiálu. Koroze vzniká pod tenkou vrstvou vody

kondenzované na povrchu součásti. K tomu nedochází běžně, pouze při překročení kritické relativní vlhkosti vzduchu (60–80 %). V této vrstvě pak probíhá elektrochemická koroze. [15; 16; 17]

Kapaliny představují druhé obvyklé korozní prostředí, přičemž největší význam jednoznačně zastává vodní prostředí, v němž také probíhá elektrochemická koroze. I zde lze říci, že v čisté destilované vodě vzniká jen zanedbatelná koroze. Znečištění, obsah kyslíku, minerálů, pevných částic, víření, teplota a mnoho dalších faktorů se podílí na rychlosti koroze menším či větším dílem. [15; 16; 17]

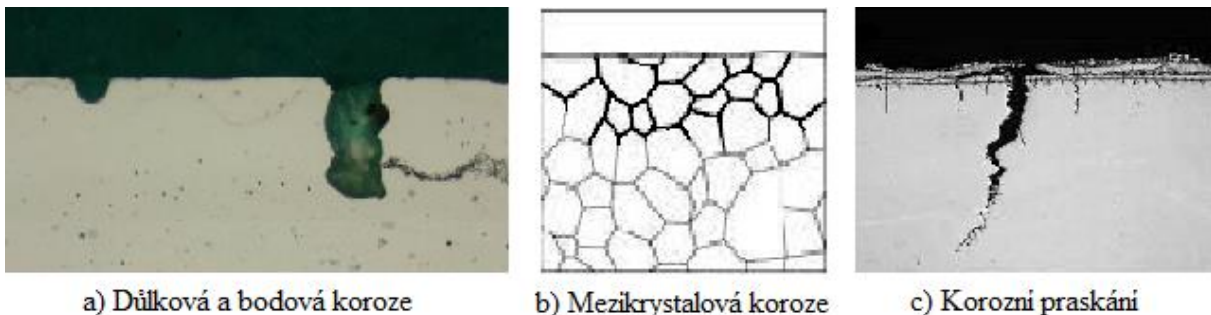
Půda, poslední korozní prostředí, je zdaleka nejsložitější na zkoumání. Výzkum přesného vlivu na rychlost degradace materiálu je takřka nemožná, jelikož se jedná o silně nehomogenní prostředí. Půda jako taková se skládá z pevné, kapalně i plynné složky. I zde díky kapalně složce probíhá převážně elektrochemická koroze. [15; 16; 17]

3.1.3 Druh korozního napadení

Plošnou či rovnoměrnou korozi se nazývá děj, kdy degradace probíhá na celé obnažené ploše materiálu přibližně stejnou rychlostí. Díky tomu představuje nejlépe předvídatelnou a nejméně nebezpečnou variantu koroze. Při konstrukci dílu se s ní často počítá a předepisují se tzv. korozní přídatky. [15; 16; 17]

Nerovnoměrná koroze představuje větší problém pro konstrukční řešení, jelikož ji není prakticky možné předvídat. Její rychlost není rovnoměrná na celé ploše, lokálně se objevují vady, které tvoří slabá místa. Selhání dílu je tak rychlejší. Nerovnoměrnou korozi lze dále rozdělit na několik poddruhů (obr. 8) [15; 16; 17]:

- důlková/bodová, vzniká lokálním narušením antikorozní vrstvy
- štěrbinová, vzniká v mezerách s elektrolytem částečně odděleným od jeho zbytku
- galvanická, vzniká spojením dvou různých kovů a jejich vystavením koroznímu prostředí
- mezikrystalová, vzniká u korozivzdorných ocelí při tepelných operacích, hranice zrn se ochuzují o chrom
- selektivní, přednostní odstraňování jedné ze složek materiálu vlivem rozdílné odolnosti
- erozní, vzniká jako následek dlouhodobého proudění tekutiny (popřípadě pevných částic v ní)
- korozní praskání, vzniká za působení současného tahového napětí a korozního procesu
- korozní únava, vzniká při cyklickém tahovém namáhání a působení korozního procesu



a) Důlková a bodová koroze

b) Mezikrystalová koroze

c) Korozní praskání

Obr. 8 – Druhy korozního napadení [15; 18]

3.2 Povrchové úpravy

Povrchovou úpravou se rozumí jakákoliv operace, která mění vlastnosti povrchu dílu, a to zásadně pozitivním způsobem. Nejčastějšími důvody k jejich využití jsou nutnost

korozivzdorného povrchu, lepších estetických vlastností, nebo požadavek na lepší mechanické vlastnosti či otěruvzdornost. Volba vhodné operace a její metodiky závisí na materiálech, popřípadě tvaru součásti, požadavcích na konečné vlastnosti povrchu součásti, složitosti procesu nanášení a mnoha dalších faktorech. [15; 19]

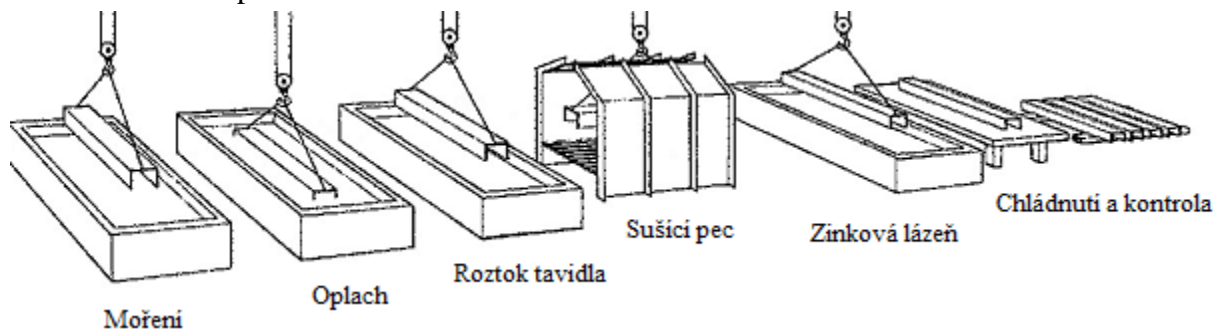
Před aplikací samotné úpravy se povrch ještě ošetřuje, zbavuje se všech nečistot, aby byla dosažena co nejvyšší přilnavost úpravy. Čištění můžeme řadit do dvou kategorií [15; 19]:

- Chemické čištění používáme pro odstranění jakýchkoli látek, které nejsou pevně spojeny s povrchem součásti. Nejčastěji se jedná o mastnotu, prach či kovové piliny. Použité prostředky se liší podle odstraňované nečistoty, od běžné vody po specifická rozpouštědla.
- Mechanické čištění se používá v případě, že je nečistota pevně spojená s povrchem dílu. Řadí se sem koroze, předchozí povrchové úpravy atd.

3.2.1 Zinkování

Zinkování součásti je děj, kdy se na povrch součásti nanáší vrstva zinku, který se procesem difuze napustí i do povrchové vrstvy materiálu. Výsledná součást se vyznačuje vysokou korozní odolností, mechanické vlastnosti jsou téměř stejné, odolnost proti otěru je mírně navýšena. Vzniklá vrstva dosahuje rozměru několika μm , její barva závisí na složení lázně a upravovaného materiálu, buď zůstává stříbrolesklá, nebo na povrchu utvoří tzv. květy, zrna slitiny železa a zinku, které vytváří nepravidelné obrazce. Existují dva typy zinkování [15; 19; 20; 21]:

- Žárové ponorem, při němž se součást ponoří do lázně s téměř čistou taveninou zinku. Povrch musí být před aplikací řádně vyčištěn v několika krocích, viz obr. 9. Teplota lázně se pohybuje ve dvou rozmezích, nízkoteplotní 450 až 480 °C a vysokoteplotní 530 °C a více. Rozsah teplot od 480 až 530 °C je pro proces nebezpečný, protože se silně zvyšuje rychlost rozpouštění zinku v železe a špatně se tak ovlivňují výsledné vlastnosti povrchu.



Obr. 9 – Schéma linky žárového zinkování [20]

- Galvanické probíhá v lázních na alkalické bázi, které plní účel elektrolytu. Anodu tvoří téměř čistý zinek, který se po připojení stejnosměrného zdroje proudu vlivem elektrolytického děje rozpouští a vylučuje na záporně nabitou katodu, kterou tvoří zinkovaná součást. Metoda je vhodná pro menší díly a velkosériové výroby.
- Termodyfuzní, probíhá v rotujících elektrických pecích za teplot 360 až 430 °C. Komora je naplněná zinkem v práškové podobě, který se difuzně vsřebává do povrchu součásti. Výsledný povlak má skvělé antikorozi a otěruvzdorné vlastnosti.
- Šopování, či žárové nástřiky, spočívá podobně jako žárové zinkování ponorem v nanášení zinkové taveniny na povrch součásti. Při šopování se však zinek (v podobě drátu, tyčinky či prášku) zahřívá na taveninu a stlačeným vzduchem rozptyluje na malé kapičky mířené přímo na povrch. Vytváří se tak antikorozi vrstva, která navíc prodlužuje životnost součásti. Dnes se používají dvě hlavní technologie tavení zinku,

plynovým plamenem a elektrickým obloukem. Druhá z nich se stává stále více na využívanou díky nižším provozním nákladům. Metoda je mobilní, lze ji provádět i na zabudovaných konstrukcích.

3.2.2 Eloxování

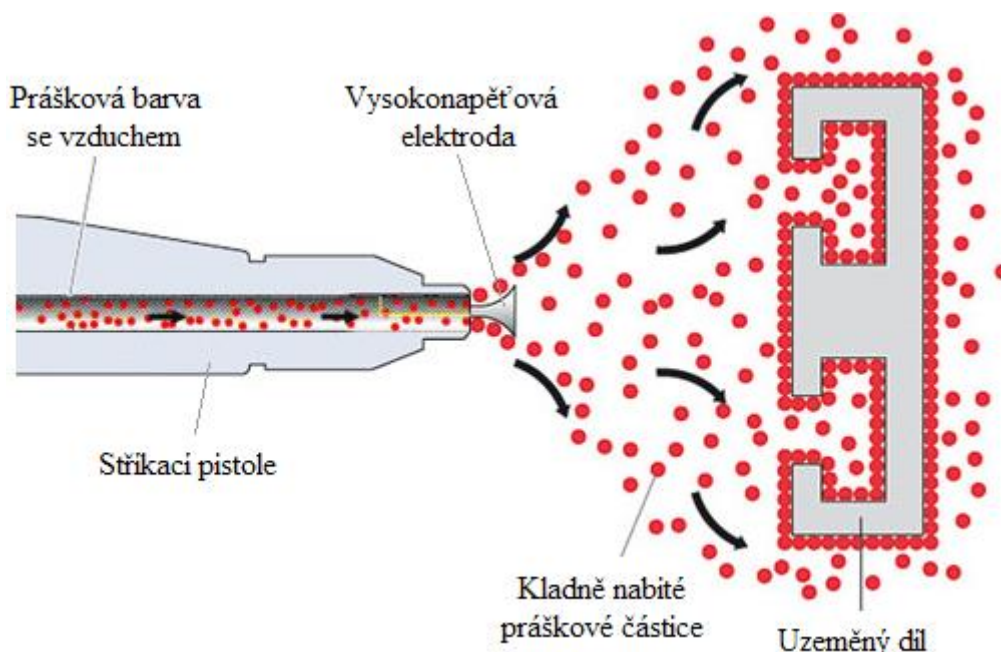
Eloxování je jedna z nejvíce rozšířených povrchových úprav hliníku a jeho slitin. Princip spočívá v řízené korozi povrchu součásti v lázních s oxidem hlinitým, kdy na součást působí elektrický proud. Součást oxiduje a vzniká tak ochranná vrstva, která se vyznačuje vysokou tvrdostí, odolností vůči otěru a korozivzdorností. Eloxovaný povrch se obvykle vyskytuje ve stříbrném provedení, je však možné jej barevně upravit pro zvýšení estetických vlastností. [17; 18]

3.2.3 Práškové lakování

Práškové lakování, také označované jako komaxit, je povrchovou úpravou, vznikající nanesením a následným zapečením práškových barev na povrch součásti. Jejich složení se různí, nejčastěji však pracují na bázi kombinace epoxidových pryskyřic, polymerů a teple a světla odolných pigmentů. Povrchy získávají korozivzdorné vlastnosti. Také se na trhu pohybuje celá řada barevných variant, což dovoluje estetické doladění součásti. [17; 22]

Proces nanášení barvy probíhá na základě elektrického nabíjení částic barviva, které se poté díky elektrostatické přitažlivé síle zachycuje na elektricky uzemněném dílu. Hlavní způsoby nabíjení na částic práškového barviva jsou dva [22]:

- elektrostatické, barva prochází silným elektrickým polem, kde se elektricky nabíjí, viz obr. 10



Obr. 9 – Schéma elektrostatického nabíjení [22]

- tribostatické, stříkácí pistole je vyložena izolačním materiálem, o něj se tře barvivo a získává elektrický náboj

3.2.4 Mokré lakování

Za nátěrovou hmotu se považuje jakákoliv organická či anorganická látka, která se aplikuje na povrch dílu za účelem vytvoření nátěrů. Proces nazýváme mokřím lakováním a jeho cílem je

zlepšení vlastností povrchu pomocí souvislého ochranného povlaku požadovaných vlastností, od estetického vzhledu, přes korozní odolnost až po specifické požadavky, např. lepší přilnavost, nezávadnost při styku s potravinami a podobně. [15; 19]

Pro jejich výrobu se používá rozmanité množství látek, skupenstvím mohou být pevné i kapalné. Podle jejich funkce je lze rozdělit na pět skupin [15]:

- Pojiva, nebo také filmotvorné látky, slouží k zabezpečení jednotnosti nátěru a pevnosti spojení s podkladovým materiálem. Má zásadní vliv na mechanické (tvrdost, pružnost) i estetické (lesk) vlastnosti finálního filmu. Nejčastější uplatnění pro tuto funkci nacházejí syntetické pryskyřice a jejich modifikace.
- Pigmenty se používají pro vytvoření žádaného barevného odstínu a dodávají nátěru jeho kryvost. V zásadě nejsou rozpustné ani v pojivu, ani v rozpouštědle. Ve většině případů také ovlivňují korozivzdornost, ať už zvýšením (používají se jako první vrstvy) nebo snížením (poslední dokončující vrstvy). Nejpoužívanější materiály pro tyto účely jsou oxidy kovů a jejich soli.
- Plniva plní funkci zesílení struktury povlaku, dodávají nátěrové hmotě objem a zlevňují její nákladnost. Typicky se používají jednoduše dostupné materiály s dobrou chemickou a barevnou stálostí.
- Aditiva zaujímají jen malou část objemu nátěrové hmoty (obvykle do 1 %). Obvykle zastávají jednu specifickou funkci, např. zlepšují rozliv, zabráňují sedimentaci a separaci pigmentů, zlepšují odolnost proti povětrnostním podmínkám atd. Jejich účinnost úzce závisí na přesnosti dávkování.
- Těkavé složky, také označované jako ředidla či rozpouštědla, upravují konzistenci nátěrové hmoty tak, aby ji bylo možné pohodlně natírat. Jsou to kapalné organické sloučeniny schopné rozpouštět syntetické i nesyntetické pryskyřice, vosky, oleje a další látky, jmenovitě např. benzín, aceton nebo toluen. Rozpouštědla jsou do směsi přidávány výrobcem, ředidla až spotřebitelem. Z ekologických i ekonomických důvodů se výrobci snaží jejich podíl v nátěrových hmotách co nejvíce minimalizovat.

Nátěry lze nanášet různými způsoby, postupy však vždy musí korespondovat s doporučeními výrobce. Pro běžného konzumenta je nejrozšířenější a nejjednodušší metodou aplikace ručními nástroji, například štětci, válečky atd. Jednoduchost a malé náklady zde vyvažuje nízká efektivita a nerovnoměrná tloušťka vrstev. Pro tvarově komplikované díly je často výhodnější využít aplikace stříkáním. Spočívá v rozprašování nátěrové hmoty na malé částičky, které se přichycují k natíranému materiálu. Pořizovací náklady nástrojů je znatelně dražší, obvykle pracují pomocí elektrické energie, vyžadují školenou obsluhu a z důvodu přestřiku se navyšují ztráty nátěrové hmoty. Efektivita práce je však daleko vyšší a nátěry lze nanést i do špatně dostupných míst. Pro velkovýroby se nabízí i speciální způsoby nanášení. Obvykle spočívají v užívání velkého množství nátěrové hmoty (např. máčení dílu v lázních), kdy přebytečná z hmota dílu steče a použije se na další díl. Metody se vyznačují vysokou efektivitou práce, výbornou ekonomičností, avšak jsou z pravidla nejdražší. [15; 19; 23]

Všechny vrstvy nátěru tvoří tzv. nátěrový systém, který se obvykle rozděluje na tři části, základní nátěr, podkladový nátěr a vrchní nátěr. Dříve byla pro každou z nich jiná nátěrová hmota, v poslední době se výrobci snaží spojit všechny typy do jedné barvy pro usnadnění aplikace. Základní nátěr je v přímém kontaktu s podkladovým materiálem a vytváří antikorozní ochrannou vrstvu, která navíc připravuje dostatečnou přilnavost pro podkladový nátěr. Ten zajišťuje náležitou tloušťku nátěru, a tedy ochranné vrstvy. Dále zajišťuje přilnavost vrchního nátěru, sloužícího jako ochrana proti povětrnostním vlivům a dává nátěru barvu a finální estetickou podobu. [15; 19; 23]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním cílem této bakalářské práce byla studie proveditelnosti čištění laserem pomocí zařízení M200 společností 4Jet. Testování probíhalo na kovových vzorcích s různými druhy znečištění a povrchových úprav. V jeho průběhu byla také otestována závislost vzdáleností optické koncovky od čištěného materiálu. Všechna vyhodnocování byla prováděna opticky a pomocí ručních měřících prostředků.

4.1 Příprava vzorků

Vzorky pro testování měly být co nejrozmanitější. Největší limitace v jejich výběru a přípravě činila časová dostupnost, možnost provedení potřebných technologií a nástrojů pro jejich realizaci a finanční možnosti. Část vzorků tedy byla připravována ručně, většina však byla obstarána u společností zabývajících se povrchovými úpravami nebo na svařovně FSI Brno.

4.1.1 Vzorky připravené společností

Při výběru vzorků bylo dbáno na výběr nejběžnějších povrchových úprav bez i po zkorodování, se kterými se strojírenské společnosti potkávají co nejběžněji. Byly tedy obstarány vzorky eloxovaného plechu, práškového lakování – komaxitu RAL 9006, galvanického zinkování a žárového zinkování. Pocházely převážně ze zbytkových plechů, měly různou tloušťku, tvar i velikost. Z toho důvodu bylo žádoucí rozměry sjednotit. Zvolenou metodou pro tento krok byl až na jeden případ stříh.

Časy jednotlivých čištění jsou spíše orientační, jelikož se jedná o ruční čištění, neexistuje způsob, kterým by bylo možné proces jednoduše normalizovat. Zkušenější obsluha, či správně seřízená robotická paže by mohla dosáhnout rychlejších a esteticky přijatelnějších výsledků.

Výběr jednotné velikosti vzorků závisel na velikosti nejmenšího neupraveného a na aplikaci čištění. Plocha nesměla být příliš malá, aby čištění trvalo vypovídající dobu, avšak aby ani nebylo zbytečně dlouhé. Konečná velikost vzorků nakonec byla stanovena na 110 x 80 mm. Těchto rozměrů bylo dosaženo u tenkých plechů, které představovaly vzorky eloxované a galvanicky zinkované, u pákových nůžkách, u tlustých plechů, jmenovitě práškově lakované vzorky, bylo využito hydraulických nůžek. V obou případech byly nástroje zapůjčeny na dílně areálu FSI v Brně. Žárově zinkovaný vzorek byl získán pouze jako robustní kus ploché konstrukce a byl příliš tlustý pro stříhání, bylo tedy nutné jeho rozměrů dosáhnout pomocí úhlové brusky. Finální podoba zástupců jednotlivých vzorků je vidět na obr. 11.

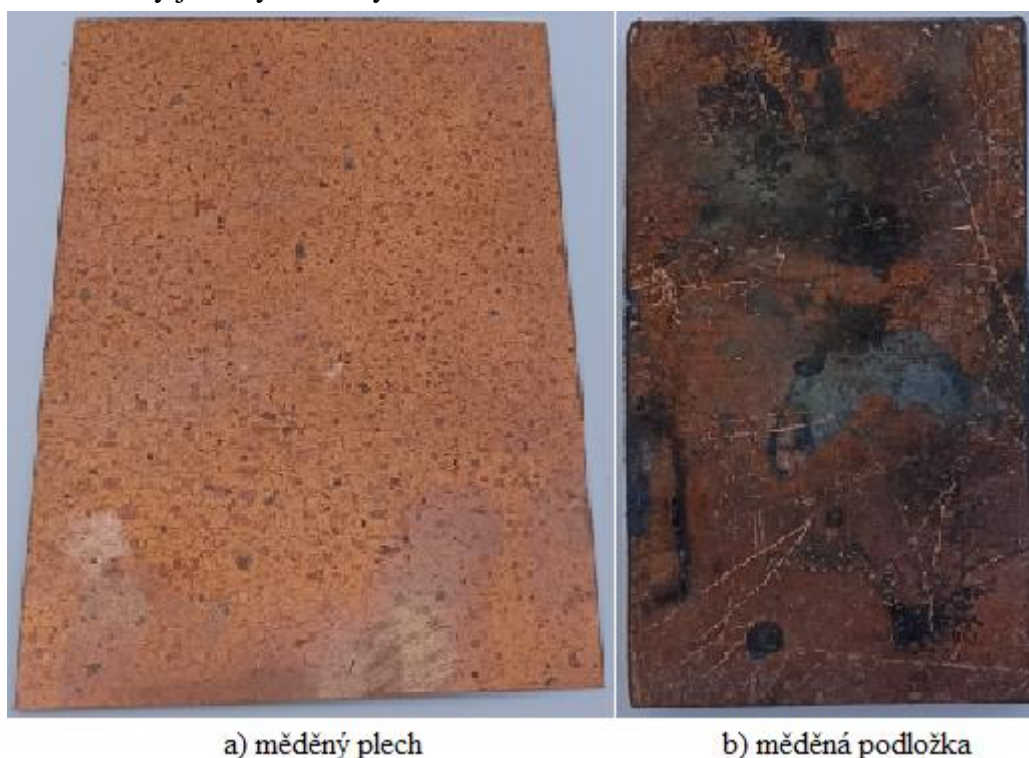


Obr. 11 – Fotodokumentace vzorků připravených společností

4.1.2 Samostatně připravené vzorky

Ručně připravené vzorky nesly ve dvou případech znečištění ve formě koroze, a to mědi a oceli, v dalších dvou pak povrchovou úpravu mokrého lakování, v obou případech na ocelovém povrchu.

Použité vzorky mědi měly rozdílné historie. První z nich měl podobu obyčejného plechu s tloušťkou půl milimetru. Povrch byl matný, bez jakéhokoliv lesku, což indikovalo vrstvu plošně zkorodovanou oxidickou vrstvou. Vzorky byly nastříhány na společnou velikost na pákových nůžkách. Druhý typ vzorku měl větší tloušťku, avšak ostatní strany nedosahovaly společných rozměrů. Jako jediný se tedy odlišuje velikostí od ostatních. Jelikož byly používány jako podložky pro svařování, povrch byl místy pokrytý připevněnými zbytky návarů, zbytek postrádal lesk a evidentně se na něm také nacházela oxidická vrstva způsobená rovněž plošnou korozí. Oba vzorky jsou vyobrazeny na obr. 12.



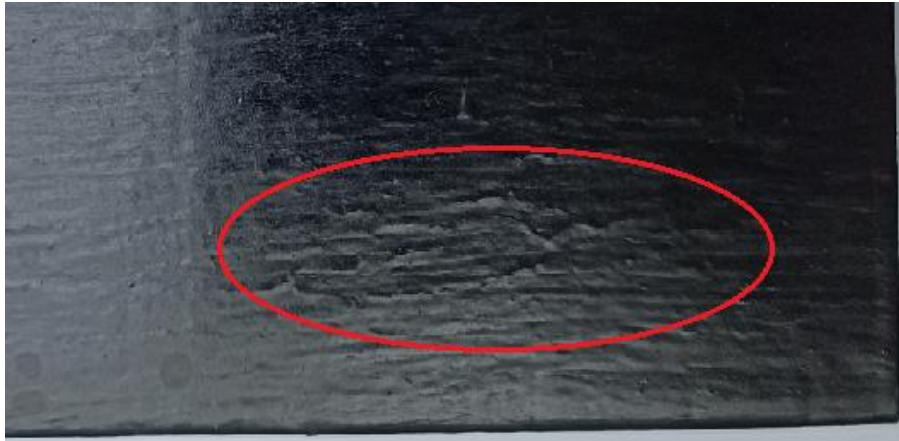
Obr. 12 – Fotodokumentace vzorků koroze mědi

Vzorky pro úpravy mokrého lakování pocházely ze stejného materiálu, S235. Před aplikací bylo nejprve nutné nastříhat tabuli plechu na společnou velikost, k čemuž opět bylo využito stříhu na hydraulických nůžkách. Z bezpečnostních důvodů byly poté ručním pilníkem zapilovány hrany všech kusů. Následovalo mechanické očištění smetákem a odmaštění povrchu. Pro tyto účely bylo využito isopropylalkoholu a papírových utěrek.

Zkoumané nátěrové hmoty byly dvojího druhu, barva ve spreji (BalSprej s označením RAL 9005, odstín černý, lesklý) a barva určená pro natírání (Prim 3v1 společnosti Hostagrund s označením S 2177, odstín černý, matný). Nanášení jednotlivých vrstev probíhalo v souladu s pokyny a doporučeními na etiketách nátěrových hmot. U natíraných vzorků byl využitý obyčejný štětec, pomocí něhož byla aplikována tenká vrstva, která se následně nechala na jeden den zaschnout (minimální doporučená doba činila 8 hodin). Po této prodlevě se nanášela další vrstva a cyklus se opakoval. Celkem tak byly připraveny 4 vzorky o jedné až čtyřech vrstvách.

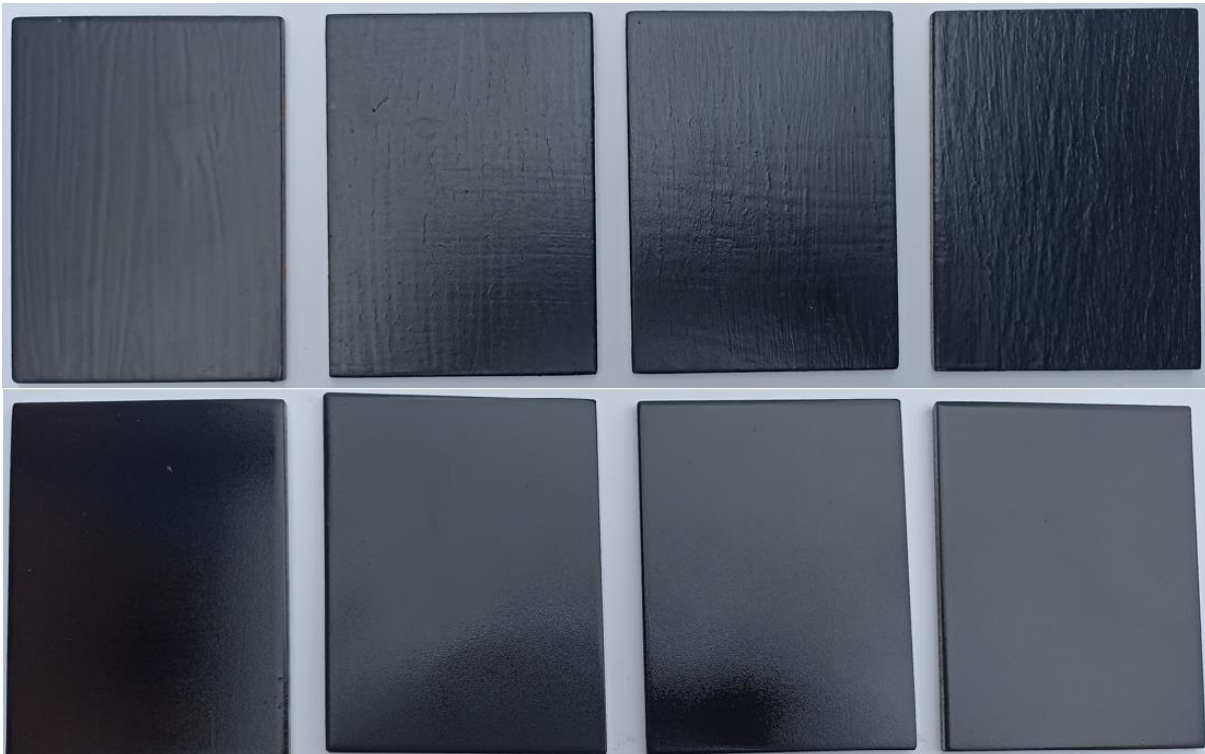
Při inspekci nátěrů po zaschnutí byly zjištěny jeho vady. Povrch u vzorků s dvěma až čtyřmi vrstvami byl mírně popraskaný a vlnitý, viz obr. 13. To bylo s největší pravděpodobností zapříčiněno nanášením příliš velké vrstvy. Pro testování vlastností laserového čištění však tyto

nedostatky nejsou podstatné, jednalo se především o estetické a mechanické oslabení, které se při vypařování materiálu neprojevuje. Vzorky tedy přesto byly shledány jako dostačující. [14]



Obr. 13 – Detail vad vzorku se čtyřmi vrstvami mokrého lakování

Sprejová barva byla nanášena na povrch v křížových vzorech, podle doporučení. Při nanášení bylo obtížné udržet stejnoměrnou vrstvu, jelikož aplikační plocha nebyla největší a rychlost tryskání barvy nebylo možné dobře ovlivnit. Vrstvy měly kratší dobu schnutí (podle doporučení 5 až 10 minut) po níž se nanášela další. Opět byly tímto způsobem zhotoveny 4 vzorky o jednom až čtyřech aplikačních cyklech. Všechny 8 vzorků mokrého lakování je vyobrazeno na obr. 14 (vrchní řada natíraná, spodní stříkaná, vzestupný počet vrstev zleva doprava).



Obr. 14 – Fotodokumentace vzorků mokrého lakování

Původní návrh realizace koroze na ocelových vzorcích měl spočívat v chemické uměle způsobené korozi. Postup zahrnoval naskládání nastříhaných vzorků do uzavíratelné nádoby a jejich následným zalitím 40% roztokem chloridu železitého, který měl sloužit jako korozní médium, viz obr. 15. Doba ukončení reakce měla být stanovena podle její rychlosti. Dosažený povrch měl nést viditelné stopy poškození, které by následně bylo odstraněno. Počáteční průběh vypadal slibně, povrch vzorků se začal vrásnit a mírně praskat. Jednalo se však pouze o

zbytkovou vrstvu okují, která měla nižší korozní odolnost. Po přibližně 10 hodinách nebyly pozorovány další změny a z časových i bezpečnostních důvodů se od této realizace upustilo.



Obr. 15 – Fotodokumentace korozní lázně

Jako náhradu za umělou korozi byly získány staré zbytky ocelového plechu, které nesly různě rozsáhlé korozivní poškození plošného i lokálního typu, povrch byl oranžový a vrásnitý. Vizualně byly rozděleny do kategorie lehké a těžké koroze. Nevýhodou byla neznámost jejich historie, korozního prostředí a přesného složení, nakonec však byly pro demonstraci účinků laserového čištění shledány jako dostačující.

Mezi vzorky byl také zařazen plech ze staré konstrukce skříně stroje, lakovaný šedou barvou, částečně zkorodovaný. Představuje příklad využití laserového čištění jako možnost aplikace při restauraci nátěru dlouhou dobu pracujícího zařízení. Plech byl na pákových nůžkách nastříhán na sjednocené rozměry. Zbýlé tři vzorky jsou vyobrazeny na obr. 16.



a) lokální koroze

b) plošná koroze

c) strojní nátěr

Obr. 16 – Fotodokumentace vzorků plošné a lokální koroze a strojního nátěru

4.2 Průběh a hodnocení laserového čištění

Všechna čištění probíhala ve venkovním prostředí, nebylo tedy zapotřebí použít odsávací zařízení. V uzavřených prostorách by bylo nutné použít odsávací zařízení. Jako podložka pro vzorky bylo použito pozinkovaného plechu, pracovní prostor byl od okolí oddělen ochrannou neprůsvitnou plachtou. Všechny osoby podílející se na čištění měly nasazeny ochranné brýle, rukavice a jednorázové roušky. Čištění bylo provedeno ručně. Parametry čištění byly nejprve

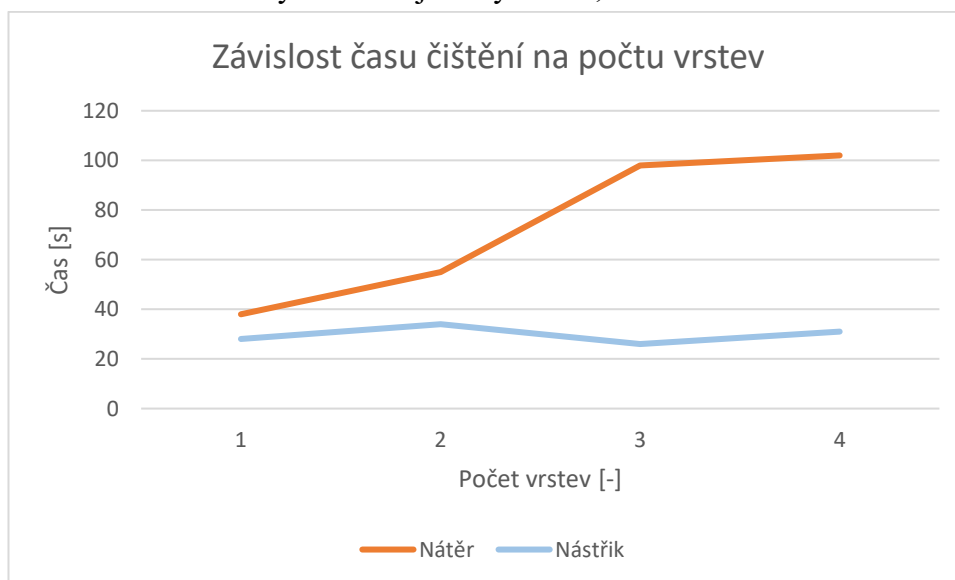
pro každý vzorek nastaveny stejně, šířka paprsku v ohniskové vzdálenosti tedy vždy činila 30 mm, používaný výkon dosahoval poloviny maxima, tedy 100 W, až na výjimečné případy.

Dříve, než se přistoupilo k čištění samotných vzorků, bylo provedeno testování zařízení „nanečisto“. Pro tyto účely byl použitý plech dřívě sloužící jako podložka pro natírání barev. Zkoumána byla optimální vzdálenost od čištěného povrchu a vliv úhlu sklonu paprsku vůči rovině čištěného plechu. Hlavním indikátorem pro míru intenzity čištění představovaly v první řadě světelná reakce plechu při dopadu záření, dále pak intenzita zvuku vydávaného procesem. Oba podněty byly nejintenzivnější ve výškovém intervalu 270 až 350 mm od ústí výstupního otvoru. Při testování úhlu dopadu paprsku nebyl pozorován viditelný rozdíl, testování probíhalo do úhlu přibližně o velikosti 60 ° svíraného mezi povrchem a dopadajícím paprskem.

Při přejezdu laseru po čisté ploše nebyla viditelná téměř žádná reakce. Ryska dopadajícího záření sice je matně viditelná, ale nijak světelně neinteraguje s podkladovým materiálem, proces je také daleko tišší. Při přejezdu nad nečistotami, či lakovaným povrchem byla reakce jasně viditelná a hlasitá, vizuálně bylo možné pozorovat odpařované nečistoty v podobě kouře, jiskření v místě kontaktu laseru a povrchu, občasně se povrch i nárazově vznítí. Podle těchto podnětů nastavování optimální výšky hlavičky nečinilo potíže. Po několika zkouškách bylo možné získat určitou praxi.

4.2.1 Mokře lakované vzorky

Vzorky s natíranými úpravami šly všechny bez potíží vyčistit do velmi uspokojivé míry. Nejlépe se vždy odstraňovala nejsvrchnější vrstva, vzorek tak ztratil tmavou černou barvu a přešel do šedivé. Spodní vrstva přichycená na podkladovém materiálu byla daleko odolnější, bylo zapotřebí daleko pomalejšího přejezdu pro úplné odstranění. Rychlost čištění také byla závislá na počtu vrstev, doba čištění narůstala mezi první až třetí vrstvou, vzorky se třemi a čtyřmi vrstvami se však čistily téměř stejnou rychlostí, viz obr. 17.



Obr. 17 – Graf závislosti doby čištění na počtu vrstev mokrého lakování

Vzorky se stříkaným lakováním měly daleko nižší odolnost než natírané. Celou ochrannou vrstvu bylo možné odstranit jedním přejezdem. Počet nástříků pak neměl vliv na rychlost čištění, konečné doby jsou velmi porovnatelné, viz obr. 17.

Výsledný povrch vzorků byl porovnatelný s výstupním stavem, matný, šedostříbrné barvy a hladký. Černá nátěrová hmota byla beze zbytku odstraněna. Hlavní rozdíl tvořily zřetelně viditelné dráhy a v některých místech bylo možné pozorovat i mřížkovitě vzorovanou strukturu, které byly zanechány jako stopy po přejezdu laseru, což je možné vidět na obr. 18 (vrchní řada

natíraná, spodní stříkaná, vzestupný počet vrstev zleva doprava). Rozdíly ve vzhledu mezi jednotlivými vzorky však nebyly pozorovány.



Obr. 18 – Fotodokumentace očištěných vzorků mokrého lakování

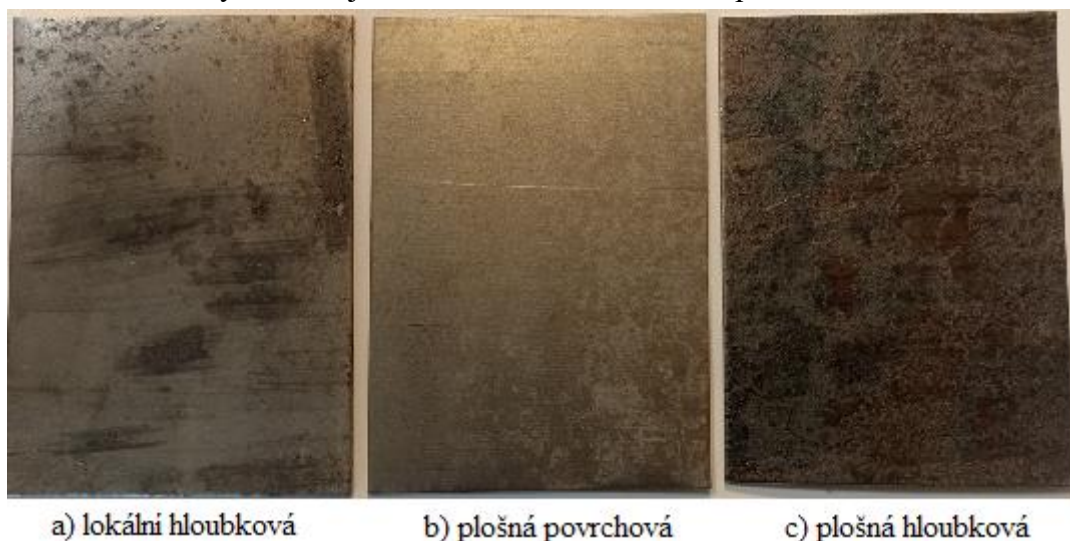
Nátěr obstaraný ze strojní konstrukce dosahoval vyšší odolnosti než ručně aplikované vzorky, délka čištění dosáhla 144 s. I přesto bylo možné jej kompletně odstranit. I v tomto případě na podkladovém materiálu zůstaly stopy po přejezdu laseru, velmi znázorněné zůstaly místa obratu směru přejezdu, které na povrchu zanechaly velmi výrazné černé rovnoběžné rysky. Vykazoval i další vizuální vady, zejména různobarevné skvrny, vzhledem k neznámé historii vzorků nelze určit, zda byly způsobeny laserem, nebo již byly přítomny. Pravděpodobně však došlo k částečnému teplotnímu ovlivnění materiálu, jehož následkem byl vznik modrých skvrn, viz obr. 19.



Obr. 19 – Fotodokumentace očištěného vzorku strojní konstrukce

4.2.2 Korozní vzorky

Korozní ocelové vzorky byly čištěny s několika komplikacemi. Vzorky nevykazovaly pouze povrchovou korozi, ale i hloubkovou, a to jak plošně, tak lokálně napadené. Povrchová koroze se čistila velmi rychle a snadno (přibližně 17 s), hloubková však byla daleko odolnější, rezavá barva se sice vytratila, nahradila ji však černá a povrch nemohl být považován za vyčištěný. Časová náročnost tak narůstala s mírou napadení a četností těchto míst. Jako efektivní metoda se ukázalo upravení parametrů laseru, jmenovitě výkon byl zvýšen na možné maximum (200 W), čímž se účinnost razantně zvýšila a hloubkovou korozi tak bylo možné z většiny odstranit. Výsledný povrch zůstal drsný a matný. V některých místech je možné pozorovat barevnou změnu odstínu podkladového materiálu k modré až fialové, jak je vidět na obr. 20, což může naznačovat jeho tepelné ovlivnění pravděpodobně způsobené navýšením výkonu. V případě nejsilnějších míst koroze zůstaly v záhybech začernalé oblasti. Úspěšnost čištění by v některých případech nemusela být dostačující v závislosti na konkrétní aplikaci dílu.



Obr. 20 – Fotodokumentace očištěných vzorků koroze oceli

Čištění jednotlivých druhů měděných vzorků neslo rozdílné výsledky. U tenkých plechů se povrchu navrátil lesk, barva a zůstal hladký, můžeme však pozorovat malé fialové skvrny, které nebylo možné dále očistit. Proces tedy můžeme považovat převážně za úspěšný a velmi rychlý, kolem 17 s. Tlusté vzorky s návary však i přes zachování totožných podmínek změnilly barvu na fialovou na celé čištěné ploše, jak vidět na obr. 21, čištění tedy nelze považovat za úspěšné.



Obr. 21 – Fotodokumentace očištěných vzorků koroze mědi

Změny barvy mědi na fialovou jsou při čištění laserem běžné. Jejich pravděpodobnou příčinou je částečné natavení povrchové korozní vrstvy oxidu měďného a jeho reakce s atmosférickým dusíkem. Barva se postupem času do jisté míry vytrácí. Vzhledem k tomu, že na plechu mědi jsou pouze malé fialově zbarvené skvrny, reakce pravděpodobně vyžaduje ke svému průběhu v nějaké formě katalyzátor. [24; 25]

4.2.3 Zinkované vzorky

Oba typy zinkovaných vzorků, zobrazené na obr. 22, nesly stejné výsledky, povrch byl zbaven pouze tenké zkorodované vrstvy, díky čemuž se povrchu navrátil lesk a zmizel namodralý odstín. Ochranná vrstva však zůstala nedotčená, stále je možné pozorovat strukturu zrn charakteristickou pro tuto povrchovou úpravu, čistící proces tedy v tomto případě zcela selhal. Textura povrchu zůstala na omak stejná. Proces po sobě zanechal stopy po přejezdu, což lze považovat za estetickou vadu. Čištění přitom probíhalo velmi rychle, stačilo přibližně 17 s. Pokus lze vnímat jako potvrzení neškodnosti metody vůči kovovým povrchům.



Obr. 22 – Fotodokumentace očištěných zinkovaných vzorků

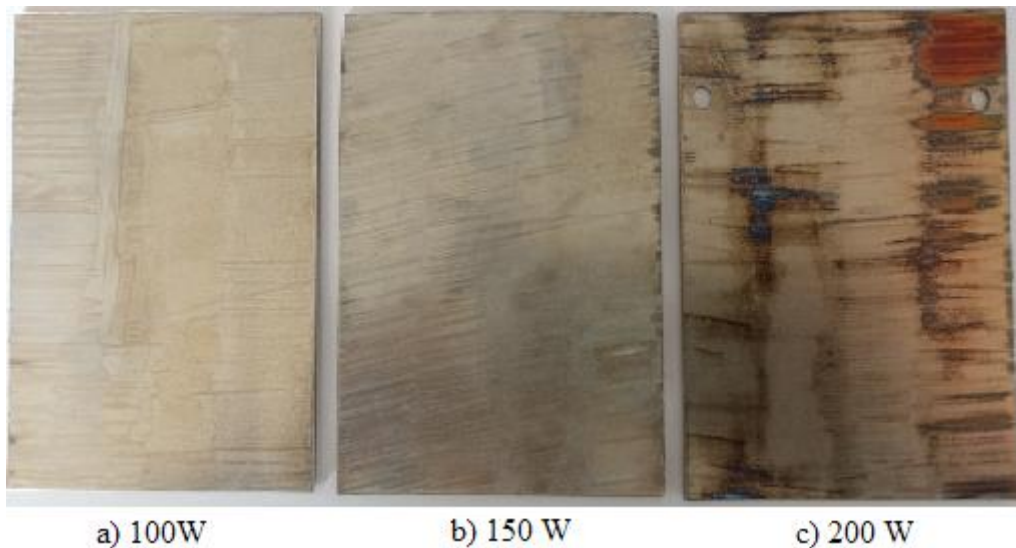
4.2.4 Práškově lakované vzorky

V souvislosti s laserovým čištěním lze práškově lakované vzorky považovat za nejodolnější testované úpravy, doba čištění dosáhla 377 s. Čištění probíhalo velmi pomalu, vyžadovalo celou řadu pomalých přejezdů, přesto byla jeho realizace zdařilá. Podobně jako u mokrého lakování i v tomto případě svrchní krycí vrstva byla vyčištěna velmi rychle, což se dalo rozpoznat barevnou změnou. Podkladové vrstvy byly opět odolnější.

Výsledný povrch také nedosahoval vysoké kvality. Pozitivní aspekty spočívaly v návratu lesku a kompletním odstranění povrchové úpravy. Povrch však vypadal esteticky nesourodě. Zřetelná byla jak dráha přejezdu laseru, tak místa, kde paprsek působil delší dobu nebo se přímo zastavil. Také barva materiálu měla nepřírozený žlutý nádech.

Jelikož čištění zabralo dlouhou dobu, byla stejně jako u korozních vzorků provedena úprava čistících parametrů laseru na maximální možnou hodnotu (200 W). Výsledkem skutečně bylo zrychlení procesu odstraňování přibližně o třetinu (245 s). Značnou nevýhodou však představoval možné prohřátí základního materiálu, způsobeného přílišným zpomalením přejezdu laseru. Tepelné ovlivnění je patrné změnou barvy na modrou na okrajích a hnědou až červenou ve středu ovlivněných oblastí.

Nejlepší výsledky byly dosaženy s nastavením parametrů na tři čtvrtiny maxima výkonu (150 W), kdy čištění sice probíhalo pomaleji než při maximálním výkonu (321 s), avšak materiál byl daleko méně náchylný k prohřevu. Výsledky všech nastavení je možné vidět na obr. 23.

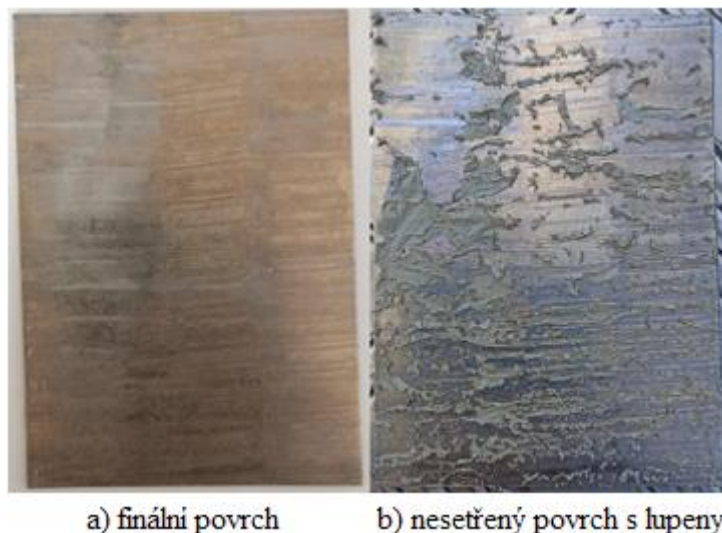


Obr. 23 – Fotodokumentace očištěných vzorků práškového lakování

4.2.5 Eloxované vzorky

Čištění těchto vzorků bylo časově poměrně náročné, přibližně 96 s. Povlak se odpařoval rovnoměrně a jako jediný nesublinoval z povrchu úplně, pouze se odloupl ve formě malých bílých šupin, viditelných na obr. 24, které bylo následně možné setřít.

Zřetelnost dráhy přejezdů a míst zastavení či zpomalení, rozdílná barva odkrytého materiálu a skvrny odlišné barvy představují estetické vady konečného vzhledu po vyčištění. K pozitivům lze opět připsat úplné odstranění povrchové úpravy a zachování hladkosti podkladového materiálu.



Obr. 24 – Fotodokumentace očištěného eloxovaného povrchu

4.3 Vyhodnocení výsledků

Při práci s laserovým zařízením došlo k několika obecným zjištěním. Prvním z nich je fakt, že zařízení zanechává na některých površích stopy po přejezdu, což u estetických kusů je nežádoucí. Jako řešení se může nabízet další úprava povrchu, např. leštění, kterým by se mohla povrchu navrátit cílená podoba. Další možností je upravení délky linie paprsku. Čištění bude tak delší, jelikož energie laseru se rozprostře na větší plochu, linií po přejezdu bude však méně.

Druhým, rovněž estetickým problémem se ukázala být místa obrátů a mírných pozastavení, které za sebou zanechávají výrazné stopy. Z hlediska prevence je u krátkých ploch možné přejíždět po celé šířce povrchu v kuse a obracet směr přejezdu mimo čištěnou plochu. Doba čištění se navýší a efektivita práce se sníží, zabrání se však tvorbě esteticky závadných míst. Druhá možnost řešení spočívá v úpravě čistících parametrů. Nastavením nižšího výkonu může být dosaženo nižší agresivity a redukci množství estetických vad.

V praxi se laserové čištění používá jako příprava na další povrchové úpravy. Pro většinu aplikací by tedy estetické vady povrchu nebyly závadné, jelikož by byly následně zakryté. V rámci takových požadavků bylo dosaženo zcela dostačujících výsledků.

Třetím obecným problémem se ukázalo být teplotní ovlivnění materiálu některých vzorků. Jednalo se z pravidla o velmi odolné úpravy, které vyžadovaly velmi pomalé rychlosti čištění a mnoho přejezdů, popřípadě navýšení výkonu laseru. I v tomto případě lze aplikovat metodu kontinuálních přejezdů a obrátů mimo čištěné povrchy. Další možností spočívá ve zrychlení přejezdů a zvýšení jejich četnosti. Velmi důležitým aspektem je v tomto případě ladění čistících parametrů, což může vyžadovat testování na zkušebních vzorcích.

Problematický se ukázal být případ hloubkové koroze. Jelikož laserový paprsek neodebírá základový kovový materiál, není nijak možné vyřešit po korozi vzniklou drsnost povrchu. V některých záhybech navíc evidentně zůstala zbytková koroze, kterou nebylo možné vyčistit. Bylo by tedy nutné provést další úpravy, pravděpodobně mechanickým čištěním.

Velmi specifických výsledků bylo dosaženo při čištění mědi. Obvyklým cílem bývá obnovení charakteristické červeno oranžové barvy, což jen v případě plechu bylo úspěšné. V tomto případě se nenabízí žádná očividná a jednoduchá prevence. Jediným možným řešením by mohlo být čištění v ochranné atmosféře.

Zinkované povrchy by bylo možné zařadit do očekávaných selhání. Technologie je dimenzovaná tak, aby neublížila kovovým povrchům, což bylo v těchto testech potvrzeno. I přesto lze odstranění povrchové koroze považovat za částečný úspěch.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo pro povrchovou korozi a mokré lakování. Čištění probíhalo rychle a spolehlivě. Dosažený povrch byl navíc esteticky téměř nezávadný. Nejhorších výsledků bylo dosaženo v případě hloubkové koroze a měděné podložky. V těchto případech by bylo nutné použít jiných metod čištění, nejspíše tryskání pro velkoplošné díly, či mechanizovaného čištění pro malé plochy.

5 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ČIŠTĚNÍ POVRCHŮ

V závislosti na požadavky různých aplikací bylo vyvinuto nespočet technologií zaměřených na dosažení různě kvalitní čistoty povrchu. Podle mechanismů a principů, které využívají je lze zařadit do tří základních kategorií, a to čištění chemické, mechanické a tepelné, do něhož spadá i technologie laserového čištění, jež bylo podrobně popsáno v předchozích kapitolách. [15; 26]

5.1 Chemické čištění

Jakékoliv zbavování povrchu pevných částic, mastnoty, povlaků a jiných nežádoucích prvků pomocí (obvykle kapalných) látek lze nazvat za chemické čištění. Využívá se při něm buď nepevného spojení nečistot s podkladovým materiálem a jejich rozpustnosti v používaném prostředku, nebo přímo chemické reakce vznikající mezi čistícím prostředkem a nečistotou, či přímo materiálem čištěné součásti. [15; 26]

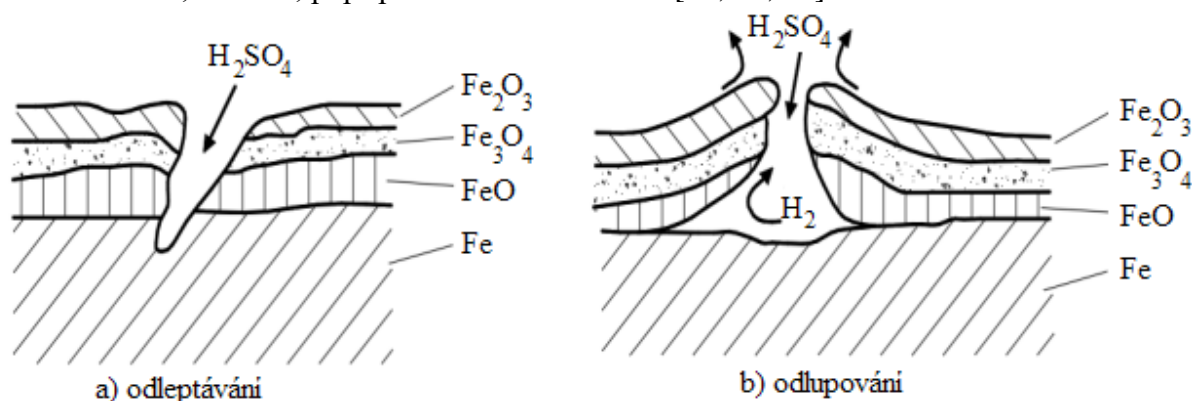
5.1.1 Čištění vodou a odmašťování

Nejobyčejnější formou chemického čištění je oplach či ostřík vodou, popřípadě vodou s odmašťovacím prostředkem. Obvykle se jedná o jednoduchou, úspornou metodu, která povrch zbaví volných částic (prach, třísky atd.), popřípadě lehce přichycených nečistot (zbytky okují, staré nátěry apod.), v případě užití čistícího prostředku i mastnoty a dalších lehce rozpustitelných látek. Ulpívající nečistoty (přichycené chemicky k povrchu součásti) této metodě odolávají. Rozměry součásti nejsou procesem nikterak ovlivněny, efektivita je obvykle malá a možnosti aplikace limitující. [15; 26; 27]

5.1.2 Moření

Nejrozšířenější a daleko agresivnější metodou je pak technologie moření. Využívá chemických reakcí mezi mořidlem (používanou chemickou látkou) a nečistotou či základovým materiálem. Nejrozšířenější využití se vyskytuje při přípravě ocelových výrobků před povrchovými úpravami, kdy se povrch zbavuje okují (oxidických vrstev vzniklých na povrchu při tepelných úpravách) či koroze. Účinnost technologie závisí na mnoha faktorech, složení čištěného materiálu, nečistot, koncentrace použitého mořidla, jeho pracovní teplota a dalších. [15; 27; 28]

Jako mořidla pro nelegované oceli se používají minerální kyseliny, nejčastěji kyselina chlorovodíková (HCl), nebo kyselina sírová (H₂SO₄). Okuje se z povrchu odstraňují pomocí mechanismu odleptávání, nebo odlepování, které jsou znázorněny na obr. 25, kde je jako mořidlo využita kyselina sírová. Varianty pro jiné kovy tvoří například kyselina fluorovodíková, dusičná, popřípadě alkalická činidla. [15; 27; 28]



Obr. 25 – Mechanismy odstraňování okují [26]

Jestliže metodu chemického čištění porovnáme s technologií laserového čištění, lze chemickou označit ve většině případů za levnější (v dlouhodobém horizontu by mohla náklady přesáhnout) a v cílených aplikacích účinnější, např. moření je ve spoustě oborů nenahraditelné. Čištění velkoplošných dílů je také jednodušší a rychlejší. Značně však zaostává nutností dokupovat nové čisticí prostředky a mořidla a variabilitou (čisticí prostředek většinou nemá velké spektrum látek, na něž působí). Největší rozdíl představuje ekologičnost, čisticí prostředky jsou z velké části nebezpečné látky, jejichž likvidace je nákladná a složitá. [3]

Pro vzorky, které byly zkoumány v praktické části, není ani jedna z uvedených technologií vhodná. Úpravy jsou pevně spojeny s podkladovým materiálem, a tudíž by čištění nebylo úspěšné.

5.2 Mechanické čištění

Tato forma využívá nejčastěji pevných částic, či nástrojů (v některých případech i proud plynu nebo kapaliny) ke zbavení povrchu nečistot. Často při procesu dochází k úběru materiálu, ideálně by to byla jen vrstva nečistot, v praxi část úbytku tvoří i opracovávaná součást. Častým kritériem kvality čištění je výsledná drsnost povrchu. Velké množství postupů, které patří pod mechanické čištění lze dále dělit do tří kategorií. [15; 26]

5.2.1 Ruční a mechanizované

V případě ručního čištění se používají pevné nástroje, škrabky, drátěné kartáče, kladiva atd. Jedná se o fyzicky velmi namáhavou metodu, jejíž účinnost je velmi nízká. Povrch nedosahuje vysoké kvality a není možné jej zbavit mastnoty, kapalných znečištění a ulpívající nečistoty. Volí se buď pro kusové lokální případy, v malých podnicích, nebo při nízkých nárocích na kvalitu čištění. [15]

Mechanizované čištění využívá elektrizovaných, či motorizovaných nástrojů k očištění povrchu. Princip jejich fungování obvykle spočívá v obrábění nečistot rotací nástroje (kruhový ocelový kartáč) nebo jejich oklepání (jehlový kartáč). Metoda je obvykle prováděna lidskou obsluhou, má daleko nižší silové nároky a její efektivitu lze řadit výše než ruční způsob i přesto se používá v podobných případech, tedy pro lokální a jednoduché práce. [15]

V porovnání s laserovým čištěním je tato metoda namáhavá a časově nákladná. Navíc vlivem lidského faktoru je možné poškodit podkladový materiál. Jediná výhoda této metody plyne z její spolehlivosti. Je totiž aplikovatelná pro každý vzorek zkoumaný v praktické části s jistotou úspěšnosti.

5.2.2 Tryskání

Tryskání pracuje na principu orážení čištěného povrchu malými pevnými částicemi, nebo li abrazivem, s velkou kinetickou energií. Ta je mu dodávána buď pracovním médiem (vzduch/voda), nebo mechanicky (lopatkový mechanismus). Jedná se o jednu z neefektivnějších metod čištění. Kvalitu výsledného povrchu lze ovlivnit tvrdostí, ostroť a velikostí zrn abraziva, a to nejen z hlediska čistoty, ale i drsnosti a rozměrů. [15; 29]

Materiály využívané pro tryskání se liší svými vlastnostmi, podle čehož se volí pro konkrétní aplikace. Nejčastějšími zástupci jsou litinová drť, strusky různých kovů, sekaný drát, korund, křemičitý písek, suchý led, nebo skleněné kuličky. [15; 29]

Pokud porovnáme technologii tryskání s laserovým čištěním, nabízí se spousta pozitiv, jmenovitě rychlost a spolehlivost jsou jednoznačně převyšující, opět by bylo možné ji použít na všechny výše zmíněné povrchové úpravy. Hlavním rozdíly představují šetrnost k podkladovému materiálu, při tryskání hrozí jeho poškození, k čemuž nedochází při čištění laserem, a nutnost doplňování a následné čištění abraziva. Z dlouhodobého hlediska je tedy

laserové čištění ekonomičtější. V zásadě však záleží na konkrétních požadavcích na finální podobu povrchu.

5.2.3 Omílání

Technologie omílání používá jako pracovní médium abraziva, která však v uzavřené komoře obklopuje čištěný díl. V komoře je generován vířivý pohyb, který způsobuje vzájemné tření abraziva a součásti, což způsobuje odírání nečistot. Jedná se o šetrnou a všestrannou metodu, ideální pro velkosériové výroby malých výrobků. Lze s její pomocí řešit nejen čištění povrchu, ale i zaoblování hran, vyhlazování hran a mnoho dalších specifikací. [26; 30]

V porovnání s laserovou technologií je omílání opět spolehlivější a rychlejší, obzvláště díky možnosti čistit více součástí najednou. Pro velkovýroby je tedy jeho uplatnění několikanásobně výhodnější. Poškození základního materiálu v tomto případě sice není tak významné, i přesto může v menším měřítku nastat. Konkrétně nelze zcela zabránit zaoblování hran, v tomto aspektu se opět jeví výhodnější laserové čištění. Argumenty o abrazivu zde platí stejně jako u tryskání. Další nevýhodou je nemožnost čištění velkoplošných a rozměrných dílů.

ZÁVĚR

V práci byla nastíněna problematika technologie laserového čištění, jeho vlastnosti a možnosti. Důraz byl kladen na proveditelnost čištění a jeho vliv na estetické vlastnosti podkladového materiálu a jeho integritu. Teoretická část práce byla zaměřena v první řadě na teorii vzniku laseru a na vlastnosti zařízení M200 společnosti 4Jet. Její druhá část popisovala povrchové úpravy použité v praktické části a mechanismy způsobující korozi materiálů (především kovů). Praktická část rozebírala metodiku přípravy vzorků, postupy při testování laserového zařízení a vyhodnocení získaných výsledků. Vzorky použité pro praktickou část nesly povrchové úpravy práškového a mokrého lakování, eloxování a žárového a galvanického zinkování. Ocel a měď představovaly základní materiál pro korodované vzorky. Na závěr praktické části práce byla vyhodnocena úspěšnost čištění a uvedena doporučení pro prevenci a řešení případných vad. Závěr práce samotné se věnuje jiným konvenčním metodám čištění povrchu a jejich aplikačnímu porovnání s vlastnostmi laserového čištění.

Všechna testování probíhala nejprve s nastavením výkonu zařízení na polovinu, tedy 100 W, přičemž byla zjištěna proveditelnost u vzorků mokrého lakování, povrchové koroze a eloxovaného povrchu. Práškové lakování bylo odolnější, proto byl výkon zvýšen na maximální možnou hodnotu, tedy 200 W, přičemž docházelo k prohřívání podkladového materiálu. Výkon tedy byl opět snížen na 150 W, což se ukázalo jako optimální hodnota. Pro hloubkovou rez nebyla dostačující ani zvýšená hodnota výkonu, byla tedy vyhodnocena jako nevhodná pro laserové čištění. Zinkované povrchy nejevily žádné známky reakce s laserovým paprskem, rovněž tedy byly označeny za nevhodné. Zároveň potvrzovaly bezúhonnost zařízení vůči kovovým povrchům.

Práce byla vypracována ve spolupráci se společností StrojeJMK, která zapůjčený laser M200 vlastní a nabízí čištění povrchů jako službu zákazníkům. Z její strany tak bylo zadání vyhotovení studie proveditelnosti na různé povrchy, která by se následně mohla používat jako referenční materiál pro předběžné určení použitelnosti technologie laserového čištění. Práce byla vypracována podle jejich potřeb. Do příloh byla také přiloženy vzorkovnice s porovnáním vstupních a finálních povrchů dosažených při čištění, které mohou být použity jako reference při určování proveditelnosti a předpokládaných výsledků čištění.

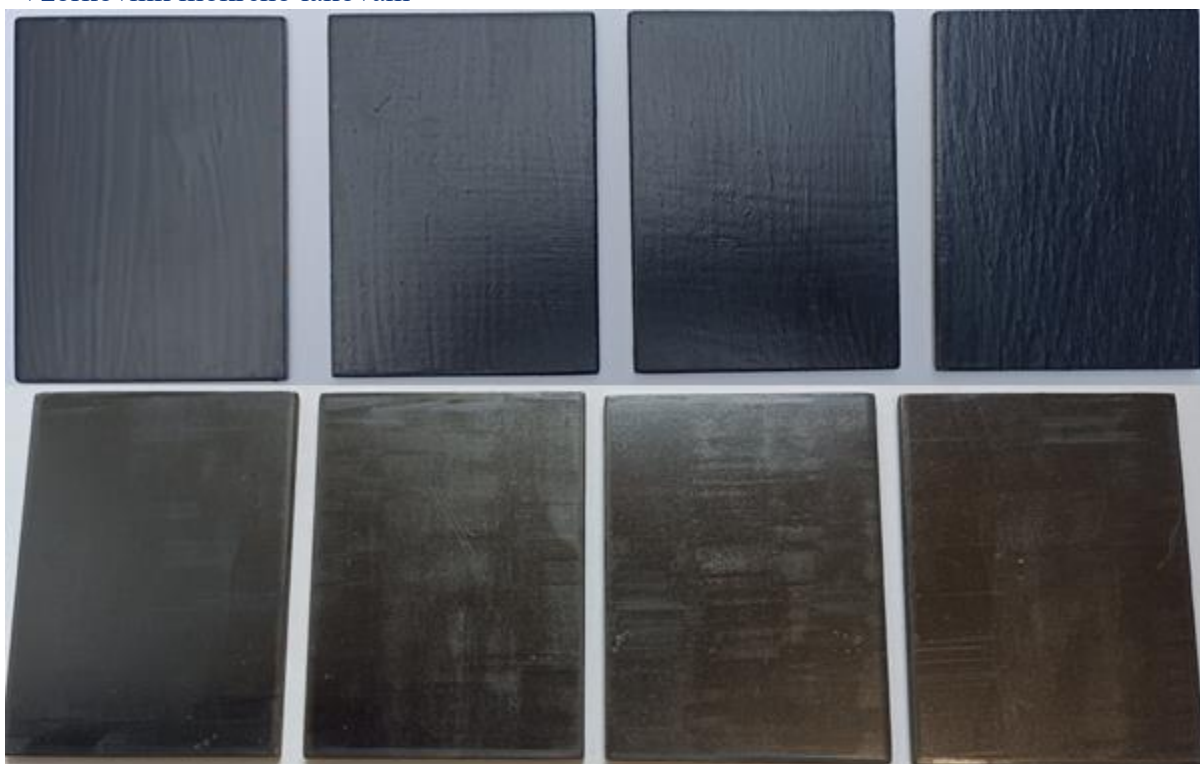
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Zařízení pro laserové čištění LaserTec. *Průmyslové Spektrum*. 2019, **19**(11). Dostupné z: doi:1. <https://www.mmspektrum.com/clanek/zarizeni-pro-laserove-cisten-lasertec>
 2. Bezkontaktní čištění laserem. *Průmyslové Spektrum*. 2022, **22**(9). Dostupné z: doi:<https://www.mmspektrum.com/clanek/bezkontaktni-cisten-laserem>
 3. 4Jet. *The 4Jet Group* [online]. Konrad Zuse-Str. 1, 52477 Alsdorf, Německo [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.4jet.de>
 4. *StrojeJMK* [online]. Jánská 199, 767 01 Kroměříž, Česká republika [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.strojeymk.cz/>
 5. CIMRMAN, Martin. *Czechlasers.cz: Vzdělávací web o laseru*. 2018. Dostupné z: doi:<https://czechlasers.cz/studovna-kategorie/clanky/>
 6. *Lasery WZ* [online]. 2013 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://lasery.wz.cz/>
 7. *Rozdělení laserů* [online]. 2015 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
 8. *Optické čočky* [online]. Termesivy 41, 58001 Havlíčkův Brod, Česká republika [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://laser-shop.cz/132-opticke-cocky/>
 9. LUKÁŠ, Michal. *Laserové diody: Princip funkce laserových diod*. Olomouc, 2001. Dostupné z: doi:<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
 10. *Mobilní systém pro laserové čištění JETLASER*. Konrad Zuse-Str. 1, 52477 Alsdorf, Německo, 2020.
 11. KENNEDY, Joe. *4Jet Webinar*. Konrad Zuse-Str. 1, 52477 Alsdorf, Německo, 2020, **1**, 33.
 12. *Lasrtové čištění* [online]. Bayerova 802/33, Brno - Veverí, 602 00, 2021 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://narran.cz/aplikace/laserove-cisten/>
 13. *Laserové čištění* [online]. Tylova 1/57, 316 00 Plzeň, Česká republika, 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-cisten/>
 14. *Bezpečnost laseru: Třídy 1 - 4*. Ulička 37, Hlohovec 691 43, Česká republika, 2020. Dostupné z: doi:<https://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
 15. KREJČÍ, Stanislav. *Protikorozi ochrana*. 1. Mariánské náměstí 1, 617 00 Brno, Česká republika: Tesydo, 2017. ISBN 978-80-87102-18-3.
 16. CHOVANCOVÁ, Marta, Eugen ŠPIRK a Pavel FELLNER. *Základy korózie a povrchovej úpravy kovových materiálův*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. Edícia skript. ISBN 80-227-1688-X.
 17. TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálův*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 80-214-3062-1.
 18. ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 3., přeprac a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1984.
 19. MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovův*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1995. ISBN 80-7078-267-6.
 20. *Duplexní povlaky ocelových konstrukcí* [online]. 2016 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/15135-duplexni-povlaky-ocelovych-konstrukci>
 21. *Metalizace - šopování - zinkování - jaký je v tom rozdíl?* [online]. U Koupaliště 1212, Chodov u Karlových Varův, 357 35, Česká republika, 2019 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://janhauzr.eu/metalizace-sopovani>
-

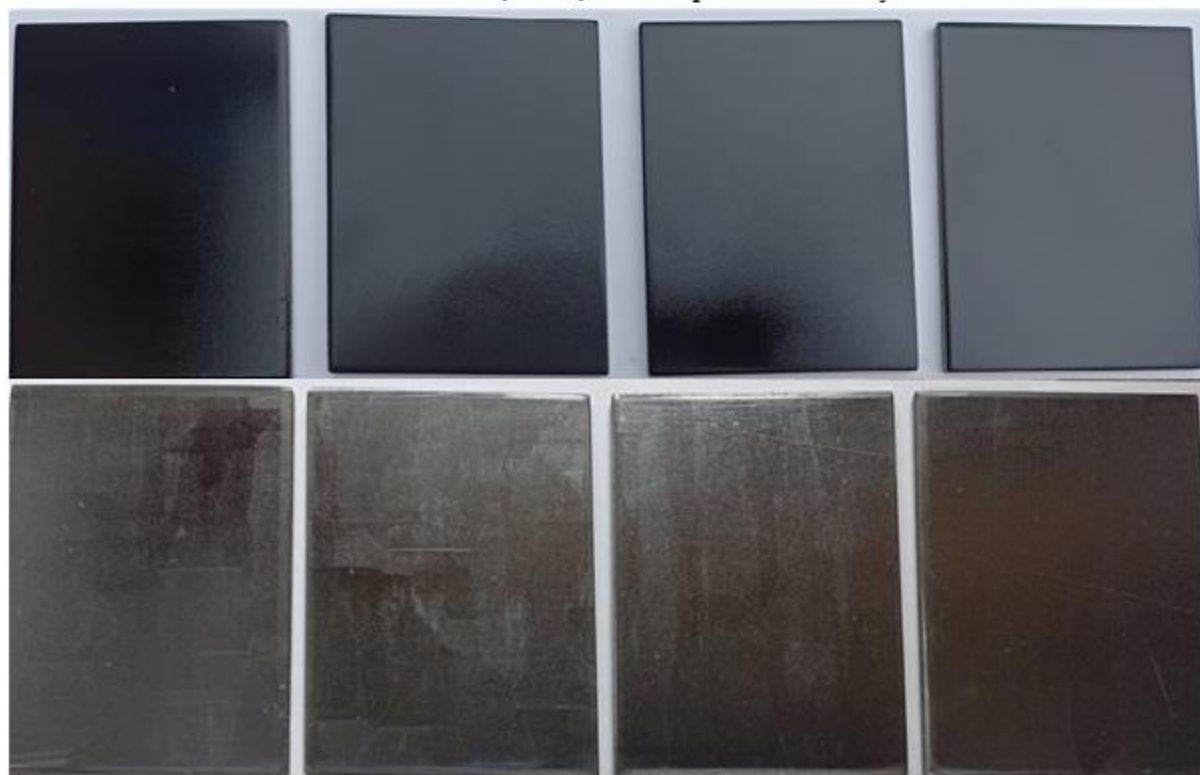
-
22. *Práškové barvy* [online]. Letkovská 50, 326 00 Plzeň, Česká republika, 2023 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.matrix2000.cz/>
 23. *Dávkování prášku injektory* [online]. 2020 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.watech.cz/wagner-group-produkty/wagner-produkty-praskovy-prumysl/praskova-technologie/davkovani-prasku-injektory.html>
 24. WATKINS, K., P. PLATT, M. COOPER a M. COOPER. Laser interactions with copper, copper alloys and their corrosion products used in outdoor sculpture in the United Kingdom. *Conference: Lacona*. 2008, **8**, 277-284. Dostupné z: doi:https://www.researchgate.net/publication/253801941_Laser_interaction_with_copper_copper_alloys_and_their_corrosion_products_used_in_outdoor_sculpture_in_the_United_Kingdom
 25. Copper(II) cyanurate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Copper\(II\)_cyanurate](https://en.wikipedia.org/wiki/Copper(II)_cyanurate)
 26. KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
 27. *Organická rozpouštědla a možnosti jejich zpracování* [online]. Omega design, 2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.recyklace-redidel.cz/chcivede;t-vice/organicka-rozpoustedla-a-moznosti-jejich-zpracovani/>
 28. KUBÍČEK, Jaroslav. Moření a leštění. Josef Řídký. In: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno [online]. 2018 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_moreni_a_lesteni_2018_kubicek.pdf
 29. KUBÍČEK, Jaroslav. Tryskání. Josef Řídký. In: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno [online]. 2018 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/>
 30. Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko [online]. 2002, č. 5 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jakouniverzalni-metoda-pro-upravu-povrchu>
-

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Vzorkovník mokrého lakování
Příloha 2 Vzorkovník korozního znečištění
Příloha 3 Vzorkovník povrchových úprav
-



Mokré lakování, nátěr, zleva doprava 1-4 vrstvy



Mokré lakování, nástrík, zleva doprava 1-4 vrstvy



Strojní nátěr s lehkou korozi



Lokální koroze

Plošná koroze

Měděný plech

Měděná podložka
s návary



Lokální hloubková koroze

Plošná povrchová koroze

Plošná hloubková koroze



Měděný plech

Měděná podložka



Galvanické zinkování

Žárové zinkování

Práškové lakování

Eloxování



Galvanické zinkování

Žárové zinkování

Finální povrch
eloxování

Nasetřený povrch
eloxování



Práškové lakování
100 W

Práškové lakování
150 W

Práškové lakování
200 W