



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO KOREKCI DRÁHY SVAŘOVACÍ HLAVICE

DESIGN OF EQUIPMENT FOR WELDING HEAD PATH CORRECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Benáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Filip Benáček**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Martin Slaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Návrh zařízení pro korekci dráhy svařovací hlavice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na návrh zařízení, které má za účel korigovat dráhu svařovací hlavice při plošném navařování materiálu Inconel 625 na tvarovou plochu. Korekce dráhy musí zohledňovat aktuální tvar dílu, a tedy předpokládá možnost zpětného odměřování a korekci dráhy svařovací hlavy v reálném čase. Předmětem práce je návrh takového zařízení včetně vytipování vhodných komponent a specifikace vnějších rizikových vlivů v provozu s uvažováním požadovaných vstupních a výstupních parametrů.

Cíle diplomové práce:

1. Definice problematiky a stanovení dílčích cílů.
2. Rešerše teoretických předpokladů.
3. Stanovení vnějších vlivů, které je třeba v rámci konstrukce zařízení uvažovat.
4. Návrh komponent zařízení.
5. Návrh zařízení.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

SADÍLEK, Marek. Progresivní strategie obrábění v CAD/CAM systémech: Progressive machining strategies in CAD/CAM systems: teze inaugurační přednášky ke jmenovacímu řízení profesorem v oboru Strojírenská technologie. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2019. ISBN 978-80-248-4275-2.

TICKOO, Sham. CATIA: kompletní průvodce. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-3527-3.

FABIAN, Michal. CAD - úvod do povrchového modelovania - CATIA V5: (povrchové modelovanie, CAM, CNC-frézovanie). Košice: Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2009. ISBN 978-80-553-0290-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce uvádí problematiku navařování membránových stěn určených pro aplikaci v energetických kotlích. Dále využití metody MIG/MAG pro navařování a výhody využití metody CMT. Pro navařovací proces byla provedena inovace v podobě laserového skenování povrchu a následné využití dat ke korekci svařovací hlavice. To vedlo k automatizaci celého procesu. Z důvodu potřebného testování funkce laserového skeneru byla navržena a zkonstruována zkušební konstrukce. Bylo nutné zvážení vhodné strategie skenování stěny a následného zpracování dat z hlediska celkového výrobního postupu. Software určený k hodnocení naskenovaného profilu umístil bod pomocí vhodného nástroje na naskenovaný profil. Množina bodů byla dále filtrována pro hladší výslednou dráhu tvořenou těmito body. Výsledné body byly přivedeny na výstupní signál z laserového zařízení pro korekci dráhy svařovací hlavice. Navařování i skenování povrchu budou probíhat současně, proto byla vytvořena nastavení pro laserový skener a uložena do interní jednotky zařízení. Laser tak dokáže pracovat bez připojení k počítači.

Klíčová slova

Navařování, membránová stěna, laserové skenování, korekce dráhy, CMT, MIG/MAG

ABSTRACT

The work presents the problem of welding of membrane walls intended for application in power boilers. Furthermore, the use of the MIG/MAG method for welding and the advantages of using the CMT method. An innovation has been made for the welding process in the form of laser scanning of the surface and subsequent use of the data to correct the welding head. This led to the automation of the whole process. Because of the necessary testing of the laser scanner function, a test structure was designed and constructed. It was necessary to consider the appropriate wall scanning strategy and subsequent data processing in terms of the overall manufacturing process. The software designed to evaluate the scanned profile placed a point using a suitable tool on the scanned profile. The set of points was further filtered for a smoother resulting path formed by these points. The resulting points were fed to the output signal from the laser device to correct the path of the welding head. Both the welding and the surface scanning will be done simultaneously, so the settings for the laser scanner were created and stored in the internal unit of the device. This allows the laser to operate without connecting to a computer.

Key words

Welding, membrane wall, laser scanning, correction of trajectory, CMT, MIG/MAG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BENÁČEK, Filip. *Návrh zařízení pro korekci dráhy svařovací hlavice* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136897>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Slaný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh zařízení pro korekci dráhy svařovací hlavice vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Filip Benáček

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Slanému, Ph.D. za užitečné rady a pomoc při vypracování. Dále Ing. Štěpán Kolomý poskytl pomoc při vypracování návrhu konstrukce a za to mu patří můj velký dík. Na konec bych chtěl poděkovat celému týmu podílejícím se na projektu navařování na membránové stěny.

OBSAH

ÚVOD	9
CÍLE PRÁCE	10
1 SOUHRNNÁ PROBLEMATIKA TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ	11
1.1 Svařování metodou MIG/MAG.....	12
1.1.1 Podstata vzniku svarového spoje	12
1.1.2 Užívané plyny pro ochrannou atmosféru.....	14
1.1.3 Svařovací zařízení pro MIG/MAG	16
1.2 Metoda svařování CMT.....	17
1.2.1 Princip metody CMT	17
1.2.2 Modifikace metody CMT	19
1.2.3 Svařovací zařízení pro CMT.....	19
1.3 Navádění svařovací hlavice	20
1.3.1 Svařovací roboti.....	21
1.3.2 Možnosti navádění.....	22
1.3.3 Laserové navádění	23
1.3.4 Laserový skener scanCONTROL LLT 25xx.....	26
2 NAVAŘOVÁNÍ MEMBRÁNOVÝCH STĚN	32
2.1 Technologický postup při navařování	33
2.1.1 Způsoby kladení návarových housenek.....	35
2.1.2 Navařování pendlovacím způsobem.....	36
2.2 Přídavný materiál	37
2.2.1 Ocel AISI 309	38
2.2.2 Inconel	39
3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO KOREKCI DRÁHY SVAŘOVACÍ HLAVICE PŘI TECHNOLOGII NAVAŘOVÁNÍ.....	40
3.1 Popis výrobního procesu	40
3.2 Výběr naváděcího systému, svařovacího zařízení a příslušenství.....	41
3.3 Zařízení pro korekci dráhy	43
3.3.1 Návrh komponent konstrukce.....	44
3.3.2 Návrh celkové konstrukce	47
3.4 Nastavení laserového zařízení	50
3.4.1 Počáteční parametry programu	50
3.4.2 Výběr vhodné strategie při vyhodnocení profilu.....	53
3.4.3 Výběr a filtrování zvolených hodnot	54
ZÁVĚR.....	58
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
SEZNAM PŘÍLOH	63
PŘÍLOHA 1: VYOBRAZENÍ ZREALIZOVANÉHO NÁVRHU KONSTRUKCE	64
PŘÍLOHA 2: VLIV NASTAVENÍ EXPOZICE A NATOČENÍ SKENERU NA VÝSLEDNÝ SKEN PROFILU	65
PŘÍLOHA 3: STATISTICKÉ HODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	67

ÚVOD

V energetických kotlích jsou využívány membránové stěny jako konstrukční podpora, ale hlavní podstata jejich použití je nahrazení velkého množství tepelné izolace. Membránová stěna je tvořena trubicemi svarem spojené s žebry spojující jednotlivé trubice. Tímto potrubním systémem proudí chladicí kapalina. Kompletní membránová stěna je svařena dohromady přímo při montáži kotle z jednotlivých membránových panelů a komponent. Stěna je značně tepelně namáhána a vlivem spalování tomu dochází v agresivním prostředí. To vede ke korozi povrchu a k erozi, která postupně degraduje tloušťku stěny. Z tohoto důvodu je celá vnitřní plocha membránových stěn opatřena návarem. Návarový materiál musí být schopný odolávat vysokým teplotám. Životnost celé stěny pak dosahuje desítky let.

Aby návarová vrstva byla souvislá, dosahovala konstantní tloušťky a nezdeformovala základní tvar stěny je potřeba mít proces pod kontrolou a postupovat ověřenými metodami klázení návarových housenek. Kromě svařovacích parametrů je zde zásadní dráha svařovací hlavice. Hlavice během navařovacího procesu koná složený pohyb nazývaný oscilační nebo také pendlovací. Oscilační pohyb vyžaduje korekci dráhy přímo během procesu. Korekce dráhy v současné době probíhá manuálně pomocí pracovníka. Lze předpokládat, že dráhy jsou nepřesné a nevzniká povrch o konstantní tloušťce. Chyba lidského faktoru zde může značně prodražit výrobu stěny vlivem dodatečných nutných oprav. Svařovací opravné zákroky je možné provádět po ukončení plošného návaru celé plochy stěny. Četnější opravné operace značně prodražují výrobní náklady na danou stěnu.

Navádění svařovací hlavice bylo doposud využíváno pouze pro svařování. Vedení hlavice při navařování je tedy novou metodou na trhu. Z těchto důvodů začaly práce na vedení svařovací hlavice při navařování membránových stěn.

CÍLE PRÁCE

- Definice problematiky a stanovení dílčích cílů
- Rešerše teoretických předpokladů
- Stanovení vnějších vlivů, které je třeba v rámci konstrukce zařízení uvažovat
- Návrh komponent zařízení
- Návrh zařízení

1 SOUHRNNÁ PROBLEMATIKA TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ

Navarování je způsob svařování, kdy cílem není spojit součásti k sobě, ale zvětšit objem stávající součásti o navařenou housenku. Při navařování stejně jako u tavného svařování dochází ke změnám ve struktuře, které vedou ke změně mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti. Z důvodu vzniku tepla při svařování jsou přítomny teplotní deformace ohrožující celkovou geometrii součásti. Pro snížení vnitřních napětí a rozměrových deformací je snaha o snížení vnášeného tepla do součásti. Vhodným postupem kladení návarových housenek a případného chlazení lze docílit požadovaného výsledku. Svařovací parametry pak dokážou ovlivnit celkové vnesené teplo do součásti a řadu dalších faktorů v procesu. Pro navařování je podstatná minimální hloubka průvaru, která vede ke zvýšení kvality celkového návaru. Dochází totiž ke snížení promísení základního a přídavného materiálu. [1, 2, 3]

K navařování je možné využít veškeré metody tavného svařování. Pro automatizované navařování jsou vhodné metody svařování pod tavidlem (SAW) a svařování v ochranné atmosféře (MIG/MAG). Metoda svařování MIG/MAG je vhodná pro navařování z důvodu velkého výběru přídavných materiálů a je na výběr z široké nabídky ochranných plynů. Oproti svařování pod tavidlem je možno navařovat ve všech polohách. Metodu lze mechanizovat a robotizovat. Při navařování touto metodou vzniká minimální počet chyb a defektů v porovnání s ostatními svařovacími metodami. Kromě plného drátu lze využít i trubičkovou plněnou elektrodu jako přídavný materiál. Obsažené plnidlo v trubičce při tavení nahrazuje funkci ochranného plynu, který nemusí být přiveden k procesu svařování či navařování. Plnidlo nabízí možnost dolegování svaru. Základní princip svařování MIG/MAG byl zdokonalen ve svařování metodou CMT, která dosahuje ještě lepších výsledků při navařování. [1, 2]

Při navařování rozlišujeme navařený materiál na povlak nebo vrstvu. Povlak značí nepromísení základního materiálu s přídavným materiálem a ve struktuře je mezi nimi zřejmá hranice. Propojení struktur návaru se základním materiálem již značí vrstvu. Teplota tavení by měla být stejná jak u přídavného, tak u základního materiálu. Popřípadě je vhodné, aby teplota tavení návaru byla nižší. [3]

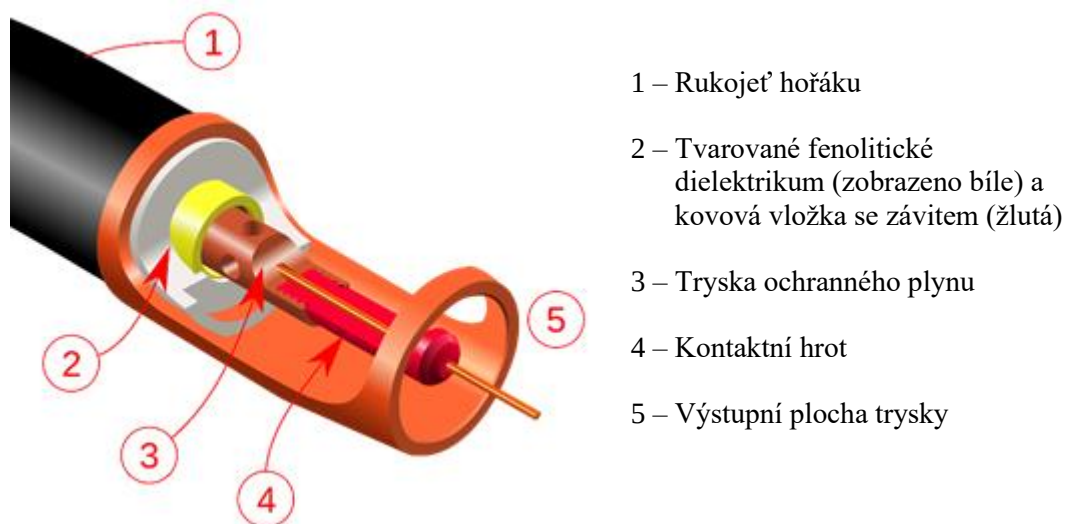
Jak pro svařování, tak pro navařování se využívají svařovací roboti. Při zavedení sériové výroby je svařovací robot značně produktivnější, a hlavně přesnější než případný kvalifikovaný pracovník (svářeč). Robotické svařování produkuje daleko pravidelnější svary s minimálním množstvím chyb. Využívány jsou převážně roboti se šesti stupni volnosti, popřípadě je použit robot se sedmi až osmi stupni volnosti pro velmi nepřístupná místa svařování. Pro navařování plochy je naopak dostačující menší počet stupňů volnosti a využití jednodušší konstrukce robota. [4]

Pro nepřerušovaný a bezproblémový provoz je nutné zvolit vhodné vedení svařovací hlavičky. Navádění zaručují snímače, které se dělí na dotykové a nedotykové. Dotykově lze vyhledávat pomocí svařovací hubice nebo koncem svařovacího drátu. Výhodou dotykového vyhledávání je nízká pořizovací cena oproti optickým snímačům. Optický senzor patří mezi nedotykové snímače. Je schopný vyhledat geometrické změny na součásti a zpětně provést případnou korekci dráhy. Výhodou prakticky neomezené využití vedení ve všech polohách svařování. Také rychlosti vyhledávání jsou značně rychlejší, jelikož není nutný mechanický kontakt. Bezdotykové navádění se dále vyznačuje daleko vyšší spolehlivostí. [5]

1.1 Svařování metodou MIG/MAG

Metoda MIG a metoda MAG patří do tavného způsobu svařování v ochranné atmosféře. Svařovací plyn, který tvoří ochrannou atmosféru, je dvojího typu. Z Anglického výrazu metal active gas vychází první metoda svařování MAG. V překladu jde o aktivní plyn, který zaručuje ochrannou atmosféru při svařovacím procesu. Druhý typ plynu je inertní neboli metal inert gas. Použití druhého typu plynu značí metodu MIG. [6, 7, 8]

Kromě ochranné atmosféry je také charakteristickým prvkem svařovací metody MIG/MAG tavící se drát, jako přídavný materiál, ve funkci elektrody. Konstrukce svařovací hubice (Obrázek 1) zajišťuje vedení svařovacího drátu a také přívod svařovacího plynu. Současné přivedení přídavného materiálu s ochrannou atmosférou usnadňuje ovládání svařovacího zařízení. Metoda je velice intuitivní při ručním svařování, proto postačí nižší úroveň kvalifikace svářeče než u ostatních metodách svaření. Případně lze svařet strojově, či za použití robotických ramen. [1, 6, 8]



Obrázek 1: Svařovací hubice MIG/MAG [9].

1.1.1 Podstata vzniku svarového spoje

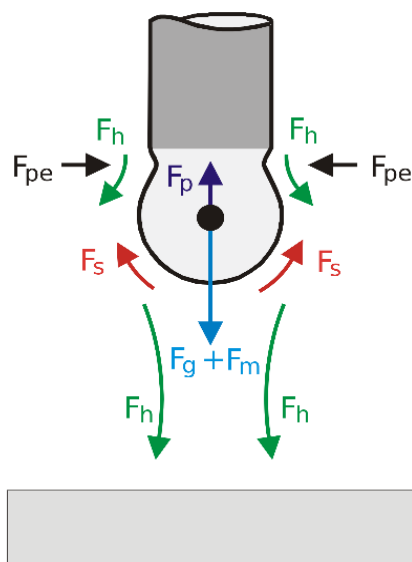
Spoj vzniklý svařením je hodnocen jako nerozebíratelný spoj dvou součástí. Spojení nastává za působení tepla, přesněji při tuhnutí svarové lázně. Pak hovoříme o tavném svařování. Do kategorie tavného svařování patří metoda MIG/MAG nebo také svařování ruční obalovanou elektrodou. V další skupině svařování ke spojení dochází také vlivem tepla, ale proces je doprovázeno tlakem. Typickým představitelem druhé skupiny je svařování elektrickým odporem. Méně četné způsoby svařování využívají při procesu pouze vysoké tlaky. [7, 8, 10]

Z fyzikálního hlediska vzniká meziatomová nebo mezimolekulová vazba v místě svaru. K této vazbě dojde za působení přitažlivých neboli kohézních sil na elementární částice. Těchto vazeb je možno dosáhnout za vysokých tlaků a přítomných deformací nebo při tuhnutí svarové lázně tzv. krystalizací. Ve svarové lázni dále probíhá difúze. To znamená, že dochází k promíchání jednotlivých elementárních částic ve svařovaných materiálech. Difúze mezi pevnými látkami je aktivnější se zvyšující se teplotou, přičemž na pokojové teplotě může probíhat jen velmi pomalu. Při teplotách solidu však aktivně přispívá k tvorbě svarového spoje. [7, 8]

Pro metodu MIG/MAG je zásadní vznik tepla pro roztavení základního materiálu a vzniku svarové lázně, do které je v průběhu celého procesu doplňován přídavný materiál. Přívod velkého množství tepla zaručuje elektrický oblouk. Elektrický oblouk je forma elektrického výboje v plynném prostředí. Oblouk vzniká mezi elektrodou a katodou. Elektrodu tvoří přídavný materiál (drát) a katodou je základní materiál. [7, 8]

Dalším faktorem podílejícím se na vzniku svarového spoje je přenos přídavného materiálu do svarové lázně. Přenosem se rozumí natavování drátu (elektrody) a ve formě kapiček roztaveného kovu oddělení a přesun do svarové lázně. Na oddělení kapku kovu od zbytku drátu působí řada sil. Síly a jejich smysl je zobrazen na Obrázku 2. Konkrétně to jsou: [1, 8]

F_h	–	hydrodynamická síla
F_s	–	síly povrchového napětí
F_{pe}	–	radiální složka síly od elektromagnetického pole
F_p	–	síla způsobená tlakem odpařovaných kovů
F_g	–	gravitační síla
F_m	–	elektromagnetická síla



Obrázek 2: Síly působící na odtavující se konec elektrody [11].

Výsledné silové působení zajišťuje oddělování kapek kovu a jejich přenos do svarové lázně. Charakter přenosu je dán poměrem mezi jednotlivými silami. Tento poměr, a tedy i výsledný způsob přenosu ovlivňuje několik vstupujících činitelů. Z elektrických veličin to jsou proudová hustota, velikost svařovacího proudu a napětí na oblouku. Dále má vliv průměr tavící se elektrody, druh svařecího proudu, polarita elektrody a druh použitého plynu. [8]

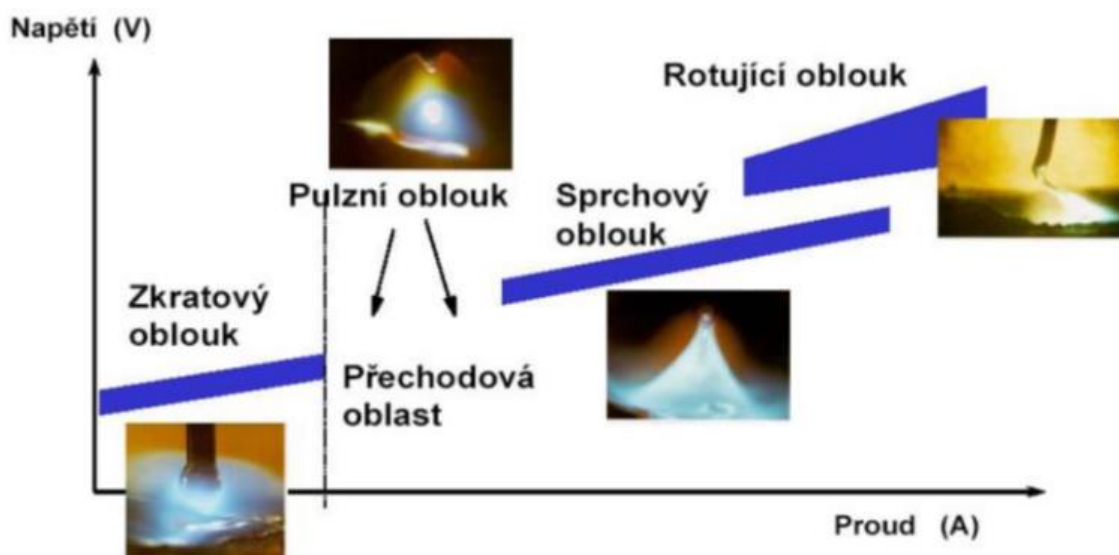
Způsob přenosu lze rozdělit podle výšky napětí na oblouku do následujících skupin. Zkratový přenos nastává při nejnižším napětí na oblouku nabývajícím hodnot 14 až 20 V. Přenos volným letem je dosažen naopak u největších napětí od 25 až 35 V. Polozkratový přenos je z hlediska velikosti napětí mezi předchozími případy, a to na hodnotách 18 až 28 V. [8]

U přenosu volným letem lze dále přenos rozdělit podle proudové hustoty na elektrodě (na průřezu drátu). Nejnižší proudovou hustotu má kapkový bezzkratový přenos kovu využívaný na svařování větších tloušťek materiálu. Při vysoké proudové hustotě je docíleno sprchového

přenosu. Opět se jedná o bezzkratový přenos, který vnáší do procesu velké množství tepla. Z tohoto důvodu je určen na svařování větších tloušťek. Oddělované kapky kovu jsou zde malé velikosti. Zvláštním případem je pulzní přenos. Ten je realizován při pulzování (pravidelné změně) velikosti proudu. Změna probíhá mezi základním proudem udržující oblouk a vyšším proudem zapříčiňující oddělení kapky. Přenos se posuzuje jako přechodový mezi zkratovým a sprchovým přenosem. Nese si ale výhody obou zmíněných. Nízká hodnota vneseného tepla a minimální rozstřík. Využití je pak širokého rozsahu. [8, 10]

Další kategorií přenosu je rotující oblouk. Tento způsob přenosu je možné získat při vysokých hodnotách svařovacího proudu a taktéž velkém proudovém zatížení drátu (velký proud na malý průměr). Rotujícího oblouku pak lze dosáhnout mechanickou cestou, což znamená rotaci samotné svařovací hubice nebo rotaci oblouku podnítit ochrannou atmosférou. Ta musí obsahovat přísadu helia. Výsledkem je vysoký tavící výkon a dobrý průvar. [6, 8]

Nejpoužívanější zkratový, pulzní, sprchový a přenos rotujícím obloukem jsou vyobrazeny na Obrázku 3. [10]



Obrázek 3: Oblasti přenosu kovu v oblouku [10].

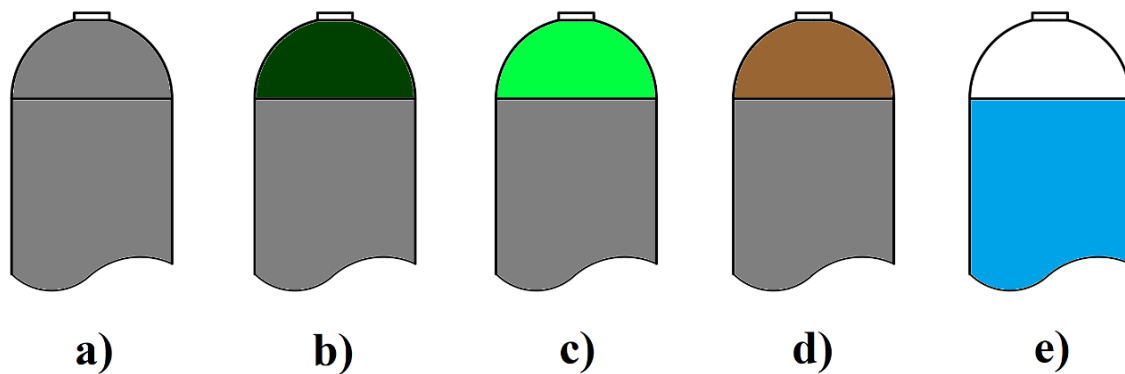
1.1.2 Užívané plyny pro ochrannou atmosféru

Použitý ochranný plyn vytvářející ochranu atmosféru rozděluje metodu tavící se elektrody na MIG a MAG. Mezi využívané inertní plyny patří argon a helium, popřípadě jejich směsi. Tyto inertní plyny se svarovou lázní chemicky nereagují a nemají vliv na konečné chemické složení svarového spoje. Inertní plyny jsou využívány metodou MIG pro svařování převážně mědi, hliníku a niklu. Ostatní užívané plyny značí metodu MAG. Ochrannou atmosféru tvoří jeden konkrétní plyn nebo vícesložkové směsi plynů. Volbu užitého plynu rozhoduje požadovaná funkce plynu (MIG/MAG) a ekonomické propočty. [1, 6, 8, 10]

Zároveň ochranný plyn plní dvě základní funkce. První je ochrana tavícího se konce elektrody včetně svarové lázně před okolní atmosférou. Užitý plyn ji vytlačí z prostoru oblouku a tím ji nahradí. Atmosféra obsahující kyslík způsobuje oxidaci, pórovitost, naplynění nebo propálení svarového spoje. Proto je přítomnost vzdušné atmosféry při svařování nežádoucí. Druhá úloha ochranného plynu spočívá ve vytváření příznivých podmínek pro zapálení i hoření oblouku,

stabilitu procesu a tvar svarové housenky. Také lze ovlivnit typ přenosu kovu do svaru. Do jisté míry je ochrannou atmosférou ovlivněna metalurgie svarového spoje při použití aktivního plynu. [1, 6, 8, 10]

- **Oxid uhličitý (CO_2)** – Samostatné použití plynu je z ekonomického hlediska nejvýhodnější možností pro svařování metodou MAG. Díky své vysoké teplotní vodivosti prohlubuje závar. Za výhodu lze považovat vyšší hustotu plynu oproti vzdušné atmosféře. Při svařování ve vhodně vybraných polohách ochranná atmosféra vlivem gravitace lépe ochrání svarovou lázeň. Pro zaručené účinky je vyžadována čistota oxidu uhličitého na 99,7 %. Svařovat je možno jen zkratovým přenosem. Využívá se pro svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Lze využít i směsi, kdy oxid uhličitý tvoří větší část, s dalšími používanými ochrannými plyny (nejčastěji s argonem). Dodává se v barevně značených tlakových lahví podle Obrázku 4. [6, 8, 10]
- **Argon (Ar)** – Oproti oxidu uhličitému má argon malou tepelnou vodivost. Příznivě však ovlivňuje zapálení oblouku a zaručuje jeho stabilní hoření za vysokých teplot. Vyšší hustota plynu zaručuje stejný efekt jako CO_2 , tedy vytlačuje okolní atmosféru z místa svaru. Hojně se využívá směs oxidu uhličitého a argonu, kdy CO_2 zaručuje dobrou ochranu svarové lázně a dobrý závar. Argon pak zaručuje dobré zapálení oblouku, které zhoršuje přítomnost CO_2 . Kromě směsi argon + CO_2 se argon využívá v celé řadě dalších kombinací s ostatními ochrannými plyny. Samotný argon se využívá velmi málo. Pro metodu MIG je nutné zajistit čistotu argonu dosahující hodnot 99,95 % nebo 99,98 %. Lze ho ovšem využít pro veškeré svařitelné materiály. [6, 8]
- **Helium (He)** – Jedná se o ochranný plyn vyšší cenové kategorie. Patří mezi inertní plyny a jeho samostatné využití je pro metodu svařování MIG. Předností helia je vyšší tepelná vodivost oproti argonu i oxidu uhličitého. Také je možné využít širší rozsah svařovacích parametrů a tím je umožněn výběr z více přenosů kovu. Ochrana svarové lázně je pro nízkou hmotnost prvku (nižší jak vzduch) méně účinná, než při využití argonu či oxidu uhličitého. Pro zachování principu ochranné atmosféry je nutné zvýšit průtokovou rychlost plynu, což vede ke zvýšení spotřeby helia. Helium je díky vysoké tepelné vodivosti vhodné pro svařované materiály s vysokou tepelnou vodivostí. Využívá se i v kombinaci s argonem, kdy se zvýšená hloubka závaru a je umožněna vyšší rychlost svařování. Samostatné helium je dodáváno v šedých tlakových lahví s hnědě zbarvenou horní zaoblenou částí dle Obrázku 4. [6, 10]
- **Kyslík (O_2)** – Nepoužívá se jako samostatný ochranný plyn, ale vždy je obsažen v malém množství (do 8 %) ve směsích s dalšími plyny. Častá je směs kyslíku a argonu. Přítomnost kyslíku vede ke stabilnějšímu elektrickému oblouku a pro jeho podporu hoření je dosahováno vyšších teplot při svařování. Pozitivně je ovlivněno odplynění svarové lázně a také dochází ke snížení povrchového napětí svaru. Přítomnost kyslíku v ochranné atmosféře umožňuje snazší přechod do sprchového přenosu kovu. Samostatný kyslík je dodáván ve světle modrých lahví s bílou horní zaoblenou částí, jak je zobrazeno na Obrázku 4. [6, 10]



Obrázek 4: Barevné značení tlakových lahví
a) oxid uhličitý; b) argon; c) směs argon + oxid uhličitý; d) helium; e) kyslík; podle [10].

1.1.3 Svařovací zařízení pro MIG/MAG

Standartní svařovací zařízení má jednoduchou konstrukci, kdy všechny důležité elementy jsou obsaženy v přenosné zakrytované skříni. Uspořádání, kdy není potřeba samostatný svářecí zdroj, je kabinového typu. Dnes se konstruují i velmi malé svařovací skříně, které neztrácí na výkonnosti. Výhodou všech kabinových typů je nízká hmotnost zařízení a s tím spojené jednoduché přesuny. Ke svařovací skříni musí být připojena tlaková láhev, obsahující ochranný plyn. Pro ulehčení přesunu je možné svařovací zařízení společně s tlakovou láhví umístit na přepravní vozík. Mobilita pak patří k nejlepším mezi svařovacími technikami. [6, 8]

Svařovací hubice, zobrazená již na Obrázku 1, je propojena se svařovacím zařízením, kde se nachází mechanický podavač drátu, cívka s navinutým drátem a svářecí zdroj. Podavač drátu má za úkol kontinuální odval drátu z cívky. Rychlost odvalu je nastavitelná podle potřeby svařovacího procesu. Vlastní podavač se skládá ze systému kladek. Kladky hnací jsou poháněny zabudovaným elektromotorem. Přítlačné kladky jsou umístěné do spoluzabírající pozice vzhledem k hnacím kladkám a působí odpovídající přítlačnou silou. Díky přítlačné síle dochází k posunu drátu dále do bowdenu (vodící trubice ústící do svařovací hubice). V některých případech se také instalují rovnací kladky pro vyrovnaní drátu vstupujícího do bowdenu a tím zamezit zvýšení odporu ve formě tření při průchodu drátu bowdenem. Umístěné jsou před hnacími a přítlačnými kladkami. [6, 8, 10]

Pro metody MIG/MAG je vhodný svařovací zdroj jednosměrného proudu s plochou V-A charakteristikou. Plochá V-A charakteristika značí velmi malé změny napětí při velkých změnách svařovacího proudu. Lze prohlásit, že jde o zdroj s konstantním napětím na oblouku. Jako svařovací zdroj se využívají svařovacích usměrňovačů. Lze je využít ke svařování se sprchovým i se zkratovým přenosem. Usměrňovače s rozsahem do 160 A jsou vhodné pro zkratový přenos a jsou vhodné pro svařování tenkých plechů. Výkonnější usměrňovače s až 600 A umožňují sprchový přenos. [6, 8]

Dnes velice rozšířené měniče (invertory) jako svařovací zdroj se vyznačují nízkou hmotností. Příznivá je i nízká cena a velmi úsporné konstrukční řešení z hlediska velikosti svařovacího zařízení. Díky statickému měniči frekvence je možno dosáhnout vyšších pracovních frekvencí. To umožňuje využití transformátoru s jádrem o výrazně nižší hmotnosti. Vyšší frekvence je spojena s lepší účinností. Nevyužitá energie je přeměněna na energii tepelnou. Z toho vychází další výhoda svařovacího měniče. Nároky na chlazení jsou výrazně nižší, jelikož hodnota účinnosti může dosahovat až 90 % při 100 kHz. Zdroj také umožňuje regulaci V-A charakteristiky. [8, 12]

Točivé elektrické zdroje se pro svoji hmotnost používají méně. Rozdělujeme je na zdroje nižších výkonů (max. 300 A) pro zkratový přenos a na vysokovýkonné (max. 750 A) zaručující sprchový přenos. [8]

Před samotným svářením je nutné nastavit proměnné hodnoty rychlosti odvíjení drátu a velikost svařovacího proudu.

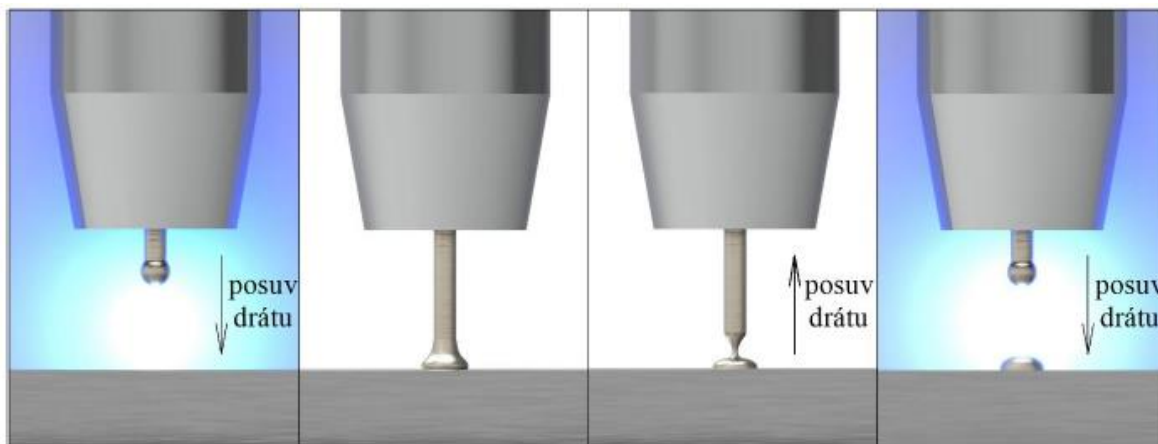
1.2 Metoda svařování CMT

Svařovací metoda CMT je zkratkou pro název Cold Metal Transfer. Název metody naznačuje princip přenosu přídavného materiálu. Ten se uskutečňuje za nízkých teplot. Metoda má základ v principu svařování metodami MIG/MAG. Úpravou a vývojem této technologie vznikla metoda CMT, která byla vyvinuta firmou Fronius za účelem spojení hliníku a ocele. Jako elektroda je zde využit svařovací drát a je zde přítomná i ochranná atmosféra. Odlišnost lze nalézt v atypickém pohybu svařovacího drátu. Zhotovené svary se vyznačují vysokou kvalitou, nízkým rozstříkem a malou tepelně ovlivněnou oblastí základního materiálu. [13, 14]

1.2.1 Princip metody CMT

Zásadním prvkem je pohyb svařovacího drátu v hubici jak směrem k svarové lázni, tak zpět do zařízení. Drát koná translační pohyb ven z hubice až do okamžiku zkratu. Následuje pohyb drátu v opačném směru, a to zpátky do svařovacího zařízení. Jakmile nastane přerušování zkratu, je posuv drátu znovu směrem ven z hubice. Střídání smyslu pohybu drátu je vykonáváno s vysokou frekvencí a to až 70 Hz. Tímto se metoda zásadně odlišuje od MIG/MAG, kde pohyb drátu je v jediném směru ven z hubice a o předem nastavené konstantní rychlosti. Pohyb drátu při metodě CMT příznivě přispívá k přenosu přídavného materiálu v podobě kapky do svarové lázně. [13, 14]

Svařovací proud dosahuje zvýšených hodnot při zapalování oblouku po dobu, kdy se svařovací drát pohybuje směrem k svařované součásti. Po kontaktu přídavného materiálu se základním je vyslán signál, který okamžitě sníží hodnotu svařovacího proudu. To je z důvodu snížení odporu v daném okamžiku. Menší odpor by způsobil zvýšení svařovacího proudu, který je při této metodě nežádoucí. Po oddělení kapky přídavného materiálu je proud opět zvýšen pro opětovné zapálení oblouku. Tento cyklus včetně pohybu svařovacího drátu je vyobrazen na Obrázku 5. [13, 14]

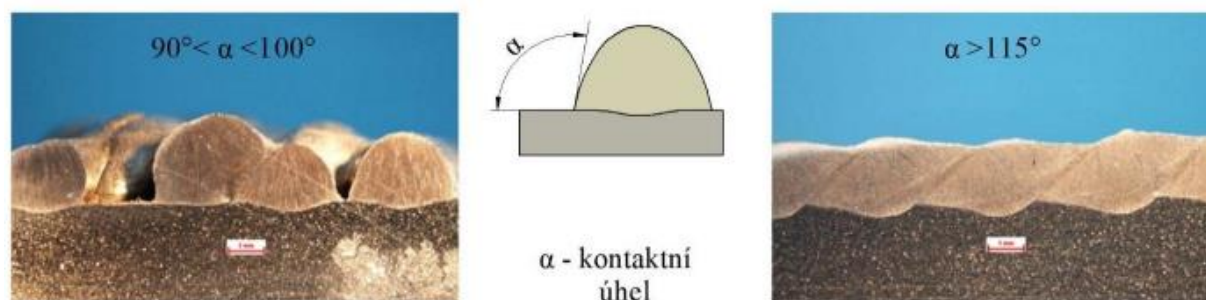


Obrázek 5: Cyklus při svařování metodou CMT [14].

Vznik a přerušení zkratu je zásadní pro funkci metody CMT. Metoda si tak sama vyhodnocuje směr pohybu drátu včetně rychlosti pohybu samotného drátu. Dalším faktorem je přesun přídavného materiálu za minimálního proudu. Toho je dosaženo díky přerušení zkratu vlivem pohybu drátu na rozdíl od MIG/MAG, kde je přerušení zkratu dosaženo právě působením proudu. Dále se metoda vyznačuje minimálním rozstříkem díky čemuž vznikají kvalitní sváry nevyžadující další opracování. Nižší rozstřík je dosažen díky nízkému svařovacímu proudu a také vlivem přerušení zkratu, který je pod kontrolou. Oproti tomu metoda MIG/MAG nevyhodnocuje svařovací proces a k přerušení zkratu dochází nekontrolovatelně. Proto má také větší rozstřík. [13, 14]

U metody CMT je nižší hodnota vneseného tepla do svařované součásti díky nízké hodnotě svařovacího proudu. Tepelné zatížení svařence je minimální, což je nutný předpoklad pro svařování hliníku a ocele. Je možné svařovat i tenké plechy, které by nebylo možné spojit pomocí svarové housenky jinou metodou, jelikož by nastaly nadměrné tepelné deformace nebo by došlo k roztavení samotného plechu jako základního materiálu. Výsledná svarová housenka vytvořená metodou CMT se vyznačuje velkým rozměrem výšky svaru a menším rozměrem do šířky. [13, 14]

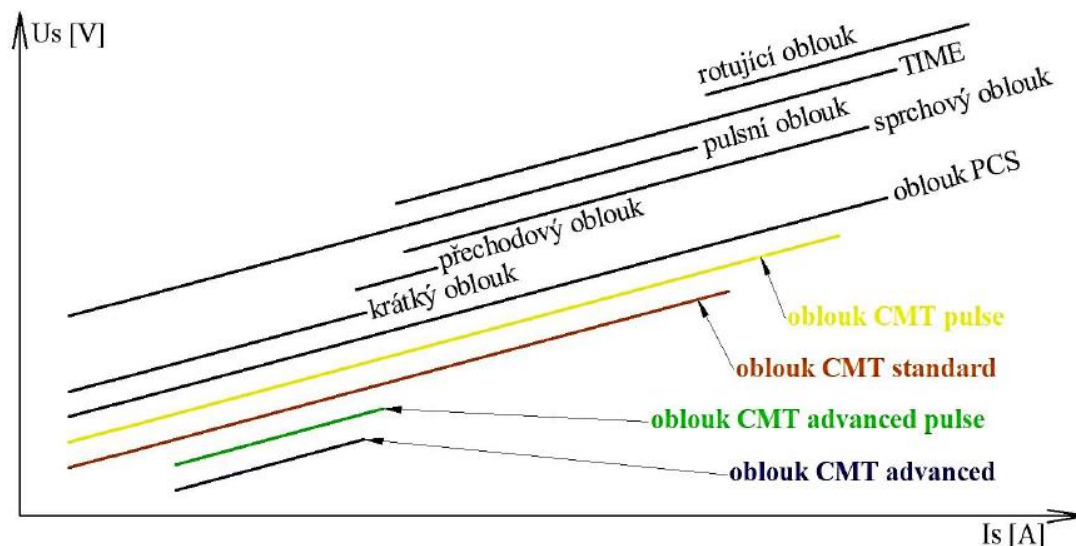
Metoda CMT je přímo vhodná k **navarování**. Díky možnostem nastavení, která metoda nabízí, lze regulovat míru zředění základního a přídavného materiálu. Promíchání těchto dvou materiálů má negativní dopady na výsledné spojení. Nejpodstatnější vliv má zředění na korozní odolnost svarového spoje. U metody CMT je promíchání dvou materiálů na velice nízké úrovni. Zároveň s malou tepelně ovlivněnou oblastí metoda dosahuje výborných výsledků při navarování. Nastavením hodnot jako je rychlost posuvu drátu nebo hodnoty svařovacího proudu se mění hodnota vneseného tepla, ale i tvar samotné housenky. Při vyšších rychlostech posuvu vneseného tepla přibývá. Naopak při snižování rychlosti posuvu nastává příznivý stav pro navarování, kdy vnesené teplo dosahuje malých hodnot a je vytvořena dostatečně velká výška návarové housenky. Pro posouzení tvaru návarové housenky se zavádí veličina kontaktní úhel α zobrazený na Obrázku 6. Kontaktní úhel se nachází mezi rovinami základního materiálu a tečné roviny ke kořenu návaru. Pro plynulé navázání návarových housenek je potřeba aby kontaktní úhel dosahoval alespoň hodnoty 115° . Při ostřejším úhlu je vzájemné navázání návarových housenek velice nepříznivé, jak vyobrazuje Obrázek 6. [14]



Obrázek 6: Kontaktní úhel při navarování [14].

1.2.2 Modifikace metody CMT

Metodu je možno použít kromě standartního přenosu (**CMT standard**) ve více modifikací. První z nich umožňuje přenos pulzním obloukem, který zajišťuje větší přívod tepla do svarové lázně. Je možné tak dosáhnout hlubokého závaru. Popřípadě je možné kombinovat standartní CMT cyklus s pulzním přenosem (**CMT pulse**) pro jednu svarovou housenku. Další možnou modifikací je CMT advanced. Tato metoda zajišťuje nejmenší možné tepelné ovlivnění základního materiálu ze všech zmíněných metod. Metoda využívá střídavého proudu, a tedy i změny polarity. Mezi přechodem z kladné do záporné polarity i naopak pak dochází ke zhasínání oblouku. Kromě nízké hodnoty vneseného tepla je dosaženo i stabilního oblouku což vede ke zhotovení kvalitních svarů. Úpravou této varianty je **CMT advanced pulse**, kde je kromě střídavého proudu implementován i pulsní přenos. Ten probíhá v okamžiku po zkratu při oddalování svařovacího drátu od základního materiálu. Zmíněné modifikace jsou znázorněny ve V-A charakteristice na Obrázku 7. K porovnání jsou v grafu uvedeny další konvenční způsoby přenosu. [13, 14]



Obrázek 7: V-A charakteristika metod CMT v porovnání s konvenčními přenosy [14].

1.2.3 Svařovací zařízení pro CMT

Svařovací zařízení pro metodu CMT je složitější a také finančně náročnější než běžné svařovací invertory pro svařování MIG/MAG. Je zde kladen nárok na umožnění pohybu svařovacího drátu v obou směrech. To ale není schopen zajistit motor v podavači drátu, který odvíjí drát z cívky a nachází se ve skříni zařízení. Proto je k dispozici druhý motor v posuvovém mechanismu nacházející se ve svařovací hubici. Ten musí být schopný pohybovat drátem oběma směry o vysoké frekvenci. Z toho důvodu je přítomen ještě absorbér, který sníží síly potřebné pro pohyb drátu. Dále absorbér vyrovnává funkci obou motorů zároveň nastávající v situacích, kdy motory táhnou drát opačným smyslem. Mechanický absorbér představuje prostor, ve kterém je drát v jednom místě pevně zavazben k posuvovému mechanismu v hubici a zbytek drátu je na volno v prostoru. Se zavazbeným koncem drátu manipuluje motor umístěný v hubici podle potřeby v obou směrech. Volný konec připojený do podavače ve skříni zařízení pak neklade téměř žádný odpor motoru v hubici zařízení. Svařovací zařízení od firmy Fronius, které bylo i využito při zkušebním navařování, je vyobrazeno na Obrázku 8. Z obrázku je patrné, že se zařízení podobá svařovacím invertorům pro MIG/MAG svařování z kterého metoda CMT vychází. [13, 14]

Zařízení dále musí disponovat řídicí jednotkou, která celý proces digitálně řídí. Zásadní je okamžitá komunikace mezi svarovou lázní a jednotkou. Ta pak musí na základě dění ve svarové lázni zadat povel k činnosti všem dalším komponentám jako je třeba motor v hubici. Tyto povely musí zvládnout zadat v řádech desítek za sekundu. Celé zařízení je i ve variantě Twin pro vysokovýkonnostní svařování. Zde jsou dva svařovací zdroje umístěné ve svařovacím zařízení. Oba svařovací dráty jsou přivedeny do jednoho hořáku. Umožňují však samostatné nastavení posuvů. Dvojnásobný počet přivedených drátů do svarové lázně značí i dvojnásobné množství přivedeného přídavného materiálu. Tuto výhodu lze využít při navařování. [13, 14]



Obrázek 8: Svařovací zařízení CMT Fronius [14].

1.3 Navádění svařovací hlavičky

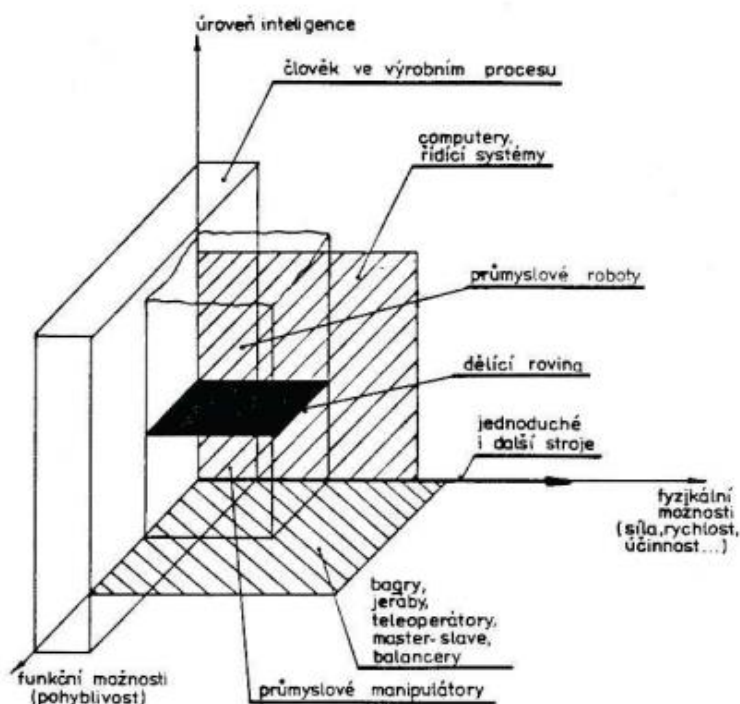
Využití navádění svařovací hlavičky značí strojové svařování, popř. automatizaci celého procesu. Automatizovaný proces navařování oproti ručnímu navařování má řadu výhod jako přesnější a pravidelnější vedení svařovací hlavičky, menší počet chyb vlivem lidského faktoru nebo vyšší produktivitu. Pohyb svařovací hlavičky je pak nutné v procesu zajistit průmyslovými roboty. Možnosti pohybu určují stupně volnosti. Na Obrázku 9 je zobrazen standardní průmyslový robot vybavený svařovacím vybavením o šesti stupních volnosti. Robot se vyznačuje vysokou přesností (např. $\pm 0,1$ mm) při pohybu v naprogramované dráze. Na zmíněnou přesnost má vliv volba vhodného navádění a také správnost sladění programu se zvoleným naváděním. Při procesu dochází ke znečištění jednotlivých komponent. To může způsobovat přerušení svařovací sekvence nebo vést k nepřesné dráze svařovací hlavičky. Při odladění procesu lze dosáhnout velké produktivnosti a úspore lidských zdrojů. [4, 5]



Obrázek 9: Svařovací robot se šesti pohyblivými osami [15].

1.3.1 Svařovací roboti

Průmyslový robot umožňuje přesáhnout limitů lidského těla ve výrobě a při vhodném využití značně zkrátit výrobní časy. Charakteristika schopností a dovedností robotů je graficky znázorněna v prostorovém grafu na Obrázku 10, kde na osách je úroveň inteligence, fyzikální možnosti a funkční možnosti. Úroveň inteligence je hodnocena mírou vnímání, rozhodování, chápání, paměti a logikou. Fyzické možnosti zastupují sílu, rychlost, trvanlivost, spolehlivost a schopnost nepřetržité práce, kterou je daný subjekt schopný vyvinout. Funkční možnosti pak zastupují univerzálnost, přizpůsobivost, možnosti přemísťování v prostoru a úroveň manipulovatelnosti. [4]



Obrázek 10: Schematické porovnání člověka a stroje ve výrobním procesu [4].

Při porovnání lidského pracovníka s jednotlivými prostředky vyskytující se v průmyslu je zřejmé, že člověk má nejvyšší stupeň inteligence a funkčních možností. Při požadavku vyššího stupně fyzikálních možností je nutné využít patřičné stroje. Do první skupiny patří bagry, jeřáby, balancery a další. V diagramu na Obrázku 10 jsou zobrazeny pouze ve dvou rovinách z důvodu absence řídicího systému. To značí nulovou úroveň inteligence a je potřeba obsluhy pracovníka. Přítomnost řídicího systému ve stroji již zvyšuje úroveň inteligence a stroj dokáže pracovat v automatickém nebo v poloautomatickém režimu. V diagramu vznikne prostorový objekt definující dané stroje. Tyto stroje dosahují hodnot na všech třech osách. Patří sem průmyslové manipulátory a od jisté úrovně inteligence danou dělicí rovinou se vyskytují roboti. [4]

Zvolený svařovací robot se pohybuje po své **dráze**. Dráhou se rozumí množina bodů, po které robot musí projít z počáteční polohy do koncové. Dráha je určena pro konkrétní bod robota (konec elektrody) a tvoří křivku. **Trajektorie** robota pak udává dráhu společně s časem. Je tedy jednoznačně dáno, v kterém bodě dráhy se bude robot v konkrétním čase nacházet. Dráha i trajektorie mohou být vyjádřeny v kloubových nebo v kartézských souřadnicích podle potřeby. [16]

Průmyslové roboty určené pro MIG/MAG či CMT metody sváření jsou vybavené potřebným zařízením a je zajištěn přísun ochranného plynu do instalované hubice. Kromě těchto nezbytných záležitostí je vhodné automatizované pracoviště vybavit dalšími prvky. Z bezpečnostního hlediska to jsou kolizní senzory, které chrání zařízení před poškozením zařízení o nečekanou překážku. Jednotka na čištění hořáku předchází nadměrnému znečištění svařovací hubice, které by vedlo k méně kvalitní housence. Vhodné využití je u nepřetržitého provozu svařovacího robota, kdy se hubice preventivně čistí ve vhodných intervalech. [4]

1.3.2 Možnosti navádění

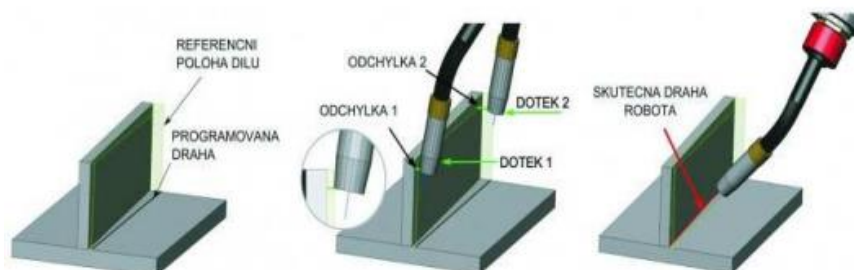
Navádění pro svařovací zařízení je dvojího typu. Je rozlišováno mezi dotykovým vyhledáváním a vyhledáváním pomocí optických senzorů. Optické senzory pracují na základě zachycení odrazu vyslaného paprsku na snímaný povrch, popřípadě jeho přerušení. Optický senzor bývá upevněný v blízkosti svařovací hubice. Optickým senzorem lze vyhledávat geometrickou změnu na svařovaném povrchu a podle řídicího programu upravovat dráhu zařízení. Lze uplatnit i v případech, kdy dotykové vyhledávání není schopno detekovat polohu budoucího svaru (např. spoje na tupo). Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a možnost ovlivňování navádění falešnými odrazy od reflexních ploch. [5]

Dotykové navádění prodlužuje časy výrobních cyklů o čas, po který probíhá vyhledávací sekvence. Tyto sekvence probíhají za nízkých rychlostech pohybu robota. Metoda dotykového vyhledávání je vhodná pro situace, kdy není možné docílit potřebné přesnosti přípravy výroby. [5]

Typy dotykového navádění:

Vyhledávání hubicí svařovacího hořáku – Po trvání vyhledávací sekvence je na svařovací hubici přivedeno napětí. Vodivé spojení mezi hubicí a základním materiálem je zaznamenáno svařovacím robotem. Dojde k přepočtu a následné korekci původní naprogramované dráze. Vyšší přivedené napětí na hubici bude zaručovat méně chybných signálů od přítomných nečistot (okuje, koroze,...). Princip navádění je vyobrazen na Obrázku 11. Jedná se o nejlevnější způsob navádění svařovacího zařízení. Metoda je omezena pouze geometrií

svařovací hubice (velká hubice vs. úzké prostory). Z časového hlediska je metoda dost omezující. Uváděné rychlosti vyhledávání dosahují $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Je to z důvodu navázání mechanického kontaktu mezi hubicí a svařencem. Kontakt je doporučen vnější kuželovou plochou hubice z důvodu přítomnosti menšího množství kovového odpadu od rozstříku kovu při procesu svařování. Čelní plocha hubice z těchto důvodů značně ovlivňuje přesnost dráhy a nedoporučuje se využívat k navádění. Pro minimální ovlivnění od nečistot a vzniku falešných dotyků je potřeba hubici pravidelně čistit pomocí čistící stanice vybavenou kartáči. [5]



Obrázek 11: Grafické znázornění vyhledávání pomocí hubice svařovacího hořáku [4].

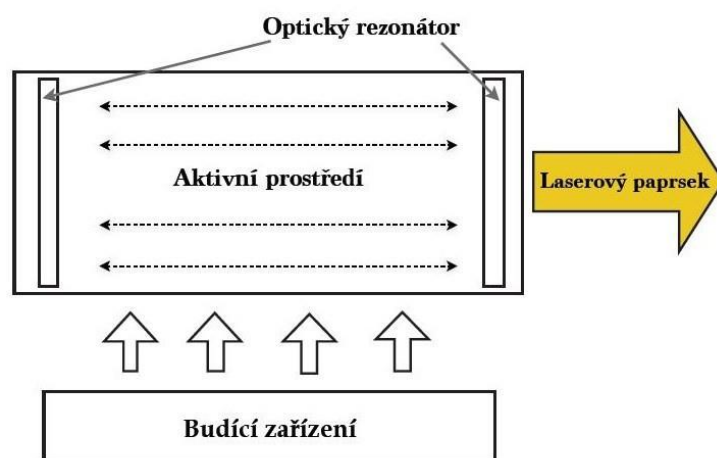
Vyhledávání koncem svařovacího drátu – Pro tento způsob vedení je nutné dočasně uvolnit kladky podavače drátu za účelem potřebné volnosti drátu. Svařovací drát je potřeba upevnit ve svařovací hubici, jinak není možno vyhledávání koncem drátu realizovat. Docíleno tomu je za využití přídatného zařízení, které je schopno drát v hubici ustavit proti pohybu. Dále je nutné zkrátit drát vždy na stejnou délku pomocí odstříhávače drátu. Princip vyhledávání je podobný jako u vyhledávání hubicí. Zde je napětí přivedeno přímo na svařovací drát. Jelikož drát je zároveň elektrodou, přívod napětí nevyžaduje další k tomu nezbytné komponenty, jako u vyhledávání hubicí. Je ovšem možné obě metody kombinovat a využít vždy jednu z nich dle potřeby. Sekvence vyhledávání je pro vyhledávání elektrodou podobná jako u vyhledávání pouze hubicí a dosahuje hodnot do $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Výhodou je také možnost dostat se do úzkých prostor pomocí drátu namísto hubice. Pro vyhledávání koncem svařovacího drátu je doporučeno používat kvalitní materiál s minimálním zkroucením, aby nedocházelo deformaci při vyhledávací sekvenci. [5]

1.3.3 Laserové navádění

Pojem laser je zkratkou anglického výrazu **L**ight **A**mplification by **S**timulated of **R**adiation. Z překladu vyplývá samotný princip laseru, který spočívá v zesilování a stimulování světelného paprsku. Vznik světla lze definovat jako přestup atomu z vyššího energetického stavu do nižšího. Světelná energie je vyzařována z jednotlivých atomů nezávisle na sobě. U laserového světla k vyzařování energie dochází vlivem vnějšího podnětu, a to stimulovanou emisí. Prvním krokem je vybuzení jednotlivých atomů v aktivním prostředí. Dosáhnou tak horní energetické hranice a následně díky stimulujícímu fotonu přeskochí v miliontině sekundy na pracovní hladinu. Výsledkem je světelný viditelný paprsek patřící do ultrafialové nebo infračervené oblasti barevného spektra. Vznikající fotony jsou totožné se stimulujícím fotonem. V důsledku toho jsou vyzařené fotony identické a urychlené stejným směrem. Ze stejného důvodu je světelný paprsek vždy monochromatický. [17, 18]

Z konstrukčního hlediska se laser skládá z aktivního prostředí, optických rezonátorů a budicího zařízení dle Obrázku 12. Aktivní prostředí značí látku, z které jsou emitovány fotony laserového paprsku. Podle aktivního prostředí jsou lasery děleny do skupin: pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmové a lasery s volnými elektrony. Optické rezonátory

představují dvě na sebe rovnoběžná zrcadla, přičemž jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Funkce rezonátorů spočívá v zesilování světelného paprsku a v udržení fotonů po dostatečně dlouhou dobu v aktivním prostředí. Poslední částí je budící zařízení, které vybudí atomy v aktivním prostředí na horní energetickou hranici. [17, 18]



Obrázek 12: Schematické znázornění konstrukce laseru [19].

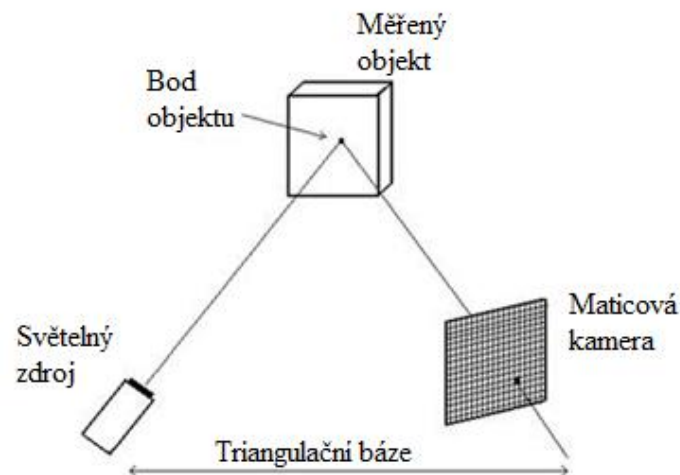
Laserové naváděcí systémy jsou schopné rozeznat i velice malé detaily. Navádění je velmi přesné dosahující přesností běžně na 0,01 mm. Díky vysoké přesnosti a rychlému vyhledávání jsou svařovací časy výrazně nižší oproti dotykovým metodám vedení. Konkrétně se jedná o laserové skenery, které jsou schopné i digitalizovat snímanou součást. Uplatnění laserových skenerů je i na rozměrové kontroly. Při využití pro navádění svařovací hlavy jsou laserové skenery variantou vyžadující nejvyšší pořizovací náklady. Zaručují však vyšší produktivitu i méně chybových měření, které by znepřesňovali výslednou dráhu hlavy. Firma Micro-epsilon je jedním z výrobců laserových skenerů a na Obrázku 13 je příklad produktu této firmy. Jedná se o řadu scanCONTROL 25xx, který lze snadno instalovat do svařovacího robota pro malé rozměry skeneru. [20, 21]



Obrázek 13: Laserový scanner firmy Micro-epsilon [19].

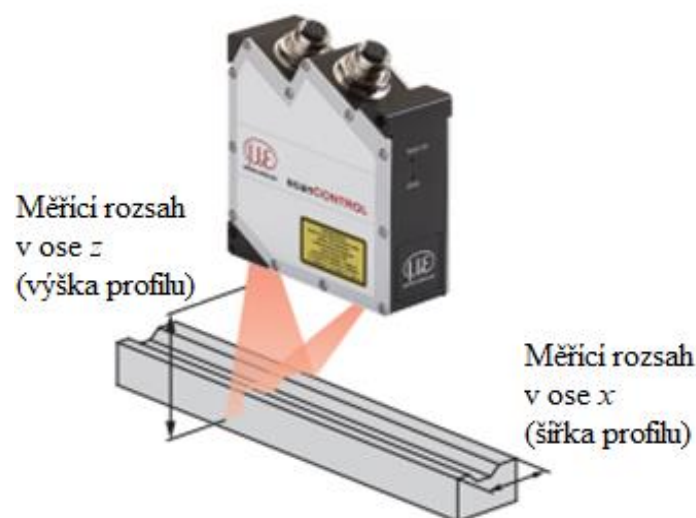
Produkt řady scanCONTROL 25xx využívá princip optické triangulace. Triangulace je měřicí metoda, využívající úhel ke změření vzdálenosti. Zdroj světla (laser) nasvítí konkrétní bod na součásti, který je zachycen pomocí integrovaného snímače. Vznikne tzv. triangulační trojúhelník zobrazený na Obrázku 14. Základnu tohoto trojúhelníku tvoří triangulační báze.

Úhel mezi triangulační bází a světelným paprskem ze zdroje je neměnný. Oproti tomu snímač zastoupený maticovou kamerou svírá s triangulační bází proměnný úhel. Na základě velikosti tohoto úhlu je přepočítána souřadnice z odpovídající vzdálenosti součásti od skeneru. Tento princip odpovídá aktivní 1D triangulaci. Dále je možné využít 2D popřípadě 3D triangulace. V případě 2D je na povrch součásti vyslán světelný pruh místo bodu. U 3D to je strukturovaný světelný svazek. Výhodou vícerozměrného (2D nebo 3D) snímání oproti jednorozměrnému (1D) je v rychlosti nasnímání. 3D triangulace je pak schopná nasnímat celý objekt najednou. ScanCONTROL 25xx je vybaven světelným zdrojem ve formě laseru, který promítá na součást světelný pruh. Jde tedy o 2D optickou triangulaci. [22, 23]



Obrázek 14: Triangulační trojúhelník; podle [23].

Snímací zařízení řady scanCONTROL 25xx jsou vybavena i integrovaným ovladačem. Vše potřebné pro funkci navádění je obsaženo v zařízení, se kterým se díky tomu snadno manipuluje. Zařízení interně uskutečňuje profilové měření. Následně vypočítává výchozí naměřené hodnoty (úhel, vzdálenost z). Dále skener zaznamenává povrch v ose x , kde je nasnímana samotná geometrie povrchu součásti. Princip měření na ose x a z je znázorněn na Obrázku 15. [22]



Obrázek 15: Princip snímání povrchu pomocí scanCONTROL 25xx; podle [22].

1.3.4 Laserový skener scanCONTROL LLT 25xx

Zařízení scanCONTROL 25xx je ve dvou zhotovení. Prvním je základní verze LLT 2500 nazývaná také jako řada compact. Tato verze poskytuje kalibrovaná data profilu, která lze následně zpracovávat pomocí vyhodnocovacího softwaru. Druhým typem skeneru scanControl je verze LLT 2510 nazývaná jako Smart. Tato verze poskytuje kromě nasnímaní profilu a jeho vyhodnocení také možnost vytvořit nastavení hodnocení parametrů a uložit tyto nastavení do integrované řídicí jednotky. Dále se jednotlivé verze produktu rozdělují podle měřicího rozsahu. Lze vždy využít jen omezenou vzdálenost v ose z (ve výšce profilu). Měřicí prostor jednotlivých variant je uveden v Tabulce 1. Promítaný světelný pruh laseru na měřicí součást má jistou limitní délku interpretovanou souřadnicí x. [24]

Tabulka 1: Využitelný měřicí prostor laserového skeneru scanControl [24].

		Model:	LLT 25xx–25	LLT 25xx–50	LLT 25xx–100
Osa z	Standartní rozsah měření	Počátek měření	53,5 mm	70 mm	190 mm
		Střed měření	66 mm	95 mm	240 mm
		Maximum	78,5 mm	120 mm	290 mm
		Výška prostoru	25 mm	50 mm	100 mm
	Rozšířený rozsah měření	Počátek měření	53 mm	65 mm	125 mm
		Maximum	79 mm	125 mm	390 mm
Osa x	Standartní rozsah měření	Počátek měření	23,4 mm	42 mm	83,1 mm
		Střed měření	25 mm	50 mm	100 mm
		Maximum	29,1 mm	58 mm	120,8 mm
	Rozšířený rozsah měření	Počátek měření	23,2 mm	40 mm	58,5 mm
		Maximum	29,3 mm	60 mm	143,5 mm

Laserový skener scanCONTROL je schopný vzhledem k nasnímanému povrchu vyhodnotit určité body, popřípadě další geometrické prvky. Široká škála nástrojů je zobrazena na Obrázcích 16 až 23. Vyhodnocení je možné provádět v poskytnutém softwaru ScanCONTROL Configuration Tools, který je zdarma k dispozici po zakoupení snímacího zařízení. Mezi možnosti softwaru patří zálohování a editování jednotlivých nasnímaných profilů. Dále sledování snímaných hodnot v reálném čase, popřípadě jejich exportování do excel tabulky. Z hlediska využití v provozu je důležitá možnost hodnoty převést na výstupní signály. Vyhodnocený bod nebo rozměr je možné zapisovat o nastavitelné frekvenci od 25 Hz až po limit laseru scanCONTROL LLT 2510 dosahující hodnoty 300 Hz. Četnost nasnímaných profilů vzhledem k délkovému rozměru na ose y lze regulovat rychlostí posuvu samotného skeneru, který se pohybuje právě ve smyslu osy y. [24]

Zaznamenané hodnoty lze filtrovat dle potřeby za účelem eliminovat extrémní hodnoty, které značí například falešné signály či chybu na snímaném povrchu, kterou je potřeba ignorovat z hlediska komplexního celku. Lze zaznamenávat například největší hodnotu nebo průměrnou hodnotu z hodnot od 3 do 63 naměřených. Tak lze regulovat množství signálů na výstupu. Při procesu skenování není však podmínkou zapojení skenovacího zařízení do počítače s nainstalovaným softwarem. Řada skenerů smart umožňuje předem připravená nastavení uložit do integrované řídicí jednotky v zařízení a při snímání povrchu v reálném čase vyhodnotit naměřená data, která mohou být přivedena na výstupní signál. V tomto případě jsou vybrané hodnoty připravené k současnému použití například pro korekci dráhy svařovací hlavice. [24]

Následuje soupis dostupných nástrojů pro hodnocení profilu v softwaru scanCONTROL Configuration Tools. Nástroje jsou seříděny dle kategorií použití stejně jako v softwaru:

- **Nástroje pro vyhodnocení extrémů**

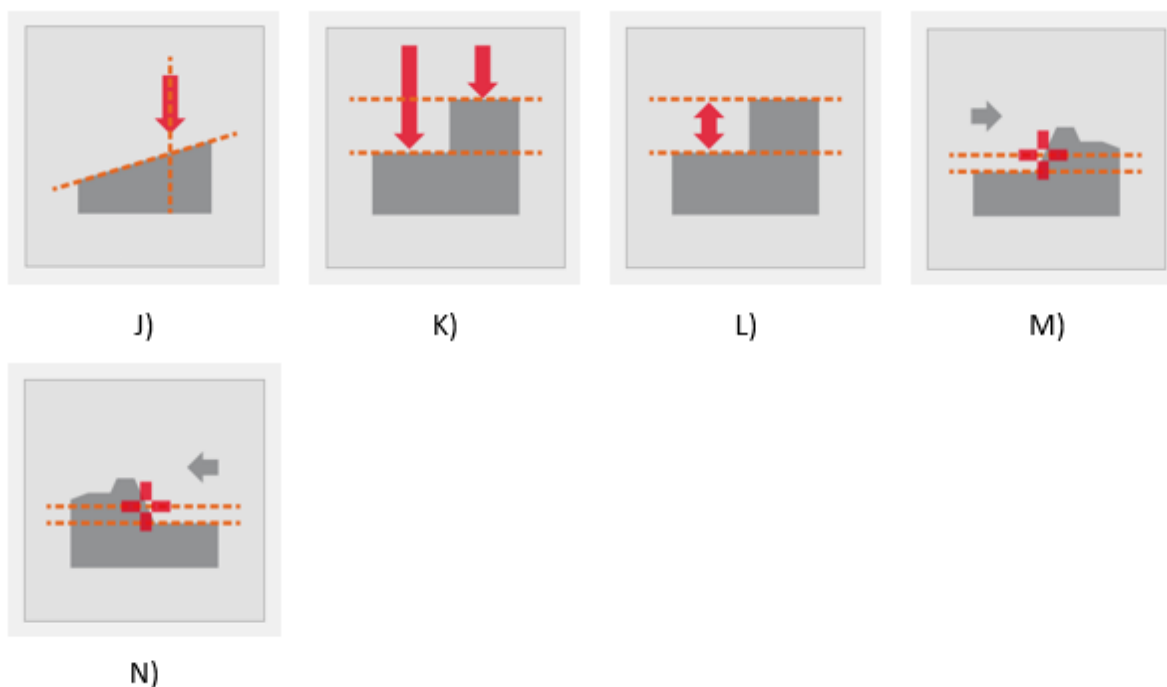


Obrázek 16: Nástroje pro vyhodnocení extrémů

A) maximální bod; B) minimální bod; C) první bod; D) poslední bod [24].

Na Obrázku 16 je zobrazena paleta nástrojů pro určení extrémních bodů. Na pozici A) je maximální bod branný jako nejvyšší hodnota na ose z. Na stejném principu funguje B) minimální bod. Body se vyhodnocují na délkovém rozměru na ose x. V softwaru je možnost omezit oblast vyhodnocení z celkové nasnímané souřadnice x na konkrétní oblast. Tak lze zaznamenat kromě celkového maxima či minima také lokální extrémy. Zápis prvního a posledního bodu (Obrázek 16 C); D)) je vzhledem k ose x. Zde je nutné počítat s maximálním rozsahem snímání povrchu. V případě nasnímaní pozadí profilu se budou body vyhodnocovat místo na profilu, tak na daném pozadí.

- **Nástroje pro krokové změny (hrany)**

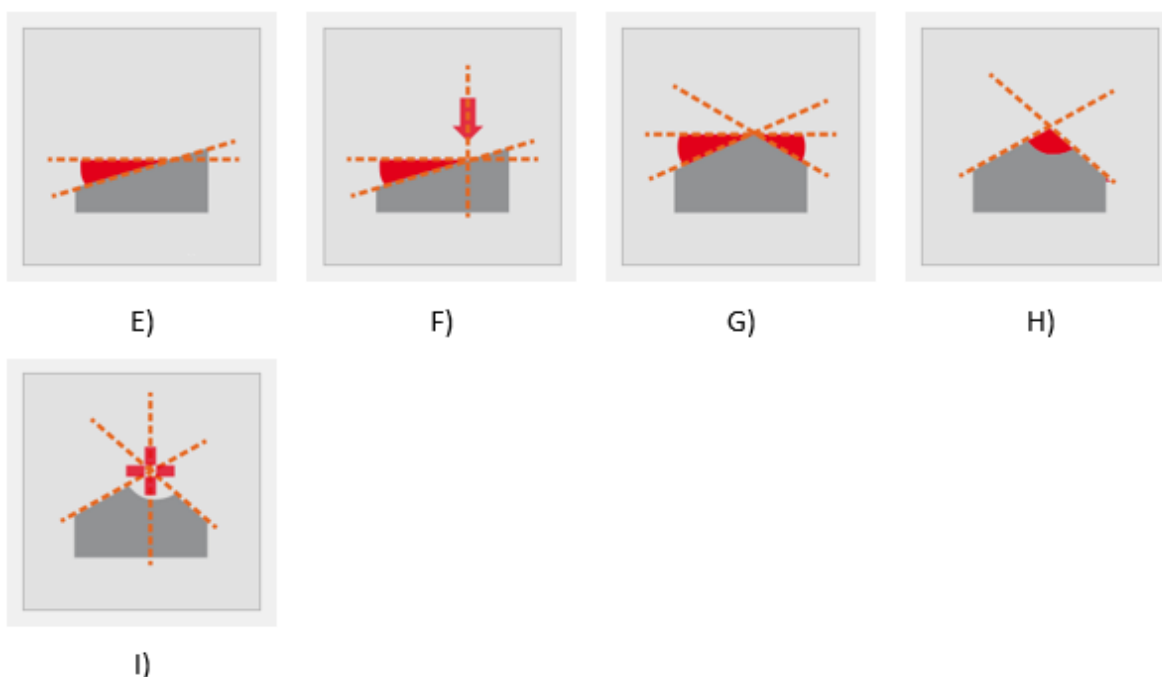


Obrázek 17: Nástroje pro krokové změny (hrany)

J) jednoduché odsazení; K) dvojité odsazení; L) výška kroku; M) levý okraj; N) pravý okraj [24].

Obrázek 17 prezentuje paletu nástrojů pro krokové změny. Program nahraný do skeneru je schopný na profilu rozpoznat hrany a následně dle vybraného nástroje vyhodnotit požadovaný rozměr či bod. Jednoduché odsazení J) uvádí vzdálenost plochy od absolutní nuly. Zvolená plocha je určena omezující oblastí. Vzdálenost od absolutní nuly je započítána ke střední hodnotě vybraného profilu. Dvojitě odsazení K) je stejný nástroj jako jednoduché odsazení s tím rozdílem, že dokáže v jednu chvíli vyhodnotit dvě odsazení. Nástroj Výška kroku L) je schopný vyhodnotit vzdálenost dvou ploch nacházejících se na profilu. Obě plochy je nutné omezit oblastí pro zprůměrování hodnot a vytvoření referenční plochy. Výstupem z programu je tedy číselná hodnota. Nástroje levý okraj M) a pravý okraj N) jsou schopné umístit bod do středu hrany. Opět i tyto nástroje vyžadují omezení patřičnými hranicemi.

- **Nástroje pro vyhodnocení úhlů**

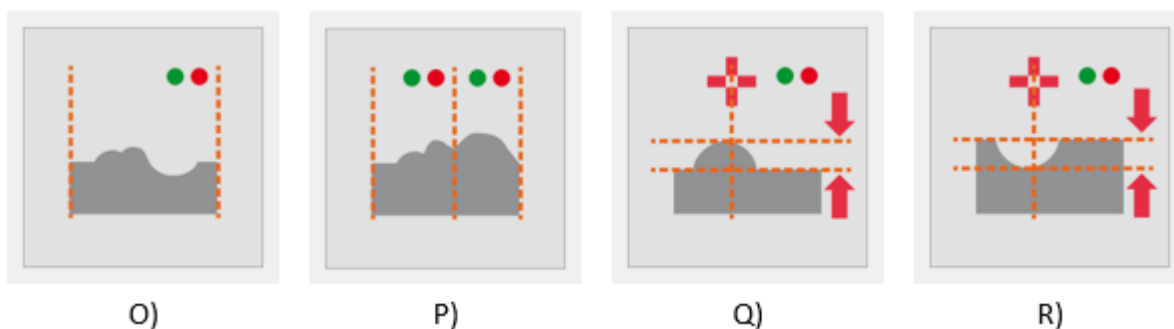


Obrázek 18: Nástroje pro vyhodnocení úhlů

E) absolutní úhel; F) úhel/odsazení; G) dvojitý úhel; H) rozdíl úhlů; I) bod křížení [24].

Paleta nástrojů pro vyhodnocení úhlů je na Obrázku 18. Absolutní úhel na pozici E) udává velikost úhlu mezi zvoleným povrchem a vodorovným směrem. Zvolený povrch se určuje pomocí omezující oblasti. Profil nacházející se uvnitř oblasti se zprůměruje na rovnou plochu. Proto je vhodné do oblasti vybrat pouze přímé útvary v profilu. Jakákoliv zakřivení profilu znehodnotí výsledek tohoto nástroje. Nástroj úhel/odsazení na pozici F) udělá dvě operace najednou. První je vyhodnocení absolutního úhlu a druhá je shodná s nástrojem odsazení z Obrázku 17 J). Obě operace jsou vztaženy na jednu omezující oblast. Výstupem z programu zde budou dvě hodnoty, a to velikost absolutního úhlu ve stupních a vzdálenost odsazení od absolutní nuly v milimetrech. Nástroj z pozice G) dvojitý úhel umožňuje vyhodnotit dva úhly současně. Nástroj rozdíl úhlů na pozici H) je určený k vyhodnocení úhlu mezi dvěma zvolenými plochami. Plochy reprezentované křivkou profilu musí být vybrány omezující oblastí, kdy profil uvnitř oblasti se zprůměruje na přímou plochu pro výpočet úhlu. Poslední nástroj na pozici I) je bod křížení. Tento nástroj využívá stejně jako předchozí nástroj dvě plochy a do jejich průsečíku umístí bod.

- **Nástroje pro hodnocení povrchu**

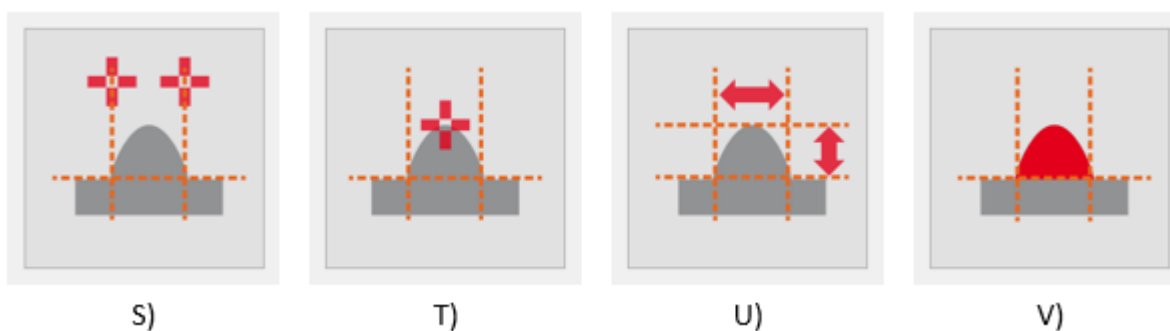


Obrázek 19: Nástroje pro hodnocení povrchu

O) deviace; P) dvojitá deviace; Q) maximum povrchu; R) minimum povrchu [24].

Skupina nástrojů pro hodnocení povrchu na Obrázku 19 je vhodná při kontrole povrchu. Po zadání počátečních podmínek je možné v rámci nástroje nastavit toleranci. V tomto případě se jedná o toleranci povrchu. Nástroj deviace O) vyhodnocuje parametr R_z , tedy největší výšku profilu. Nástroj je vhodný k posuzování rovných ploch, kdy při hodnocení povrchu obsahující tvarové náležitosti jsou výsledky zkreslené. Proto je vhodné využívat omezující oblast. Dvojitá deviace P) se využívá pro hodnocení dvou různých povrchů současně. Funkce nástroje je totožná jako u deviace O). Nástroj maximum povrchu Q) vyhodnotí nejvyšší výstupek profilu, tedy parametr profilu R_p . Protikladem je nástroj minimum povrchu R) k vyhodnocení nejnižší prohlubně profilu R_v . Oba nástroje je nutné z hlediska přesných výsledků omezit omezující oblastí.

- **Nástroje pro hodnocení švů.**

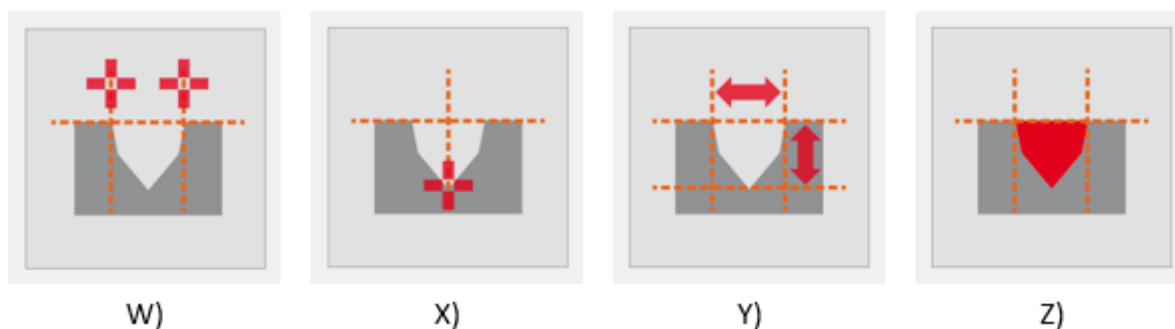


Obrázek 20: Nástroje pro hodnocení švů

S) start/konec; T) maximum; U) šířka a výška; V) oblast [24].

Stejně jako je schopný laserový skener pomocí programu rozpoznat hranu na profilu, tak dokáže určit šev nacházející se na skenovaném povrchu. K jejich hodnocení je nabídnuta paleta nástrojů na Obrázku 20. Nástroj S) start/konec umístí body do kořene švu z obou stran. Na kulový vrchlík švu umístí bod nástroj T) maximum. Rozměry výšky (v ose z) a šířky (v ose x) švu je možné získat pomocí nástroje U) šířka a výška. Tyto rozměry jsou v softwaru uváděné v milimetrech. Poslední nástroj V) oblast dokáže vyhodnotit plochu švu v profilu v milimetrech čtverečních. Nástroje U) a V) je nutné nastavit omezující oblast.

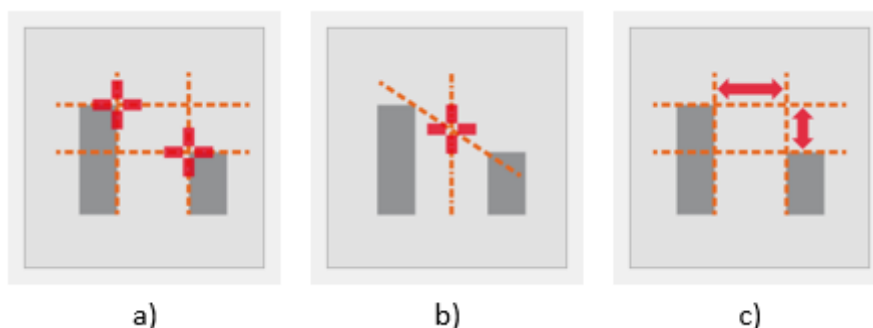
- **Nástroje pro hodnocení drážek**



Obrázek 21: Nástroje pro hodnocení drážek
W) start/konec; X) minimum; Y) šířka a hloubka; Z) oblast [24].

Pro vyhodnocení drážek na součásti jsou k dispozici nástroje z Obrázku 21. Ty jsou stejného charakteru jako nástroje pro švy. Na místo švů se zde jedná o drážky. Po detekci drážky programem lze pomocí nástroje W) start/konec umístit body na začátek a na konec drážky. Popřípadě bod na nejnižší pozici v drážce z hlediska z souřadnice zaručí nástroj X) minimum. Další nástroj Y) šířka a hloubka vyhodnotí rozměry drážky v souřadnicích x (šířka) a z (hloubka). Jednotkou jsou opět milimetry. Nástroj Z) oblast vyhodnotí celkovou plochu drážky a uvedené hodnoty zaznamenaná v milimetrech čtverečních. Nástroje Y) a Z) vyžadují nastavení omezující oblasti.

- **Nástroje pro hodnocení mezer**



Obrázek 22: Nástroje pro hodnocení mezer
a) start/konec; b) středový bod; c) vzdálenost x/z [24].

Na Obrázku 22 jsou představeny nástroje pro hodnocení mezer. Důležitým faktorem je rozdíl mezery od drážky. Drážka má své minimum neboli má dno a je celistvá. Mezera se vyznačuje prázdným prostorem mezi materiálem. Takto mezi těmito útvary rozlišuje i hodnotící software. Prvním nástrojem a) start/konec je možné umístit body na začátek a na konec mezery. Nástroj b) středový bod je schopný umístit bod do geometrického středu mezery. Umístění středového bodu může být vyhodnoceno z délky spojnice krajních bodů mezery. Pro případy nepravidelných okrajů mezery a nestálého profilu je možnost určení středového bodu ze souřadnice x celkové mezery a ze souřadnice z . Nástrojem c) vzdálenost x/z dojde ke změření rozměrů mezery. Prvním je délka mezery v ose x a druhým rozměrem je výškové přesazení v ose z . Tyto rozměry jsou opět uvedeny v milimetrech.

- **Nástroje pro hodnocení kruhu**

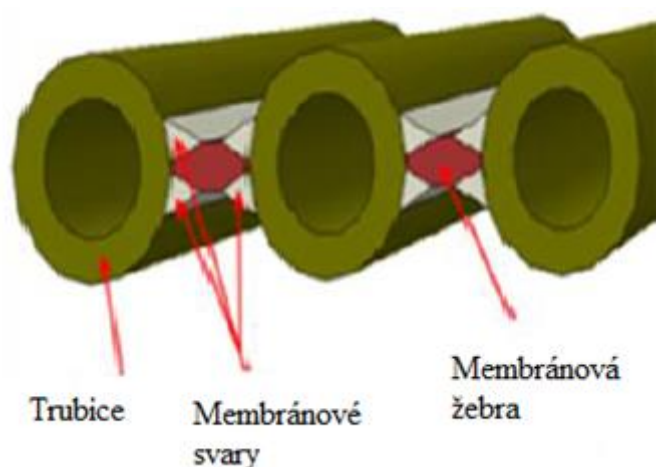


Obrázek 23: Nástroje pro hodnocení kruhu
d) středový bod; e) poloměr; f) kulový vrchlík [24].

Nástroje pro hodnocení zaoblených tvarů profilu jsou vyobrazeny na Obrázku 23. Nástrojem d) středový bod je možné určit střed zaoblení a umístit do něj bod. U tohoto nástroje je nutné omezit konkrétní oblast, kterou nástroj má za úkol vyhodnotit. Program totiž vyhodnocuje středový bod zaoblení ze všech dostupných bodů profilu. Omezením výběru bodů profilu na vybrané zaoblení je dosaženo požadovaného výsledku, a to středu zaoblení. Stejným způsobem funguje výpočet poloměru pomocí nástroje e) poloměr. Po nastavení vhodné omezující oblasti nástroj vypočte výsledný poloměr zaoblení uvedený v milimetrech. Nástroj f) kulový vrchlík dokáže umístit bod do kulového vrchlíku. Program zde vyhodnotí nejvyšší bod ze všech bodů profilu a umístí bod na zaoblený profil.

2 NAVAŘOVÁNÍ MEMBRÁNOVÝCH STĚN

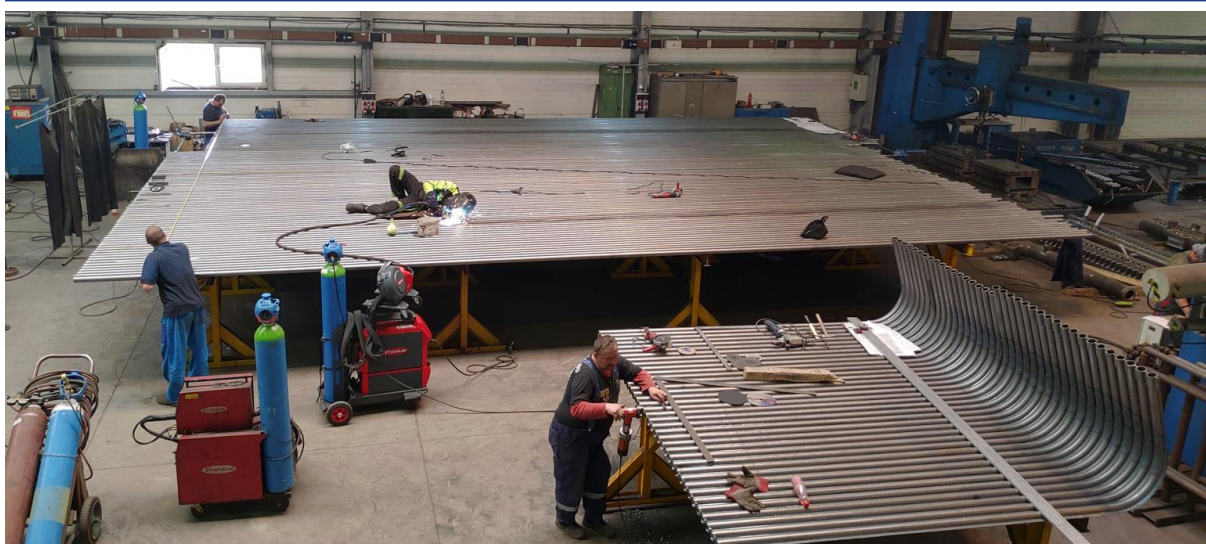
Produktem, který byl navařován, byla membránová stěna určená pro využití v energetice. Membránové stěny mohou být použity v energetickém kotli spalující fosilní paliva nebo ve spalovně komunálního odpadu. Teploty během procesu spalování dosahují běžně 700 °C. Při spalování odpadu se teploty pohybují v rozmezí 900–1 000 °C. Membránová stěna musí být navržena a vyrobena tak, aby odolala provozním teplotám i z dlouhodobějšího hlediska. Zdroj [25] se zaměřuje na výrobu membránových stěn s životností nejméně 30 let. Provozní teploty pro tento návrh byly stanoveny na 760 °C při působícím tlaku 35 MPa. Sledované parametry materiálu stěn jsou nepochybně žárupevnost a žáruvzdornost. Stěna je z geometrického hlediska tvořena dlouhými trubicemi (pro umožnění průtoku chladící kapaliny), které jsou spojené žebry. Trubice společně se spojovacími žebry jsou pevně spojeny v jeden celek za využití svařovacích technologií. Vyobrazeno na Obrázku 24. [25]



Obrázek 24: Jednotlivé části membránové stěny, podle [25].

Díky trubkovému systému je umožněno chlazení stěny kotle. Membránová stěna pak dokáže nahradit velké množství izolačního materiálu, z kterého by kotel musel být vybudován v případě nevyužití membránové stěny. Výhodou je tedy úspora hmotnosti samotného kotle. Zároveň membránová stěna slouží jako konstrukční podpora kotle. Příklad membránové stěny je na Obrázku 25. Trubice membránové stěny nebývají vždy přímé. Časté jsou ohyby stěny podle potřebné geometrie kotle. Celková membránová stěna kotle je pak na místě svařena z dílčích membránových stěn. [25]

Tato práce byla vypracována pro stěnu, která je bez ohybů a dalších tvarově složitých prvků. Jedná se o zkušební vzorek s omezenými rozměry určený pro aplikaci teorie do praxe. Pro prodloužení životnosti stěny bylo rozhodnuto o podstoupení procesu navařování. Cílem bylo nanést přídatný materiál na celou plochu stěny z vnitřní strany kotle. Došlo tak ke výraznému zvětšení tloušťky membránové stěny doprovázené zvýšenou hmotností zkušební vzorku. Za účelem zvýšení životnosti stěny byl využit žárupevný a žáruvzdorný přídatný materiál.



Obrázek 25: Membránová stěna do kotle.

2.1 Technologický postup při navařování

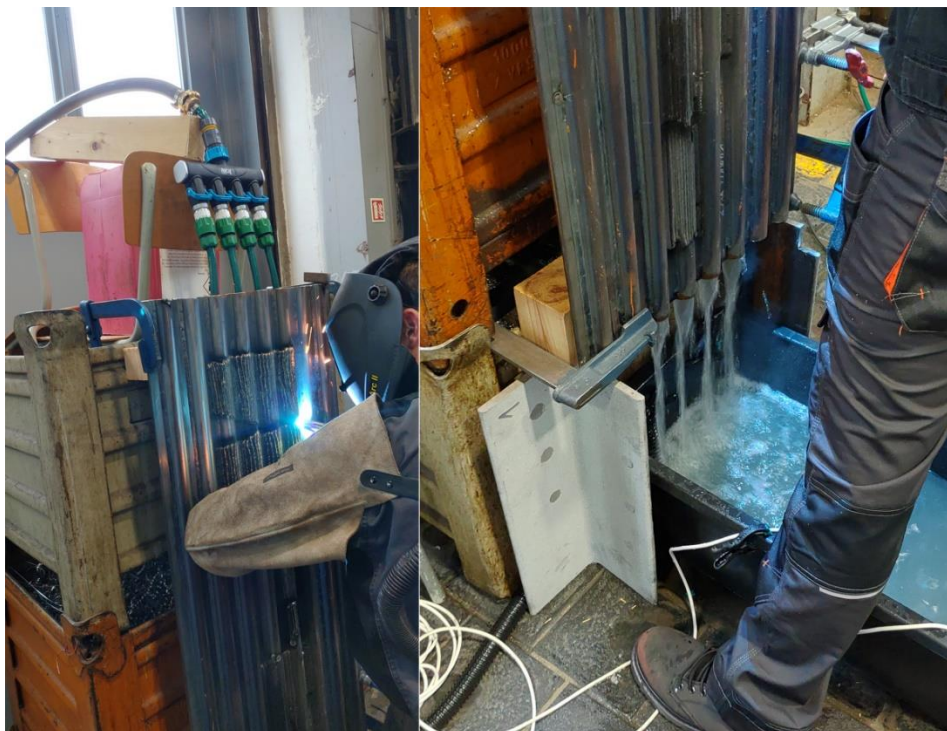
Při kladení návarových housenek na membránovou stěnu je nutné postupovat takovým způsobem, aby nedocházelo k nadměrným teplotním deformacím. Navařování na membránovou stěnu probíhá pouze z jedné strany, a to z budoucí vnitřní strany energetického kotle. Na vnější stranu stěny nemá smysl navařovat přídatný materiál, jelikož zde jsou daleko nižší teploty za provozu kotle než na vnitřní straně a také nedochází k degradaci povrchu vlivem spalování fosilního paliva. V případě spalování komunálního odpadu se jedná o zásadně agresivnější prostředí. Při nesprávné volbě postupu navařování hrozí fatální tepelná deformace a zkroucení celé membránové stěny. Chyby se mohou vyskytovat již v dodané membránové stěně, která je polotovarem pro navařovací proces. Celá membránová stěna je tvořena velkým množstvím trubíc a žebry spojené svarovými spoji. Proto je na místě kontrola polotovaru před začátkem navařování. [27]

Nejčastější chyby membránových stěn [27]:

- Velký rozdíl ve výšce mezi jednotlivými trubicemi
- Spojovací žebra nejsou ve stejné rovině
- Svařovací defekty jako pórovitost nebo studené spoje
- Vnitřní defekt v trubkách

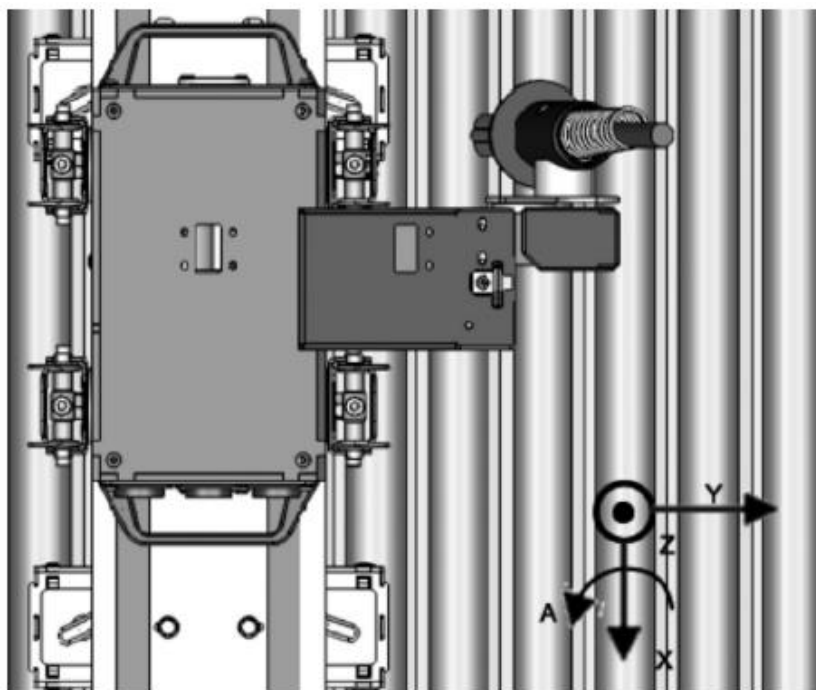
Výsledné navařené membránové stěny bývají běžně bez povrchové úpravy aplikovány přímo do provozu. Při montáži jednotlivých stěn dochází k jejich svařování vůči sobě. V místě svaru by předešlá povrchová úprava byla zbytečná. Přesto zvolení vhodné povrchové úpravy má příznivý dopad na celou plochu stěny. Zabraňuje předčasnému zanášení nečistot na membránovou stěnu kotle. Nečistoty mají za následek špatné vedení tepla, které je zásadní pro správnou funkci energetického kotle. [28]

Membránová stěna umožňuje průtok kapaliny během funkce energetického kotle. Možného průtoku kapaliny se využívá i během výroby stěny při navařování. Na membránovou stěnu je napojený systém vodního chlazení, díky kterému je výrazně snížena tepelná deformace stěny při navařování. Na Obrázku 26 je ukázka vodního chlazení během zkušebního navařování. Teplota vody se udržuje pod 30 °C. [27, 28]



Obrázek 26: Vodní chlazení během zkušebního procesu.

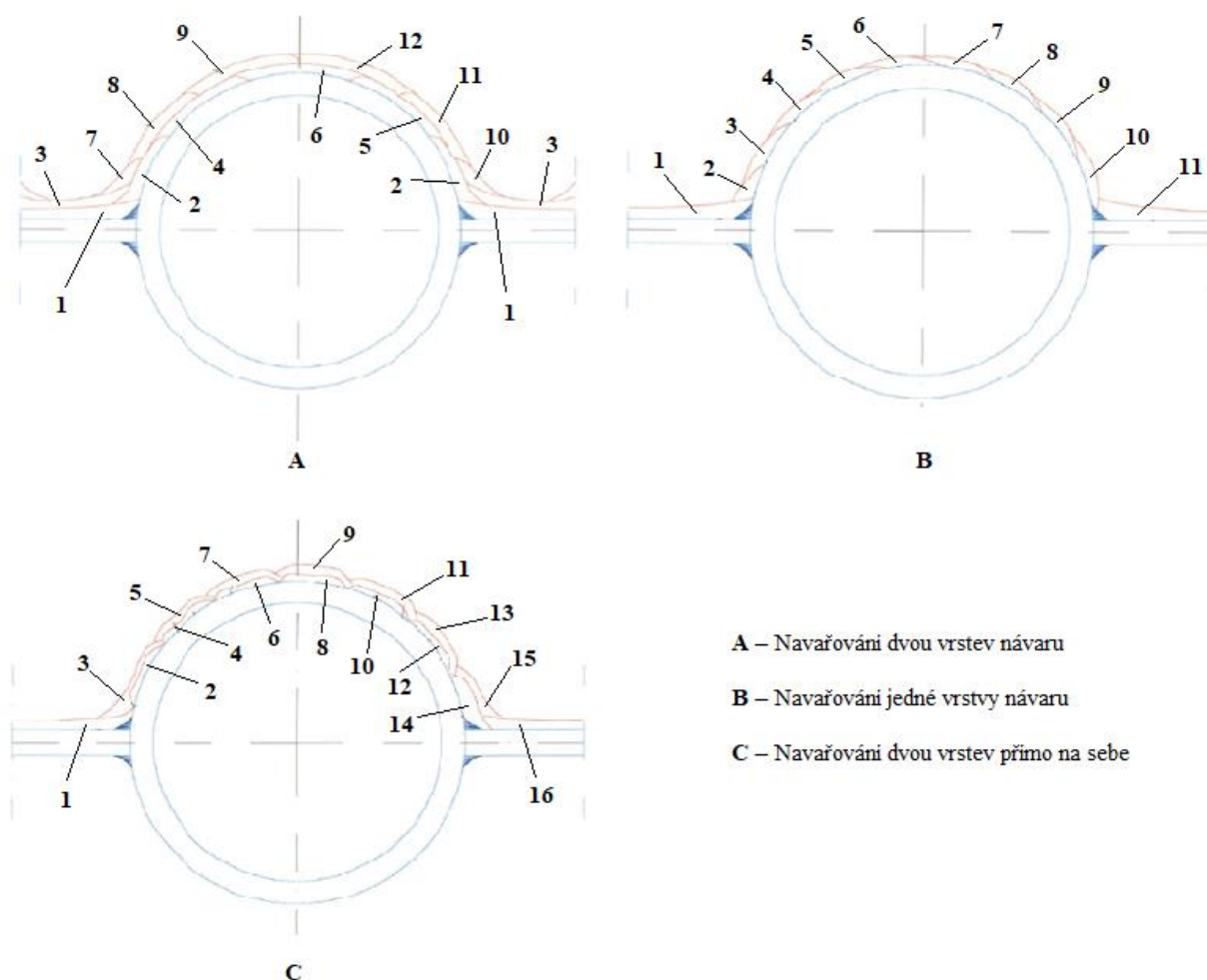
Svařovací hlavice je umístěná na pendlovacím stole, který umožňuje pohyb o čtyřech stupních volnosti. Pendlovací stůl vybavený svařovací hlavicí je znázorněn na Obrázku 27. Pohyb pendlovacího stolu při svařování pak koná hlavní pohyb v ose X a v případě pendlovacího způsobu svařování zároveň pohyb v ose Y a natočení A . Zařízení musí být schopné vykonávat oscilační pohyb svařovací hlavice o velké hodnotě amplitudy. [28]



Obrázek 27: Stupně volnosti pendlovacího stolu [28].

2.1.1 Způsoby kladení návarových housenek

Pro vytvoření návaru lze postupovat jedním z níže uvedených způsobů. Svarové housenky lze pokládat v jedné nebo ve více vrstvách. S přibývajícím počtem svarových housenek roste časová náročnost procesu. Při navařování pouze jednou vrstvou návarových housenek vznikne návarový povrch s nestálou tloušťkou. Při kladení návarových housenek střídavým způsobem, na místo hned vedle sebe, se minimalizuje tepelná deformace celé membránové stěny a předchází se tak její zkroucení. [27]



Obrázek 28: Schematické znázornění návarových housenek; podle [27].

A – Navaření dvou vrstev návaru

První vrstva je navařena o tloušťce 0,9 mm. Přítomnost železa je v průměru 12 %. Membránová stěna je v tomto případě pod nízkým tepelným namáháním. Při pokládání druhé vrstvy je přítomnost železa pod 5 %. Technologický postup kladení návarových housenek je na Obrázku 28 A. Návarové housenky se zde skládají střídavě podle číslování. Je to z důvodu tepelného ovlivnění membránové stěny, které je takto minimalizováno. Předchází se tak nadměrným tepelným deformacím. Tímto způsobem vznikne hladký povrch návaru o dané tloušťce návaru. [27]

B – Navaření jedné vrstvy návaru

Při takovémto způsobu svařování je nutné jednotlivé vrstvy vůči sobě překrýt. Míra překrytí by měla být 50 %. Tloušťka navařené vrstvy není konstantní. Dosáhnutí nízkého obsahu železa v povrchové vrstvě je zde problémové. Jednoduchá strategie kladení housenek je na Obrázku 28 B. [27]

C – Navaření dvou vrstev přímo na sebe

Navařování zajišťují dva hořáky ve vertikální pozici umístěné asi 100 mm od sebe. Svařování obou vrstev probíhá v jednom kroku. Během procesu nelze kontrolovat stav první navařené vrstvy, jelikož je ihned zakryta druhou navařenou vrstvou. Pořadí pokládaných návarových housenek je zobrazeno na Obrázku 28 C. Tloušťka takto zhotoveného návaru je proměnlivá s různorodým obsahem železa. Během procesu dochází k nadměrnému tepelnému zatěžování, které může způsobit nebezpečné tepelné deformace vedoucí až k fatálnímu ohybu membránové stěny. [27]

Svařování s překrytím

Při navařování vznikají jednotlivé návarové housenky, které postupně utváří výsledný povrch součásti. Je výhodnější nanést více svarových housenek překrývajících se navzájem pro konstantnější tloušťku návaru. Výsledkem je totiž ochranná vrstva materiálu a její výrazné kolísání tloušťky by vedlo k nepravidelnému vedení tepla a k nižší životnosti stěny v místě s nižší tloušťkou návaru. Proto jsou návarové housenky kladeny s překrytím. Svařování s překrytím je samostatná kategorie. Nejlépe se však uskutečňuje způsobem A – *Navaření dvou vrstev na sebe*. [27, 28]

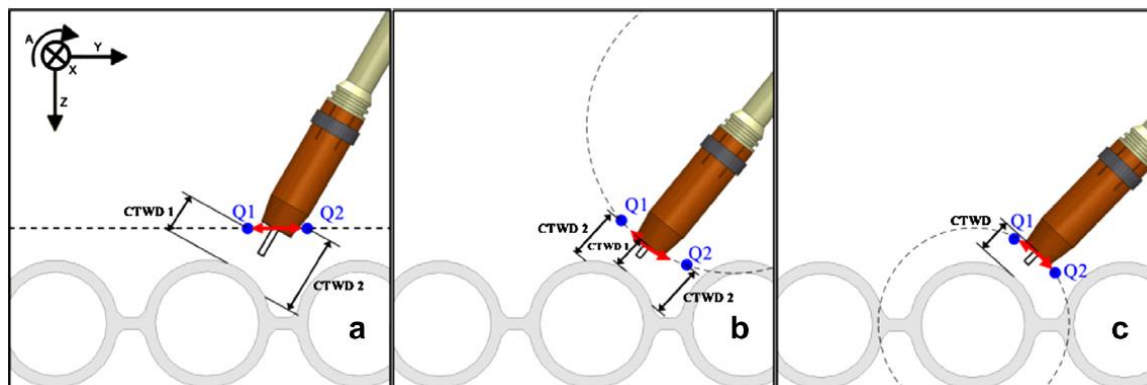
Požadavky na optimální navařování s překrytím [27]:

- Kontrola kvality polotovaru (membránové stěny)
- Čištění povrchu (2x otryskání)
- Povrchová úprava do hloubky 35 μm pro konstantní obsah železa v materiálu
- Chlazení proudem vody o teplotě pod 30 °C během navařování (Obrázek 26)
- Správné svařovací parametry, malá teplotně ovlivněná oblast
- Správný ochranný plyn, doporučuje se Cronigon Ni 10
- Využívání dvouvrstvé technologie – jedna vrstva návaru bílou barvou, druhá černou

2.1.2 Navařování pendlovacím způsobem

Jelikož je pohyb hořáku vůči membránové stěně vázán na pohyb pendlovacího stolu, je možno využít pohyby hořáku vyobrazené na Obrázku 29. Jedná se o navařování pendlovacím způsobem. Hořák tedy kmitá mezi dvěma krajními polohami při translaci v ose X podle Obrázku 28. V případě **a**) na Obrázku 29 se hořák pohybuje translačně mezi krajními polohami Q1 a Q2. V tomto případě vzniká velký rozdíl ve vzdálenosti hořáku oproti místu navařování. Nejbližší bude v bodě Q1 o vzdálenosti CTWD1 a nejvzdálenější v bodě Q2 o vzdálenost CTWD2. Druhou možností **b**) je rotace. Při využití této metody vznikne nejkratší vzdálenost

CTWD1 uprostřed mezi dvěmi maximálními vzdálenostmi CTWD2. Zde již není takový rozdíl vzdáleností jako v případě a). Jedná se tedy o příznivější pohyb hořáku z hlediska svařovacího procesu. Při velké změně vzdálenosti CTWD během svařovacího procesu vznikají problémy s konzistencí návaru a návarová housenka může mít nespojitou geometrii. Doprovodným jevem je i zvýšený rozstřík. Těmto průvodním jevům předchází způsob c). Zde je vzdálenost CTWD po celou dobu konstantní. Hořák koná rotační pohyb se středem totožným středem trubice membránové stěny. Pro pendlovací stůl to však znamená pohyb složený z rotace A a translace v osách Z i Y. Během procesu se pak stůl pohybuje i v ose X. V tomto způsobu jsou tedy využity všechny stupně volnosti pendlovacího stolu a využit maximální potenciál zařízení pro dosažení maximálních výsledků. [28]

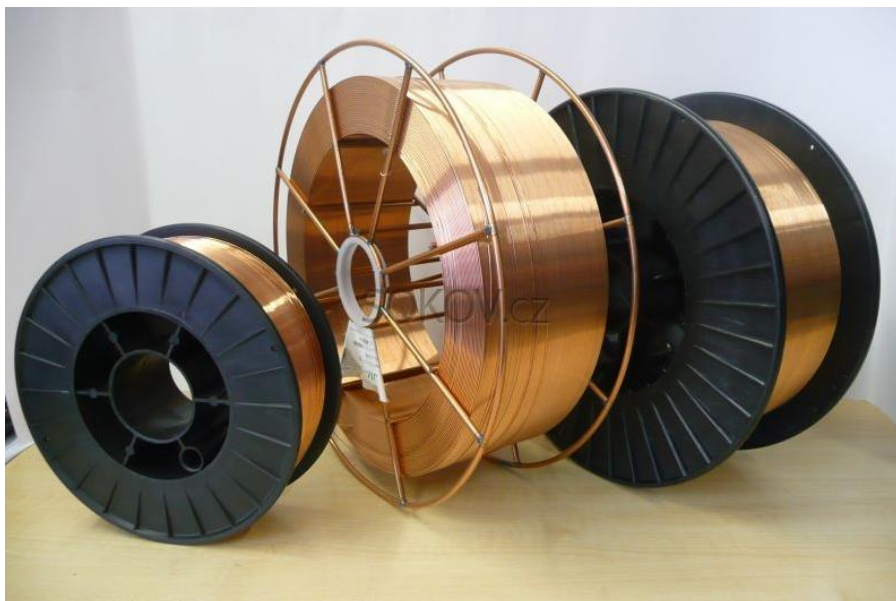


Obrázek 29: Poloha hořáku vůči membránové stěně [28].

Navařování na membránovou stěnu může probíhat konvenčními způsoby, které jsou zmíněné výše. Dále jsou k dispozici postupy, které vedou ke snížení možné koroze a eroze výsledného návaru. Výsledkem je membránová stěna s delší životností návarové vrstvy. Toho je možné dosáhnout technologií navařování pomocí vlnových pulzů. Technologie výroby spočívá ve svařování horkým drátem v plynovém wolframovém oblouku. Kombinace technologie vlnových pulzů s automatickým TIG navařováním vede ke snížení zředění základního s přídavným materiálem. Pochopitelně je tato metoda navařování na membránové stěny náročná jak z hlediska svařovacího procesu, tak z hlediska finančních možností. Navařování pomocí vlnových pulzů je technologie přímo vhodná pro navařování membránových stěn a je podobně produktivní jako navařování metodou CMT. Metoda CMT je vzhledem k zařízení potřebnému na navařování pomocí vlnových pulzů levnější variantou. Zároveň se vyznačuje stejně jako metody MIG/MAG celkovou jednoduchostí procesu. [13, 14, 29]

2.2 Přídavný materiál

Přídavný materiál pro metodu CMT je totožný jako pro MIG/MAG svařování. Přídavný materiál je ve formě drátu (výjimečně plněné trubičky), který je navinutý na cívce. Z cívky je drát odvíjen a podávacím zařízením přiveden do svařovací hubice. Svařovací drát je dodáván v běžných průměrech od 0,6 mm do 1,6 mm. V praxi nepoužívanější jsou průměry blízké 1 mm. Přídavný materiál je běžně z nelegované konstrukční oceli, která se chemickým složením co nejvíce blíží základnímu materiálu. V případě potřeby jsou využity oceli legované či superslitiny. Samotný drát může být dodáván v základní (lesklé) podobě nebo s povrchovou úpravou. Rozšířené jsou poměděné svařovací dráty odolné vůči korozi (Obrázek 30).



Obrázek 30: Poměděný svařovací drát navinutý na cívce [30].

2.2.1 Ocel AISI 309

Oceli AISI 309 jsou austenitické tepelně odolné nerezové oceli. Mezi hlavní legury patří Chrom a nikl. Jsou vhodné pro vysokoteplotní aplikace. Z tohoto důvodu se využívají jako přídavný materiál k navařování na stěnu kotle. Oceli odolávají oxidaci na vzduchu až do teplot 1 000 °C. Při využití ve více agresivním prostředí se teplota sníží až na 800 °C. Ocel je dobře svařitelná, ale při průvaru nad 3 mm je zde riziko vzniku mezikrystalické koroze. [31]

Tabulka 2: Chemické složení Oceli AISI 309 [31].

Ocel AISI 309	C	Cr	Ni	P	S	Si	Mn	Fe
Chem. Složení [%]	0,20	22–24	12–15	0,045	0,03	0,75	2,0	58–63

Mechanické vlastnosti:
(21 °C)

mez pevnosti	R _m	= 620 MPa
smluvní mez kluzu	R _{p 0,2}	= 310 MPa
tažnost	A	= 50 %

Mechanické vlastnosti:
(649 °C)

mez pevnosti	R _m	= 359 MPa
smluvní mez kluzu	R _{p 0,2}	= 152 MPa
tažnost	A	= 26 %

Mechanické vlastnosti:
(871 °C)

mez pevnosti	R _m	= 124 MPa
tažnost	A	= 32 %

2.2.2 Inconel

Materiál pod obchodním označením Inconel je označován jako superslitina. Jedná se o slitinu prvků niklu a chromu (Ni-Cr), které jsou v materiálu dominantní. Vlastností Inconelu je vysoká úroveň žárupevnosti a žáruvzdornosti. Vytvrzení je zde intermediální fází typu $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Za přítomnosti karbidických a karbonitridických fází je dosaženo vysokých hodnot pevnosti při vyšších teplotách. [32]

Z metalurgického hlediska je výrobním procesem dosaženo jemnozrnné monokrystalické struktury. Výroba spočívá v tavení ve vakuu, elektrostruskovém přetavování, tavením plazmou, elektronovým paprskem nebo laserem. Superslitiny jsou dále tvářeny a upravovány práškovou metalurgií jako je spékání nebo slinování. [32]

Inconel 625

Materiál Inconel 625, s chemickým složením uvedeným v Tabulce 3 je austenitická slitina prvků Ni, Cr, Mo a Nb. Superslitina je žárupevná do teploty 815 °C. Maximální přípustná pracovní teplota na vzduchu je 1 150 °C. Mezi další vlastnosti patří odolnost vůči nauhličujícím plynům, oxidaci, sulfidaci, karbonitridaci a alkalické korozi. Materiál je zaručeně svařitelný. [32]

Tabulka 3: Chemické složení superslitiny Inconel 625 [32].

INCONEL 625	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
Chem. složení [%]	61,0	21,5	9,5	3,6	2,5

Mechanické vlastnosti: (20 °C)	mez pevnosti	R _m	= 1210 MPa
	smluvní mez kluzu	R _{p 0,2}	= 760 MPa
	tažnost	A	= 50 %

Mechanické vlastnosti: (760 °C)	mez pevnosti	R _m	= 538 MPa
	smluvní mez kluzu	R _{p 0,2}	= 403 MPa
	tažnost	A	= 91 %

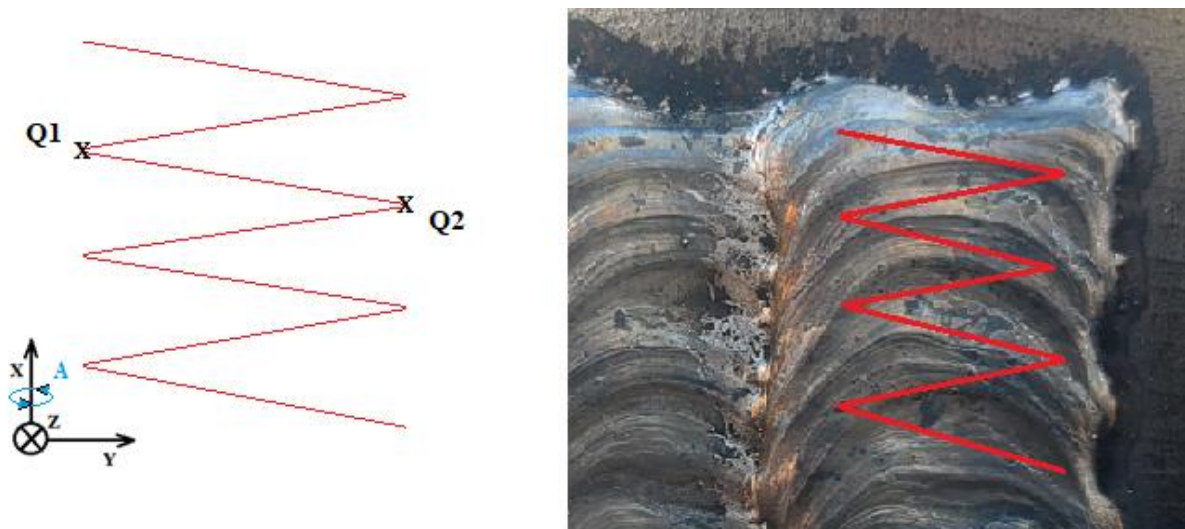
3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO KOREKCI DRÁHY SVAŘOVACÍ HLAVICE PŘI TECHNOLOGII NAVAŘOVÁNÍ

Proces navařování bylo nutné vybavit vhodným naváděním pro korekci dráhy svařovací hlavice. Je to z důvodu navařování na tvarovou plochu. Díky naskenování povrchu lze vyhodnotit určité body dané geometrií membránové stěny. Další možností je vyhledání předchozí svarové housenky, na které by byl určen konkrétní bod v naskenovaném profilu. Podle souboru bodů je následně prováděna korekce dráhy hlavice. Bez přítomného navádění by nebyl možný čistě strojní proces, který je připraven zvládnout nepřetržitý provoz. Při porovnání s ručním navařováním je to strojní značně přesnější, produktivnější a vyrobené produkty jsou téměř totožné.

Pro vzorek membránové stěny byla navržena konstrukce zajišťující pohyb vlastního skeneru za účelem nasnímání povrchu součásti. Tato konstrukce je určena pouze pro zkušební vzorek. Tím je zajištěné testovací navařování a možnost následné zhotovení podobného konstrukčního návrhu ve větším měřítku. Vlastní konstrukce je naprosto nezávislá na svařovací hlavici. Ta je umístěna na další přídatné konstrukci a její pohyb není s pohybem skeneru svázán.

3.1 Popis výrobního procesu

Proces navařování mohl být uskutečněn dvěma způsoby co se pohybu svařovací hlavice týče. Nejdříve bylo zkoušeno pro svoji jednoduchost a minimální vnesené teplo translační vedení svařovací hlavice. Zde se projeví problémy s nepravidelností návarových housenek. Také nebylo možné jednotlivé housenky na sebe plnohodnotně navázat a vznikala neúplná vrstva navařeného materiálu. Pro tyto důvody bylo od tohoto způsobu upuštěno a byl využit pendlovací (oscilační) pohyb svařovací hlavice. Tomuto pohybu je věnována kapitola 2.1.2 *Navařování pendlovacím způsobem* a je vyobrazen na Obrázku 31. Návarová housenka vzniká v ose X stejně jako u prvního způsobu. Zde však přibude pohyb v ose Y mezi body $Q1$ a $Q2$. Jelikož je navařováno na válcovou plochu je zde přítomná i rotace A . U tohoto způsobu vedení docházelo k lepšímu překladu jednotlivých housenek a vznikala tak souvislejší vrstva navařeného materiálu.



Obrázek 31: Pendlovací (oscilační) pohyb svařovací hlavice.

Návarový materiál byl kladen ve dvou vrstvách podle Obrázku 28 A v kapitole 2.1.1 *Způsoby kladení návarových housenek* z důvodu požadavku od zákazníka na obsah Fe v povrchové vrstvě pod 5 %. Tato metoda kladení návarových housenek požadavek splňuje a zároveň přináší další výhody. První je nejmenší tepelné ovlivnění membránové stěny v porovnání s dalšími dvěma možnostmi popsane v kapitole 2.1.1. Tloušťka navařeného materiálu kolísá nejméně, přičemž konstantní tloušťky dosáhnout nejde bez použití obráběcích operací pro dokončení povrchu. Housenky jsou zde kladeny s překrytím což vede ke zvýšení kvality návaru. Překrývající navařené housenky předešlé položené housenky vyžijají. U tohoto způsobu kladení je předpokládána dlouhá životnost. Nevýhodou je nejdelší časová náročnost z důvodu vysokého počtu housenek a také ze střídavého kladení vyobrazené na Obrázku 28 A.

Výsledné výrobní zařízení bude připraveno na navařování různých typů membránových stěn. Běžně se tyto stěny vyrábí s vnějším průměrem trubek od nejmenších 38 mm až po největší s průměrem 72 mm. Jelikož základní geometrie stěny má stejný charakter, bude výrobní proces schopný zpracovat všechny vyráběné rozměry. Výsledné výrobní zařízení bude muset být na rozdíl od toho zkušební mnohem rozměrnější. Konstrukce pro laserový skener bude muset odpovídat výrazně delším rozměrům a tím pádem bude muset být odpovídajícím způsobem zpevněna. Při návrhu zkušební konstrukce pro funkci laseru bylo bráno v úvahu jeho jednoúčelové použití na odladění procesu a zhotovení patřičných zkušebních procesů. Z těchto důvodů bylo za potřeby navrhnout funkční konstrukční návrh, který je finančně nenáročný. Oproti tomu pendlovací stůl pro svařovací hlavici bude využit stejný, popřípadě podobný z testovacího zařízení.

3.2 Výběr naváděcího systému, svařovacího zařízení a příslušenství

Následující komponenty a materiály byly využity při zkušebním procesu. Výrobní proces by pak měl zahrnovat totožné prvky. Lišit by se měli jen nastavení a uspořádání jednotlivých komponent v rámci odladění výrobního procesu.

- **Naváděcí systém**

Naváděcí systém v podobě optického laserového skeneru pro korekci dráhy svařovací hlavice byl vybrán scanCONTROL LLT 2510-100 connect od firmy Micro-epsilon. Číselné označení patří výkonnostní řadě smart schopné snímat povrch vzdálený od skeneru až 290 mm. Výškový rozsah měřící vzdálenosti činí 100 mm. Laserový snímač tedy musí být umístěn nejméně 190 mm od snímaného povrchu. Podrobnější informace k měřicímu prostoru zařízení jsou uvedeny v Tabulce 1. Tomuto snímacímu zařízení je věnována převážná část kapitoly 1.3.3 *Laserové navádění*, kde se nachází i ilustrační obrázek zařízení na Obrázku 13. Jedná se o laserový naváděcí systém využívající 2D optickou tringulaci. Tento konkrétní typ pracuje samostatně bez připojení k dalšímu řídicímu systému (třeba PC).

Zařízení bude v nepřetržitém provozu vystaveno prašnosti. Proto je nutné ochranné kryty udržovat v čistotě pro správnou funkci laserového skeneru. K čištění je vhodný stlačený vzduch nebo navlhčený hadřík v alkoholu, který nebude zanechávat vlákna. Nedoporučuje se čistit běžnými prostředky na sklo. Pořízený naváděcí systém bude kromě zkušebního zařízení použit i v plánovaném výrobním zařízení. Jedná se o výrazně nejnákladnější prvek celé zkušební konstrukce. Z tohoto důvodu je pořízení laserového snímače bráno jako investice do následného výrobního procesu a výběr snímače tomu byl uzpůsoben.

• Svařovací zařízení

Při výběru svařovacího zařízení bylo uvažováno o svařovacím invertoru podporující svařovací metodu MIG/MAG a zařízením pro svařování metodou CMT. Předpoklad potvrzený experimentem určil vhodnější využití navařování metodou CMT. Rozhodující parametr byl obsah železa v povrchové vrstvě návaru, přičemž nižší obsah železa značí vyšší odolnosti proti korozi. V této kategorii bylo naměřeno nižšího obsahu u metody CMT. Dalšími důvody k výběru zařízení pro CMT byly vlastnosti jako je výrazně nižší rozstřík, menší tepelné zatížení membránové stěny, díky čemuž nehrozí zásadní deformace celé stěny. Dále nízkou mírou zředění mezi základním a přídavným materiálem. Tato vlastnost způsobuje vyšší korozní odolnosti.

Svařovací zařízení bylo vybráno TPS 400i od firmy Fronius. Jedná se o zařízení zajišťující svařovací metodu CMT. Označení TPS je pro modulární platformu, která se vyznačuje vysokou mírou inteligence zařízení spojenou s rozsáhlými komunikačními funkcemi mezi zařízením a obsluhou. [33]

Tabulka 4: Údaje o svařovacím zařízení Fronius TPS 400i [33]

PARAMETRY ZAŘÍZENÍ	
Délka	706 mm
Šířka	300 mm
Výška	510 mm
Hmotnost	36,45 kg
SVAŘOVACÍ PARAMETRY	
Svařovací proud maximální	400 A
Svařovací proud minimální	3 A
Svařovací proud / dovolené zatížení [10 min/40 °C]	400 A / 40 %
Svařovací proud / dovolené zatížení [10 min/40 °C]	360 A / 60 %
Svařovací proud / dovolené zatížení [10 min/40 °C]	320 A / 100 %
Napětí naprázdno	73 V
Síťové napětí	3 × 400 V
Maximální pracovní napětí	34,0 V
Minimální pracovní napětí	14,2 V
Síťová frekvence	50–60 Hz
Síťové jištění	35 A
Krytí	IP23

Svařovací zařízení bylo během zkušebního navařování umístěné společně s tlakovou láhví obsahující ochrannou atmosféru vedle pendlovacího stolu a zařízení pro korekci dráhy na pojízdném vozíku. Podle Tabulky 4 je hmotnost zařízení 36,45 Kg. Společně s tlakovou láhví by byla jakákoli manipulace obtížná, proto obě komponenty byly umístěny právě na pojízdný vozík. Svařovací hlavice pak byla napojena na pendlovací stůl zajišťující pohyb při navařování.

• Přídavný materiál

Při výběru přídavného materiálu bylo upuštěno od běžných materiálů v podobě konstrukčních ocelí. Z celosvětových výrobních postupů od dodavatelů navařených membránových stěn jsou nejčastěji doporučeny dva materiály pro aplikaci na membránovou stěnu kotle. Prvním je korozivzdorná ocel AISI 309 odolná vůči oxidaci i za zvýšených teplot. Druhým je superslitina niklu a chromu pod obchodní názvem Inconel 625. I tento materiál je určený pro vysokoteplotní zatížení. Je žárupevný do teploty 815 °C a i za těchto zvýšených teplot si zachovává dobré mechanické vlastnosti. Materiál Inconel 625 také lépe odolává agresivním prostředím než ocel AISI 309.

Jako přídavný materiál pro navařovací proces byl vybrán Inconel 625. Chemické složení je uvedeno v Tabulce 2 pod kapitolou 2.2.2 *Inconel*. Za využití černého uhlí jako paliva v energetickém kotli je dosahováno vysokých teplot při spalování a to až 1200 °C. Z tohoto důvodu je nutné intenzivně ochlazovat, jelikož materiál Inconel je žárupevný pouze do teplot 815 °C. Ve zkušebním navařovacím procesu byl použit přídavný materiál ve formě drátu o průměru 1,2 mm.

• Ochranná atmosféra

Pro ochrannou atmosféru při svařování byla vybrána směs plynů od firmy Linde s obchodním značením Cronigon Ni10. Objemové složení jednotlivých prvků ve směsi plynu udává Tabulka 5. Směs plynu zastupuje funkci aktivního plynu. Ochranná atmosféra se aktivně podílí na výsledném chemickém složení svarového kovu. Směs plynů je dodávána v tlakových lahvích šedé barvy se světle zelenou koncovou částí.

Tabulka 5: Složení ochranného plynu Cronigon Ni10.

Obchodní označení	ČSN EN ISO 14175	Oxid uhličitý [obj. %]	Helium [obj. %]	Vodík [obj. %]	Argon [obj. %]
CRONIGON Ni10	Z-ArHeHC-30/2/0,05	0,055	30	2	67,945

3.3 Zařízení pro korekci dráhy

Během testovacího navařování byly posuzovány konkrétní svařovací parametry. Tomuto tématu se věnuje samostatná práce (zdroj [14]). Dále bylo nutné otestovat vlastní funkci laserového skeneru, při kladení návarových housenek na membránové stěně. Díky nasnímaní povrchu laserem a následnému zpracování dat je možné vytvořit trajektorii svařovací hlavičky. Vybraný skener určí v každém nasnímaném profilu konkrétní bod podle předem nastaveného programu. Díky spojnici těchto bodů vzniká dráha, která koriguje trajektorii svařovací hlavičky. Je ovšem nutné funkci programu ověřit v praxi během zkušebního navařovacího procesu. Pro testovací navařování bylo tedy nutné kromě pendlovacího stolu zrealizovat konstrukční návrh umožňující pohyb laseru nad vzorkem membránové směny.

3.3.1 Návrh komponent konstrukce

Zkušební konstrukce pro laserové zařízení je jednoúčelová. Důraz zde byl kladen na nízké pořizovací náklady jednotlivých komponent a celkovou jednoduchost konstrukce. Ta by měla být snadno rozebíratelná a přenosná. Konstrukce zajišťuje pohyb pouze laserového zařízení o nízké hmotnosti. Nároky na výkony motorů a na prvky zajišťující přenos síly jsou tedy taktéž nízké. Největší investicí v sestavě byl jednoznačně laserový skener. Jeho pořizovací cena je řádově odlišná od zbytku kupovaných komponent. Kromě testovací konstrukce bude skener použit i ve výrobním procesu. Samotný skener tedy jednoúčelový není a předpokládá se návratnost investice díky výrobnímu provozu.

Při návrhu jednotlivých komponent byly vytvořeny 3D modely v modelovacím programu Autodesk Inventor Profesional. Z těchto jednotlivých komponent byla složena výsledná sestava testovací konstrukce. Ta se skládá hlavně z kupovaných komponent s minimální výrobní náročností. Veškeré díly konstrukce vyžadující výrobní úkony byly zhotoveny obráběcím procesem na frézce FV 25 CNC A (Obrázek 32). Jednalo se o díly, které slouží jako spojky, držáky, či mezikusy v sestavě. Polotovarem byly L profily nebo nařezané desky z pásovin. Následně do těchto polotovarů byly vyvrtány požadované otvory. Jelikož tyto díly slouží jako mezikusy, které spojují další komponenty, tak veškeré tyto díly měly otvory na šrouby. Na závěr byly obrobeny válcovou frézou na výsledný rozměr.

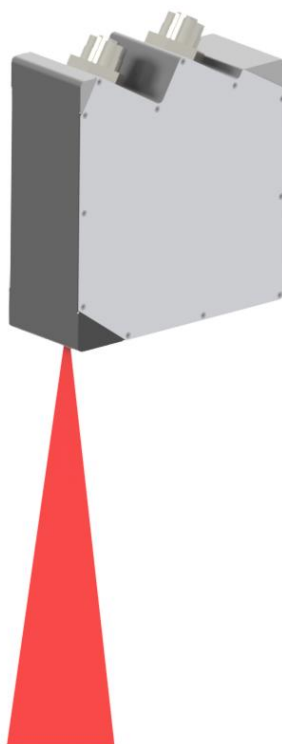


Obrázek 32: Frézka FV 25 CNC A.

Vytvořené modely komponent jsou v několika případech zjednodušeny oproti reálnému konstrukčnímu řešení. 3D modely neobsahují detaily, které nejsou důležité pro ověření funkce laserového skeneru nebo ověření smontovatelnosti celkové sestavy. Jelikož 3D model slouží výhradně k vizualizaci a jako pomůcka při návrhu, byly jednotlivé komponenty od sebe barevně odlišeny nezávisle na jejich skutečném barevném odstínu. Následují vybrané komponenty, které mají výraznější podíl na celkové sestavě.

- **ScanCONTROL LLT2510-100**

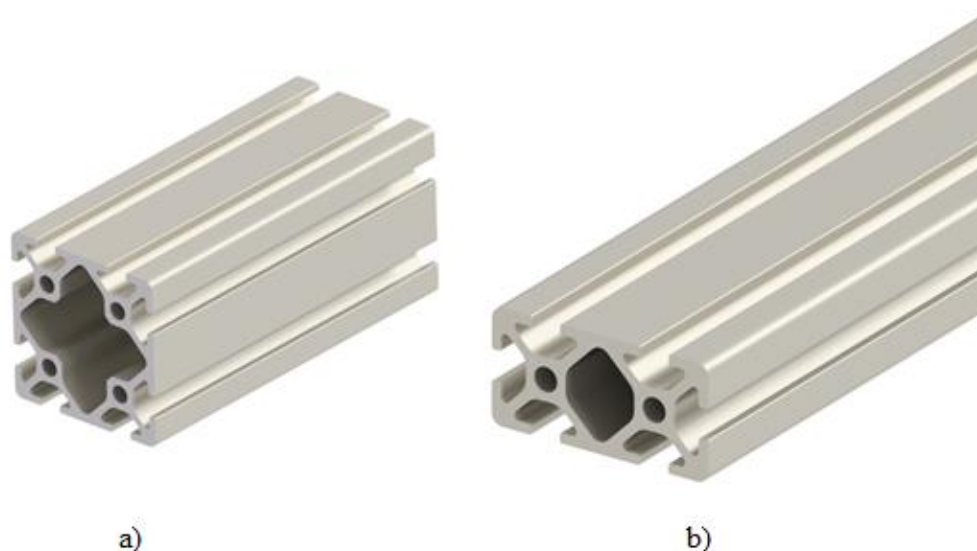
Model skeneru (na Obrázku 33) byl vymodelován včetně laserového paprsku z důvodu názornější vizualizace v sestavě konečného konstrukčního řešení. Podle dosahu měřicího paprsku byla navržena výška konstrukce pro snímání rozměrově odlišných membránových stěn. Laserový paprsek je vymodelován pro rozšířený měřicí rozsah, a to až do vzdálenosti 390 mm. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 1. V ose X je rozšířený měřicí rozsah interpretován maximální hodnotou délky měřicího paprsku 143,5 mm. Rozšíření měřicího rozsahu je také aplikováno pro možné bližší snímání povrchu myšleno ve vzdálenosti od laserového skeneru. Konkrétně v ose Z lze začít snímat povrch ze vzdálenosti 125 mm místo standardních 190 mm. Pro osu X to odpovídá hodnotě 58,5 mm v rozšířeném rozsahu místo hodnoty 83,1 mm ve standardním měřicím rozsahu.



Obrázek 33: ScanCONTROL LLT2510-100 včetně měřicího paprsku.

- **Profilový systém**

Při návrhu konstrukce byly použity vysokopevnostní hliníkové profily MayTec jako základní prvek ke spojení jednotlivých komponent. Zároveň zajišťují dostatečnou tuhost soustavy. Jedná se tedy o kupovanou komponentu, která ovšem vyžaduje výrobní úkony. Konkrétně to znamená vyvrtání několika děr pro šrouby a spojovací prvky. Také zkrácení na požadovanou délku. Použité profily zobrazuje Obrázek 34. Využité rozměry profilu byly 40×40 mm na Obrázku 34 a) a profil 40×20 mm na Obrázku 34 b). Profily MayTec se vyznačují velkým množstvím způsobů montáže jak vůči sobě, tak montáží dalších prvků. Drážky v podélném směru profilu umožňují umístění matic či spojek. Montáž je nenáročná a rychlá.



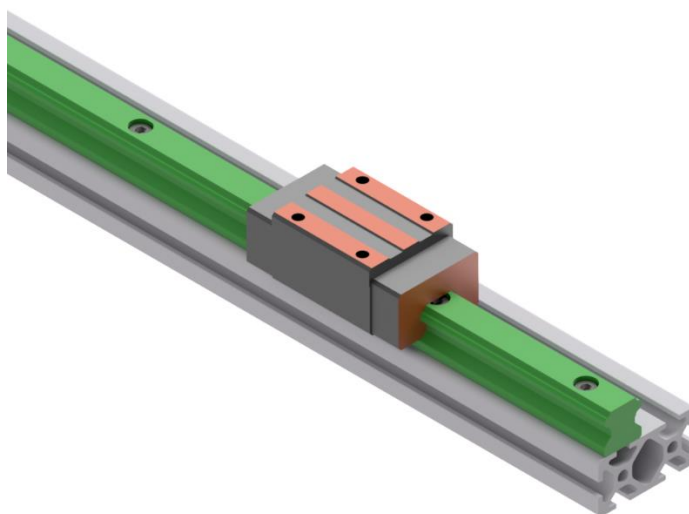
Obrázek 34: Profilový systém a) profil 40 × 40 mm; b) profil 40 × 20 mm.

- **Servo motor HG-KN23J-S100**

Pohon pro pohyblivé osy konstrukce byl vybrán servo motor Mitsubishi HG-KN23J-S100. V řešení návrhu byly použity dva tyto motory, které byly samostatně použity pro každou osu. Jediný motor disponuje výkonem 200 W a je schopný vyvinout jmenovité otáčky o hodnotě 3000 min^{-1} . Jmenovitý točivý moment činí $0,64 \text{ N}\cdot\text{m}$. Hmotnost motoru je pak $0,98 \text{ kg}$.

- **Pojezdový vozík HGH 15 CA**

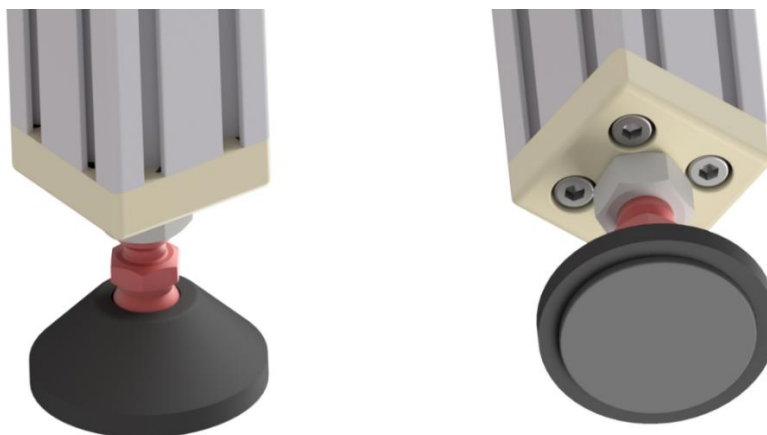
Pro lineární pohyb os konstrukce byl vybrán pojezdový vozík se čtyřřadým kuličkovým lineárním vedením. Tento vozík je v konstrukci využit na obě pohyblivé osy. V případě lineárního vedení byla navržená délka u pohyblivé osy 815 mm. U statické osy délka vedení dosahuje hodnoty 1 300 mm. Výběr pojezdového vozíku byl uzpůsoben minimálnímu zatížení, a proto byl vybrán nejmenší konvenční vozík s kuličkovým vedením z důvodu nejnižších pořizovacích nákladů. Vozík včetně lineárního vedení a montáže k hliníkovému profilu je na Obrázku 35.



Obrázek 35: Pojezdový vozík HGH 15 CA

- **Výškově nastavitelné patky**

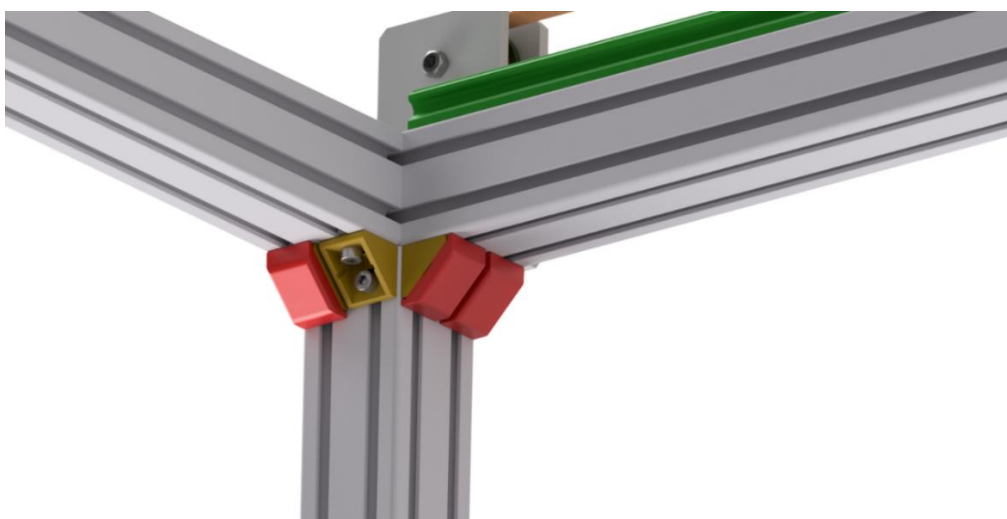
V rámci testů bylo potřeba konstrukci vícekrát přenést a napolohovat. První testy byly prováděny mimo dílnu v místě montáže. V dílně při testovacím navařování byla příležitostně konstrukce přesunována. Z tohoto důvodu bylo užitečné vybavit konstrukci výškově nastavitelnými patkami pomocí kterých je možné konstrukci uvést do vodorovné pozice i v případě nerovné podlahy v dílně. Patky včetně montáže do profilu nohy konstrukce jsou na Obrázku 36.



Obrázek 36: Výškově stavitelná patka.

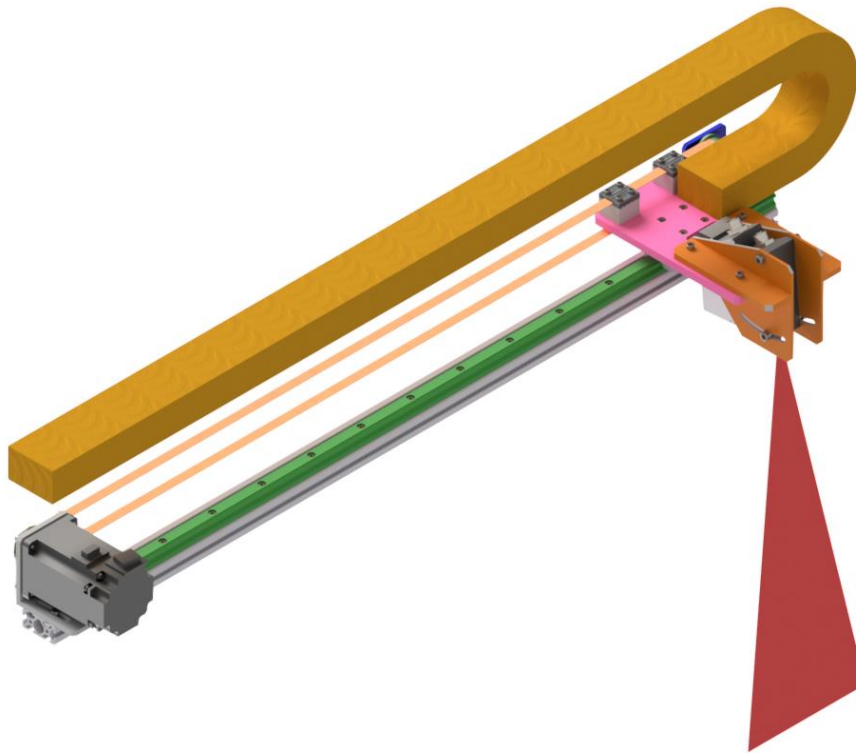
3.3.2 Návrh celkové konstrukce

Předpoklad je, že konstrukce jako celek přejímá kartézský souřadný systém od laserového skeneru. Osa Z zde reprezentuje výškové rozměry konstrukce. V ose Y probíhá posun laseru při snímání povrchu a v ose X je vykreslován nasnímaný profil. Konstrukce je tvořena jednoduchým rámem z hliníkových profilů MayTec. Na hlavní nosný rám a na nohy rámu byly použity profily 40x40, které disponují dvěma drážkami na boční ploše profilu. Díky tomu lze použít dva úhelníkové spoje na spoji dvou ploch. Jak je vidět na Obrázku 37 spojení profilů bylo provedeno na tupo. Tento rohový spoj zajišťují čtyři úhelníkové spoje (žlutá barva) opatřeny protiprachovou ochranou krytkou (červená barva). Díky takovému typu spojení a použití poměrně silných profilů bylo dosaženo dostatečné tuhosti sestavy a nebylo nutné konstrukci více zpevňovat přidáním dalších profilů.



Obrázek 37: Rohový spoj konstrukce.

Samotný laserový skener je zavazben pomocí dvou L profilů z obou bočních stran (Oranžovou barvou na Obrázku 38). Skener je k nim upevněn pomocí šroubů. L profily pak tvoří kulisu pro laser, která je díky mezikusu ve formě desky (Na Obrázku 38 růžovou barvou) upevněna na pojezdovém vozíku. Ve dvou ze čtyř celkových L profilů je drážka pro natočení samotného laseru. Zkušební konstrukce tak nabízí i natočení laseru podél osy X , což umožňuje dopad světelného paprsku pod nastavitelným úhlem. Tento úhel je možné změnit z důvodu špatného snímání povrchu vlivem špatných světelných podmínek. Nepříznivý je hladký lesklý povrch, na který je účinnější vyzařovat světelný paprsek pod úhlem stanoveným experimentem.

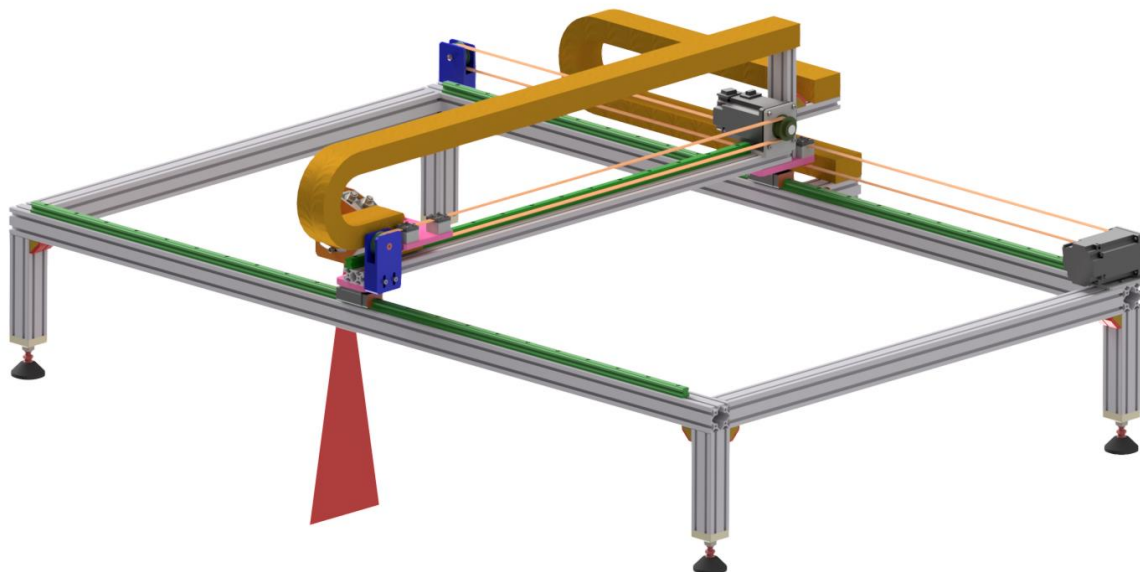


Obrázek 38: Pojezdová osa konstrukce.

Pojezdový vozík společně s komponentami upevňující laserový snímač se pohybuje na lineární vedení. Vedení je spojeno k hliníkovému profilu 40×20 pomocí šroubů a matek určených do drážky profilu. Na profilu se dále nachází servo motor zajišťující pohyb laseru v ose X . Přenos hnací síly je pomocí ozubeného řemenu. Napínací kladka je umístěna na druhé straně profilu a ukotvení je na desce, která spojuje kulisu laseru s pojezdovým vozíkem (růžovou barvou na Obrázku 38). Součástí pohyblivé osy je i energetický řetěz schematicky znázorněn žlutou barvou.

Pojezdová osa je usazená v rámu a pohybuje se v ose Y . Profil MayTec je upevněn za použití mezikusů do dvou pojezdových vozíků, které jsou vzájemně rovnoběžné. Mezikusem se rozumí opět deska, podobného typu jako deska nacházející se v pojezdové ose. Na Obrázku 39 jsou všechny tři desky vyobrazeny růžovou barvou. Zároveň tyto díly bylo nutné vyrobít dle požadovaných parametrů. K tomu posloužila frézka FV 25 CNC A (Obrázek 32). Jednalo se o výrobu jednoho kusu od každé součásti. Ty byly obrobena na konkrétní délkové rozměry a následně byly do součástí vyvrtány otvory pro šroubové spojení. Přičemž na rozměrnější desce, nacházející se mezi rámem a pojezdovou osou, byl umístěn profil na podporu energetického řetězu pro osu Y . Dále se na této desce nacházejí upínky pro ozubený řemen. Součást tedy vyžadovala výrobu celkem šestnácti otvorů.

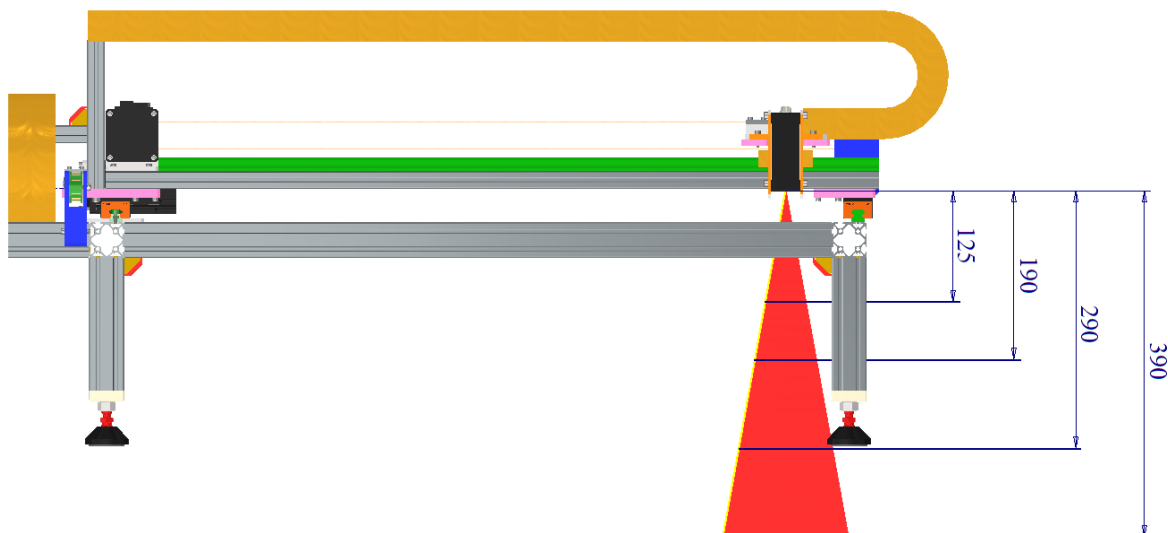
Pohon v ose Y je řešený stejným způsobem jako u pojezdové osy. Je zde využit druhý servo motor Mitsubishi HG-KN23J-S100, který pomocí ozubeného řemenu zajišťuje pohyb v ose Y . Dvě rovnoběžné lineární vedení s vozíkem HGH 15 CA od Hivinu umožňují pohyb v dané ose. Vedení je pomocí šroubů a matic určeným do drážky profilu upevněno k rámu konstrukce.



Obrázek 39: Návrh celkové testovací konstrukce.

Samotný rám je tvořen dvěma profily 40×40 v ose Y o délce 1 400 mm. Dále dvěma profily 40×40 v ose X o délce 800 mm. Na výškový rozměr (osa Z) byly použity taktéž profily 40×40 o délce 150 mm. Do těchto profilů byly nainstalovány výškově stavitelné patky. Samotné profily jsou vzájemně smontovány pomocí úhelníkových spojů zobrazené na Obrázku 37. Celkové rozměry konstrukce jsou $1\,065 \times 1\,405 \times 491$ mm v souřadném systému $X \times Y \times Z$. Laserový skener pak dokáže pokrýt plochu $665 \times 1\,223$ mm v osách $X \times Y$. Tato plocha je fyzicky maximální možná a v rámci bezpečnosti je nutné ji omezit pomocí softwaru.

Zatímco v osách X a Y udává maximální možnou pracovní plochu skeneru návrh vlastní konstrukce, tak v ose Z je skenovací rozsah omezen samotným zařízením. Parametry rozsahu pro skenování jsou uvedené již v Tabulce 1 na straně 26. Grafické znázornění rozsahu vybraného zařízení scanCONTROL LLT2510-100 je na Obrázku 40. Kóty 190 a 290 značí standartní oblast snímání laserem, která činí 100 mm v ose Z . Zároveň je konstrukce navržena tak, aby byla snímána i podlaha pod konstrukcí. V případě potřeby je možné využít i rozšířeného rozsahu měření, které je omezeno kóty 390 a 125 na Obrázku 40. Při skenování membránových stěn by měl postačit základní měřicí rozsah pro případy, kdy budou stěny pokládány přímo na společnou podstavu společnou s konstrukcí. Membránové stěny se vyrábí s maximálním průměrem trubice 72 mm. S ohledem na navařenou housenku se i tato membránová stěna vleze do skenovaného prostoru. V osách X a Y se membránové stěny mohou zkrátit na určitou míru nebo je skenovat postupně. Konstrukce však nemá sloužit ke kompletnímu nasnímání membránové stěny, ale k odladění zkušebnímu procesu.



Obrázek 40: Snímací rozsah skeneru scanCONTROL LLT2510-100.

3.4 Nastavení laserového zařízení

Po realizaci návrhu zkušební konstrukce bylo nutné vytvořit program na funkci samotného laseru. Použitý software byl scanCONTROL Configuration Tools, který byl bezplatně k dispozici v rámci zakoupení skenovacího zařízení od stejné společnosti. Software byl použit na nastavení správné funkce skenovacího zařízení. Nastavení zahrnovalo světelné podmínky při skenování, množství nasnímaných profilů za sekundu a vyhodnocení vybraných bodů na profilu, které následně byly použity ke korekci dráhy svařovací hlavy. Pro případ budoucích úprav programu během zavádění postupu ze zkušební do výrobního provozu byly vytvořeny návodná videa. Ty slouží k rychlé orientaci v softwaru pro osobu, která by potřebovala například upravit parametr čas expozice při snímání ve světelných podmínkách odlišných než při zkušebním provozu snímacího zařízení. Program je vytvořen pro podmínky zkušebního procesu, který se od budoucích aplikací může drobně lišit. Samotný pohyb zkušební konstrukce je řešen řídicím systémem na bázi PLC. Provizorní instalace PLC systému společně se zkušební konstrukcí je vyobrazena na Obrázku 41. PLC systém stejně jako laserový skener byl pořízen jak pro testovací proces, tak pro následný výrobní proces. Program pro PLC ale není součástí této práce.

3.4.1 Počáteční parametry programu

V softwaru scanCONTROL Configuration Tools byly dva počáteční parametry, které bylo potřeba řešit v rámci dané problematiky. Prvním parametrem byl čas expozice neboli doba, po kterou bude sensor vystaven světlu ze snímaného prostředí pro pořízení jednoho záznamu profilu. Software nabízí čas expozice v intervalu od 0,01 do 40 ms. Při zjišťování vhodné hodnoty byly využity časy 0,75; 1,00 a 1,50 ms. Určení vhodné hodnoty probíhalo experimentálně, kdy byl čas expozice zvolen a následně bylo provedeno snímání povrchu.

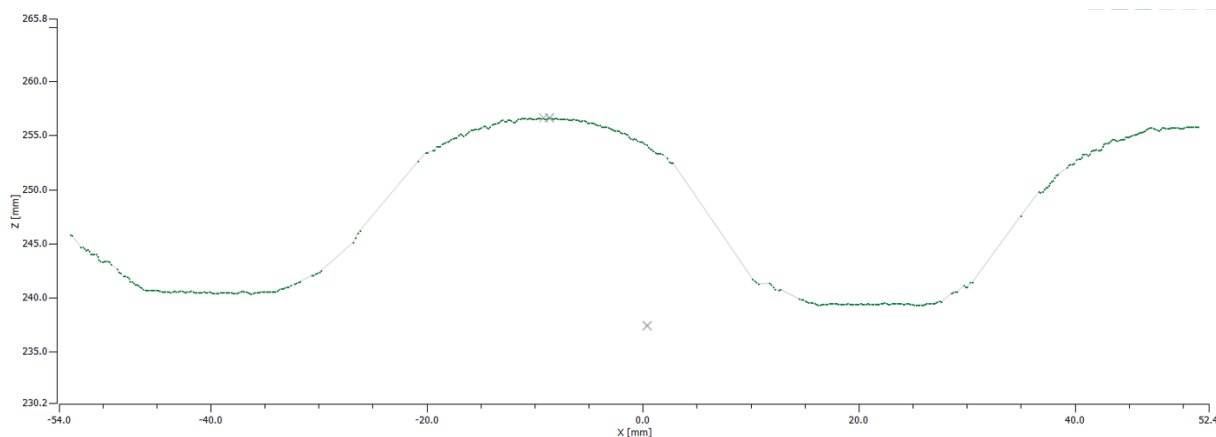
Příklad zaznamenaného profilu je na Obrázku 42 a na Obrázku 43. Zde je nasnímaný profil zobrazen zelenou barvou. Šedá barva v profilu značí nenasnímaný úsek profilu. Křivka šedé barvy je tak pouze spojnicí mezi nasnímanými body profilu zelenou barvou a nepředstavuje skutečný profil. Laserový snímač vždy nenasnímá plochu, která se leskne. Proto samotný povrch snímané součásti hraje velkou roli. Tímto experimentem byl zjištěn vhodný čas

expozice pro konkrétní případ skenování povrchu. V jiném případě s odlišnými světelnými podmínkami výsledek tohoto pokusu nemusí být zcela prokazatelný. Při experimentu bylo vyzkoušeno natočení samotného skenovacího zařízení, které zkušební konstrukce umožňovala.

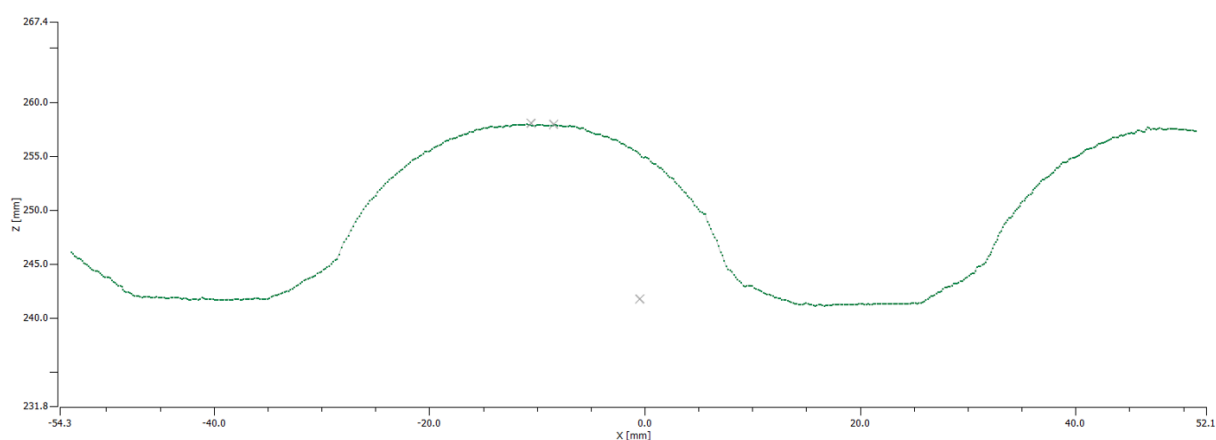


Obrázek 41: Zkušební konstrukce včetně PLC systému.

V rámci testování kvality snímání povrchu bylo k dispozici nastavení natočení skeneru. Natočení je uvažováno jako úhel mezi spodní plochou snímacího zařízení, kde se nachází světelný zdroj a maticová kamera, a mezi podlahou na které leží membránová stěna. Pro porovnání výsledků je na Obrázku 43 záznam profilu s nejméně vhodným nastavením. Profil je zde z velké části nenasnímaný. Tento výsledek skenování odpovídá nulovému natočení skeneru (úhel 0°) a času expozice 0,75 ms. Oproti tomu na Obrázku 43 je zobrazen ideální výsledek. Profil je zde zcela kompletně naskenovaný. Nastavení, které bylo nadále využíváno, odpovídá opět nulovému natočení laserového snímače a času expozice 1,5 ms. Ostatní výsledky experimentu jsou uvedeny v Příloze 1, kde je lze vzájemně porovnávat.



Obrázek 42: Profil při expozici 0,75 ms; úhel natočení 0°



Obrázek 43: Profil při expozici 1,5 ms; úhel natočení 0°

Druhým parametrem nastaveným na počátku skenování byla frekvence zaznamenávání bodů. Frekvence pro laserový skener scanCONTROL LLT2510 je nastavitelná v intervalu od 25 do 300 Hz. Pro potřeby korekce svařovací hlavičky je potřeba jen malé množství kontrolních bodů. Proto byla minimální možná nastavitelná frekvence 25 Hz dostačující. Výsledkem tedy bylo 25 nasnímaných profilů za jednu vteřinu. Samotná rychlost laserového skeneru hraje roli na výsledný počet profilů po celé délce membránové stěny. Tato rychlost by se měla shodovat s rychlostí posuvu svařovacího zařízení v ose Y. Rychlost v této ose byla při zkušebním navařování použita v rozmezí od 178 do 668 mm·min⁻¹. Rychlost posuvu v ose Y byla zvolena jako ideální hodnota 315 mm·min⁻¹ po 19. testovacím návaru.

V případě využití rychlosti z testovacího navařování lze stanovit názorný příklad pro zaznamenávání profilů. Při celkové dráze 100 mm, kterou bude laser skenovat při pohybu rychlostí 315 mm·min⁻¹, bude toto skenování hotové za dobu 19,04 s. Při zaznamenávání profilů o frekvenci 25 Hz je na 100 mm délky výsledný počet profilů 476. Takové množství profilů, z kterých budou vyhodnoceny body pro korekci dráhy, je až nadbytečné. Řešením této problematiky se práce zabývá v následujících kapitolách. Pro nastavení frekvence záznamu to znamená nastavení nejnížší možné hodnoty 25 Hz.

3.4.2 Výběr vhodné strategie při vyhodnocení profilu

Zvolení vhodného nástroje z kapitoly 1.3.4 *Laserový snímač scanCONTROL 25xx* je prvním krokem k získání řady bodů tvořící křivku pro korekci dráhy svařovací hlavice. Práce probíhaly v softwaru scanCONTROL Configuration Tools. Jednotlivé nástroje pro hodnocení profilů jsou zobrazeny na Obrázcích 16 až 23. Ve strategii vyhodnocení je však nutné brát v úvahu měnící se geometrii profilu v důsledku navařovacího procesu. V průběhu procesu bylo tedy nutné využívat více hodnotících nástrojů a jejich možností použití. Neměnný prvek profilu je okraj membránové stěny. Zde je stěna vždy zakončena žebrem, na které nebude aplikován návar. Tomu je tak z důvodu nutného svaření jednotlivých stěn v jeden celek přímo v místě aplikace. Zároveň za tyto žebra bude stěna zavazbena pomocí kotvících patek.

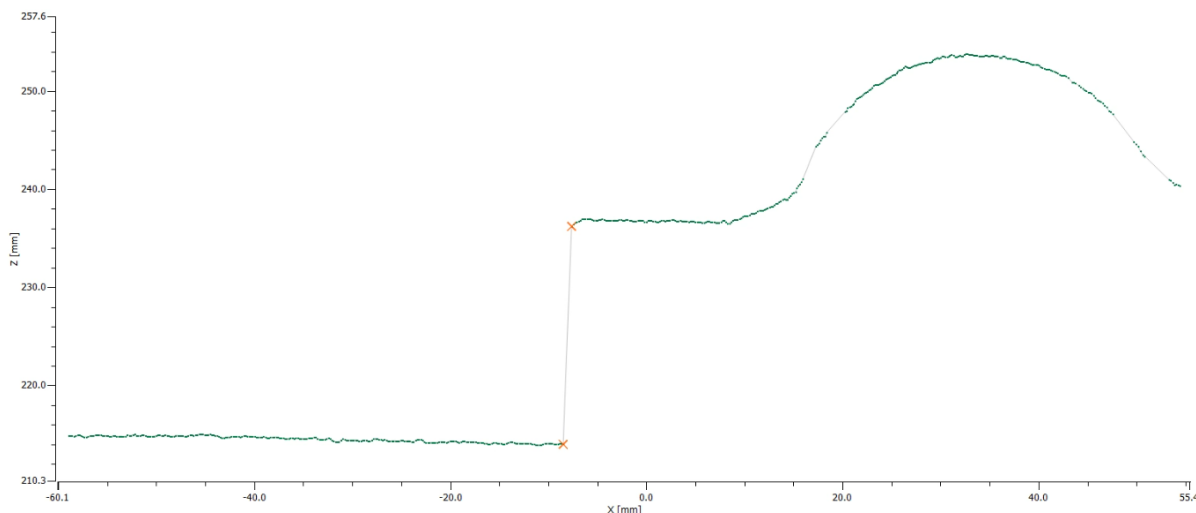
Z hodnotících nástrojů profilu byly brány v úvahu **maximální bod**, **první bod**, **kulový vrchlík**, **středový bod** (hodnocení kruhu) a **start/konec** (hodnocení mezery). Při posuzování umístění bodu buď do středu zaoblení nebo na kulový vrchlík, bylo shledáno vhodnějším využití bodu na kulovém vrchlíku, který bude tvořit dráhu přímo na povrchu membránové stěny místo v ose trubice. Následná úvaha nastala v použití právě kulového vrchlíku nebo maximálního bodu. Maximální bod vykazoval při testování odchylky způsobující přeskokování pozice bodu v ose X. Maximální bod tedy nebyl vždy ve stejném místě. Je nutné dodat, že odchylky od skutečného maxima nebyly příliš četné. Druhou možností byl bod umístěný na kulový vrchlík. Zde měl výsledný bod stálou pozici a nedocházelo ke kmitání jeho pozice jako u maximálního bodu. Nástroj však vyžadoval pracnější nastavování. Bylo nutné omezit oblast vyhodnocování na oblast obsahující pouze profil trubice (tedy zaoblenou část). Při vyhodnocování bodu na kulovém vrchlíku bez omezení nástroj započítává celý profil a vznikaly tak nesmyslné výsledky. Zároveň omezení oblasti pro vyhodnocení muselo být přesné a nezahrnovat jinou část profilu než jen zaoblenou část. Z praktického pohledu, kdy bude probíhat skenování celé membránové stěny, by musela být oblast nastavována pro každý průjezd laseru. To neodpovídá cíli nahrát toto nastavení do interní jednotky laserového snímače, který bude vykonávat funkci bez připojení k počítači. Druhou možností by bylo nastavit laserový snímač do přesné polohy nad zvolenou trubicí. S tím by byl současně vytvořen další problém s polohováním celé membránové stěny. Z těchto důvodů byl vybrán nástroj **maximální bod** vyžadující úpravy z hlediska bodů na výstupu.

Z hlediska strategie snímání laserem a následného vyhodnocení při probíhajícím procesu navařování bylo nutné určit nástroj pro každou svarovou housenku. Například nelze použít vybraný nástroj maximální bod v situaci, kdy je nutné navařovat na danou trubicí jako část membránové stěny a na stěně je již navařena housenka převyšující maximální bod trubice. Maximální bod by byl vyhodnocen na svarové housence, která je z geometrického hlediska nepoužitelná pro vytvoření požadované dráhy. Tomuto stavu předchází opatření, kdy bylo rozhodnuto použít pro vyhodnocení a pro korekci dráhy vedlejší trubicí, na kterou ještě nebylo navařováno. Tato strategie umožňuje navařit téměř celou plochu bez nutného zásahu do změny režimu na jinou operaci.

Korekce podle vedlejší trubice nebude platit pro poslední trubicí na stěně. Pro okamžik, kdy bude navařena celá stěna kromě posledního článku, bude nutné stanovit jiný nástroj pro vyhodnocení profilu. Navádění pomocí návarové vrstvy bylo zahrnuto a mezi nenavařenou plochu pro tento okamžik patří poslední trubicí a spojovací žebra po stranách trubice. Jelikož na trubicí bude následnou operací navařováno, tak nejpriznivější možností se jevílo využít okraj celé stěny. Na tento okraj (současně poslední žebro v řadě) nebude kladena návarová vrstva a současně je za něj celá stěna uchycena. Proto bylo nutné uvažovat přítomnost kotvících patek na okraji.

Výběr nástrojů probíhal mezi **prvním bodem** z kategorie extrémů a mezi nástrojem **start/konec** z kategorie hodnocení mezery. Nástroj první bod umístí bod do prvního laserem

zaznamenaného bodu profilu na ose X z levé strany (též minimální souřadnice X). Jelikož je zkušební konstrukce navržena i pro snímání podlahy skenerem, bylo by nutné omezit oblast vyhodnocování profilu tak, aby podlahu nezahrnovala. Současně při budoucím výrobním procesu bude za membránovou stěnou taktéž pozadí. Použití tohoto nástroje je však možné. Druhým ve výběru byl nástroj z kategorie hodnocení mezery. Mezera na profilu vznikla mezi membránovou stěnou a podlahou, jak je vidět na Obrázku 44. Spoj mezi nasnímaným profilem a podlahou je spojen šedou křivkou, která značí nenasnímanou oblast. Nástroj start/konec umožňuje umístit body na start a konec mezery (Na Obrázku 44 červené značky). Ze dvou vytvořených bodů je potřebný bod umístěný na konci membránové stěny, podle kterého bude možné provádět korekci. Z důvodu absence nutných úprav nastavení byl použit nástroj **start/konec**. Ke korekci dráhy bude použit pouze bod na profilu membránové stěny.



Obrázek 44: Hodnocení mezery – start/konec.

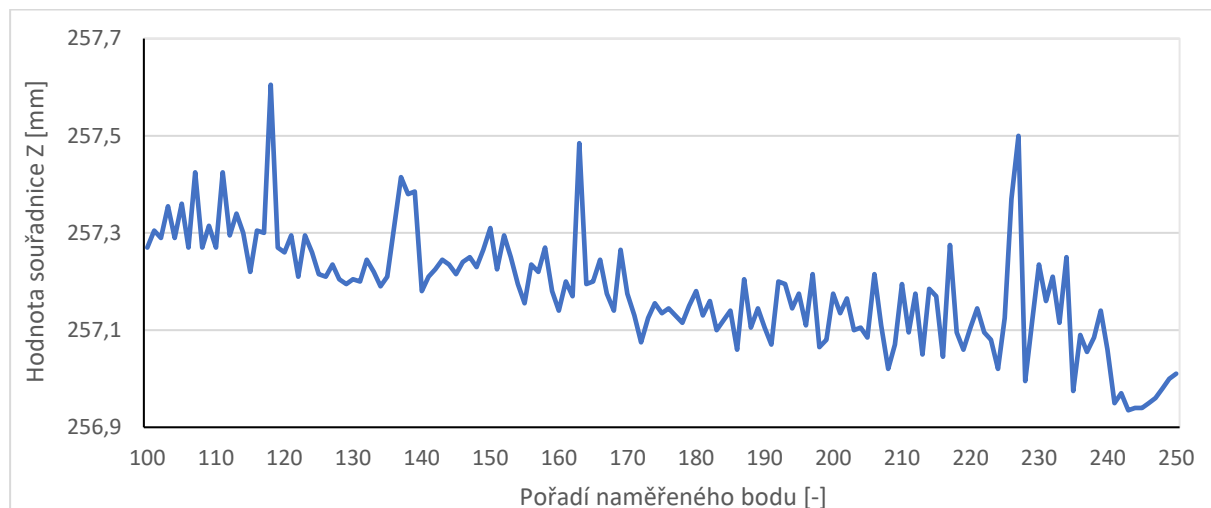
Pro korekci dráhy pomocí okraje membránové stěny bylo ještě nutné vyřešit skokové změny souřadnic bodů při přejíždění kotvících patek skenerem. Software ScanCONTROL Configuration Tools nabízí možnosti filtrování vybraných hodnot, či informaci, zda je hodnota ve zvolené toleranci. Samotnému filtrování a výběru hodnot se věnuje následující kapitola. V rámci softwaru nebylo možné nastavit, aby při nesplnění tolerance nebyly hodnoty (souřadnice bodu) přivedeny na výstupní signál. Strategie korekce je ve vynechání oblasti, kde se nachází kotvící patka. Zde dráha bude spojena dvěma nejbližšími body nacházejícími se na okrajích patky (uvažováno v ose Y – ve směru posunu skeneru). Pro korekci dráhy svařovací hlavičky nebude mít slepé místo v dráze žádné závažnější důsledky. Pro omezení nehodícího se úseku nebyl použit software na vyhodnocování profilů, ale data byly omezeny v rámci PLC systému. Zde byla nastavena tolerance, kdy data byla použita pro korekci a při značném navýšení hodnot o patku nacházející se na součásti data nebyla použita. V rámci PLC systému byl ještě omezen výběr bodů pro korekci dráhy pro jejich celkový přebytek.

3.4.3 Výběr a filtrování zvolených hodnot

Po zvolení vhodných nástrojů pro umístění bodu na profil a po případném omezení oblasti vyhodnocení bylo ještě nutné vybrané parametry přivést na výstupní signál snímacího zařízení. Na výstupní signál bylo možné přivést veškeré nasnímané souřadnice bodu (X a Z). Dále software nabízí možnost filtrování zaznamenaných dat. To mělo smysl zvláště u nástroje maximální bod, který vykazoval zvýšený rozptyl hodnot. Filtr hodnot spočívá ve výpočtu aritmetického průměru z řady nasnímaných hodnot a následný průměr je teprve zaznamenan.

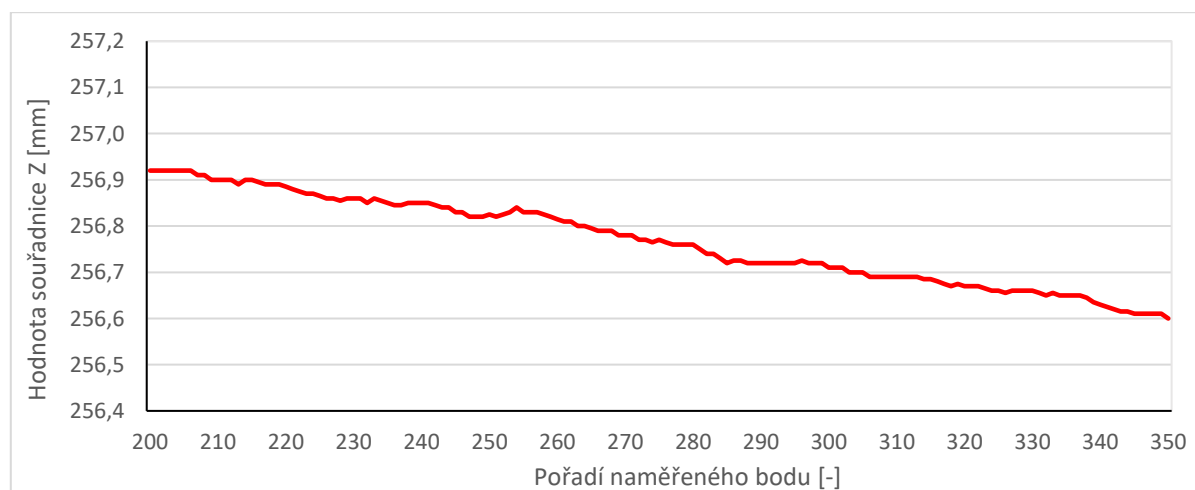
Software umožňuje výpočet průměru až ze 63 nasnímaných hodnot. Tím by se teoreticky měl snížit rozptyl hodnot.

Pro ověření teoretických předpokladů bylo provedeno zkušební měření souřadnic bodu a jeho statistické vyhodnocení. Bod byl na profil umístěn nástrojem maximální bod. Snímán byl stejný úsek membránové stěny 10x v řadě pro dostatečně velký statistický soubor. Využitým nástrojem byl maximální bod a zaznamenány byly všechny jeho souřadnice o předem nastavené frekvenci 25 Hz. Z důvodu velkého počtu nasnímaných bodů je pro názornost je na Obrázku 45 uveden pouze výřez průběhu hodnoty souřadnice Z.



Obrázek 45: Průběh nefiltrovaných naměřených hodnot.

Stejně naměření hodnot probíhalo v druhém případě, kdy byl využit filtr v podobě průměrných hodnot. Výpočet průměru byl nastaven na nejvyšší možný počet zdrojových hodnot a to 63. Snímání povrchu pro filtrované hodnoty proběhlo pouze 2x z důvodu obsazení vysokého množství bodů již v jednom samotném nasnímání. Stejně jako v předchozím případě je na Obrázku 46 vyobrazena část průběhu hodnoty souřadnice Z. Pro vertikální osu Hodnota souřadnice Z byl použit stejná velikost rozsahu. V případě nefiltrovaných hodnot na Obrázku 45 je pozorovaná oblast od 256,9 do 257,7 mm. Rozsah tedy činí 0,8 mm. Pro graf filtrovaných hodnot na Obrázku 46 je pak pozorovaná oblast od 256,4 do 257,2 mm. Rozsah je tedy totožný a to 0,8 mm. Vodorovná osa Pořadí naměřených bodů u obou grafů má taktéž stejný rozsah 150 naměřených bodů. Celková pozorovaná oblast má stejnou velikost pro oba grafy.



Obrázek 46: Průběh filtrovaných naměřených hodnot.

Z grafů je možné pozorovat odlišnou pozorovanou oblast. To je z důvodu nechtěného posunutí skenované oblasti na membránové stěně během vytváření odlišného nastavení v softwaru. I přesto jsou výsledky použitelné a na první pohled je patrné, že filtrované hodnoty vykazují výrazně nižší odchylky. Průběh hodnot je plynulejší než u nefiltrované souřadnice Z. Dalším prokazatelným důkazem o výhodě využití filtrovaných hodnot mělo být statistické vyhodnocení.

Statistické vyhodnocení bylo provedeno pro deset měření nefiltrovaných hodnot a pro dvě měření filtrovaných hodnot, kdy obě řady hodnot obsahující velké množství zdrojových nefiltrovaných hodnot. Každá jedna hodnota v souboru vznikla jako aritmetický průměr ze 63 původních hodnot. Při velikosti použitého souboru 260 hodnot souřadnice Z to dělá soubor 16 380 zdrojových hodnot pro jedno měření. Oproti tomu deset záznamů nefiltrovaných hodnot čítalo velikosti souboru pouze 280 hodnot pro jednotlivý záznam.

Z hlediska statistického vyhodnocení bylo nutné vypočítat aritmetický průměr podle rovnice (3.1). Počet hodnot v souboru zde byl deset hodnot pro nefiltrované hodnoty a pouze dva pro filtrované. Jednotlivé měření byly vždy pro stejný pozorovaný úsek. Tomu odpovídaly podobné odchylky v průběhu jednotlivých měření.

Aritmetický průměr [34]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

kde: $\bar{x}$ - aritmetický průměr [mm],
 n - počet hodnot v souboru [-],
 x_i - pozorovaná hodnota [mm].

Výpočet rozptylu představuje průměr druhých mocnin odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru. Jeho výpočet byl proveden podle vzorce (3.2). Pro statistický popis naměřených hodnot byla využita směrodatná odchylka. Výpočet byl podle vzorce (3.3), tedy druhá odmocnina rozptylu. [34]

Rozptyl [34]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.2)$$

kde: σ^2 - rozptyl [mm²],
 n - počet hodnot v souboru [-],
 x_i - pozorovaná hodnota [mm],
 $\bar{x}$ - aritmetický průměr [mm].

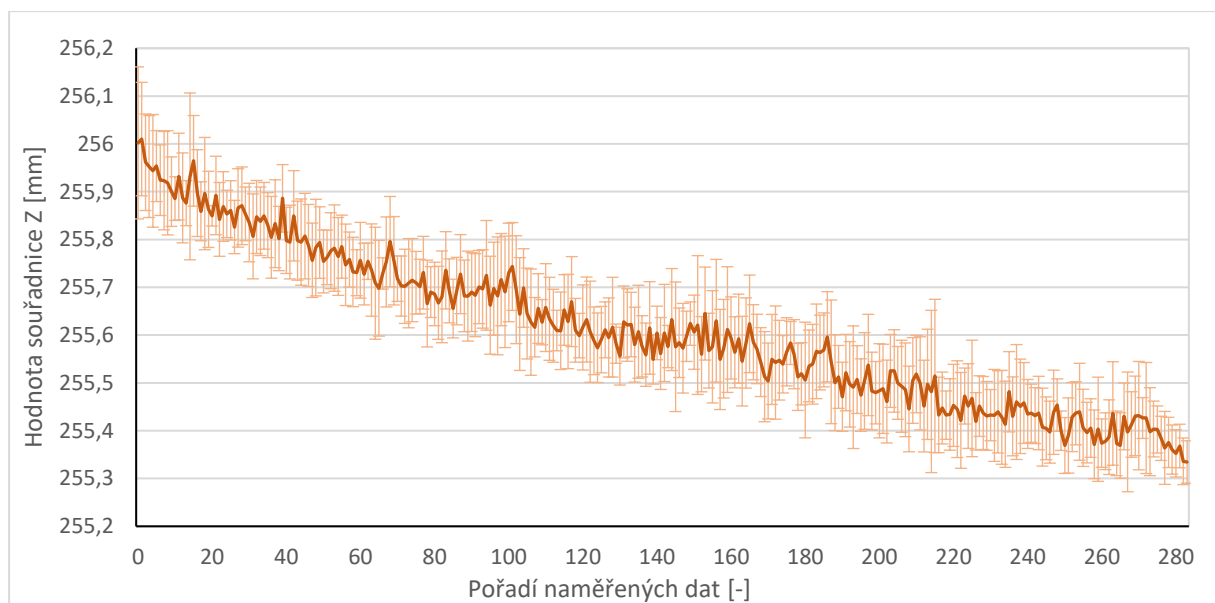
Směrodatná odchylka [34]:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \quad (3.3)$$

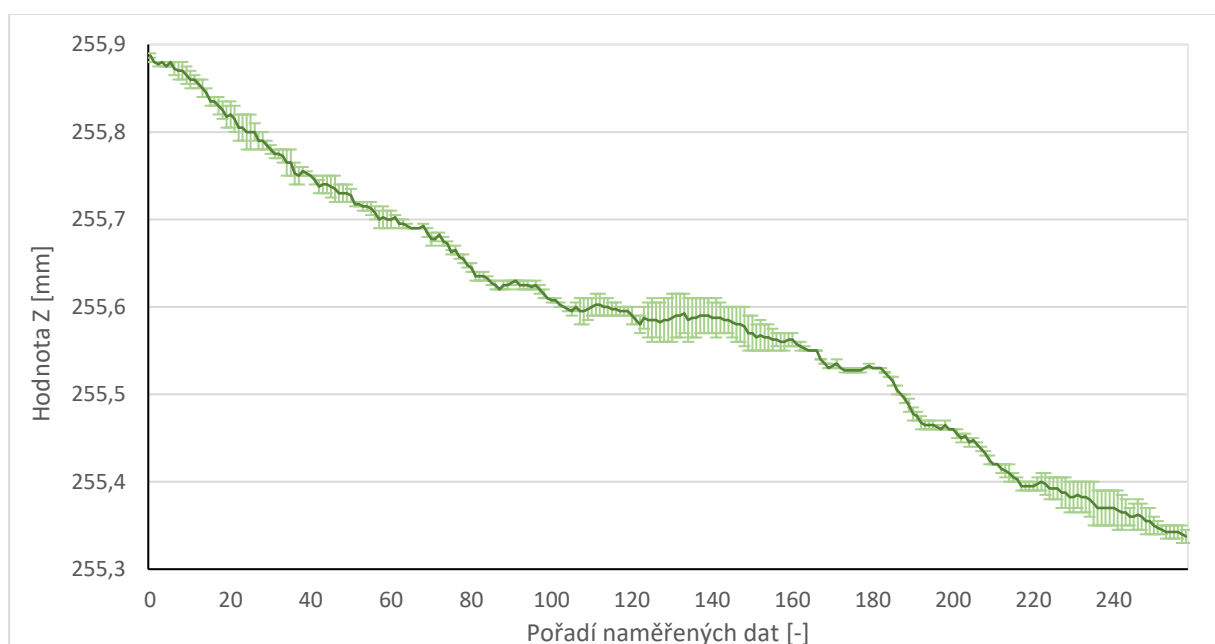
kde: σ - směrodatná odchylka [mm],
 σ^2 - rozptyl [mm²].

Ukázka tabulky obsahující naměřené hodnoty a výsledky rovnic (3.1), (3.2) a (3.3) je uvedena v Příloze 3. Příloha také obsahuje další provedené vyhodnocení.

Vypočítaný aritmetický průměr byl zakreslen do grafu a stejně tak směrodatné odchylky reprezentované chybovými úsečkami. Vznikly tak dva grafy. První z nefiltrovaných hodnot na Obrázku 47. Druhý graf reprezentující měření filtrovaných hodnot je na Obrázku 48. Pro druhý graf (Obrázek 48) byl použit menší rozsah jak ve vertikálním směru (0,6 mm), tak ve vodorovném (260 hodnot). Graf pro nefiltrované hodnoty dosahoval rozměrnější pozorované oblasti ve vertikálním směru (1 mm) i ve vodorovném směru (280 hodnot). To značí skutečnost, že je graf na Obrázku 48 detailnější a velikost chybových úseček by měla být výraznější než v grafu na Obrázku 47. Z obou obrázků je však patrné, že chybové úsečky jsou výrazně menší v grafu pro filtrované hodnoty. Tím se potvrzuje teoretická predikce o vhodnosti využití filtrovaných hodnot pro použití při korekci svařovací hlavice.



Obrázek 47: Průběh aritmetického průměru včetně chybových úseček



Obrázek 48: Průběh aritmetického průměru včetně chybových úseček pro filtrované hodnoty

ZÁVĚR

Laserové skenovací zařízení scanCONTROL LLT 2510–100 bylo vybráno ke korekci dráhy svařovací hlavice. V softwaru scanCONTROL Configuration Tools byla vytvořena potřebná nastavení připravená pro uložení do interní jednotky skenovacího zařízení. Hlavní částí tohoto nastavení jsou použité softwarové nástroje pro umístění bodů na naskenovaný profil. Body na profilu je tvořena dráha, podle které bude korigována dráha svařovací hlavice. Použité nástroje byly „maximální bod“ z kategorie hodnocení extrémů, a „start/konec“ z kategorie hodnocení mezer. Po statistickém vyhodnocení byl potvrzen teoretický předpoklad o výhodě využití filtrovaných souřadnic bodů místo nefiltrovaných. Výsledná dráha dosahovala výrazně nižšího rozptylu. Pro samotnou svařovací hlavici je vhodná plynule se měnící dráha z důvodu možného rozkmitání hlavice podle výchylek zdrojové dráhy ke korekci. Toho dosaženo nebylo v rámci použitého softwaru. Řešením je omezit množství použitých bodů k sestrojení dráhy. To je možné zajistit v rámci PLC systému, který bude řídit pohyb laserového skeneru i svařovací hlavice. Zdrojem výsledné dráhy budou filtrované souřadnice bodů vytvořené softwarem scanCONTROL Configuration Tools.

Pro laserové skenovací zařízení byla navržena a sestavena zkušební konstrukce. Ta byla využita při vytváření nastavení v softwaru. Dále bude využívána při nastavování a testech PLC systému a následně i při zkušebním navařování. Laserový skener dokáže snímat v rámci zkušební konstrukce plochu $665 \times 1\,223$ mm v osách $X \times Y$. Výšková souřadnice Z umožňuje naskenovat objekty až do výšky 162 mm, počítáno od podlahy.

Samotné navařování na membránové stěny bude zajišťovat svařovací metoda CMT. Ta byla upřednostněna před metodou MIG/MAG z důvodů, jako je menší hodnota vneseného tepla, nízká míra promísení základního a přídavného materiálu a pro minimální rozstřík. Metoda je schopna vytvořit kvalitní návarovou vrstvu, která bude lépe odolávat oxidaci, než návarová vrstva zhotovená metodou MIG/MAG. Navařovaným materiálem bude superslitina niklu a chromu Inconel 625 a jako ochranná atmosféra bude využit aktivní plyn Cronigon Ni10.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FURCH, Jan, Josef GLOS, Oldřich TĚŠÍK a Josef MAREK. *Opravy bojových a speciálních vozidel*. Brno: Univerzita obrany, 2007. ISBN 978-80-7231-296-2.
2. HALUZÍKOVÁ, Kateřina. *Studium svařitelnosti vysokouhlikových ocelí*. Ostrava: Vysoká škola báňská, Fakulta strojní, 2007. ISBN 978-80-248-1528-2.
3. KREJČÍ, Vojtěch. *Nekonvenční technologie navařování kovů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Čelko.
4. PETLACH, Tomáš. *Současné možnosti a trendy pro svařování průmyslovými roboty*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Kubela.
5. VAVREČKA, Jakub. Fakta a mýty o dotykovém vyhledávání při robotickém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 7.10.2009 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/fakta-a-myty-o-dotykovem-vyhledavani-pri-robotickem-svarovani>
6. DOHNAL, Ivo. *Vliv složení ochranné atmosféry na přenos kovu při MIG/MAG svařování ocelí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Daněk.
7. AUGUSTIN, Petr. *Svařované konstrukce svislých soustruhů*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Marek.
8. ORSZÁGH, Peter a Viktor, ORSZÁGH. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000, 460 s. : il. ISBN 80-88780-36-5.
9. TTLIGHTINGROD. *Wikipedia Commons* [online]. Mysid, 2008 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MIG_cut-away.svg
10. JISKRA, Milan. *Porovnání CMT TWIN s ostatními MIG/MAG procesy*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Kubiček.
11. *Wikipedia Commons* [online]. Alu.cz, 2010 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Welding-pincheffect.svg>
12. Co je to invertor. *Elektrody* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.elektrody.cz/co-je-to-invertor>
13. Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). *Technický týdeník* [online]. 1.1.2006 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html

14. HRÁDEK, Jan. *Procesní parametry při navařování Inconelu 625*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
15. RPKovo [online]. 2019 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.rpkovo.cz/roboticke-svarovani/>
16. GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.
17. Laser. WikiSkripta [online]. 2020 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>
18. Jak funguje laser. Skupina ČEZ: edee [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
19. A.olserova. Funkce laseru. WikiSkripta [online]. 2012 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Soubor:Lasery.obrazek.jpg>
20. Naváděcí systémy. *Laser Therm: lasery pro průmyslové technologie* [online]. 2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/produkty/navadeci-systemy-svarovani-laserem>
21. Laser scanner offers new performance level for series applications. *Micro-epsilon* [online]. 2020 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.com/press/release/PR470_scanCONTROL-2500/?sr=1&sc=1&st=scan+control+2510+connect
22. Operation instruction: scanCONTROL 25xx. *Micro-epsilon* [online]. Ortenburg/Germany [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man--scanCONTROL-25xx--en.pdf>
23. KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. Brno: VUT, 2005 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1>
24. MICRO-EPSILON. *ScanCONTROL: 2D/3D laser scanners*. 94496 Ortenburg / Germany.
25. PSCHIRER James, Joshua BURGESS a Ray CHAMBERLAND. *Advanced Ultrasupercritical (AUSC) Tube Membrane Panel Development: Final technical report* [online]. Windsor, 2017 [cit. 2022-01-09].
26. Výroba membránových stěn. *Přerovské kotlářny* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://www.kotlarna.cz/vyroba_membranovych_sten
27. MANZKE, Arne. Standard of cladding process in biomass and waste combustion. *Uhlig Rohrbogen*. Oslo, 2010 [cit. 2021-12-18].

28. DUTRA, Jair Carlos, Nelso Gauze BONACORSO, Regis Henrique GONCALVES E SILVA, Renon Steinbach CARVALHO a Fernando Costenaro SILVA. *Mechatronic: Development of a flexible robotic welding system for weld overlay cladding of thermoelectrical plants' boiler tube walls* [online]. 2014 [cit. 2022-01-13].
29. Overlay capabilities. *Boiler Tube Company of America*. Lyman: Babcock Power, 2018. Dostupné také z: boilertubes.com
30. Fiala: železářství a domácí potřeby [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://zelezarstvi-fiala.cz/eshop.php?p=eshop_productinfo&id=570213&utm_source=googleNakupy&utm_medium=ppc&utm_campaign=googleNakupy
31. Alloy 309/309S. *NeoNickel* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/nerezove-oceli/alloy-309309s/>
32. PILOUS, Václav a Vladimír KUDĚLKA. *Nikl a slitiny niklu: superslitiny niklu*. Brno: TESIYO, 2017. ISBN 978-80-87102-16-9.
33. TPS/i. *Fronius* [online]. Praha 10 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyroby/ru%C4%8Dn%C3%AD-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/migmag/tpsi>
34. KARPÍŠEK, Zdeněk, Pavel POPELA a Josef BENDÁŘ. *Statistika a pravděpodobnost: učební pomůcka: studijní opora pro kombinované bakalářské studium*. Brno: CERM, 2002, 89 s. ISBN 80-7204-261-0.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
F_g	Gravitační síla	[N]
F_h	Hydrodynamická síla	[N]
F_m	Elektromagnetická síla	[N]
F_p	Síla způsobená tlakem odpařovaných kovů	[N]
F_{pe}	Radiální složka síly od elektromagnetického pole	[N]
F_s	Síly povrchového napětí	[N]
X	Souřadnice osy X	[mm]
Y	Souřadnice osy Y	[mm]
Z	Souřadnice osy Z	[mm]
n	Počet hodnot v souboru	[-]
x_i	Pozorovaná hodnota	[mm]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	[mm]
σ	Směrodatná odchylka	[mm]
σ^2	Rozptyl	[mm ²]

Zkratky

Označení	Legenda
CMT	Cold Metal Transfer
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission
MAG	Metal Active Gas (metoda svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu)
MIG	Metal Inert Gas (metoda svařování v ochranné atmosféře inertního plynu)
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
R_p	Nejvyšší výstupek profilu
R_v	Nejnižší prohlubeň profilu
R_z	Největší výška profilu
SAW	Submerged Arc Welding (metoda svařování pod tavidlem)
TIG	Tungsten inert gas (metoda svařování netavicí se wolframovou elektrodou)

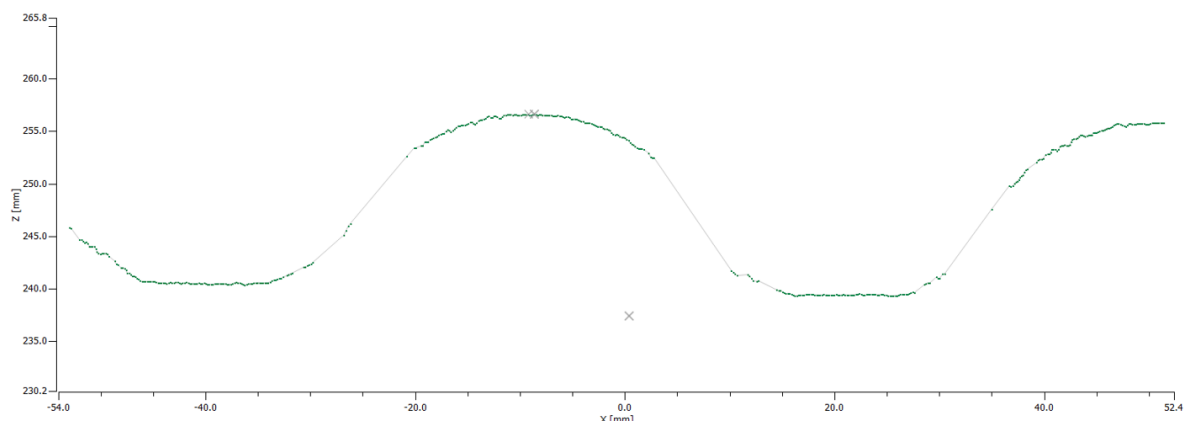
SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Vyobrazení zrealizovaného návrhu konstrukce |
| Příloha 2 | Vliv nastavení expozice a natočení skeneru na výsledný sken profilu |
| Příloha 3 | Statistické hodnocení naměřených dat |

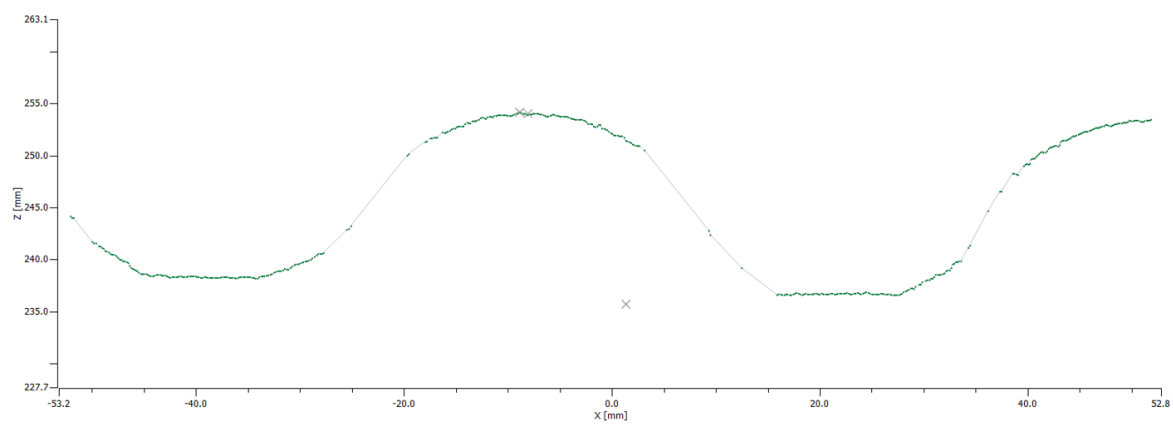
PŘÍLOHA 1: VYOBRAZENÍ ZREALIZOVANÉHO NÁVRHU KONSTRUKCE



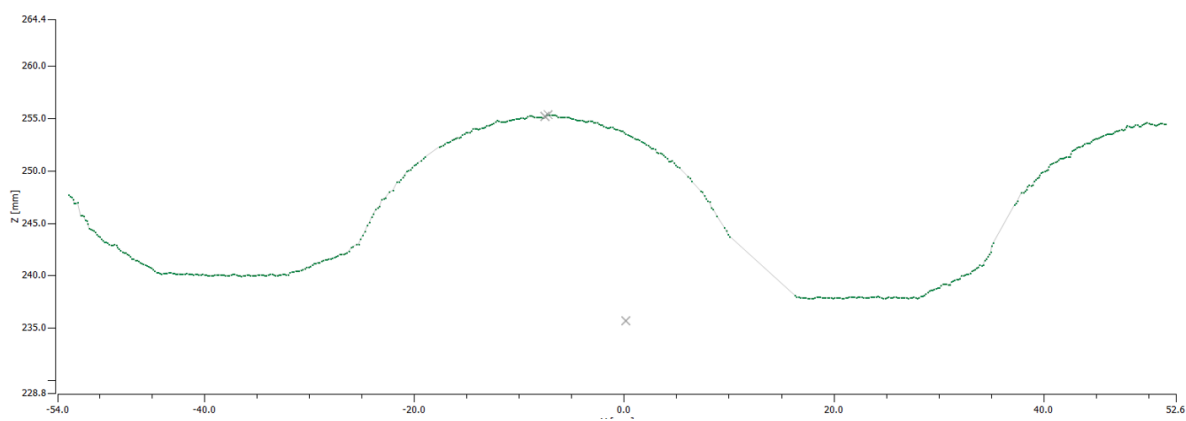
PŘÍLOHA 2: VLIV NASTAVENÍ EXPOZICE A NATOČENÍ SKENERU NA VÝSLEDNÝ SKEN PROFILU



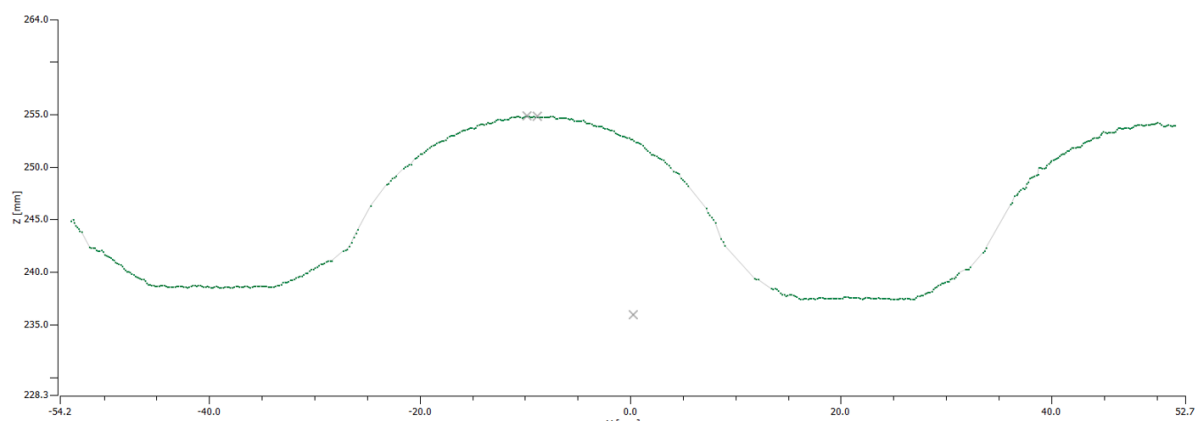
Expozice 0,75 ms; úhel natočení 0°



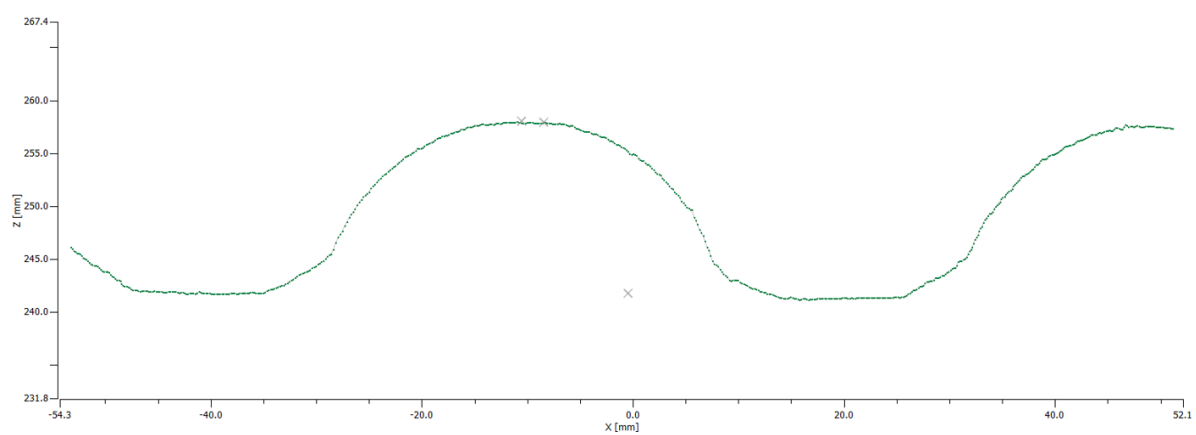
Expozice 0,75 ms; úhel natočení 5°



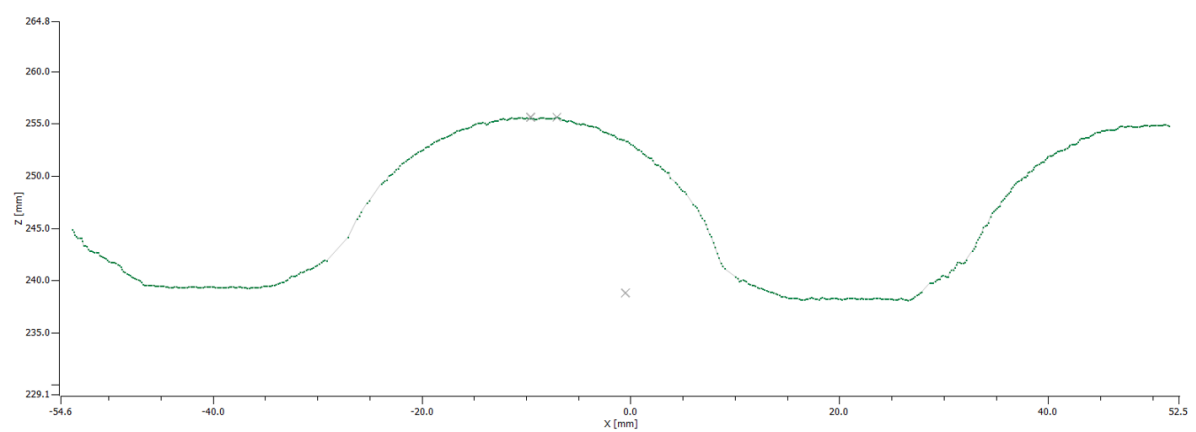
Expozice 1,00 ms; úhel natočení 0°



Expozice 1,00 ms; úhel natočení 5°



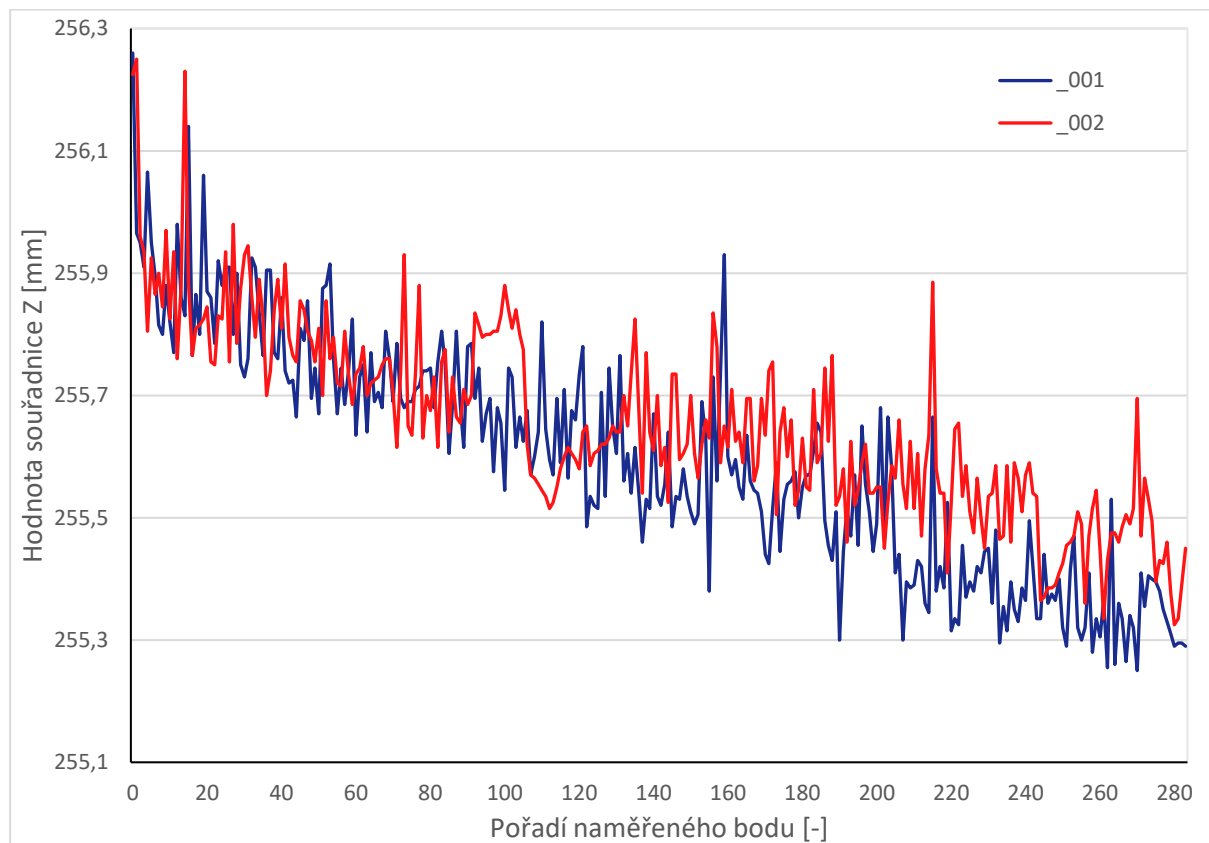
Expozice 1,50 ms; úhel natočení 0°



Expozice 1,50 ms; úhel natočení 5°

PŘÍLOHA 3: STATISTICKÉ HODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Na následujícím grafu jsou zobrazeny dva z desíti naměřených průběhů souřadnice Z. Tato souřadnice náleží bodu na profilu vytvořeném nástrojem maximální bod. Jedná se tedy o naměřená data použita pro statistické vyhodnocení. V tomto grafu jsou mírně upravena pro následné použití. Úpravou se rozumí srovnání průběhů, aby popisovali přibližně totožnou oblast. Začátek, a hlavně konec naměřených dat musel být vypuštěn z důvodu lišících se počtů bodů.



Následoval výpočet aritmetického průměru, rozptylu a směrodatné odchylky deseti naměřených průběhů. Každý průběh dosahoval 280 naměřených bodů. Prvních deset řádků tabulky pro deset prvních bodů je v následující tabulce uvedeno jako vzor.

	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	Arit. průměr	Rozptyl	Směrodatná odchylka
1	256,26	256,23	256,02	255,95	255,83	255,95	255,94	256,20	255,87	255,81	256,002	0,02530	0,159047
2	255,97	256,25	256,03	256,06	255,89	255,96	255,92	256,20	255,89	255,96	256,010	0,01409	0,118680
3	255,95	255,96	256,05	255,82	255,88	256,03	255,96	256,19	255,90	255,89	255,962	0,01020	0,100972
4	255,91	255,94	256,02	255,82	255,84	256,03	255,85	256,17	255,91	256,06	255,953	0,01137	0,106613
5	256,07	255,81	256,05	255,91	255,81	256,04	255,89	256,16	255,90	255,82	255,944	0,01389	0,117857
6	255,95	255,93	255,92	255,89	255,85	256,04	256,04	256,10	255,89	255,95	255,954	0,00551	0,074231
7	255,90	255,87	255,85	255,90	255,95	255,98	256,09	255,99	255,89	255,84	255,924	0,00544	0,073783
8	255,82	255,90	255,99	255,88	255,89	256,21	255,89	255,91	255,91	255,86	255,923	0,01059	0,102888
9	255,80	255,85	256,19	255,92	255,84	255,96	256,02	255,89	255,86	255,87	255,919	0,01188	0,108974
10	255,88	255,97	255,87	255,94	255,81	255,81	255,98	256,04	255,84	255,89	255,900	0,00529	0,072698

Hodnoty z tabulky byly použity při tvorbě grafu na Obrázku 47. Směrodatné odchylky udávají velikost chybových úseček.

Alternativním statistickým zhodnocením bylo vložení zdrojových hodnot do krabicového grafu (boxplot). Je zde reprezentováno všech deset provedených měření, a navíc i dvě měření filtrovaných hodnot. Porovnání tak lze učinit přímo v grafu. Pro filtrované hodnoty (vytvořené zprůměrováním 63 hodnot) lze prohlásit, že dosahují nižší variability než nefiltrované hodnoty. Také se u filtrovaných hodnot nevyskytují odlehlé body.

