



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO PROCESU ELEKTROLYTICKÉHO LEŠTĚNÍ VZORKŮ PRO ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP

DESIGN OF AUTOMATED ELECTRO-POLISHING APPARATUS FOR ELECTRON MICROSCOPY
SPECIMENS PREPARATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Čermák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mgr. Šárka Mikmeková, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Jan Čermák
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Mgr. Šárka Mikmeková, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 automatizovaného procesu elektrolytického leštění vzorků pro elektronový mikroskop

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh koncepce automatizovaného procesu elektrolytické leštičky, který slouží pro přípravu vzorků pro elektronový mikroskop. Pracoviště bude vybaveno manipulátorem vzorků, automatizovaným procesem měření, ochrannou buňkou a bezpečnostními prvky. Vyvinuté zařízení bude experimentálně ověřeno na vzorcích vysokopevnostních ocelí. Vzorky připravené pomocí nově vyvinuté elektrolytické leštičky budou přímo porovnány se vzorky připravenými pomocí klasického komerčního elektrolytického leštění. Kvalita povrchu vzorků bude hodnocena za pomoci pokročilé rastrovací elektronové mikroskopie.

Cíle diplomové práce:

Rešerše současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh variant automatizovaného zařízení pro elektrolytického leštění a zdůvodnění výběru řešené varianty.

Technické výpočty zaměřené na funkčnost a bezpečnost.

Výkres sestavy automatizovaného zařízení pro elektrolytického leštění.

Návrh aplikace pro měření parametrů procesu v systémovém prostředí LabView.

Experimentální ověření na vzorcích vysokopevnostní oceli a srovnání s konvenční technologií.

Vlastní závěry a/nebo doporučení.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

VOORT, George F Vander. Metallography: principles and practice. 4. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. ISBN 978-0-87170-672-0.

LabView user manual. In: NATIONAL INSTRUMENTS CORP [online]. Austin, Texas, USA: National Instruments Corporation, 2020, 2003 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>

YANG, G., B. WANG, K. TAWFIQ, H. WEI, S. ZHOU a G. CHEN. Electropolishing of surfaces: theory and applications. Surface Engineering [online]. 2016, 33(2), 149-166 [cit. 2020-11-05]. ISSN 0267-0844. Dostupné z: doi:10.1080/02670844.2016.1198452

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá automatizací procesu elektrolytického leštění, které se provádí jako poslední krok při přípravě metalografických vzorků určených pro pozorování v elektronovém mikroskopu. Byl vypracován kompletní návrh hardwaru jednorúčového stroje, který zajišťuje automatickou přípravu až šesti vzorků na jedno vložení. Součástí řešení bylo navržení manipulátoru pro manipulaci se vzorky společně s chemicky odolným držákem vzorků vhodným pro automatický provoz. Konstrukce celého stroje byla navržena s ohledem na bezpečnost obsluhy. Součástí práce je detailní 3D model zařízení a návrh aplikace pro měření v prostředí LabVIEW. Je zde popsáno budoucí fungování stroje včetně popisu softwarového řešení pro ovládání stroje a odesílání dat o procesu pro každý vzorek do databáze v souladu s principy průmyslu 4.0. V závěru jsou formulovány dosažené výsledky a návrh dalších kroků nutných pro realizaci stroje.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the automation of the electropolishing process, which is performed as the last step in the preparation of metallographic samples intended for observation in an electron microscope. A complete hardware design of a single-purpose machine has been developed, which provides the automatic preparation of up to six samples per insertion. There was the design of a manipulator for sample handling together with chemically resistant sample holder suitable for automatic operation as a part of solution. The design of the whole machine was developed with regard to the safety of the operator. The thesis includes detailed 3D model of the device and the design of an application for measurement in the LabVIEW. It describes the future working process of the machine, including a description of a software for controlling the machine and sending process data of each sample to the database in accordance with the principles of industry 4.0. In the conclusion, the achieved results and the proposal of further steps necessary for the realization of the machine are formulated.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrolytické leštění, příprava vzorků pro elektronový mikroskop, automatizace metalografické přípravy

KEYWORDS

Electropolishing, electron microscopy specimens preparation, automation of metallographic preparation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERMÁK, Jan. *Návrh automatizovaného procesu elektrolytického leštění vzorků pro elektronový mikroskop*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132530>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Šárka Mikmeková.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Mgr. Šárce Mikmekové, PhD., za podnětné rady, metodickou a odbornou pomoc při zpracování mé práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Mgr. Šárky Mikmekové, Ph.D., a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. 5. 2021

.....
Jan Čermák

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	16
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
3.1	Elektrolytické leštění	17
3.1.1	Suché elektrolytické leštění	19
3.2	Elektrolytické leštičky	20
3.2.1	Laboratorní elektrolytické leštičky	20
3.2.2	Automatizace průmyslového elektrolytického leštění	23
3.2.3	Prototyp experimentálního zařízení pro elektrolytické leštění	26
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY	28
4.1	Metalografický vzorek pro analýzu v elektronovém mikroskopu	28
4.1.1	Velikost a tvar vzorku.....	28
4.1.2	Materiál vzorku.....	29
4.1.3	Orientace vzorku.....	30
4.2	Postup elektrolytického leštění	32
4.2.1	Míchání elektrolytu můžeme zajišťovat více způsoby:	32
4.2.2	Přídavné operace k elektrolytickému leštění	33
4.3	Prostorové zadání a požadované rozměry	34
4.4	Hmotnost.....	34
4.5	Cena	35
5	NÁVRH A ZDŮVODNĚNÍ ŘEŠENÍ	36
6	VARIANTY NÁVRHU	37
6.1	Varianta 1 s 6-DOF robotickým ramenem	38
6.2	Varianta 2 se SCARA robotem.....	40
6.3	Varianta 3 s kartézským manipulátorem	42
6.4	Výběr nejvhodnější varianty pomocí metody vícekriteriálního rozhodování ...	44
6.4.1	Bodovací metoda	44
6.4.2	Určení hodnotících kritérií.....	45
6.4.3	Výpočet bodového zisku daných variant.....	47
7	POPIS ŘEŠENÍ VYBRANÉ VARIANTY	48
7.1	Mechanická konstrukce	48
7.1.1	Návrh rámové konstrukce.....	48
7.1.2	Posuvné dveře.....	51
7.1.3	Plechové dveře.....	52
7.1.4	Rozmístění dílčích technologií v horní části stroje	52
7.1.5	Zakládací paletka a aretační slot.....	53
7.1.6	Odsávání	54
7.1.7	Odsávání oplachové kapaliny vysavačem	55
7.1.8	Ultrazvukové čističky	56
7.1.9	Hadičkový terminál	56
7.1.10	Oplachový set	56
7.1.11	Sušení horkým vzduchem.....	57
7.1.12	Konzole pro ovládací periferie	58
7.1.13	Terminál peristaltických čerpadel a ventilů.....	59

7.1.14	Popis návrhu držáku	60
7.1.15	Manipulátor	62
7.2	Výpočet důležitých prvků mechanické konstrukce manipulátoru.....	67
7.2.1	Potřebný moment motoru.....	67
7.2.2	Průhyb lineárního vedení osy Y	73
7.2.3	Kontrola statických momentů působících na vozík lineárního vedení	74
7.2.4	Určení trvanlivosti ložisek	76
7.3	Popis provozu navrženého stroje pro elektrolytické leštění	78
8	NÁVRH APLIKACE PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROCESU V SYSTÉMOVÉM PROSTŘEDÍ LABVIEW	81
8.1	Návrh aplikace.....	82
8.1.1	Hardware pro měření.....	82
8.1.2	Popis programu pro měření	83
9	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	86
10	ZÁVĚR.....	87
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	90
12	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	93
12.1	Seznam tabulek.....	93
12.2	Seznam obrázků.....	93
13	SEZNAM PŘÍLOH.....	97

1 ÚVOD

Žijeme v době zrychlujícího se technologického pokroku, ve které se každé dva roky objem znalostí a informací zdvojnásobí. To má za následek další akceleraci vývoje, který vede ke zlepšování materiální životní úrovně lidí na celém světě. To však znamená narůstající produkci, potažmo narůstající materiálové toky – zvýšení potřeby těžby surovin, jejich zpracování a přepravy atd. Aby se mohl životní standard zvětšující se populace dále zvyšovat při zachování udržitelnosti, roste poptávka po materiálech nové generace, které při stejném objemu hmoty mají vyšší pevnost, jsou lehčí, výroba je ekologičtější a další zpracování energeticky šetrnější.

Pro vývoj, vznik a kontrolu kvality takových materiálů přestává optická mikroskopie dostačovat. Pozorování optickým mikroskopem odpustí metalurgovi mnohé nedokonalosti přípravy vzorků, avšak pro zkoumání pokročilých materiálů je nutné přistoupit k pozorování metalografických vzorků v elektronovém mikroskopu. Pokročilé metody analýzy v elektronovém mikroskopu kladou vysoké nároky na kvalitu povrchu. Příprava metalografických vzorků takové kvality je jak časově velmi náročná, tak vyžaduje velmi drahé laboratorní vybavení. Opakovatelnost přípravy vzorků s požadavkem vysoké kvality povrchu je velmi nízká, protože laboratorní metalografické přístroje, pokud automatizaci procesu vůbec řeší, se omezují na automatizaci samotného procesu, nikoliv už na mezioperační automatizaci. Všechny obslužné práce musí vykonávat metalurg, který i přes vysokou úroveň kompetentnosti zanáší do procesu přípravy vzorků proměnné, které snižují opakovatelnost.

Z hlediska kvality povrchu metalografického vzorku pro pokročilé analýzy v elektronovém mikroskopu, jako je například metoda EBSD, je nejkritičtější krokem přípravy finální operace. Tato operace se snaží dosáhnout co nejmenší drsnosti povrchu, které může být dosaženo například iontovým leštěním nebo elektrolytickým leštěním. Protože je princip elektrolytického leštění velmi jednoduchý, je tato metoda poměrně nenákladná, a tak je široce rozšířená. Cílem této práce je navrhnout způsob automatizace elektrolytického leštění metalografických vzorků pro elektronový mikroskop.

Nejdříve se práce bude zabývat přehledem současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky, kde se prozkoumají současné možnosti přístrojů pro elektrolytické leštění a jejich automatizace. Dále systémově rozebere daný problém elektrolytického leštění tak, aby bylo možné na základě těchto znalostí navrhnout a popsat řešení zadání.

Na základě tohoto návrhu řešení vzniknou tři detailnější návrhové varianty, které budou popsány, a pomocí multikriteriální metody výběru bude označena nejlepší varianta, která bude kompletně rozpracována a vymodelována v 3D modeláři. Tento detailní 3D model stroje bude společně s výrobními výkresy vložen k práci jako příloha.

Klíčové prvky návrhu stroje budou podrobeny analýze a pomocí technických výpočtů bude ověřena jejich funkčnost a bezpečnost.

Dále bude popsán zamýšlený provoz stroje pro automatické elektrolytické leštění a nakonec se práce bude zabývat návrhem jednoduché aplikace ve vývojovém prostředí LabVIEW pro měření veličiny procesu elektrolytického leštění, jako je napětí a proud v elektrolytickém obvodu a teplota elektrolytu.

2 MOTIVACE

Důvodem pro vypracování této práce byl požadavek na automatizaci některých metalografických postupů přípravy vzorků pro elektronový mikroskop na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Nejdříve jsem pracoval na vývoji poloautomatické elektrolytické leštičky, která pro manipulaci se vzorky využívala jednoduché pětiosé rameno bez inverzní kinematiky s malým dosahem. Při zkoušení tohoto zařízení jsem však na základě znalostí získaných na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotů shledával toto zařízení nedostačujícím. Jednak malý rozsah ramena nedovoloval čištění ve více kádinkách než ve třech, ale především jeho kinematika bez inverzní kinematiky nevyhovovala pro tuto operaci. Absence inverzní kinematiky nedovoluje automatickou výměnu vzorků, takže není možné leštění v sériích. Z hlediska postavení jednotlivých komponent technologie se zdál být návrh tříosého manipulátoru jako lepší řešení.

Proto vznikla téma této práce, která měla za cíl za prvé ověřit, zdali je myšlenka s jednoúčelovým manipulátorem správná, a za druhé navrhnout komplexnější řešení pro automatické elektrolytické leštění. Komplexní řešení přístroje pro elektrolytické leštění umožní nejen lepší opakovatelnost, ale i lepší řízení a záznam experimentu.

Cílem skupiny dr. Mikmekové na ÚPT AV ČR je mimo jiné odladění metalografických metod pro přípravu vzorků pro elektronový mikroskop. Tímto zařízením bude například možné na jedné sérii vzorků postupně měnit napětí elektrolytického leštění pro daný materiál a hledat tak jeho optimální hodnotu, zatímco všechny ostatní parametry zůstanou stejné. V dalším experimentu se může ověřovat závislost kvality povrchu na délce elektrolytického leštění při zachování ostatních parametrů. Takto se vytvoří databáze optimálních postupů pro jednotlivé kovové materiály, které se zkoumají, a při dalším zkoumání se toto nastavení jednoduše vyvolá z paměti do přístroje.

Možnost připravovat větší série s deterministicky určenou změnou parametrů poskytne potřebné množství kvalitních dat pro naučení umělé inteligence, která bude mít za úkol rozpoznání jednotlivých fází materiálů na základě snímku zrychleného snímání metodou EBSD. Pokud ale budeme mít dostatek kvalitních dat, je nepřehledné množství možností, co lze se strojovým učěním, potažmo umělou inteligencí dělat, a zdaleka se nemusíme spokojit pouze s jednou aplikací.

Následně interpretovaná data z umělé inteligence lze využít pro rychlé odladování výrobních procesů moderních kovových materiálů, jako jsou například TRIP ocele, případně nano-ocel.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

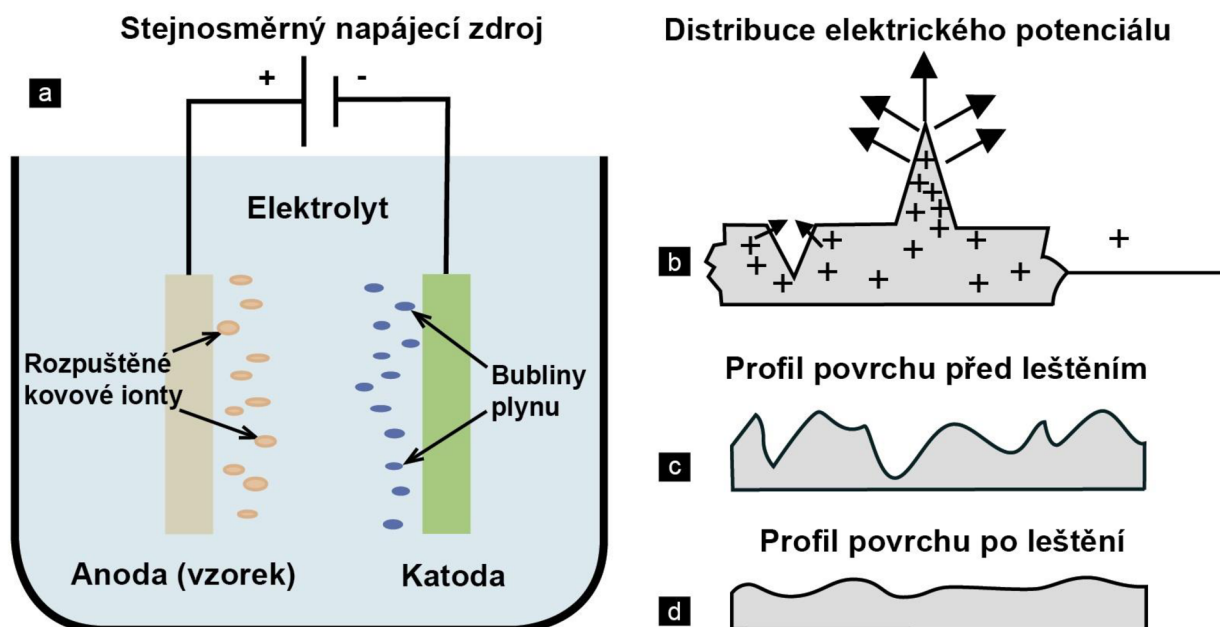
3.1 Elektrolytické leštění

Elektrolytické leštění (electropolishing), také známé jako elektrochemické leštění, je dokončovací metoda, při které je materiál odebírán z kovu nebo slitiny procesem anodického rozpouštění, kde vzorek (leštěná součást) figuruje v tomto procesu jako anoda. Touto metodou lze dosáhnout povrchu, který je vhodný pro metalografickou analýzu. [5] [6]

Elektrolytické leštění je ideální lešticí technika, protože během procesu se povrch vzorku nedeformuje v důsledku působení mechanických sil. Metoda svým principem dokonce odstraňuje většinu, případně celou část deformované vrstvy, která vznikla při mechanické přípravě vzorku. Další nespornou výhodou metody je vysoká produktivita, protože proces leštění trvá velmi krátkou dobu, obvykle 5 až 20 sekund. [6]

Princip elektrolytického leštění spočívá v odstraňování nerovností na vzorku iont po iontu. Vzorek je ponořený v tepelně kontrolované lázni elektrolytu a slouží jako anoda, která je připojena na kladný pól stejnosměrného napájecího zdroje. Záporný pól zdroje je připojen na katodu. Proud poté teče ve směru od anody ke katodě, díky čemuž dochází k odplavování jednotlivých iontů z povrchu vzorku. [5]

Nerovnosti mají vyšší potenciál než ploché oblasti, tudíž částice z nerovností jsou rozpuštěny dříve a povrch se vyhlazuje. Kontrolou podmínek elektrolytického článku můžeme nejdříve odstranit nerovnosti větších rozměrů (nad 1 μm), tj. proces „vyhlazování“ (smoothing), a pak probíhá proces „rozjasňování“ (brightening), který odstraní submikronové nerovnosti přibližně až na úroveň 0,01 μm . [6]

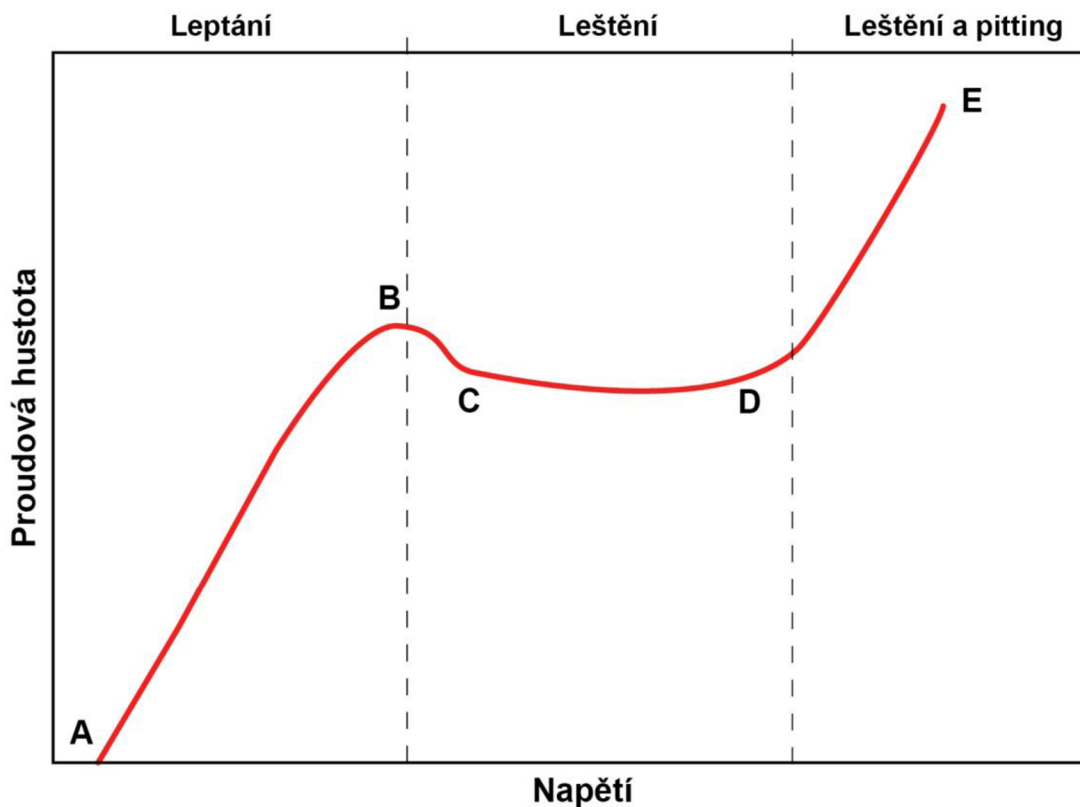


Obr. 1) a) sestava pro elektrolytické leštění, b) distribuce elektrického potenciálu, c) profil povrchu před leštěním, d) profil povrchu po leštění. [5][7]

Výsledná kvalita povrchu je závislá na mnoha proměnných, jako jsou následující:

- plocha povrchu, který má být leštěný,
- orientace vzorku v lázni
- orientace katody v lázni
- volba materiálu katody
- poměr velikosti povrchu katody ku velikosti povrchu anody
- vzdálenost mezi anodou a katodou
- hloubka vzorku pod povrchem roztoku
- složení vzorku, včetně nečistot
- stáří elektrolytické lázně a změna složení
- teplota lázně
- stupeň míchání lázně
- proudová hustota a napětí
- čas
- míra předchozího mechanického ošetření
- způsob vytahování vzorku z lázně
- metoda oplachování

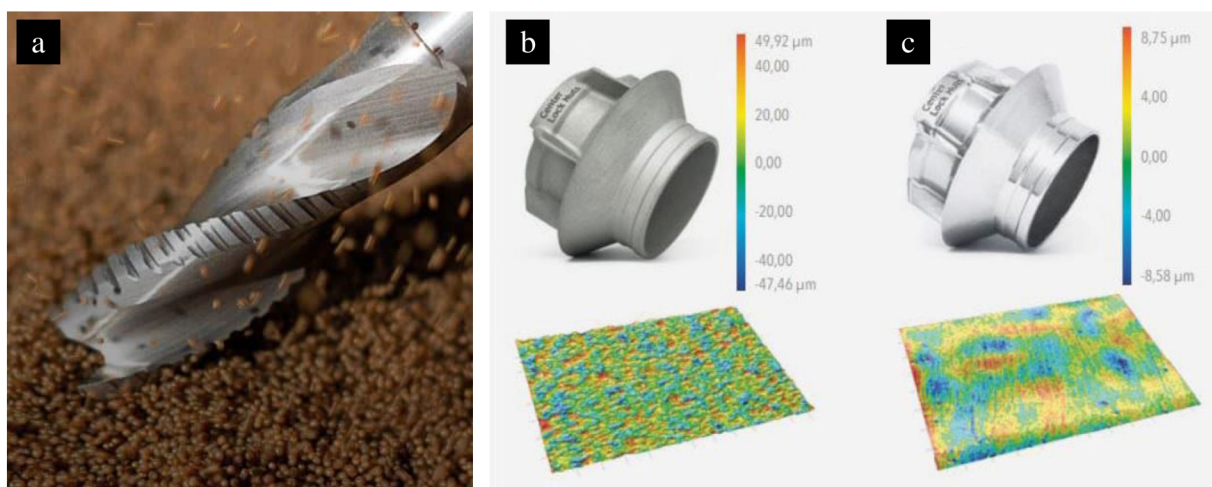
Provozní podmínky pro konkrétní kombinaci elektrolytu a materiálu vzorku lze vyhodnotit pomocí grafu proudové hustoty v závislosti na napětí. Na obr. 2 lze vidět schematicky znázorněný typický průběh závislosti proudové hustoty na napětí, kde v první části probíhá elektrolytické leptání (velký úběr materiálu za čas), v druhé části probíhá elektrolytické leštění a ve třetí probíhá elektrolytické leštění s výskytem pittingu. [2]



Obr. 2) Závislost proudové hustoty na napětí materiálu v elektrolytickém obvodu [2]

3.1.1 Suché elektrolytické leštění

Suchý elektrolyt se skládá z pevných elektricky vodivých porézních částic, které odvádí při procesu leštění z povrchu leštěné části kovové ionty a absorbují je do sebe (Obr. 3a). Součást zde funguje jako anoda, stejně jako u klasického elektrolytického leštění, jako katoda pak slouží například kovová nádoba, ve které je suchý elektrolyt nasypán. Velikost těchto částic se pohybuje od velikosti 0,1 mm do 1 mm. Čím menší průměr zrna, tím je výsledný povrch lesklejší a vhodnější pro díly s komplexní geometrií. Výhody suchého elektrolytu jsou především bezpečnost a do určité míry i ekologická šetrnost. Se suchým elektrolytem se manipuluje snadněji než s kapalným elektrolytem (většinou na bázi kyselin). V případě kontaktu kůže pracovníka se suchým elektrolytem jsou následky mnohem méně závažné než u kapalného elektrolytu. Protože se suchý elektrolyt neodpařuje tak jako kapalný, není potřeba zvláštní ventilace, která by tyto výpary odváděla. S tím souvisí další výhoda suchého elektrolytu, a to je možnost leštit některé materiály bez nutnosti téměř kryogenických teplot. Výpary z použitého kapalného elektrolytu vhodného pro materiál, jako je například titan, jsou totiž při pokojových teplotách hořlavé až výbušné. Nevýhoda z hlediska produktivity je u suchého elektrolytického leštění delší čas procesu, může to však být i výhoda z hlediska lepší říditelnosti procesu a rovnoměrnějšího vyleštění složitých součástí. Suché elektrolytické leštění je schopno dosáhnout průměrné drsnosti povrchu (R_a) 0,09 mikrometrů, v porovnání elektrolytické leštění s využitím kapalných elektrolytů je schopno dosáhnout drsnosti menší než 0,01 mikrometru (Obr. 3 b, c). [10][11]



Obr. 3) a) Suchý elektrolyt, b) Drsnost povrchu před suchým elektrolytickým leštěním, c) Drsnost povrchu po suchém elektrolytickém leštění. [11]

3.2 Elektrolytické leštičky

Elektrolytické leštičky jsou nenákladné, snadno použitelné a lze je najít v laboratořích, v malých výrobních podnicích, v galvanovnách, ve výrobě elektronického průmyslu a ve vysoce specializovaných a automatizovaných výrobcích.

Zařízení pro elektrolytické leštění můžeme rozdělit na:

- a) Laboratorní elektrolytické leštičky
- b) Průmyslové elektrolytické leštičky s nízkým stupněm automatizace
- c) Průmyslové elektrolytické leštičky s vysokým stupněm automatizace [12]

3.2.1 Laboratorní elektrolytické leštičky

Na trhu je k dispozici bezpočet laboratorních přístrojů pro elektrolytické leštění, jsou určeny buď pro přípravu metalografických vzorků, nebo pro leštění šperků a 3D tištěných kovových dílů. Jako typičtí zástupci, kteří ilustrují tuto kategorii, jsou více popsána zařízení QETCH 1000 a Struers LectroPol-5. Firmu Struers je možné považovat za jakýsi etalon přístrojů pro metalografii.

QETCH 1000 (Kristall 680) – automatická elektrolytická leštička



Obr. 4) QETCH 1000 (Kristall 680) – laboratorní elektrolytická leštička [13]

Tab 1) Parametry zařízení QETCH 1000 [13]

Napájení	2 kVA
Pracovní napětí	0–90 V \pm 0,1 V
Pracovní proud	0–14 A
Čas leštění	1 sek. – 25 min.
Čas leptání	1 sek. – 5 min.
Rozměry (Š x V x H)	330 x 220 x 400 mm (řídící jednotka), 216 x 320 x 280 mm (lešticí jednotka)
Váha	7 kg (řídící jednotka), 4 kg (lešticí jednotka)

Na Obr. 4) lze vidět laboratorní přístroj pro elektrolytické leštění. V popisu slibuje plnou automatizaci, ale jak lze vidět na obrázku, plná automatizace v tomto případě znamená, že po manuálním vložení vzorku a připojení kontaktu na vzorek proběhne elektrolytické leštění na základě programu v řídicí jednotce. Tyto programy (profily) jsou nastavené buď přímo od

výrobce, nebo si může uživatel vytvořit vlastní profily zadáním parametrů, jako je čas a napětí. Zařízení však umožňuje skenování funkcí pro zobrazení grafu proudové/napěťové charakteristiky, tudíž lze podle výsledné charakteristiky nastavit parametry jak pro leštění, tak pro leptání. Řídicí jednotku lze ovládat přes dotykový displej a data zálohovat na USB datový nosič. Dále řídicí jednotka umožňuje připojit až dvě lešticí/leptací jednotky. Chlazení elektrolytu je prováděno pomocí vody protékající chladicí spirálou. Plášť je vyroben z hliníkové slitiny a je povlakován plastem. [13]

Struers LectroPol-5



Obr. 5) Struers LectroPol-5 – laboratorní elektrolytická lešticí pro metalografii [14]

LectroPol-5 od firmy Struers je navržen pro automatické elektrolytické leštění a leptání metalografických vzorků, skládá se z řídicí jednotky a lešticí jednotky. Stejně jako předchozí zařízení disponuje automatickým skenováním funkcí pro určení parametrů různých materiálů, na kterých záleží, jestli bude probíhat leptání, pasivace, leštění nebo se objeví pitting povrchu. Lešticí udržuje konstantní teplotu elektrolytu během procesu pomocí chladicí spirály, kterou protéká voda nebo chladicí médium napojené na chladicí jednotku. Samotné elektrolytické leštění/leptání probíhá tak, že se na plastovou masku s otvorem položí vzorek, který se připojí k elektrolytickému článku pomocí páky s kontaktem nebo pomocí krokosvorky. Zařízení je pak ovládáno pomocí zabudovaného odolného tlačítkového panelu a displeje. [14]

Tab 2) Parametry zařízení Struers LectroPol-5 [14]

Napájení	1,2 kVA
Pracovní napětí	0–100 V (kroky po 1 V)
Pracovní proud	0–6 A
Rozměry (Š x V x H)	385 x 160 x 350 mm (řídicí jednotka), 220 x 160 x 350 mm (lešticí jednotka)
Váha	18 kg (řídicí jednotka), 6,3 kg (lešticí jednotka)

Tab 3) Tabulka srovnání laboratorních přístrojů dalších výrobců [14] až [24]

Název	Výrobce	Napětí [V]	Proud [A]	Poloha vzorku*	Provozní teplota [°C]	Chlazení
KRISTALL 680	ATM	0–90 (krok 0,1 V)	0–14	H	–	H2O
ELOPREP 102	KEMET	0–120	–	H	30–50	H2O
ELECTRO-P	Echo-Lab	0–60 (krok 1 V)	0–25	H	0–30	–
Polisec C25	PRESI	0–100	0–10 / 0–20	H	-80–80 -80–10 -90 až -30	Chladicí medium ve spirále
Polimat 2	BUEHLER	0–60 // 0–120	0–20 (0–60 V) / 0–10 (0–120 V)	H	0–38	H2O
LectroPol-5	STRUERS	0–100 (krok 1 V)	max. 6 A	H	–	H2O

Název	Podpora nízkých teplot	Míchání	Materiál katody	Velikost a tvar vzorku	Masky	Automatizace
KRISTALL 680	X	Bezkontaktní pumpa	–	Max. výška 50 mm, potom krokosvorky	0,5/1,5/2,5/5 cm ²	X
ELOPREP 102	✓	Magnetická míchačka	Nerezová ocel, měď, titan	Max. výška 35 mm	0,5/1,5/2,5/5 cm ²	X
ELECTRO-P	–	–	–	–	ø 10 až 40 mm	X
Polisec C25	✓	Oběhová pumpa	Nerezová ocel	–	–	X
Polimat 2	X	Pumpa	Nerezová ocel	Až několik cm	1/2/10 cm ²	X
LectroPol-5	✓	Magnetická míchačka	–	S přídatným ramenem až 10 cm	0,5/1/2/5 cm ²	X

*Horizontální

Limity laboratorních zařízení pro elektrolytické leštění

Přestože samotný proces elektrolytického leštění je u metalografických zařízení zvládnutý na automatické úrovni, vše mimo tento proces je ponecháno na laboratorním technikovi. Samotné umístění vzorku na masku není mnohdy z technologických důvodů ideální, a tak není zaručena planparalelita s katodou.

Dalším faktorem omezující kvalitu povrchu je absence automatického oplachu a sušení vzorku. Ačkoliv délka samotného leštění se dá nastavit na řídicí jednotce, po skončení tohoto procesu na vzorku ulpívají zbytky elektrolytu, který vzorek dále leptá. Proto musí být laboratorní technik připravený těsně po procesu vzorek opláchnout v oplachové lázni a následně osušit například pod horkovzdušnou pistolí, ofouknout argonovým plynem nebo umístit do pece. Všechny tyto operace zanáší do procesu proměnné, které brání opakovatelnosti a snižují kvalitu povrchu, na které jsou obzvláště závislé některé metody analýzy pozorování v elektronovém mikroskopu, jako je například analytická metoda EBSD.

Kvalitu vzorku také ovlivňuje jeho orientace v prostoru. Kvůli unikajícímu plynu s nízkým tlakem z katody, který vzniká při elektrolýze, je ideální, aby leštěný povrch vzorku směřoval vzhůru, jinak mohou tyto bublinky způsobovat mikrokavítace na výsledném povrchu vzorku.

V neposlední řadě může kvalitu procesu ovlivňovat materiál katody. Jelikož jsou pro různé materiály doporučována různá složení elektrolytů, mohou být tyto elektrolyty zvláště agresivní vůči některým materiálům katod. Jak lze vidět v tabulce 3 (tabulka srovnávající různé elektrolytické leštidla), většina výrobců se spoléhá na katodu z nerezové oceli, kterou nelze vyměnit jednoduše mezi procesy. Výrobci se tudíž uchylují k omezení materiálů, které lze elektrolyticky leštit, a nabízí svoje elektrolyty, které nepoškodí katodu, nebo dokonce nádobu, ve které je elektrolyt nalitý.

3.2.2 Automatizace průmyslového elektrolytického leštění

Podobně jako u laboratorních zařízení je i mnoho průmyslových elektrolytických leštidel pouze poloautomatizovaných, což znamená, že manipulace se součástími je řízena operátorem. Operátor obvykle pomocí tlačítek nebo dotykové obrazovky součást navádí mezi jednotlivými procesy, kde je díl zpracován automaticky, ale mnoho prvků dílu stále vyžaduje do určité míry manuální zásah. Oproti tomu automatické systémy mohou poskytovat kompletně automatizovanou bezkontaktní manipulaci s produktem, řízení složení elektrolytické lázně nebo řízení teploty. [12]



Obr. 6) a), b) Příklad poloautomatické linky pro elektrolytické leštění [42]

Automatizované linky snižují cenu práce, zvyšují opakovatelnost, umožňují digitální záznam řízení procesu a toku materiálu bez nutnosti označování dílu pomocí gravírování nebo lisování.

Manipulace se součástmi v rámci elektrolytického leštění zahrnuje dva samostatné problémy:

- Manipulaci napříč kroky elektrolytického leštění
- Zakládání a odebrání součástí do a z přípravků, cívek, nebo do nosičů, tak aby díly mohly být ponořeny do elektrolytické lázně, případně oplachových lázní.

Automatizace transportu částí mezi lázněmi obecně používá tři přístupy: rotační (radiální) systémy, systémy cívka-cívka, přímočaré (lineární) systémy. Roboty jsou běžně užívány právě pro takový transport dílů, nicméně jsou limitovány pouze na operaci zakládání a odebrání součástí, protože kyseliny a jiné procesní kapaliny by mohly poškodit části robotu. [12]

Technic MP500



Automatizovaný rotační systém elektrolytického leštění s vysokou propustností máčených dílů může být přizpůsobený pro různorodé díly vyžadující elektrolytické leštění, ostření a odjehlování. Vhodný je především pro výrobu lékařské techniky, kde zaručuje přesnost a opakovatelnost. Je to samostatně stojící stroj, ovládaný a monitorovatelný přes dotykovou obrazovku.

Může být doplněn moduly s technologií robotického zakládání, přípravky, nádržemi, nástroji a řízením, tudíž je vhodný i pro práci ve výrobních buňkách.

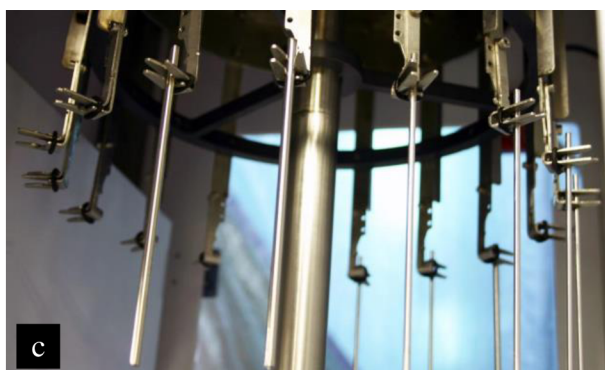
Je vhodný pro nerezové oceli, Monel®, Hastelloy®, titan a podobné kovy.

Díly mohou být velké od řádů milimetrů až do 18,5 cm². [41]

a



b



c

Obr. 7) a), b), c) Ukázka rotačního elektropolišingového stroje Technic MP500 [41]

Technic Medi1500

Uzavřený laterální transportní systém pro elektrolytické leštění umožňuje různorodé aplikace pro medicínskou výrobu, jelikož zaručuje vyšší flexibilitu než rotační systém. Jedná se o zástupce přímočarého systému. S díly určenými pro leštění manipuluje dvojosý manipulátor, který postupně namáčí díly pověšené na háku do lineárně poskládaných van s oplachovacím médiem, resp. elektrolytem. Tyto kapaliny jsou skladovány v nádržích a jsou automaticky doplňovány do máčecích van. Uzavřená konstrukce dovoluje veškeré výpary z procesu odvádět z prostoru obsluhy.

Systém má tyto vlastnosti:

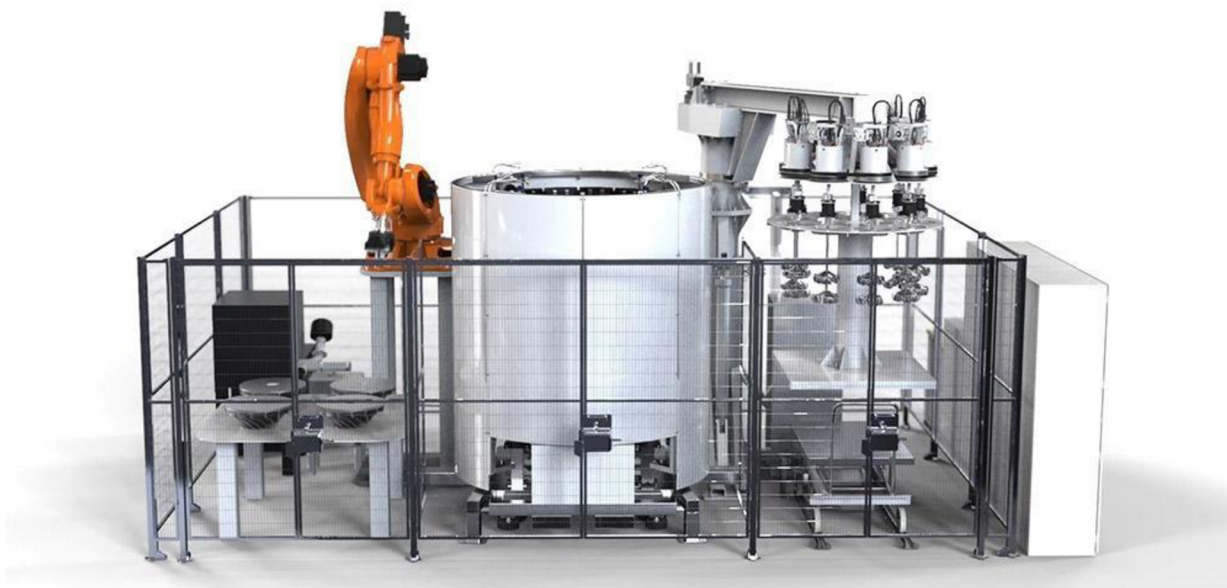
- modulární konstrukci
- je vyrobený z korozi odolných materiálů
- stroj je navržen tak, aby při oplachování šetřil vodou
- sbírá data o procesu
- vyhřívání párou nebo elektřinou
- snadný provoz a obsluha
- opakovatelné výsledky
- minimalizace odpadu [43]



Obr. 8) Technic Medi1500 [43]

DLyte 10 000

DLyte 10 000 je modulární zařízení pro suché elektrolytické leštění, který může být plně integrován do výrobní linky a nabízí vysokou produktivitu díky vysokému stupni automatizace. Robotizovaná buňka je vybavena rotační nádrží se suchým elektrolytem o objemu 1200 litrů.



Obr. 9) DLyte 10 000 – robotizovaná buňka průmyslového elektrolytického leštění [10]

Nádrž je opatřena vibračním systémem. Rychlost otáčení nádrže je 6 rpm. Průměr nádrže je 1330 mm a její výška 850 mm. Robotické rameno slouží pro složité a velké geometrie, jeho nosnost je 100 kg a maximální velikost leštěné součásti je 750 × 500 × 500 mm. Pro masovou produkci je v buňce umístěn jeřáb, který může najednou nést až 200 součástí do velikosti 50 × 50 × 50 mm. Maximální nosnost jeřábu je 1000 kg. Buňka je vybavena bezpečnostními prvky, jako je bezpečnostní oplocení nebo automatické zastavení stroje při otevření dveří. [10]

Limity automatických systémů pro elektrolytické leštění

Automatizované linky a jednoúčelové stroje se zaměřují především na velkoprodukční výrobu, kde se nepočítá s velkou variabilitou dílů. Na výsledný povrch takto zpracovaných součástí nejsou kladeny tak vysoké nároky jako na metalografické vzorky, zvláště potom na ty vzorky, které jsou určeny pro elektronovou mikroskopii. Ačkoliv systémy jako je Technic Medi1500, umožňují vyšší flexibilitu procesu tím, že lze přenastavit dráhu manipulátoru, a tak například součásti namáčet v různých vanách s různými elektrolyty v závislosti na materiálu součásti. Nevýhodou těchto systémů je nutnost skladování velkého množství nebezpečných látek a manipulace s nimi. Otevřené vany s těkavými kapalinami přináší problémy s jejich zpracováním, případně s výbušností a korozivností těchto par. Tento problém částečně řeší suché elektrolyty pro průmyslové elektrolytické leštění, avšak jejich omezení je zase nižší kvalita povrchu na submikronové úrovni. Stejně jako u komerčně dostupných laboratorních zařízení jsou tyto automatizované stroje pro elektropolišing z principu omezeny na zpracování pouze některých materiálů s doporučením některých leptadel.

3.2.3 Prototyp experimentálního zařízení pro elektrolytické leštění

Na Ústavu přístrojové techniky AV ČR vznikl z důvodu potřeby opakovatelnosti procesu elektrolytického leštění prototyp experimentálního zařízení pro elektrolytické leštění a leptání metalografických vzorků určených pro analýzu v elektronovém mikroskopu. Opakovatelnost procesu zajišťuje 5-osé robotické rameno. Rameno je připevněno ke konzole, která zajišťuje přesnou vzájemnou konfiguraci ramena a zbytku zařízení. Jako koncový efektor slouží držák metalografického vzorku, který je vytištěný na 3D tiskárně z chemicky odolného materiálu PEEK. Držák zajišťuje rovnoběžnost anody (vzorku) a katody. Skládá se ze spodního dílu držáku, kde je vodivě upnutý vzorek, a vrchní části, kde je vodivě upnutá katoda. Spodní část vzorku lze snadno z držáku sejmut a vzorek tak pohodlně upnout na stole. Po nasazení spodní části držáku k vrchní části lze nastavovat vzdálenost mezi vzorkem a katodou podle nastavení experimentu. Elektrolyt je umístěn v kádince, která je zasazena do krycí masky z keramického skla ležícího na ultrazvukové čističce. Během procesu elektrolytického leštění zajišťuje promíchávání a odstraňování plynů z elektrolytu ultrazvuková leštička při frekvenci 35 nebo 80 kHz. V dalších slotech masky jsou umístěny kádinky s oplachovou kapalinou. Celá ultrazvuková čistička je připevněna ke konzoli. Z důvodu bezpečnosti obsluhy je robotické rameno s lázní umístěno v boxu s PET-G, který je vybaven přírubou pro připevnění hadice pro odtah výparů z procesu. Z boku boxu je umístěna příruba, do které lze vložit horkovzdušnou pistoli pro automatické sušení vzorku. Na zadní vnější straně boxu je umístěna řídicí jednotka robotického ramene a konektorový panel. Do tohoto panelu jsou přivedeny vodiče z laboratorního programovatelného stejnosměrného zdroje (0–160 V, 0–14 A, 720 W), dále jsou přes konektorový panel připojeny tři multimetry, které slouží pro měření napětí, proudu a teploty při procesu leštění. Tyto hodnoty

jsou čteny a zaznamenávány pomocí LabView v pracovním notebooku. Přes programovací prostředí xArm se v notebooku také vytváří a spouští program robotického ramena. Celá sestava zařízení je umístěna na dílenském vozíku z důvodu omezených prostor v metalografické laboratoři a nutnosti toto zařízení skladovat jinde.



Obr. 10) Prototyp experimentálního zařízení pro elektrolytické leštění, vlevo 3D model aparátu, vpravo realizovaný prototyp

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

Pro určení klíčových vlastností návrhu automatizovaného procesu elektrolytické leštičky, který slouží pro přípravu vzorků pro elektronový mikroskop, je třeba nejdříve definovat metalografický vzorek pro zkoumání v elektronovém mikroskopu. Dále je třeba analyzovat samotný proces elektrolytického leštění a z toho plynoucích omezení pro konstrukci. Určit se také musí všechny přidavné operace, které elektrolytickému leštění předchází, případně na leštění navazují, a také popsat variabilitu přidavných operací v závislosti na nastavení experimentu. Dalším faktorem určujícím konstrukci jsou prostory, kde má být zařízení provozováno a v neposlední řadě je velmi důležitým faktorem pro návrh cena.

4.1 Metalografický vzorek pro analýzu v elektronovém mikroskopu

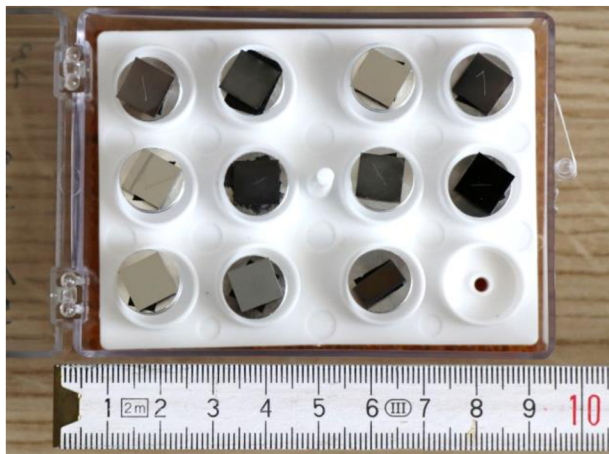
Ve skupině Mikroskopie pro materiálové vědy oddělení Elektronové mikroskopie Ústavu přístrojové techniky AV ČR se využívají pro pokročilé zkoumání metalografických vzorků tato zařízení: vysokorozlišovací rastrovací elektronový mikroskop MAGELLAN 400L od firmy FEI (dnes Thermo Fisher Scientific), na ÚPT vyvinutý Ultra-vysoko vakuový elektronový mikroskop („Mamut“), případně pro tvorbu tenkých lamel pro transmisní elektronovou mikroskopii (TEM) elektronový mikroskop FIB-SEM Helios od firmy Thermo Fisher Scientific.

4.1.1 Velikost a tvar vzorku

Všechna tato zařízení potřebují z principu pro správné pozorování vzorku vysoké vakuum. Z toho plyne, že je výhodné, aby velikost pozorovací komory byla omezená (čím větší komora, tím déle trvá, než se dosáhne správné hladiny vakua). Pro urychlení výměny vzorků se k elektronovému mikroskopu přidává modul předkomory. Tato předkomora je vlastně jednocelový manipulátor, do kterého se založí vzorky, většinou na nosiči vzorku pro SEM (Obr. 11), a po uzavření předkomory se vyvakuuje pouze její obsah. Po dosažení dostatečného vakua se z předkomory vzorek na nosiči zavede do pozorovací komory. Běžně používaný nosič vzorku FEI má v průměru 12,7 mm a tloušťku 3,15 mm. Z toho plyne velikost standardně připravovaných metalografických vzorků, jejichž rozměry se pohybují kolem 8x8 mm s tloušťkou do 5 mm. Avšak tvar vzorků není přesně geometricky definován z důvodu manuálního upínání a nastavení dělicí pily při řezání polotovaru. Velikost vzorků se může lišit v řádu milimetrů a jejich tvar odpovídá nepravidelnému čtyřhranu (vizte Obr. 12). Polotovar vzorku je velmi různorodý, může to být plech, svařenec, tyčovina, drát, odlitek a další. Hmotnost vzorku se pohybuje v řádu jednotek gramů (hmotnost průměrného vzorku, který lze vidět na obrázku, byla 0,6 g).



Obr. 11) Nosič vzorku pro SEM [40]



Obr. 12) Fotografie typických metalografických vzorků pro SEM

4.1.2 Materiál vzorku

Skupina Mikroskopie pro materiálové vědy na ÚPT AV ČR se v poslední době zabývá především zkoumáním vysokopevnostních heterogenních ocelí určených do automobilového průmyslu, jako je např. TRIP steel nebo MILD steel. Není však výjimkou, že přijde zadání na zkoumání niklo-chromových superslitin, jako je INCONEL, nebo hliníkových slitin, vzácně čistého hliníku, měděných slitin, případně čisté mědi. Běžné zadání také obsahuje přípravu vzorků heterogenních svarů, tudíž vzorek může obsahovat i více materiálů najednou. Každý materiál má svoje specifika při přípravě vzorku, a to již od mechanické přípravy (je třeba volit různě tvrdé pryskyřice, různé brusné pasty v závislosti na charakteristice vzorku atd.). Nejdůležitější proměnná, která nás zajímá z hlediska systémového rozboru pro návrh automatizovaného procesu elektrolytického leštění, jsou však elektrolyty. V závislosti na materiálu vzorku jsou doporučovány desítky různých elektrolytů (vizte tabulku vybraných elektrolytů, Tab 4).

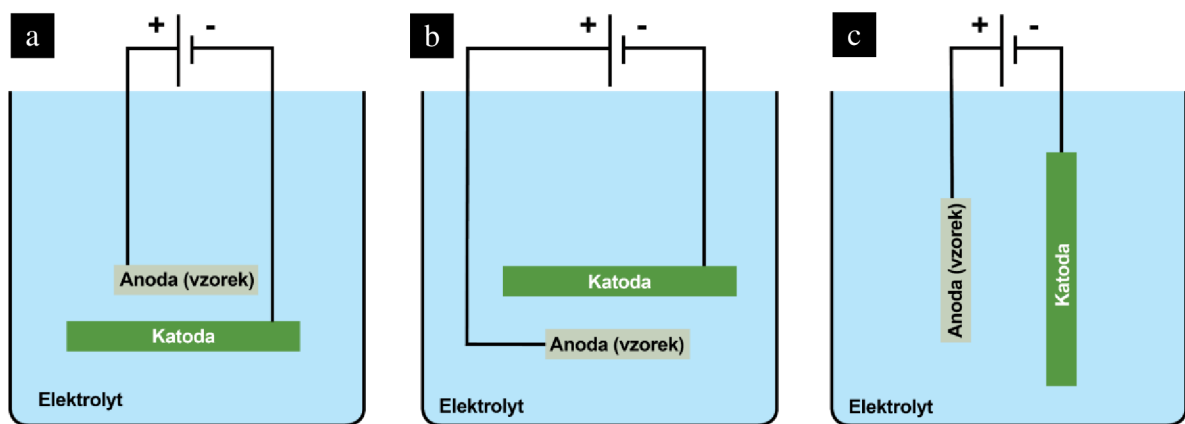
Tab 4) Tabulka vybraných elektrolytů [25]

Kategorie	Složení	Použití	Napětí článku	Čas
Skupina I: Elektrolyty obsahující HClO₄				
I-2	800 ml ethanol (absolutní), 200 ml HClO ₄ (60%)	Nerezová ocel, hliník	35–80	15–60 s
I-4	700 ml ethanol (absolutní), 120 ml H ₂ O, 100 ml 2-butoxyethanol, 80 ml HClO ₄ (60%)	Ocel, litina, hliník a slitiny, nikl, cín, stříbro, titan...	30–65	15–60 s
I-10	950 ml methanol (absolutní), 15 ml HNO ₃ , 50 ml HClO ₄ (60%)	Hliník	30–60	15–60 s
Skupina II: Elektrolyty obsahující HClO₄ (60%) a ledovou kyselinu octovou				
II-1	940 ml kyseliny octové, 60 ml HClO ₄	Chrom, titan, uran, zirkon, železo, litina, uhlík, nerezová ocel	20–60	1–5 min
II-4	700 ml kyseliny octové, 300 ml HClO ₄	Nikl, olovo, slitiny olova a antimonu	40–100	1–5 min
Skupina III: Elektrolyty obsahující H₃PO₄ (85%) ve vodě nebo organickém rozpouštědle				
III-1	1000 ml H ₃ PO ₄	Kobalt	1,2	3–5 min
III-5	1000 ml H ₂ O, 580 g H ₄ P ₂ O ₇ (kyselina pyrofosforečná)	Měď, měď-zinek	1–2	10 min
III-6	500 ml diethylenglykol monoethylether, 500 ml H ₃ PO ₄	Ocel	5–20	5–15 min
Skupina IV: Elektrolyty obsahující H₂SO₄ ve vodě nebo organickém rozpouštědle				
IV-1	250 ml H ₂ O, 750 ml H ₂ SO ₄	Nerezová ocel	1,5–6	1–2 min
IV-5	70 ml H ₂ O, 200 ml glycerol, 720 ml H ₂ SO ₄	Nerezová ocel	1,5–6	0,5–5 min
Skupina V: Elektrolyty obsahující CrO₃ ve vodě				
V-1	830 ml H ₂ O, 620 g CrO ₃	Nerezová ocel	1,5–9	2–10 min
Skupina VI: Elektrolyty obsahující smíchané kyseliny se soli ve vodě nebo organickém rozpouštědle				
VI-1	600 ml H ₃ PO ₄ (85%), 400 ml H ₂ SO ₄	Nerezová ocel	–	–

VI-9	260 ml H ₂ O, 175 g CrO ₃ , 175 ml H ₃ PO ₄ (85%), 580 ml H ₂ SO ₄	Nerezová ocel	–	30 min
VI-14	800 ml H ₂ O, 100 g CrO ₃ , 46 ml H ₂ SO ₄ 310 g dichroman sodný, 96 ml ledová kyselina octová	Zinek	–	–
VI-20	885 ml ethanol (absolutní), 100 ml n-butyl alkohol, 109 g AlCl ₃ · 6 H ₂ O (hydratovaný chlorid hlinitý), 250 g ZnCl ₂ (chlorid zinečnatý) (bezvodnatý)	Titan	30–60	1–6 min
Skupina VII: Alkalické elektrolyty				
VII-1	Voda do 1000 ml, 80 g KCN (kyanid draselný), 40 g K ₂ CO ₃ (uhličitan draselný), 50 g, AuCl ₃ (chlorid zlatitý)	Zlato, stříbro	7,5	2–4 min
VII-4	Voda do 1000 ml, 160 g Na ₃ PO ₄ · 12 H ₂ O (fosforečnan trisodný)	Wolfram	–	10 min
Skupina VIII: Elektrolyty obsahující methanol a HNO₃				
VIII-1	600 ml methanol (absolutní), 300 ml HNO ₃	Nikl, měď, zinek, bronz, nerezová ocel, monel, niklchrom	40–70	10–60 s

4.1.3 Orientace vzorku

V průmyslové praxi je běžné, že leštěná část slouží jako anoda a jako katoda slouží samotná vana z nerezové oceli, případně síťka z chemicky odolné slitiny. Pokud se součást elektrochemicky leští z důvodů estetiky nebo zvýšené chemické odolnosti vzniklého povrchu, je tento postup zcela dostačující, dokonce jediný možný, pokud chceme součást s prostorovou geometrií vyleštit ze všech stran. U přípravy metalografických vzorků se leští především jedna plochá strana, opačná strana se totiž přilepí k nosiči vzorku pro SEM. Pozorovaná strana vzorku musí být navíc ideálně co nejvíce plochá, protože elektronový mikroskop má nízkou hloubku ostrosti a při pokročilých metodách analýzy, jako je například EBSD, se vzorek pozoruje pod ostrým úhlem a každá nerovnost na povrchu vrhá „stín“. Proto by leštěná plocha vzorku měla být rovnoběžná s plochou katody. Tato vzájemná poloha nám v prostoru nabízí tři orientace. Vzorek nahoře – katoda dole, vzorek dole – katoda nahoře, vzorek a katoda vertikálně orientovány (Obr. 13).



Obr. 13) Orientace vzorku a katody a) vzorek nahoře, katoda dole, b) vzorek dole, katoda nahoře, c) vzorek a katoda vertikálně orientovány

Vzorek nahoře – katoda dole

Tato konfigurace umožňuje snadnější provedení procesu, k vzorku je přiveden vodič ze zdroje a katoda je permanentně umístěna v nádobě s elektrolytem. Elektrický obvod může být neustále sepnutý, protože proud probíhá pouze při ponoření vzorku do elektrolytu. Při oplachování vzorku nehrozí, že by oplachová kapalina vytvořila vodivé médium mezi elektrodami. Nevýhodou této konfigurace je, že při elektrolýze vznikají na katodě bublinky plynu, které unikají směrem vzhůru, směrem ke vzorku. Při kontaktu s povrchem vzorku bublinka plynu s nízkým tlakem může povrch poškodit kavitací.

Vzorek dole – katoda nahoře

Tato konfigurace přináší lepší kvalitu povrchu, protože produkty elektrolýzy unikají směrem od vzorku. Nicméně provedení procesu je náročnější, protože se manipulovaný vzorek musí dostat pod katodu. Kvůli tekutému elektrolytu není však možné najet zespodu, což se musí vyřešit například držákem, do kterého jsou zakomponovány obě elektrody. V tomto případě musíme řešit automatické zapínání a vypínání elektrického obvodu v závislosti na prováděné operaci.

Vzorek a katoda vertikálně orientovány

Tato konfigurace umožňuje snadné provedení procesu jako u varianty Vzorek nahoře – katoda dole, ale netrpí negativy poškozování povrchu bublinkami plynu vznikajícími na katodě. Nicméně pokusy ukazují, že leštěný povrch není rovnoměrně vyleštěný z důvodu nerovnoměrného odvádění kovových iontů od vzorku.

4.2 Postup elektrolytického leštění

Proces elektrolytického leštění probíhá různě u průmyslového leštění a jinak u laboratorních metalografických leštiček. U průmyslových leštiček se většinou součást zanořuje do vany s elektrolytem a tím se propojuje elektrolytický obvod. U metalografických leštiček vzorek leží na masce s otvorem a je připojen pomocí ramena s elektrickým kontaktem nebo krokosvorkou. Následně elektrolyt tryská na vzorek přes masku s otvorem. Větší součásti mohou být částečně ponořené v elektrolytu a rameno s elektrickým kontaktem je umístěno na neponořenou část.

Tím zajišťují promíchávání elektrolytu a dostatečný odvod produktů elektrolýzy od leštěného vzorku. Toto míchání je v procesu elektrolytického leštění důležitý faktor, protože bez míchání elektrolytu se může kolem vzorku vytvořit tenký film z kovových iontů a dalších produktů elektrolytického leštění, který brání řízenému odvodu materiálu z povrchu, případně může povrch poškozovat leptáním, kontaminovat ho atd.

4.2.1 Míchání elektrolytu můžeme zajišťovat více způsoby:

- a) Prouděním elektrolytu – bezkontaktní pumpa vytváří proudění elektrolytu v uzavřeném okruhu, například z hlavní nádržky do lešticí komory a z komory zpět do hlavní nádržky. Pokud je do hlavní nádržky umístěná chladicí spirála, případně je hlavní nádržka chlazená zvenčí, obtok elektrolytu zajišťuje chlazení.
- b) Elektromagnetické míchání – na dně nádobe s elektrolytem leží magnetické míchadélko (např. neodymový magnet potažený teflonem), pod nádobou je umístěná elektromagnetická smyčka a míchadélko je roztáčeno jako rotor elektromotoru.
- c) Mechanické míchání – do nádoby s elektrolytem je umístěna vrtulka, která zajišťuje pohyb kapaliny
- d) Ultrazvukové míchání – nádoba s elektrolytem je umístěná do ultrazvukové lázně a míchání je zaručeno mechanickým vlněním s vysokou frekvencí, tento způsob míchání brání vytváření filmu z produktů elektrolýzy u povrchu vzorku.

Důležitou součástí mokrého elektrolytického leštění je chlazení elektrolytu. Při leštění materiálů, jako je titan nebo wolfram, je nutné elektrolyt chladit na hluboké minusové teploty (-20 až -40 °C). Některé směsi elektrolytů jsou totiž při pokojové teplotě hořlavé, až výbušné, navíc při samotném procesu elektrolýzy vzniká teplo, tudíž se elektrolyt ohřívá. Případně si to vyžaduje samotná fyzika procesu. Toto chlazení elektrolytu může probíhat různými způsoby:

- a) Chladicí spirála s vnějším okruhem – chladicí spirálou protéká chladicí médium, které proudí z chladicí jednotky na principu výměníku tepla. Některé jednotky, např. Lauda RP890, jsou schopny uchládit médium až na teplotu kolem -90 °C. Chlazení na takovou teplotu však trvá dlouho (120 min) a cena takové jednotky se pohybuje kolem půl milionu korun.
- b) Vychlazení elektrolytu v hlubokomrazicím boxu – před leštěním je možné příslušný elektrolyt předchladit v hlubokomrazicím boxu. Existují boxy, které jsou schopny provozní teploty -80 °C. Toto řešení je možné, protože samotné leštění probíhá v řádu sekund. Nádobu s elektrolytem je navíc možné uložit do nádoby se suchým ledem nebo předchlazeným propylenglykolem.

- c) Přikapávání tekutého dusíku do elektrolytu – tento způsob dochlazování je vhodný především s předchozí variantou b). Elektrolyt je předchlazený z hlubokomrazicího boxu a pomocí přikapávání tekutého dusíku se udržuje konstantní teplota.

4.2.2 Přídavné operace k elektrolytickému leštění

Pro automatizaci laboratorního metalografického procesu elektrolytického leštění je třeba popsat i operace, které samotnému elektrolytickému leštění předchází, nebo na ně naopak navazují.

Ať už u průmyslových nebo laboratorních elektrolytických leštiček začíná postup umístěním součásti. V případě průmyslových zařízení se součásti připevňují na vodivý hák a následně na měděnou pásovinu. Pokud je součást trubkovitého tvaru, menších rozměrů a leští se vnější povrch, navlékne se součást na vodivou pružinu, která slouží zároveň jako nosná část i jako připojení k elektrolytickému elektrickému obvodu. Možné jsou i různé vodivé držáky, přípravky nebo upínky. U laboratorních leštiček se vzorek umísťuje leštěnou plochou dolů na masku s otvorem a z vrchu se přiloží vodivé rameno nebo se na vzorek připne krokosvorka. V laboratorních podmínkách se také používá postup, že se vzorek chytí do speciálních kleští s připevněným vodičem a vloží se do vodivé nádoby s elektrolytem, ke které je připojen vodič druhého pólu elektrolytického článku (vizte obrázek 14).



Obr. 14) Laboratorní aparatura pro elektrochemické leštění [13]

Po upnutí součásti (vzorku) se v průmyslovém procesu před samotným leštěním nejdříve provádí odmašťování a oplach. Při přípravě metalografického vzorku se tento krok vypouští, protože vzorek byl odmaštěn a opláchnut po vyjmutí z metalografické pryskyřice na konci procesu mechanického leštění.

Následuje proces elektrolytického leštění, tento krok byl podrobně rozebrán v předchozí kapitole.

Po leštění je nutné vzorek co nejrychleji opláchnout od elektrolytu, jelikož ze závislosti proudové hustoty a napětí je zřejmé, že elektrolyt bez elektrického proudu leptá, čímž by se poškozoval vyleštěný povrch vzorku. Tento oplach se provádí většinou v organických rozpouštědlech, jako ethanol, methanol, izopropylalkohol, aceton, toluen a další. Nejvýhodnější je provádět tento oplach za působení ultrazvukové čističky. V průmyslové sféře se součásti pak oplachují vodou nebo vodní párou, pro pozorování v elektronovém mikroskopu není oplach u železných a ocelových vzorků vhodný z důvodu vzniku mikrovrstev hydratovaného oxidu železitého (rzi). Tato vrstva rzi vzniká již působením vzdušné vlhkosti.

Po oplachu je nutné z metalografického vzorku co nejdříve odstranit oplachovou kapalinu, protože pokud by na povrchu usychala samovolně, kontaminovala by povrch vysráženými uhlovodíky, které by znemožnily pozorování. Odstranění oplachového média lze provést různými způsoby: např. ofouknutím vzduchem, lépe argonem nebo dusíkem, případně odpařením ve vakuu za zvýšené teploty, umístěním do pece s teplotou okolo 100 °C nebo usušením pod úhlem horkovzdušnou pistolí. [26]

Nakonec se v ideálním případě připravený vzorek po odepnutí z držáku ihned umístí do nádoby s inertní atmosférou, případně do vakuové nádoby.

4.3 Prostorové zadání a požadované rozměry

Navržené zařízení se bude používat v metalografické laboratoři, která se nachází v suterénu Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Laboratoř sestává ze dvou místností o velikosti 3x5 m. Z kapacitních důvodů není možné zde postavit například pevnou robotickou buňku s opločením. Výhodné by bylo pro současnou situaci, aby lešticí aparatura byla mobilní, tak aby bylo možné ji v případě nutnosti uskladnit mimo laboratoř. Tento požadavek určuje maximální rozměry zařízení: výška 1900 mm, šířka 1500 mm, hloubka 700 mm.

4.4 Hmotnost

Velikost připravovaných metalografických vzorků pro elektronovou mikroskopii se odvíjí od velikost držáků pro vzorky, tj. průměr 10 mm až 30 mm. Tloušťka vzorků může být maximálně 5 mm. Z jednoduchého fyzikálního vzorce pro hmotnost válce

$$m = V \times \rho = \pi \times r^2 \times v \times \rho, \quad (1)$$

kde m je hmotnost, V objem, ρ je hustota, r je poloměr a v je výška,

můžeme vyvodit maximální hmotnost vzorku (v případě vzorku z prvku s nejvyšší hustotou, jako je iridium – 22,562 g/cm³). To je $m = \pi \times 1,5^2 \times 5 \times 22,562 \cong 797$ g. Hmotnost vzorku z běžně zkoumané oceli s hustotou 7,85 g/cm³ by byla maximálně 277 g. Celková hmotnost držáku (spodní i horní části) je cca 230 gramů. Statická nosnost manipulačního zařízení by tudíž měla být v extrémním případě 1027 gramů. Avšak při běžně zkoumaných vzorcích, kde vzorek má hmotnost v řádu jednotek gramů, by statická nosnost manipulačního zařízení měla být do 250 g.

4.5 Cena

Klíčovým faktorem pro návrh jakéhokoliv zařízení je samozřejmě cena. Vývoj tohoto zařízení je hrazen z projektu veřejné vědecké instituce, která má určitá pravidla. Například dílčí podsystém zařízení nesmí být dražší než 40 tisíc Kč s DPH (platné v roce 2020). Jednotlivé subsystemy musí být použitelné zvlášť, tak aby vzájemně netvořily neoddělitelný funkční celek. Do hodnoty zařízení se tudíž nepočítají měřicí přístroje, které se dají použít samostatně.

5 NÁVRH A ZDŮVODNĚNÍ ŘEŠENÍ

Z výše popsaného rozboru problematiky vyplývá, že řešení automatizovaného procesu elektrolytické leštičky pro přípravu metalografických vzorků určených k pozorování v elektronovém mikroskopu se nabízí toto: Všechny potřebné subsystémy pro automatizovanou operaci umístit do konstrukce z hliníkových profilů, která kvůli potřebě přemístování bude vybavena kolečky s aretací polohy. Do této konstrukce bude zabudován rozvaděč s PLC pro řízení manipulačního zařízení pro vzorky, s IPC pro ovládání procesu, zpracování a vizualizace dat, dále na průmyslovém počítači v rozvaděči bude nainstalováno LabView pro ovládání NI-DAQ, rovněž umístěného v rozvaděči. Na výklopném rameni budou umístěny ovládací prvky PC. Dále bude v konstrukci zabudován zdroj stejnosměrného napětí potřebný pro proces elektrolytického leštění a chemicky odolný ventilátor určený do výbušného prostředí, který bude sloužit pro odtažení výparů z chemických sloučenin potřebných pro proces. Celá konstrukce bude uzavřena tak, aby výpary z procesů mohly odcházet pouze odsáváním. Nasávání vzduchu bude opatřeno filtrem, aby do zařízení nebyl nasáván společně se vzduchem prach z prostředí. Pracovní prostor bude chráněn automaticky uzamykatelnými dveřmi, aby obsluha nemohla do prostoru vstoupit během procesu. Elektrolytické leštění bude probíhat v ultrazvukové lázni, ve které bude umístěná nádoba s elektrolytem a nádoby pro oplach vzorku. Vzorky upnuté v přípravku se budou zakládat do paletky, kterou obsluha umístí do zařízení do definovaného slotu. Podle programu, který obsluha zvolí, manipulační zařízení provede automaticky proces u založených vzorků. V zařízení budou umístěny oplachové nádoby, ve kterých manipulační zařízení vzorek vypere. Jako další operace bude následovat ofouknutí vzorku a poté umístění přípravku s upnutým vzorkem do zásobníku, kde bude probíhat sušení horkým vzduchem. Posléze proběhne další sekvence s dalším vzorkem a založení do zásobníku. Po usušení manipulační zařízení vyjme přípravek ze zásobníku a založí ho na původní místo v paletce. Po vyleštění všech vzorků manipulační zařízení najede do home-pozice, zařízení začne indikovat dokončený proces a odemkne dveře. Výměnou koncového efektoru a paletky bude zařízení schopno provádět leptání vzorků zalitých v metalografické pryskyřici.

Tento návrh splňuje všechny požadavky zadání, které vyplývají ze systémového rozboru. Zařízení je mobilní díky tomu, že všechny potřebné části jsou umístěny v jedné konstrukci opatřené kolečky. Vzniká tak bezpečné laboratorní modulární zařízení, které lze v případě potřeby vybavit jinou technologií. Z průmyslového počítače ve spojení s PLC lze programovat celý proces ve vývojovém prostředí pro PLC. Dále lze na počítači v LabView programovat a spouštět automatizovaný proces měření a vyhodnocování, které probíhá ve spojení s NI-DAQ a kartami pro měření proudu, napětí a teploty. Virtuální měřicí přístroje od National Instruments jsou voleny z důvodu jejich univerzálnosti. V případě změny technologie lze program v LabView jednoduše změnit. Průmyslový počítač může sloužit také jako OPC server pro spojení mezi jednotlivými subsystémy, případně lze použít počítač pro zapisování údajů o měření do databáze. Toto řešení umožňuje zkrátit dobu přípravy série vzorků. Lze snadno připravovat série, kde se mění jeden či více parametrů, a vše ostatní zůstává stejné. Automatizované řešení problému zajišťuje navíc lepší opakovatelnost a na základě zpětné vazby z pozorování v elektronovém mikroskopu lze snadno měnit parametry pro vyladění procesu. Databázi materiálů a nastavení parametrů lze pak snadno využít při dalších experimentech v budoucnu.

6 VARIANTY NÁVRHU

V konceptu řešení bylo nastíněno, že nejvýhodnějším způsobem řešení bude all-in-one zařízení, jehož nosnou částí bude rámová konstrukce opatřená kolečky, vnitřek konstrukce bude vybavený patřičnou technologií. Klíčovým prvkem automatizovaného procesu elektrolytického leštění je manipulace se vzorkem. Proto se tato kapitola zaměřuje především na variantní řešení manipulačního zařízení pro vzorky. Z dostupných komerčních technologií lze vybrat pro manipulaci šestiosý průmyslový robot nebo kobot, čtyřosý SCARA robot, DELTA robot. Nebo je možné jít nekomerční cestou a navrhnout vlastní kartézský manipulátor. Níže detailněji popsané varianty řešení ilustrují tři hlavní směry automatizace, které lze sledovat i v průmyslu. První popsanou variantou je leštící automat s univerzálním šestiosým robotem (kobotem), který nabízí velkou volnost při způsobu manipulace se vzorky a poskytuje prostor pro různá řešení umístění dílčích technologií, jako ofuk, sušení a podobně. Druhým způsobem řešení manipulace je levnější a komerčně dostupný SCARA robot s dobrým využitím prostoru, ale omezenější prostorovou konfigurací dílčích technologií. Komerčně dostupný DELTA robot není pro tuto aplikaci vhodný z důvodu malé výšky pracovního prostoru, kterou DELTA robot poskytuje. Třetím návrhem pro manipulaci se vzorkem je na míru navržený kartézský manipulátor, který využitím prostoru převyšuje SCARA robot, z hlediska materiálu je výrazně levnější než předchozí technologie, nicméně vyžaduje delší čas na jeho vývoj a výrobu. U jednotlivých variant není hodnocena nosnost manipulačního zařízení, protože nejmenší užitečné zatížení robotu SCARA jsou 3 Kg, stejně jako u nejmenších zástupců robotů, jako jsou např. Kawasaki RS003N nebo Universal robots UR3.

6.1 Varianta 1 s 6-DOF robotickým ramenem

Manipulace s materiálem pomocí šestiosého robotického ramene je dnes naprostým standardem v průmyslové sféře. Použití v průmyslu nezná prakticky mezí. Průmyslové šestiosé roboty mohou kromě výše zmíněné manipulace s materiálem obrábět, svařovat, lakovat, osazovat, zakládat do obráběcích center, být součástí lisovacích linek, skládat krabice, obsluhovat potravinářské linky a farmaceutické linky. Kromě téměř stoprocentně robotizovaného automobilového průmyslu nachází průmyslové roboty čím dál častěji uplatnění i v oborech dříve nemyslitelných, jako jsou slévárenské provozy, v nábytkářské výrobě, případně roboty vybavené kamerovým systémem a řídicím systémem s umělou inteligencí jsou schopné vybalovat a třídit balíky přímo z palet v třídících halách zásilkových firem. Obecná filozofie nasazení robotických systémů je v aplikacích, které jsou pro člověka příliš rutinní, namáhavé nebo zdraví nebezpečné.

V této variantě návrhu, jak je vidět na obr. 15, je do konstrukce lešticího automatu zabudován lehký šestiosý robot do polohy „spider“, to znamená přikotven ke konstrukci vzhůru nohama. Tato pozice robotickému ramenu umožňuje lepší využití prostoru v buňce a chrání základnu robotu před chemikáliemi z procesu. Na konci robotického ramena je jako koncový efektor umístěn držák z teflonu, který slouží pro připojení druhé části držáku se vzorkem, která je založená v paletce. Robotické rameno po připojení přípravku se vzorkem provádí sekvenci



Obr. 15) Varianta 1 – šestiosý robot

elektrolytického leštění, oplachu, ofuku a sušení. Nakonec odepínatelnou část s vzorkem zase založí na svoje původní místo do paletky.

Výhody řešení:

- + komerčně dostupné řešení, které lze vybrat z katalogu
- + krátká doba dodání
- + kompletní řešení s řízením a příslušenstvím, jako jsou snímače apod.
- + snadné naprogramování automatického procesu buď online, nebo offline ve vývojovém prostředí jako je RobotStudio, Process Simulate a další
- + dostupný servis
- + možnost naklápění v každém bodu pracovního prostoru
- + vysoká přesnost
- + vysoká rychlost

Nevýhody řešení:

- vysoká cena
- vysoká hmotnost
- vyšší příkon
- větší zástavbové prostory pro řídicí jednotku a zdroj
- horší poměr mezi zástavbovými prostory a velikostí pracovní obálky

6.2 Varianta 2 se SCARA robotem

Druhá varianta řešení pro manipulaci se vzorky zahrnuje použití čtyřosého robotu SCARA.

Roboty SCARA se často používají v menších robotických aplikacích pro manipulaci s materiálem. SCARA znamená selektivní kompatibilní kloubové robotické rameno (**S**elective **C**ompliance **A**rticulated **R**obot **A**rm), což znamená, že se pohybuje v rovině XY a do osy Z se pohybuje pouze třetí osa, zpravidla šroub s koncovým efektoem, který se může otáčet kolem své osy. Tak vzniká 4-osé robotické rameno. SCARA robot není vhodný do aplikací, které vyžadují sklápění a natáčení, ale je ideální do většiny aplikací, které spočívají v uchopení a přemístění, případně v drobných montážích zahrnujících přesun dílce z bodu A do bodu B. SCARA robot je také vhodný pro aplikace šroubování, kde rotační osa snadno převezme roli šroubového pohybu. SCARA robot má válcovitou pracovní obálku, kde lze dosáhnout až nulového hlučného prostoru. Robot SCARA je díky své jednoduché kinematice (RRT) jedním z nejrychlejších na trhu. Typicky osy J1 a J2 řídí pohyb v rovině XY a J3 a J4 ovládají osu Z a rotační pohyb. Díky tomu jsou inverzní kinematické výpočty mnohem jednodušší než u šestiosého robotu, což znamená kratší výpočtový čas, a tudíž i kratší dobu cyklu. Díky své jednoduché kinematice SCARA roboty mají v porovnání s jinými roboty nejlepší opakovatelnost. [27]



Obr. 16) Varianta 2 se SCARA robotem

Tento robot je ukotven na vyvýšené platformě uvnitř rámové konstrukce lešticího automatu (vizte obr. 16). Z této pozice snadno dosáhne na všechny požadované body dílčích technologií. Na ose J3/J4 je připevněn teflonový držák katody, ke kterému se v základací paletce automaticky připojí spodní část s uchyceným vzorkem. Robot SCARA lze snadno využít pro rotační pohyb míchání v jednotlivých nádobách s kapalinami. Stejně jako u výše popsaného prvního variantního řešení robot SCARA nabere část držáku se vzorkem v základací paletce a provede sekvenci automatizovaného elektrolytického leštění. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost dodržení plošného layoutu technologie, jelikož SCARA robot bez přídatných zařízení není schopen provádět klopení a natáčení. Další nevýhodou je malý rozsah výšky manipulovaného prostoru.

Výhody:

- + komerčně dostupné řešení, které lze vybrat z katalogu
- + krátká doba dodání
- + kompletní řešení s řízením a příslušenstvím, jako jsou snímače apod.
- + snadné naprogramování automatického procesu buď online, nebo offline ve vývojovém prostředí, jako je Epson RC+, Process Simulate a další
- + dostupný servis
- + nejvyšší přesnost
- + nejvyšší rychlost
- + nejvyšší opakovatelnost
- + dobrý poměr mezi cenou a výkonem
- + nižší hmotnost oproti šestiosému robotu

Nevýhody:

- vyšší cena
- nemožnost klopení a natáčení v základní sestavě
- válcová pracovní obálka s malou výškou (rozsah osy J3 v zetové ose)
- vyšší hmotnost oproti XYZ manipulátoru
- rozměrná řídicí jednotka

6.3 Varianta 3 s kartézským manipulátorem

Pro sériovou kinematiku XYZ robotů a manipulátorů ve spojení TTT (translace, translace, translace) je typický svislý pohyb koncového členu základního kinematického řetězce. Pracovní obálka takového zařízení je kvádr. Často lze vidět v podobě portálového provedení jednostranného či celoportálového. Translační kinematická dvojice vodorovného pohybu v ose Y může být smykadlového typu nebo suportového typu. [1]

Tuto kinematiku lze v dnešní době potkávat především u velkých obráběcích strojů, u tříosých souřadnicových měřicích systémů, případně u hobby obráběcích strojů a 3D tiskáren. Důvodem je vysoká tuhost tohoto řešení, dobrá škálovatelnost, vysoká přesnost a jednoduché řízení. Poslední jmenovaná vlastnost je jistě důvod, proč je tato kinematika tak populární u 3D tiskáren typu Rep-Rap, případně hobby CNC frézek apod. Řídit pouze tři osy + otáčky třetí osy je poměrně jednoduchá aplikace, která nevyžaduje vysoký výpočetní výkon pro výpočet inverzní kinematiky, to v důsledku znamená nižší cenu řídicího systému, driverů atp.



Obr. 17) Varianta 3 s čtyřosým manipulátorem

U třetí návrhové varianty (obr. 17) se počítá s tříosým XYZ manipulátorem, kde je možná rotace kolem osy Z (C_0). Tudíž lze mluvit o čtyřosém manipulátoru. Ten je umístěn uvnitř rámové konstrukce s integrovanou technologií. Manipulátor je řešený principem horního gántry, které je uloženo na lineárních kolejnicích z každé strany. Příčnick je uložen na vozičkách a je poháněn oboustranně pohybovými šrouby, které jsou připojeny ke krokovým motorům pomocí ozubeného řemenu přes ozubené řemenice. Příčnick sestává z upevňovacích elementů a dvou hlazených tyčí, na kterých jsou umístěna dvě lineární ložiska. K lineárním ložiskům je připevněna deska suportu se dvěma lineárními kolejnicemi pro pohyb v ose Z. Pohyb suportu v ose Y může být řešen pomocí ozubeného řemene poháněného krokovým motorem nebo pomocí pohybového šroubu. Nosná ložiska smykadla jsou připevněna k lineárním vozičkám a pozice smykadla je polohována pomocí pohybového šroubu, který je poháněn krokovým motorem. Rotační pohyb smykadla kolem své osy je řešen stejnosměrným servomotorem. Na konci smykadla je připevněn držák katody, ke kterému se v základací paletce připojí spodní část s upnutým vzorkem. Vodivé spojení obou částí pak zajišťuje měděný trn, který je polohován pomocí mikroelektromotoru se šroubem v ose rotoru. Pro koncová čidla všech os jsou zvoleny indukční přibližovací snímače. Veškerá potřebná kabeláž snímačů a kabelů pro elektrolytické leštění je vedena v energořetězech. Řízení manipulátoru zajišťuje PLC ve spojení s průmyslovým počítačem integrovaným do rámové konstrukce. V případě použití synchronních servomotorů a kuličkových šroubů by bylo možné dosáhnout nejvyšší přesnosti polohování, opakovatelnosti a případně i dynamiky. Ze systémového rozboru však vychází, že kromě zakládání do paletky není potřeba vysoká přesnost. Tuhost, resp. užitečné zatížení manipulátoru lze navrhnout přesně pro dané řešení.

Výhody:

- + nízká cena realizace
- + snadné řízení
- + nízká hmotnost
- + nejlepší poměr velikosti zástavby a využitelnosti prostoru
- + řízení pomocí kompaktního PLC umístitelného na DIN lištu v rozvaděči
- + řešení na míru
- + možnost vlastního výběru všech komponent
- + možnost vlastního servisu
- + snadná kompenzace chyb polohování

Nevýhody:

- komerčně nedostupné řešení, nutný vlastní vývoj nebo řešení na zakázku
- delší doba vývoje a výroby
- programování vlastní aplikace
- přesnost v závislosti na kvalitě realizace
- nižší rychlost v závislosti na konstrukci
- opakovatelnost v závislosti na realizaci

6.4 Výběr nejvhodnější varianty pomocí metody vícekritériálního rozhodování

V případě, že řešíme úlohy rozhodování s více kritérii, hledáme optimální hodnoty neznámých $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, které zároveň posuzujeme podle několika kritérií, která si často navzájem odporují (nejlepší varianta podle jednoho kritéria nemusí být nejlepší podle dalšího kritéria). Za podmínky, že je množina hodnocených variant popsána explicitně konkrétním výčtem všech prvků, lze hovořit o úloze vícekritériálního hodnocení variant (VHV). [30]

U metod, které jsou založeny na dílčím hodnocení variant, je důležité, zda důsledky variant hodnotíme vzhledem ke kvalitativním či kvantitativním kritériím. Důsledky variant, u kterých záleží na kvalitativních kritériích, je vhodné hodnotit především pomocí bodů (bodovací metoda).

6.4.1 Bodovací metoda

Tato metoda spočívá v přiřazení určitého počtu bodů zvolené hodnocené variantě na základě daného kritéria. Důležitost kritéria je kvantitativně ohodnocena pomocí bodovací stupnice (např. od 1 do 10). Čím je kritérium pro hodnotitele důležitější, tím bude váha přiřazená danému kritériu vyšší. Lépe je hodnocena ta varianta, která získá vyšší počet bodů vzhledem k danému kritériu. Počet stupňů bodové stupnice je závislý na rozlišovací schopnosti hodnotitele, vždy však musí platit, že maximální (resp. minimální) přiřazený počet bodů nejlepší (resp. nejhorší) hodnotě kritéria musí být pro všechna kritéria stejný. Nevylučuje se případ, kdy při dílčím hodnocení podle daného kritéria nedosáhne extrémního počtu bodů žádná z variant.

Výpočet ohodnocení variant se pomocí této metody stanoví takto:

$$h_i = \sum_{j=1}^k v_j y_{ij} \quad (2)$$

kde h_i je ohodnocení i -té varianty, $i = 1, 2, \dots, n$,
 y_{ij} jsou hodnoty kritériální matice Y ,
 v_j je normovaná váha j -tého kritéria, $j = 1, 2, \dots, k$

a varianty a_i jsou pak seřazeny tak, že čím má h_i vyšší hodnotu, tím je i -tá varianta více preferovaná. [28]

6.4.2 Určení hodnotících kritérií

Výběr kritérií pro zhodnocení jednotlivých variant lze snadno spojit se základními parametry manipulačních zařízení. Popsat každé zařízení lze pomocí těchto parametrů:

- velikost zástavby
- hmotnost
- rychlost (dynamika)
- přesnost (opakovatelnost)
- užitečné zatížení
- pracovní prostor
- míra manipulace v prostoru
- složitost řízení
- chemická odolnost
- míra inteligence
- dostupnost
- dostupný software
- cena

Velikost zástavby – tento parametr hodnotí potřebné prostory pro umístění do rámové konstrukce lešticího automatu včetně podpůrných zařízení, jako je řídicí jednotka a zdroj. Vzhledem k tomu, že velikost celkového zařízení je jedna z klíčových vlastností zadání, je váha tohoto kritéria 8.

Hmotnost – návrh rámové konstrukce odpovídá celkovému zatížení. V případě vysoké hmotnosti manipulačního zařízení by bylo nutné uvažovat s usazením rámové konstrukce na svařenec, což by se odrazilo na výsledné velikosti a ceně, proto je váha tohoto kritéria 7.

Rychlost (dynamika) – v případě mokrého elektrolytického leštění záleží spíše na plynulosti procesu než na rychlosti provedení jednotlivých pohybů. Váha rychlosti (dynamiky) je 2.

Přesnost (opakovatelnost) – manipulační zařízení nabere založený spodní díl držáku vzorku v zakládací paletce a provede sekvenci, která spočívá v namáčení držáku v nádobách s elektrolytem a v oplachovacích kapalinách, poté zajede k ofuku a sušení. Nakonec spodní díl držáku se vzorkem založí zpět do přípravku. Během tohoto procesu je nutná přesnost (opakovatelnost) pouze v případě najíždění držáku do přípravku, tento přípravek lze přizpůsobit tak, aby dokázal vykompenzovat nepřesnost najetí do polohy. Hodnota váhy přesnosti (opakovatelnosti) je proto 5.

Užitečné zatížení – vzhledem k tomu, že hmotnost vzorku se ve většině případů pohybuje v řádu jednotek gramů a roboty mají nejmenší nosnost 3 kg (manipulátor lze navrhnout na potřebnou nosnost), je váha tohoto kritéria 2.

Pracovní prostor – využití pracovního prostoru v konstrukci v automatickém zařízení pro elektrolytické leštění je poměrně důležitý parametr. Na základě tohoto parametru je nutné rozmístit dílčí technologie a upravit program. Případně volit velikost robotu tak, aby se dílčí technologie vyskytovala v jeho pracovní obálce i za cenu, že celkový dosah robotu bude výrazně větší, než je vnitřní prostor rámové konstrukce (obdélníkový prostor technologie musí být vepsán do kulové obálky šestiosého robotu, resp. do válcové obálky robotu SCARA). Váha je 8.

Míra manipulace v prostoru – toto kritérium hodnotí možnosti manipulačního zařízení při manipulaci se vzorkem. Například může do nádoby s elektrolytem najet pod úhlem, založit spodní část držáku se vzorkem do zásobníku pro sušení v naklopené pozici atd. Je možné, že nastavení některého experimentu si tuto možnost bude vyžadovat, ale pro většinu rutinní přípravy není tato možnost důležitá. Váha je tedy 4.

Složitost řízení – tento parametr souvisí s inverzní kinematikou a složitostí výpočtu pohybu os pro najetí do dané polohy. V závislosti na složitosti výpočtu je potřeba větší a výkonnější řídicí jednotka. Případně vyšší výkon kompilátoru nadřazené aplikace pro ovládání a nastavení procesu. Hodnota váhy je v tomto případě 6.

Chemická odolnost – v konstrukci automatické elektrolytické leštičky bude zakomponován výkonný odsávací systém, který bude vznikající výpary odsávat. Je však možné, že během procesu může kapalný elektrolyt nebo oplachové médium po najetí do nádoby vyšplíchnout. Tento problém lze vyřešit úpravou držáku (např. prodloužením dřívku), případně přidáním ochranné masky. Váha tohoto kritéria je 3.

Míra inteligence – manipulátor od robotu odděluje míra jeho inteligence (adaptability na prostředí), avšak u jednoúčelového stroje pro elektrolytické leštění se zakládáním v přípravku (vzorky nemůžou být do stroje nasypány, protože by se poškodil jejich mechanicky leštěný povrch) je využitelnost inteligentního řízení omezené. Velikost váhy je proto 2.

Dostupnost – v případě vývoje experimentálního zařízení není rychlost dostupnosti klíčovým parametrem, jako je tomu v průmyslu, kde rychlost nasazení aplikace rozhoduje o úspěšnosti zakázky. Váha je proto 2.

Dostupný software – v případě komerčně dostupných zařízení pro manipulaci s materiálem většina firem nabízí hotový software pro programování. Nicméně komplexní softwarová aplikace pro ovládání stroje operátorem, kde je manipulační zařízení (robot, kobot) pouze dílčí součástí, je stále na straně vývojáře. Případně vývojové prostředí pro takovou aplikaci je dostupné od třetích stran. U navrženého kartézského manipulátoru na míru lze tento manipulátor snadno řídit pomocí PLC jako ostatní dílčí zařízení (ovládání dveří atp.), protože PLC nepotřebuje výpočetní výkon na inverzní kinematiku. Náročnost implementace nadřazeného softwaru pro ovládání operátorem je tudíž na stejné úrovni jako u komerčně dostupných robotů. Hodnota váhy je proto 3.

Cena – možná nejdůležitějším kritériem pro nasazení jakékoliv technologie je vždy cena. V průmyslu se počítá vždy návratnost investice, v případě vědecké aplikace je nutné počítat s omezením z hlediska typu projektu, ze kterého je zařízení hrazeno. Váha tohoto kritéria je 10.

6.4.3 Výpočet bodového zisku daných variant

Tab 5) Kritéria, hodnota vah a bodové ohodnocení variant

Kritérium	Hodnota váhy	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Velikost zástavby	8	3	6	8
Hmotnost	7	1	3	5
Rychlost (dynamika)	2	7	9	5
Přesnost (opakovatelnost)	5	7	9	5
Užitečné zatížení	2	8	8	5
Pracovní prostor	8	5	4	6
Míra manipulace v prostoru	4	10	5	5
Složitost řízení	6	1	4	7
Chemická odolnost	3	4	5	6
Míra inteligence	2	8	7	1
Dostupnost	2	8	8	5
Dostupný software	3	5	5	5
Cena	10	1	5	10

Pozn.: Hodnota daného kritéria označuje míru plnění požadované vlastnosti danou variantou. Např. nejnižší cena 10, nejvyšší cena 1.

Výpočet bodového zisku daných variant

Varianta 1: $h_1 = 8 \times 3 + 7 \times 1 + 2 \times 7 + 5 \times 7 + 2 \times 8 + 8 \times 5 + 4 \times 10 + 6 \times 1 + 3 \times 4 + 2 \times 8 + 2 \times 8 + 3 \times 5 + 10 \times 1 = 251$

Varianta 2: $h_2 = 8 \times 6 + 7 \times 3 + 2 \times 9 + 5 \times 9 + 2 \times 8 + 8 \times 4 + 4 \times 5 + 6 \times 4 + 3 \times 5 + 2 \times 7 + 2 \times 8 + 3 \times 5 + 10 \times 5 = 334$

Varianta 3: $h_3 = 8 \times 8 + 7 \times 5 + 2 \times 5 + 5 \times 5 + 2 \times 5 + 8 \times 6 + 4 \times 5 + 6 \times 7 + 3 \times 6 + 2 \times 1 + 2 \times 5 + 3 \times 5 + 10 \times 10 = 399$

Na základě vícekritériálního rozhodování pomocí bodovací metody vychází jako nejlepší varianta (varianta s nejvíce body), což je na míru navržený tříosý kartézský manipulátor s rotační osou kolem osy Z (XYZA manipulátor s kinematickým řetězcem TTTR).

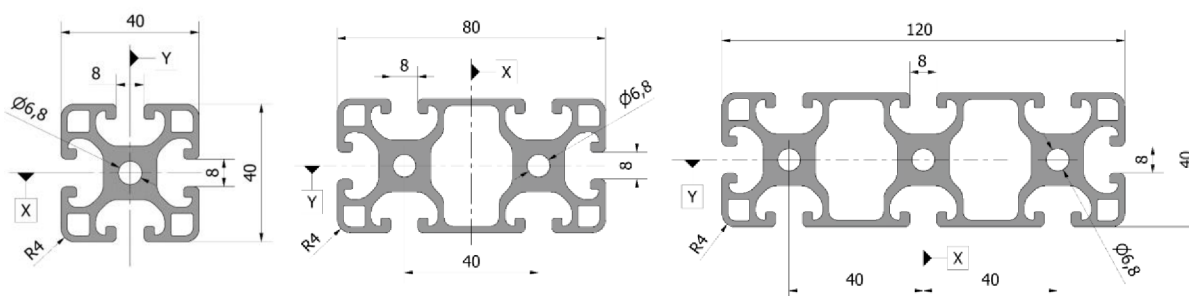
7 POPIS ŘEŠENÍ VYBRANÉ VARIANTY

7.1 Mechanická konstrukce

7.1.1 Návrh rámové konstrukce

Nosnou částí tohoto stroje je rám z hliníkových profilů stavebnicového systému s drážkou 8 mm. Tyto profily se používají běžně pro stavbu rámu a konstrukcí jednocelových strojů, ochranných oplocení, pracovních stolů, montážních pracovišť, výrobních linek, konstrukcí dopravníků, rámu lineárních vedení a pro jiné aplikace s důrazem na design a variabilitu celkové konstrukce. [29]

Pro stavbu rámu jsou použity především profily 40 × 40 L, 40 × 80 L a 40 × 120 L. Průřez těchto profilů lze vidět na obrázku 18.



Obr. 18) Průřezy použitých hliníkových profilů pro konstrukci rámu

Celkové rozměry hliníkového rámu jsou 1800 × 1080 × 620 mm (V × Š × H). Tento rám je umístěn na čtyřech otočných pojzdových kolech s brzdou o průměru D75 mm. Jedno z těchto kol splňuje požadavky ESD (vodivé spojení) kvůli uzemnění rámu proti elektrostatickým výbojům. (obr. 20a)

Prostor rámu je rozdělen na dvě hlavní části – spodní a horní. Jednotlivé profily jsou mezi sebou spojovány centrální spojkou, jejíž šroub s čočkovitou hlavou s vnitřním šestihranem M8x20 ISO 7380 se utahuje imbusovým klíčem skrze vyvrtanou díru o průměru 7 mm v kolmém profilu do závitu M8, který je vyřezán do válcové díry v čele druhého hliníkového profilu. (viz obr. 19). Takto realizovaný spoj vytváří vodivé spojení. U profilů, kde je nutné zajistit pozdější přestavitelnost, lze využít pro spojení úhelník 40 × 40 mm s drážkou (obr. 20).



Obr. 19) Spojení profilů centrální spojkou



Obr. 20) Spojení profilů úhelníkem

Horní část rámové konstrukce slouží jako prostor pro umístění nádob s elektrolytem, ultrazvukových lázní, zakládací paletky, zásobníkové paletky pro sušení, vysavače a odsávání. V prostoru nad platformou s těmito dílčími technologiemi je zabudován čtyřosý kartézský manipulátor (XYZA). Spodní část předního vnějšího horního prostoru je napevno zakrytována. Je opatřena ovládacími prvky pro posuvné uzamykatelné dveře a kohouty s kulovým ventilem pro napojení chladicího okruhu. Zakrytování je řešeno plechovými dílci opatřenými práškovým lakem, tzv. komaxitem (obr. 21b). Tyto plechy jsou k rámu přišroubovány přes boční výřezy v lemu pomocí šroubu s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem DIN912. Tento šroub je chycený do matice vložené v drážce hliníkového profilu. Každý plechový dílec má na vnitřní straně přivařený měděný svorník, který slouží pro vodivé spojení s rámem. Ke stropní části je připevněno osvětlení do výbušného prostředí. Do pravého plechové boku je v horní části vypálená ventilační mřížka, z vnější strany je pak přimontován plechový koš pro vložení HEPA filtru, který zde slouží pro odfiltrování prachových částic z nasávaného vzduchu do stroje. Dále jsou na dílu přivařené měděné svorníky se závitem, pro uchycení průmyslového zdroje horkého vzduchu. Horní a spodní část stroje jsou odděleny taktéž plechovými dílci s práškovým lakem, do kterých jsou vypáleny díry na ventilační roury, hadice pro vysavač a otvory pro kabeláž. Stropní díl má přivařené měděné svorníky pro přišroubování osvětlení do výbušného prostředí.



Obr. 21) a) Rámová konstrukce z hliníkového stavebnicového systému, b) krycí prvky rámu

Spodní část je vyhrazena pro obslužné technologie stroje, jako je potrubí ventilace a vysavače napojené na chemicky odolný radiální ventilátor vyrobený z polypropylenu poháněný elektromotorem chráněným proti explozi (ATEX – shodný) s napětím 400 V a průtokem 60–250 m³/h. Dále je zde umístěn programovatelný napěťový zdroj určený pro samotnou technologii elektrolytického leštění. V tomto prostoru mohou být také umístěna peristaltická čerpadla a elektricky ovládané třicestné hydraulické ventily pro automatickou výměnu kapalin. Nádoby s kapalinami pro automatickou výměnu mají určený prostor ve spodní části rámu, na polici k tomu určené. Do boku rámu je zabudovaný rozvaděč, ve kterém je umístěné PLC, IPC a DAQ. Dále je rozvaděč opatřen oddělovacím transformátorem 400V//230V, proudovým chráničem, pojistkami a dalšími bezpečnostními prvky. Z vnější strany rozvaděče jsou dostupné ovládací prvky, jako je bezpečnostní klíč pro zapnutí stroje, START tlačítko, CENTRAL STOP tlačítko, tlačítko pro vypnutí odsávání a indikační kontrolky zapnutého a vypnutého stavu. Spodní část rámu je zakrytována podobnými dílci jako horní strana. K tomu je přední strana navíc opatřena uzamykatelnými dvířky (obr. 22).

Pro snadnější manipulaci se zařízením byly z obou bočních stran přidána dvojice trubkových madla o délce 500 mm.



Obr. 22) Pohled na spodní část s policí a na plechové dveře se zámkem

7.1.2 Posuvné dveře

Posuvné dveře jsou ze dvou částí, které jsou umístěné dvouřadně, takže je pro obsluhu možné přistupovat vždy pouze do jednoho sektoru. Při běžném zakládání paletky se vzorky nejdříve manipulátor zajede do home-pozice a pak jsou odblokovány pravé dveře, kde je přístup pouze k mechanickým dílčím technologiím. V případě výměny chemikálií jsou pro uživatele s vyšším oprávněním odblokovány levé dveře pro přístup do sektoru s kapalinami.

Rám dveří je z hliníkových profilů stavebnicového systému 40×40 mm. Jako výplň slouží tepelně zpevněné bezpečnostní čiré sklo o tloušťce 5 mm. Toto sklo je v drážce profilu utěsněno přítlačným gumovým těsněním. Drážka horizontálního profilu rámu zapadá do lišty z technického plastu, po které se dveře posouvají kluzným pohybem. Plastové vodící lišty jsou upevněny šrouby do matic v drážce hliníkového profilu rámu stroje. Lišty jsou umístěné dvojřad jak ve spodním profilu 80×40 mm, tak v horním profilu stejných rozměrů (vizte obr. 23). Levé dveře stroje lze chytit za plastovou třmenovou rukojeť o velikosti 122 mm. Pro manipulaci s pravými dveřmi je do vertikálního profilu rámu vyfrézovaná prohlubeň, do které je přišroubovaná plastová misková úchytka. Tato asymetrie úchytek je daná tím, že jsou dveře umístěné dvojřad za sebou, takže by levé vnější dveře při otevření narážely do této úchytky. K horní části obou rámu dveří je vždy připevněn protikus bezpečnostního dveřního spínače HS5D, tento zámek je připevněn ve vnitřní části k rámu stroje (vizte obr. 24). U pravých dveří je protikus přimontován na vnitřní plochu vrchního horizontálního profilu. U levých dveří je protikus upevněn do čela vrchního horizontálního profilu přes hliníkovou patku z důvodu těsného umístění posuvných dveří za sebou, takže by se protikus zámku zarazil o pravé dveře a zkrátil tak posuv otevření. Pro pravé dveře je instalována zarážka, aby misková úchytky zůstala vždy dostupná.

Tento způsob řešení dveří byl zvolen z důvodu lepší těsnosti než u křídlových dveří, dále proto, že při otevření dveře nezasahují do prostoru, takže se obsluha do stroje dostane i v omezených prostorách laboratoře. Třetím aspektem tohoto řešení je vyšší bezpečnost posuvných dveří z hlediska manipulace s nádobami s procesními kapalinami (do otevřených posuvných dveří narozdíl od dvoukřídlových dveří nemůže obsluha při manipulaci s chemikáliemi narazit).



Obr. 23) Detail na vodící lištu posuvných dveří



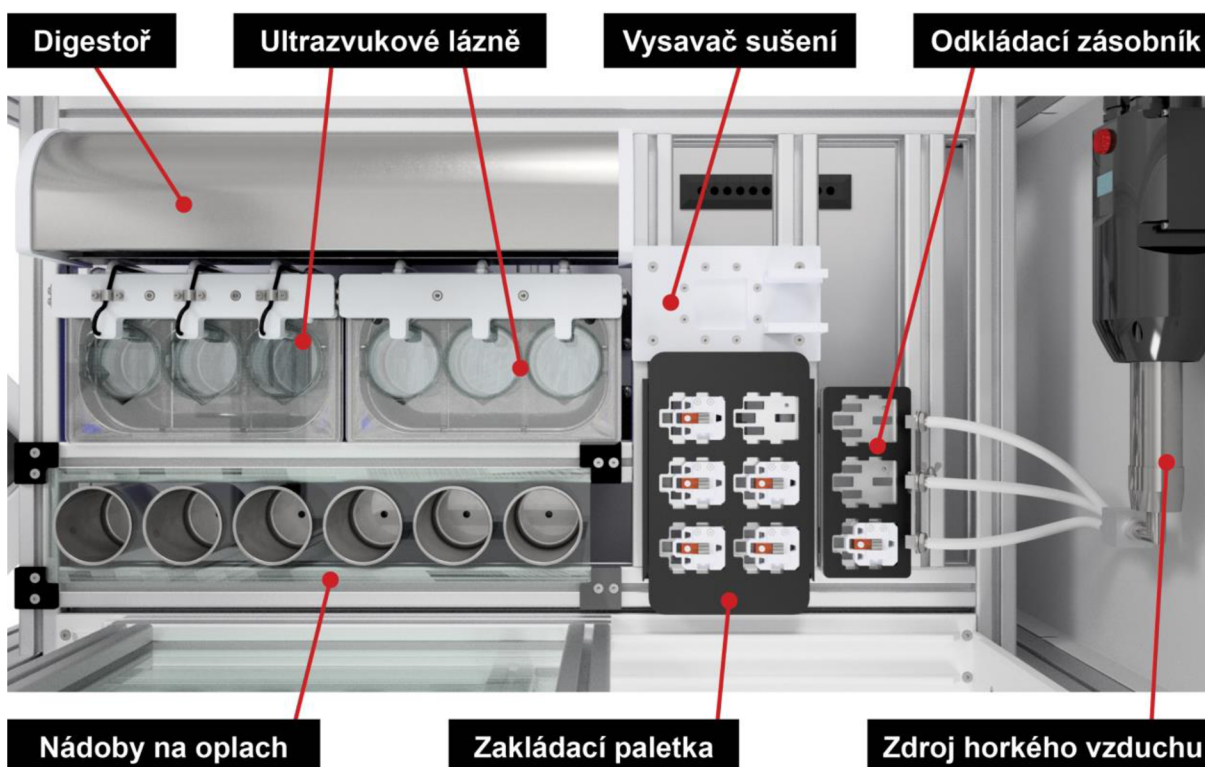
Obr. 24) Detail bezpečnostního zámku dveří

7.1.3 Plechové dveře

Spodní plechové dveře slouží k přístupu k technické části stroje. Jsou vyrobeny z ohýbaného ocelového plechu o tloušťce 1 mm a jsou opatřené hladkým práškovým lakem se světle šedou barvou RAL7035. K rámu jsou upevněny pomocí plastových dveřních závěsů 40 × 40 mm (lze vidět na obr. 21b). K zamykání slouží čtvercový otočný skříňový nábytkový zámek s rozvorovými tyčemi, které zapadají do protikusu v rámu. Jazyček zámku zapadá do protikusu na druhém dveřním křídle (vizte obr. 22).

7.1.4 Rozmístění dílčích technologií v horní části stroje

Na obrázku 25 lze vidět layout hlavní části stroje pro automatické elektrolytické leštění. Ultrazvukové lázně jsou umístěny do plastových jamek, které přesně definují pozici UZ čističky. Tyto jamky jsou přišroubovány pomocí samořezných šroubů do plechu k plechovým dílcům, dělicí horní a spodní prostor stroje. Ostatní technologie jsou umístěny na vyvýšené konzoli z hliníkových profilů, která je připevněna k rámu pomocí úhelníků. Tato konzole slouží k tomu, aby většina z automatického procesu probíhala v jedné úrovni s UZ lázněmi, a tak se co nejvíce eliminoval rozsah posuvu v ose Z. V zadní části stroje je v blízkosti dvou UZ čističek umístěna plechová ventilační digestoř pro odsávání výparů z kádínek. V přední části jsou umístěny další nádoby pro oplach. Na pravé straně je umístěn slot se zakládací paletkou. Vedle paletky je umístěn odkládací zásobník k sušení vzorků horkým vzduchem. Horký vzduch proudí z průmyslového zdroje horkého vzduchu. V zadní části za paletkou je umístěn vysavač, který je napojen na odtahový ventilátor společně s digestoří.



Obr. 25) Layout dílčích technologií na operační ploše

7.1.5 Zakládací paletka a aretační slot

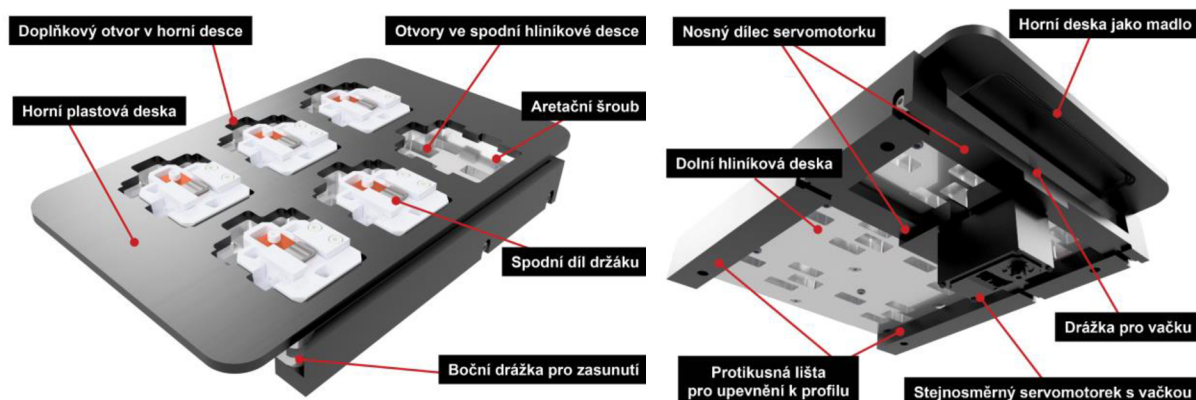
Do zakládací paletky (obr. 26) se vloží až šest spodních dílů držáku, ve kterých jsou upevněny metalografické vzorky určené k elektrolytickému leštění. Držák se do paletky vkládá jednoduše tak, že se nejprve kolmo shora položí skrze komplementární otvor a poté posuvným pohybem dorazí do koncové polohy, kde zapadne pružně uložená kulička aretačního šroubu do díry v držáku. Celá paletka se poté založí do stroje do drážek k tomu určených a ve správné poloze se zaaretuje pomocí otočení aretační vačky připevněné k stejnosměrnému servomotoru. V této pozici jsou spodní díly držáku připraveny pro odběr manipulátorem.

Paletka sestává ze dvou hlavních částí – spodní a horní desky. Spodní hliníkový díl na má delších stranách vyfrézované drážky na zasunutí do protikusných lišt ve stroji. Lišty a drážky zajišťují paletku proti pohybu v ose Z, a navíc přesně určují pozici paletky v prostoru vzhledem k manipulátoru. Drážky mají obdélníkový průřez, ale jedna drážka je širší, takže není možné založit paletku obráceně. V zadní části (na té straně, kterou se paletka vkládá do stroje) je vyfrézovaná kruhovitá díra s drážkou, která slouží pro zajištění paletky aretační vačkou.

Protikusné lišty jsou vyrobeny z plastu a jsou připevněny šrouby do matice ve drážce hliníkového profilu. Na konci lišt jsou dorazy určující koncovou polohu paletky. K těmto lištám je přišroubován nosný dílec sloužící k připevnění stejnosměrného servomotoru.

Na ploše hliníkové desky jsou vyfrézované otvory, jež odpovídají dráze koncových bodů horní části držáku. Dráha manipulátoru je dána pohybem shora dolů do pozice, která odpovídá požadované vzdálenosti mezi katodou a vzorkem. Poté manipulátor udělá posuvný pohyb v ose X a odjistí tak držák ze zakládací paletky. Nakonec pohybem vzhůru vytáhne držák se vzorkem. Zpětné založení je analogické, ale s opačným pořadím kroků. V každé pozici pro držák je zesponu našroubovaný aretační šroub M5 × 12 s odpruženou kuličkou.

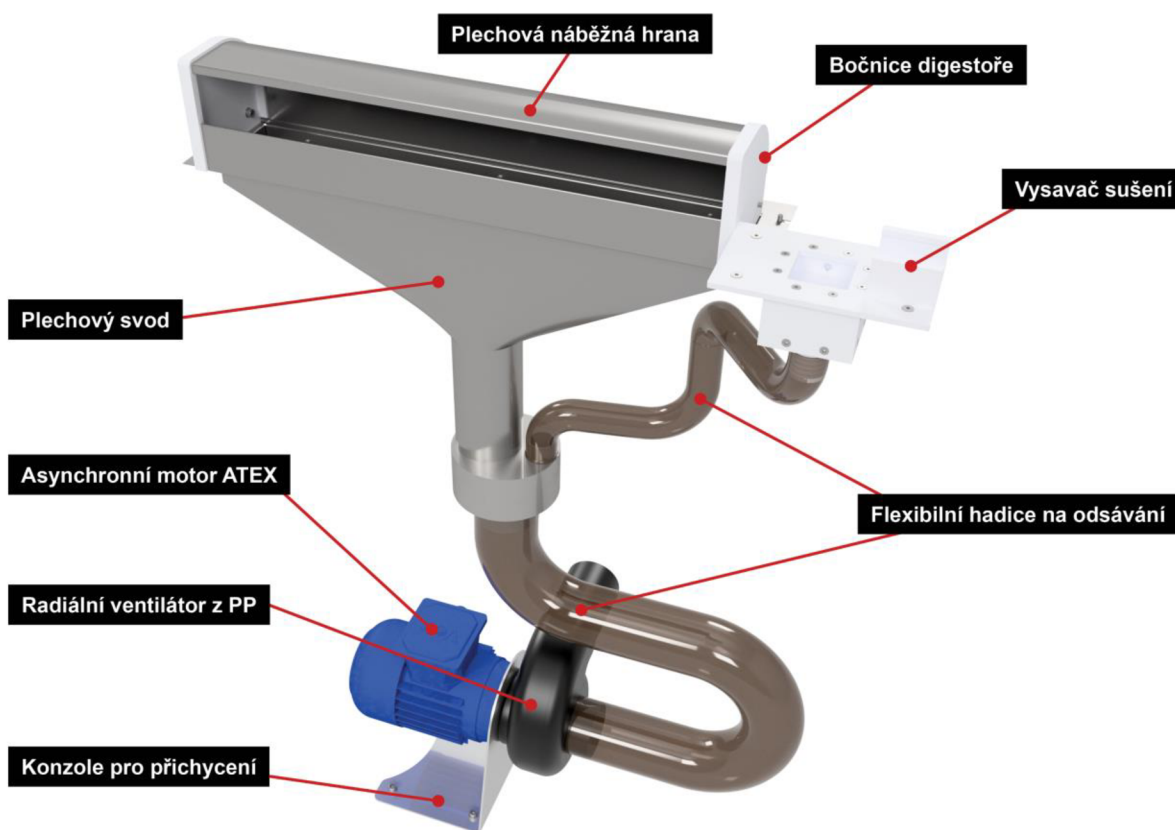
K tomu, aby manipulátor mohl držák v paletce odložit, slouží druhá část paletky – horní plastová deska. Tato deska má otvory takového tvaru, který je doplňkový k tvaru spodního držáku, na kterém jsou z boční strany výstupky sloužící po zasunutí k zachycení o horní desku. Horní plastová deska je přišroubovaná zesponu k hliníkové části pomocí šroubů se zápusnou hlavou DIN 7991. Horní deska překrývá spodní na kratších stranách tak, aby bylo možné celou paletku snadno uchopit.



Obr. 26) Zakládací paletka a aretační slot

7.1.6 Odsávání

Většina procesních kapalin je na bázi organických rozpouštědel, které jsou silně těkavé. Z tohoto důvodu je ve stroji umístěn výkonný chemicky odolný radiální ventilátor z polypropylenu poháněný střídavým asynchronním motorem do výbušného prostředí splňující směrnici ATEX. Výfuk ventilátoru je vyveden vně stroje, kde lze napojit hadici vedoucí do digestoře. Na sací trubku ventilátoru je napojena chemicky odolná odsávací hadice. Ta je připojena do rozdělovacího kruhového boxu. Tento box je napojen na svod vnitřní digestoře stroje a na hadici, vedoucí ze sušicího vysavače. Digestoř je složena z několika částí. Bočnice jsou vyrobeny z plastu a jsou přišroubované do hliníkových profilů konzole. Do nich zapadá ohnutý plech, který tvoří naváděcí hranu pro proudění vzduchu. Ke spodní straně konzole z hliníkových profilů je přišroubovaný plechový svod, který je napojený do výše zmíněného rozdělovacího kruhového boxu. Pro nasávání vzduchu do stroje slouží ventilační mřížka vypálená do plechového boku na opačné straně, než je digestoř, aby docházelo ve vnitřním prostoru k co největší výměně vzduchu. K plechovému boku je z vnější strany připevněn pomocí vratových šroubů plechový koš s HEPA filtrem (max. 300 m³/hod) k filtraci prachových částic. Vratové šrouby jsou voleny z toho důvodu, aby bylo možné koš odmontovat pouze z vnitřní strany stroje. Podstavu odsávání lze vidět na obr. 27.

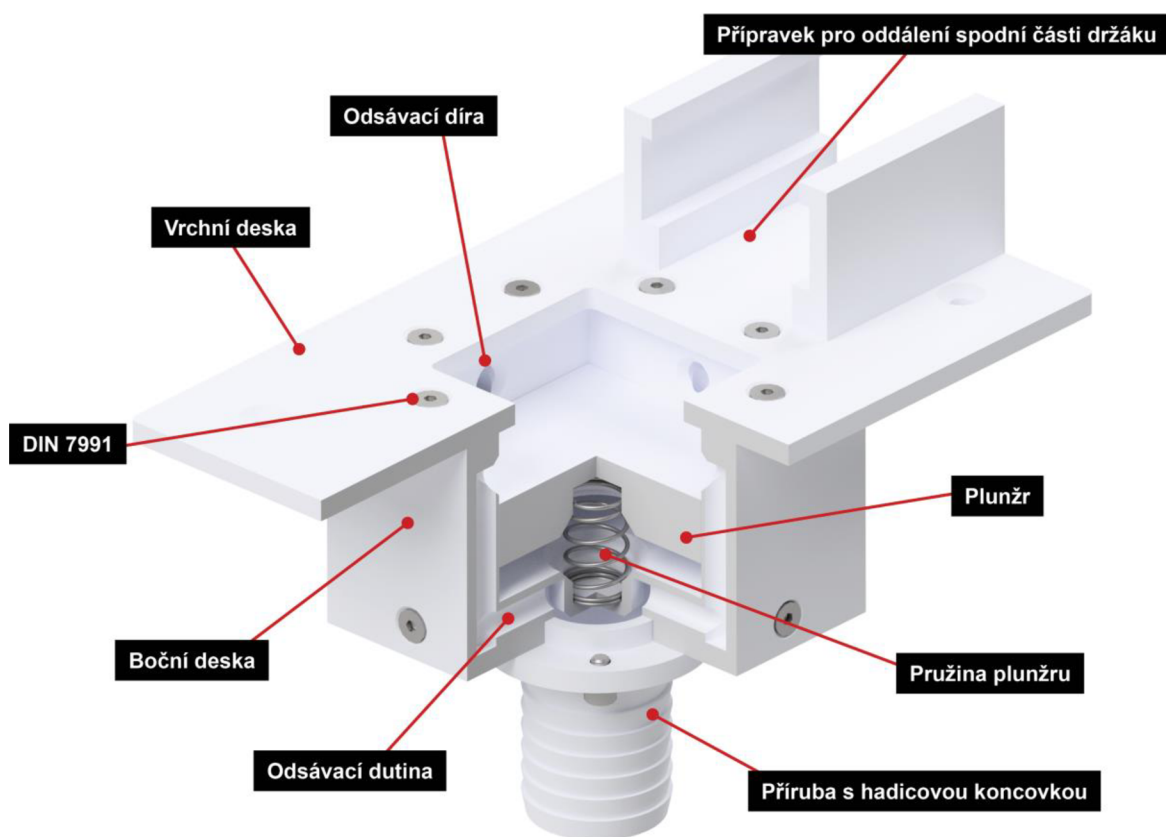


Obr. 27) Izolovaná podsestava odsávání

7.1.7 Odsávání oplachové kapaliny vysavačem

Po sérii oplachů v nádobách s rozpouštědly zajede manipulátor se vzorkem v držáku k vysavači. Nejdříve manipulátor najede do pozice s přípravkem, pomocí kterého stáhne spodní díl držáku do krajní pozice, tak aby se prostor kolem vzorku otevřel. Poté najede nad pružný plunžr vysavače a zatlačením plunžru do dolní pozice odkryje odsávací průduchy v bočnicích vysavače. Vzniklý proud vzduchu odsaje kapalinu z držáku.

Vysavač je zkonstruovaný převážně z navzájem pospojovaných plastových desek. Vrchní deska slouží k upnutí k hliníkovým profilům. Dále jsou k ní přišroubované packy přípravku pro oddálení spodní části držáku. Box vysavače je složen ze čtyř bočnic a dna. Bočnice mají v sobě vyvrtanou díru pro odvod vzduchu. Dutiny z bočnic jsou napojeny na dutiny ve dnu a ústí ve středu dna, kde je připojena kruhová příruba s hadicovou koncovkou. Na koncovku je připojena hadice vedoucí do rozdělovacího kruhového boxu ve spodní části stroje. Celá podsestava pro odsávání oplachové kapaliny lze vidět na obr. 28.



Obr. 28) Vysavač k sušení vzorků

7.1.8 Ultrazvukové čističky

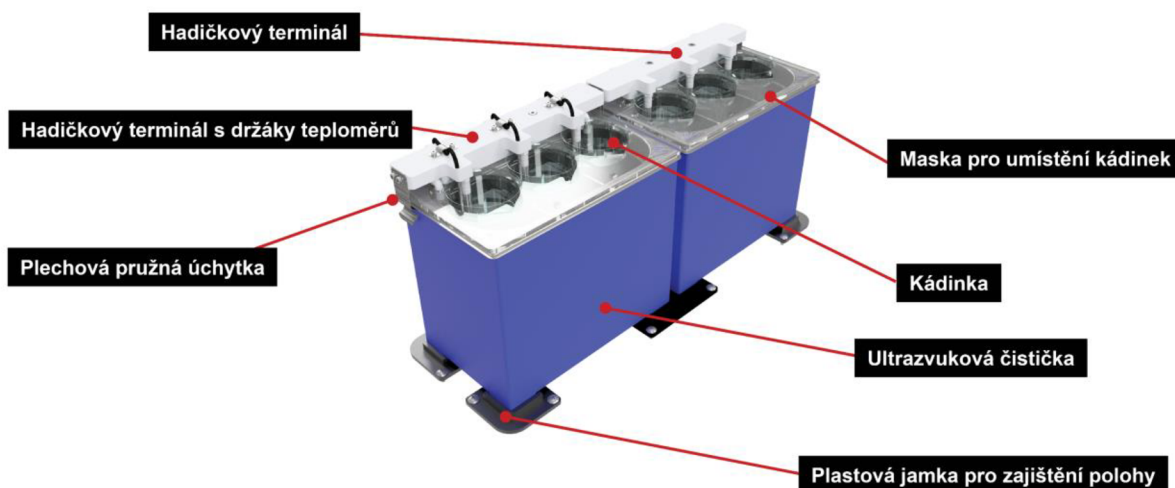
Do stroje jsou zakomponovány dvě ultrazvukové čističky Elmasonic S30H. Jedna UZ čistička slouží pro elektrolytické leštění a může být napojená na chladicí okruh. Druhá UZ lázeň slouží pro oplach. Pozice lázní ve stroji je definována plastovými jamkami, které jsou přišroubované k plechovému dnu pomocí samořezných šroubů (vizte obr. 29). V každé UZ lázni jsou umístěny tři kádinky z borosilikátového skla o objemu 250 ml. Tyto kádinky jsou umístěné v masce (držáku) z keramického skla, do kterého jsou vodním paprskem vyříznuté otvory na kádinky. Takto je zaručena přesná pozice kádinek v prostoru. Dále jsou do masky vyříznuty otvory pro hadičky pro chladicí okruh. Na ultrazvukové čističce je pak umístěný odepínací hadičkový terminál z PTFE.

7.1.9 Hadičkový terminál

Hadičkový terminál je složen ze dvou PTFE desek, které jsou k sobě přišroubovány. Spodní deska slouží jako distanční podložka a zarážka o zadní hranu. Má menší šířku, to proto, aby po krajích mohly vést hadičky s médiem chladicího okruhu.

V horní desce jsou vyvrtány tři díry pro proudění kapalin. Každá díra má v zadní části trubkový závit, do kterého je našroubováno koleno 90° s trnem na napíchnutí hadičky. V přední části je ze spodní strany – kolmo na výše zmíněnou díru – vyvrtaná další díra se závitěm, do které je našroubovaný trn se závitěm pro napojení hadičky umístěné v kádince. Do kratších bočních stran horní desky jsou vyhotoveny díry se závitěm, přes které jsou chyceny plechové úchytky sloužící k připevnění k UZ lázni. Tento způsob uchycení je volen z důvodu potřeby snadného sejmutí terminálu vždy, když je potřeba umýt kádinky umístěné v lázni. Umístění hadičkového terminálu na UZ lázni lze vidět na obr. 29.

U ultrazvukové čističky pro kádinky s elektrolytem je do tohoto terminálu navíc vyvrtána sada děr pro umístění čtyřvodičového teplotního senzoru pro chemicky agresivní prostředí do každé kádinky.



Obr. 29) Ultrazvukové čističky s hadičkovým terminálem a upevnění lázní ve stroji

7.1.10 Oplachový set

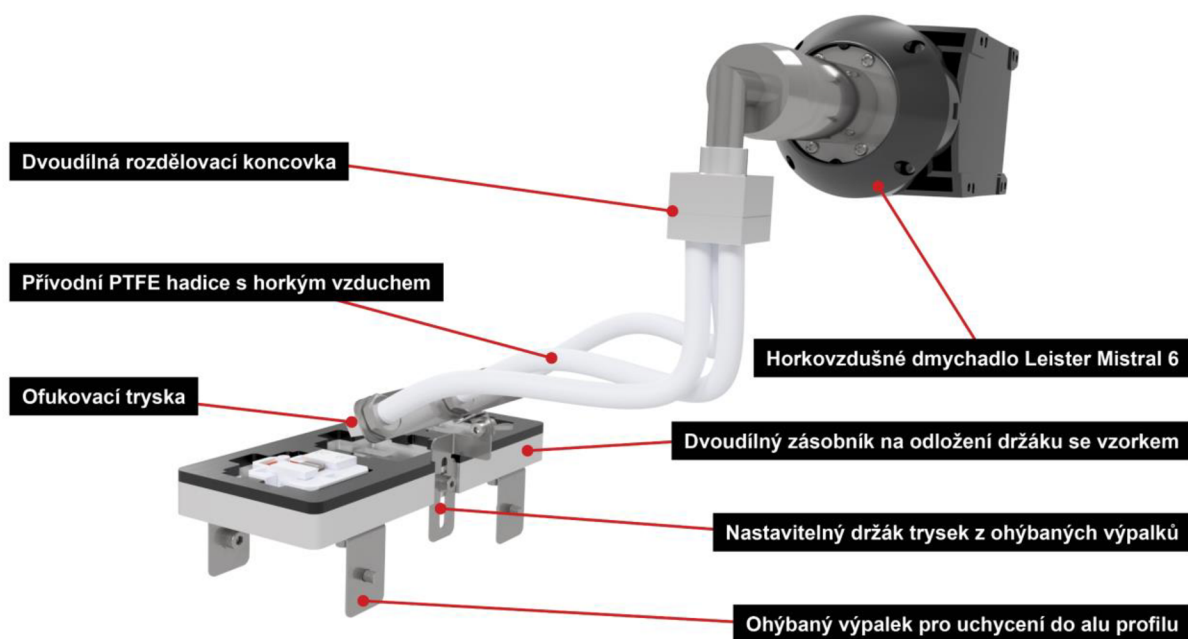
Mimo kádinek v UZ lázni k oplachu slouží dalších 6 nerezových nádob. Tyto nádoby mají ve dnu díru s přivařenou hadičkovou koncovkou, na kterou je napíchnutá teflonová hadička pro automatické napouštění a vypouštění kapaliny za pomoci peristaltického čerpadla. Nádoby jsou

zapuštěny v desce z keramického skla o tloušťce 5 mm. Do této desky jsou vodním paprskem vyříznuté díry pro nerezové nádoby. Skleněná maska leží na hliníkových profilech a její pozice je určena plastovými držáky, které jsou uchyceny k hliníkovým profilům šrouby se zápusťnou hlavou s maticemi do drážky. Tímto je přesně definovaná pozice jednotlivých nádob.

7.1.11 Sušení horkým vzduchem

K finálnímu sušení vzorku upnutého ve spodní části držáku slouží odkládací zásobník. Ten je navržený obdobně jako zakládací paletka s tím rozdílem, že má kvůli úspoře prostoru jen tři zakládací sloty a je napevno přimontována k hliníkovým profilům pomocí ohýbaných nerezových plechů. Na každou ze tří pozic je namířena ofukovací tryska. Trysky jsou upevněny k držáku složeného ze dvou ohýbaných nerezových výpalků. Konstrukce umožňuje naklápění trysek a změnu výšky držáku. Ze zadní strany trysky je nasazena teflonová hadička (max. 260 °C), která je napojena do rozdělovací koncovky připojené k horkovzdušnému dmychadlu Leister Mistral 6 System. Toto zařízení má příkon 2300 W, maximální teplotu 650 °C, průtok vzduchu 100 až 300 l/min a pracuje s uzavřeným okruhem regulace na konkrétní teplotu. Lze je ovládat pomocí integrované ovládací jednotky nebo externím rozhraním. Dmychadlo má na svém plášti čtyři díry sloužící k připevnění. Skrze díry jsou prostrčeny svorníky se závitem M5, přivařené k bočnímu plechu. Dmychadlo je utaženo pomocí matic našroubovaných na svornících. Podstavu pro sušení horkým vzduchem lze vidět na obr. 30.

Odkládací paletka je v sekvenci zařazena kvůli snížení celkového času procesu. Manipulátor spodní díl držáku se vzorkem odloží na místo sušení a během doby sušení provede další sekvenci elektrolytického leštění. Po uplynutí stanovené doby sušení manipulátor založí usušený držák se vzorkem na své původní místo v paletce. Dalším důvodem pro odkládací paletku byl způsob sušení horkým vzduchem. Rozvod horkého vzduchu ke každému slotu zakládací paletky by znamenalo dvojnásobné množství hadic, držáků a trysek, a navíc by mohlo docházet ke kontaminaci zbylých vzorků odkápnutím oplachového média při přejíždění do pozice daného slotu.



Obr. 30) Podstava pro sušení horkým vzduchem

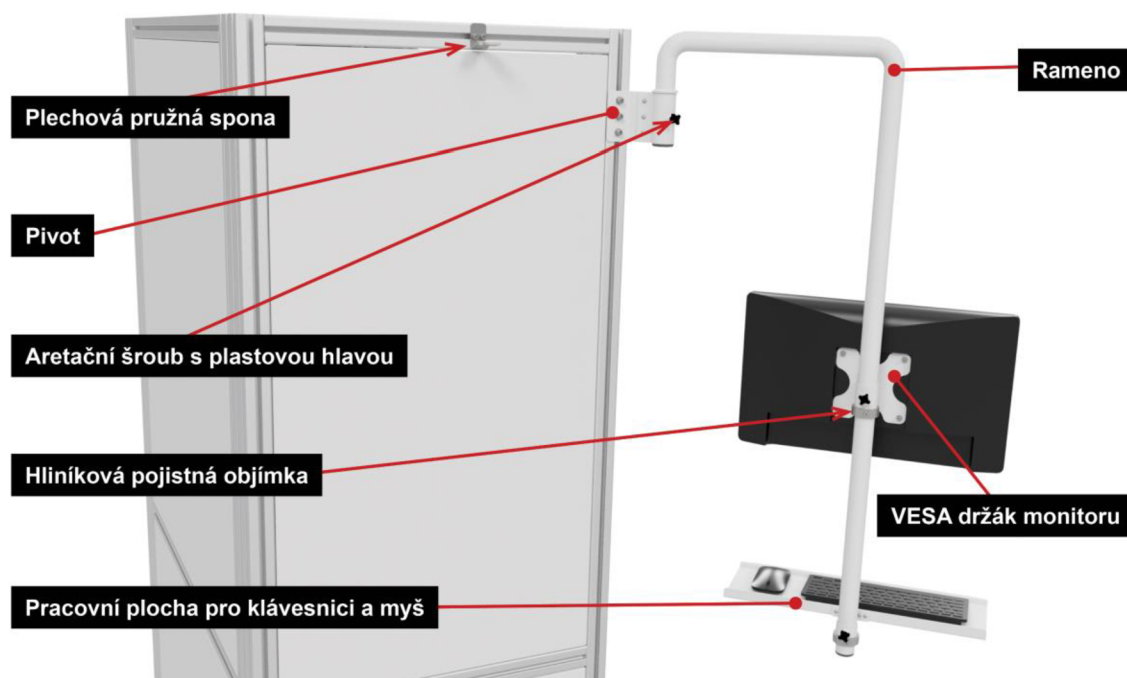
7.1.12 Konzole pro ovládací periferie

Pro komfortnější zadávání parametrů do průmyslového počítače jsou jeho periferie připevněny k otočnému ramenu, které lze otáčet kolem pívotu připevněného zvnějšku k rámu stroje (obr. 31). Ve složené poloze (monitor přitisknutý plošně k plechovému boku) je rameno aretováno plechovou pružnou sponou připevněnou k rámu stroje.

Pivot je vyroben z ohýbaného plechu a je připevněný třemi šrouby do matic v drážce alu profilu rámu stroje. Do pívotu je vloženo rameno vyrobené z ohnuté trubky o průměru 30 mm a tloušťce 2 mm. Pohybu dolů v ose Z brání přivařená manžeta na trubce, která se opírá o vrchní hranu pívotu. Pohyb v opačném směru je zamezen plastovým víčkem naraženým do trubky ramena. Aretace polohy natočení kolem pívotu je zajištěna aretačním šroubem s plastovou hlavou, který je zašroubován do matice, která je přivařená k plechovému pívotu. Na opačné straně trubky je připevněn monitor a pracovní deska pro klávesnici a myš.

Monitor je připevněn ke svařenci uloženému otočně kolem trubky. Svařenec sestává ze dvou hlavních dílů. Z výpalku odpovídající VESA uchycení pro připevnění k monitoru a k němu přivařené ohýbané pásovině, která na jedné straně tvoří objímku. Přes tuto objímku je držák monitoru navléknutý na trubce ramena a v požadované výšce je zajištěn hliníkovou objímkou utáženou kolem trubky. Takže spodní část objímky držáku monitoru leží na vrchní části pojistné hliníkové objímky stahované kolem trubky za pomoci šroubu. Monitor lze otáčet kolem osy trubky ramena a v požadované pozici je zajištěn aretačním šroubem s plastovou hlavou. K objímce držáku monitoru je přivařená matice, do které je aretační šroub zašroubován.

Klávesnice a myš leží na pracovní ploše, která je vyrobena z ohýbaného plechu. Z přední strany je plocha pro opření zápěstí a o hranu této plochy se opírá klávesnice, vedle klávesnice je myš. Na zadní straně plechu je obruba, ke které je přinýtovaná objímka z pásovině k upevnění na trubku. Tato objímka leží obdobně jako u držáku monitoru na výškově nastavitelné objímce z hliníku. A stejně jako u držáku monitoru je tato odkládací plocha v požadované pozici natočení zajištěna aretačním šroubem s plastovou hlavou.



Obr. 31) Konzole pro periferie PC

7.1.13 Terminál peristaltických čerpadel a ventilů

Pro automatické plnění a vypouštění procesních kapalin jsou nutná čerpadla. Peristaltická čerpadla mají tu výhodu, že kromě speciální hadičky žádná funkční část nepřichází do kontaktu s přečerpávanou kapalinou. Tudíž se tato čerpadla hodí i pro dávkování chemicky agresivních kapalin. Nevýhodou těchto čerpadel je však nižší průtok, proto bylo voleno čerpadel více.

Konkrétně byl zvolen typ peristaltického čerpadla ESPANGO IPS30 24 VDC. Toto peristaltické čerpadlo má konstantní průtok 30 l/h a u stejnosměrného motoru má možnost zpětného chodu. Spouštění čerpadla ON/OFF je prováděno z externího zdroje.

Každá kádinka má maximální objem 250 ml, tudíž naplnění jedné kádinky jedním čerpadlem by při konstantním průtoku 30 l/h trvalo 30 s. Pro experimenty je vhodné, aby byla zachována co největší variabilita. Tudíž je voleno jedno čerpadlo pro každou kádinku s elektrolytem, aby bylo možné každou kádinku plnit zvlášť. Toto nabízí možnost mít v každé kádince jiný elektrolyt, případně při leštění menšího počtu vzorků naplnit pouze jednu kádinku. Stejně tak u oplachů v ultrazvukové lázni je vhodné mít možnost kombinovat jednotlivé oplachové kapaliny. Takže také pro každou kádinku v UZ lázni pro oplach je určeno zvláštní čerpadlo.

Pro oplachový set bylo zvoleno jedno čerpadlo pro dvě nádoby. Zde by bylo možné, aby ve všech nádobách byla stejná oplachová kapalina, ale z důvodu rychlosti napouštění bylo zvoleno jedno čerpadlo obsluhující dvě nádoby, tudíž napouštění nádob by trvalo přibližně jednu minutu.

Celkově je tedy potřeba devět peristaltických čerpadel. Z důvodu symetrie a zachování variability je však konzole pro uchycení čerpadel navržena na deset čerpadel. Jedno z míst zůstane neobsazené, ale jeho nejvhodnější poloha se ukáže až při montáži.

V případě větších sérií vzorků je vhodné, aby vypouštění kádinek probíhalo do jiných nádob, než ze kterých byly kapaliny nasávány, a tak se nezneškodnocovaly čisté procesní kapaliny kontaminujícími produkty elektrolytického leštění. Tento problém je řešený elektricky ovládanými třicestnými ventily.

Z vývodního trnu peristaltického čerpadla vede jedna teflonová hadička do nádoby ve vrchní části stroje. Druhá hadička z nasávacího trnu vede do elektricky ovládaného třicestného ventilu. Z ventilu vede jedna hadička do zásobníku s procesní kapalinou umístěného na polici ve spodní části stroje a druhá hadička do odpadního zásobníku.

Sestava peristaltických čerpadel leží na hliníkovém profilu v horní části spodního prostoru. Jednotlivá čerpadla jsou přichycena k ohýbanému nerezovému plechu, který je připevněn k hliníkovým profilům tvořícím přepážku mezi spodním a horním prostorem. V tomto úhelníku jsou vypáleny díry pro upevnění peristaltického čerpadla podle rozměrů v datasheetu čerpadla (lze náhlednout v přílohách). K plechu je čerpadlo přichyceno šroubem a z druhé strany maticí (z obou stran podloženo podložkou).

7.1.14 Popis návrhu držáku

Materiál držáku

Variabilita složení elektrolytů a použitých chemikálií v nich je natolik široká, že je složité vybrat materiál držáku vzorku, který je odolný vůči všem těmto látkám. Z principu procesu elektrolytického leštění je naprosto nevhodný kovový nebo vodivý materiál. Řešením může být sice povlakování například nerezové oceli chemicky odolným materiálem, ale jako výhodnější se v tomto případě jeví výroba držáku vzorku z chemicky odolného nevodivého materiálu. Chemicky odolný nevodivý materiál by mohla být například keramika, avšak keramika je špatně obrobitelná a křehká. Držák z keramiky by bylo možné vyrobit slinováním, což je ale velmi nákladná technologie pro kusovou výrobu. Z předešlého vyplývá, že nejlepší kandidát pro materiál držáku bude chemicky odolný plast, jelikož držák není výrazně mechanicky namáhán (tabulka chemické odolnosti plastů v příloze). Z tabulky vyplývá, že mezi nejodolnější technické plasty patří teflon (PTFE).

Konstrukce držáku

Držák vzorku sestává z mnoha dílů, je však možné ho rozdělit na dvě, respektive tři hlavní skupiny. Horní část, která je připevněna k manipulátoru, a dolní část, do které se upíná vzorek. K horní části je však zesponu připevněn držák katody pomocí bajonetového spoje, takže lze tuto skupinu považovat za zvláštní entitu. Jednotlivé díly lze vidět na obr. 32, který znázorňuje tříčtvrtinový řez držákem.

Prvním dílem horní skupiny je připojení k hliníkovému profilu 20×20 mm. Profil u manipulátoru slouží jako smykadlo. Držák je přes díl, který je nazvaný „připojení k alu-profilu“, přišroubován do čela hliníkového profilu šroubem s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem o velikosti $M5 \times 20$. Tento díl je dále opatřen čtyřmi výstupky, které zapadají do drážek profilu a svazují tak natočení kolem osy Z profilu s natočením kolem osy Z držáku.

Ke spodní straně tohoto dílu je pomocí čtyř zápusných šroubů přišroubován díl pro našroubování dříku. Z boční strany je díra se závitem M3, která slouží pro našroubování pojistného červíku, který definuje natočení dříku vzhledem k manipulátoru.

Dřík je trubkový díl s vnějším průměrem 15 mm, který má v horní části vyřezaný závit M14. Tento se šroubuje do díry se závitem ve středu dílu pro našroubování dříku. V závitu dříku je příčná drážka, do které zapadne pojistný červík a definuje tak natočení. Uvnitř dříku se pohybuje nerezový (případně měděný) vodivý čep, který je z vrchní strany dotlačován tlačnou pružinou do koncové polohy, která je dána zmenšeným průměrem vnitřní díry dříku ve spodní části. Pružina je zajištěna šroubem $M8 \times 10$, který je našroubován do vrchního čela dříku (šroubem je možné nastavovat předpnutí pružiny). Do těla dříku je vyfrézovaná oválná díra, která slouží pro pohyb v ose Z nerezového šroubu našroubovaného do čepu. Pomocí soustavy tohoto šroubu, přírodního kabelku s krimpovacím očkem a vodivého čepu je zajištěn pružný elektrický kontakt až ke katodě, na kterou konec čepu z vrchní strany tlačí.

Dřík je zasunut do tubusu držáku, ve kterém je do krajní polohy odtlačován tlačnou pružinou, která je „na dně“ tubusu. Podél těla tubusu jsou dvě oválné díry. V oválných dírách se pohybují šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, které jsou našroubované do dříku. Takto je vymezený pohyb tubusu v ose Z a je znemožněna rotace kolem osy. Toto uložení tubusu na dříku slouží k pasivní kompenzaci v axiálním směru, tzn. držák je poddajný v ose Z. Proto při najíždění manipulátoru do pozice v paletce nehrozí tvrdé vymezení vůlí v ložiscích, případně poškození manipulátoru z důvodu nepřesného najetí do polohy.

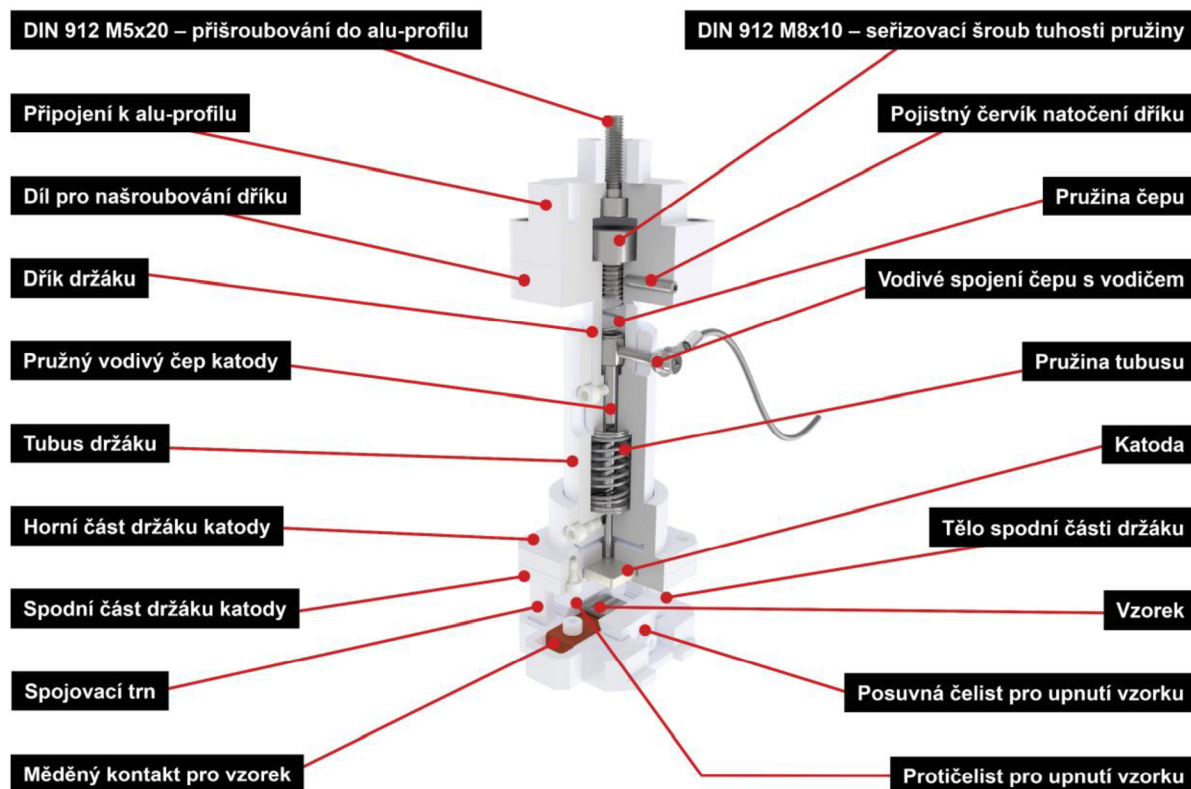
Z vnější strany na spodní části tubusu jsou proti sobě přišroubovány dva šrouby s DIN 912. Ty slouží jako čepy pro bajonetové spojení mezi tubusem a horní částí držáku katody. Bajonetové spojení je voleno z důvodu možnosti automaticky vyměňovat i držák s katodou, resp. používat katody z různých materiálů během jedné série vzorků.

K horní části držáku katody je zespod přišroubována třemi zápusnými šrouby spodní část, do které je vložena katoda a tři samostatné trny. Tyto trny mají lichoběžníkový průřez a slouží pro pohyb držáku vzorku v axiálním směru, tzn. nastavování vzdálenosti mezi leštěnou plochou vzorku a plochou katody. Trny jsou rozmístěny v konfiguraci rovnoramenného trojúhelníku. Protistojný trn má ze zadní strany vyfrézované vroubkové ozubení, po němž se pohybuje pružná západka vyfrézovaná v těle spodní části držáku. Toto slouží jako opatření proti samovolnému pohybu v axiálním směru.

Spodní část držáku je určena pro vodivě upnutí vzorku. Hlavním dílem spodní části je „tělo spodní části držáku“. K tomuto tělu je přišroubována z jedné strany napevno protičelist a z druhé strany je pomocí šroubu utahována posuvná čelist pro upnutí vzorku. Čelisti mají zkosený tvar čel, aby při utahování docházelo k přitlačování vzorku k měděnému pásku, který zajišťuje elektricky vodivé spojení.

Tento pásek je k tělu spodní části držáku připevněn pomocí šroubu s válcovou hlavou a je zahnutý přes hranu tak, aby se k ploše přitisknul shora přijíždějící vodivý trn. Tento trn má špičaté přední čelo a zajíždí do díry (objímky) na těle spodní části držáku. Při zajíždění do pozice dochází postupně k vymezení vůlí mezi trnem a měděným páskem, a je tak zaručený bezkapacitní kluzný kontakt.

Z boků těla spodní části držáku vyčnívají výstupky sloužící k zasunutí v zakládací paletce (zamezení pohybu v ose Z). Na spodní straně těla spodní části držáku je vyvrtaná díra, do které zapadá kulička aretační šroubu, umístěná v zakládací paletce (zajištění posuvného pohybu).



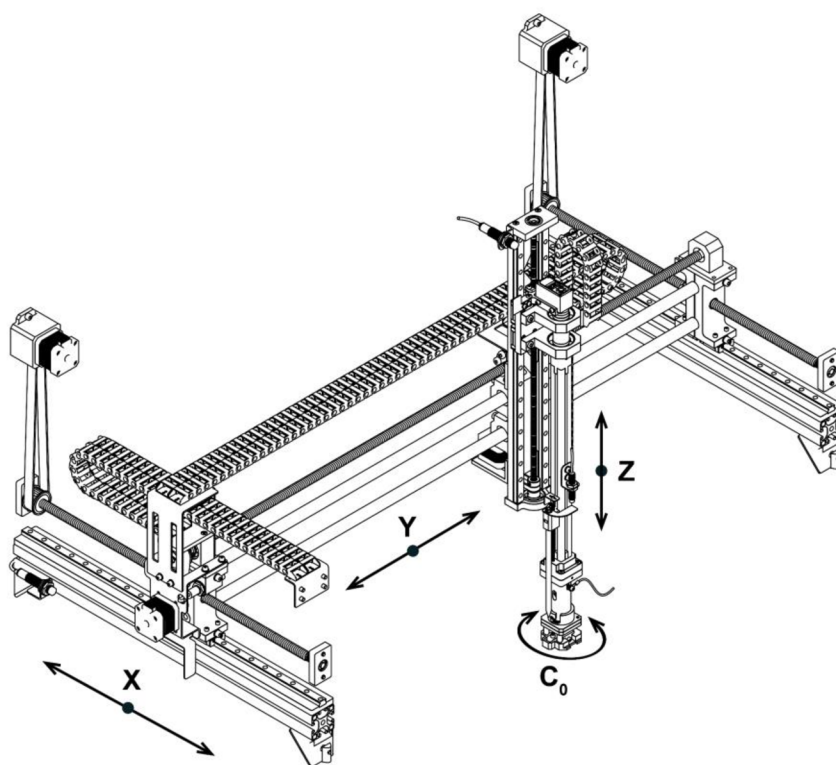
Obr. 32) Držák vzorku a katody

7.1.15 Manipulátor

Manipulátor využívá sériovou kinematiku TTTR v souřadnicovém systému XYZ (obr. 33). Pracovní obálka manipulátoru je tedy kvádr o rozměrech cca – šířka 800 mm, hloubka 340 mm, výška 390 mm. Koncový člen základního kinematického řetězce (smykadlo) vykonává svislý pohyb (v ose Z) a může rotovat kolem vlastní osy. Konstrukce manipulátoru je celoportálová a je umístěna uvnitř nosného rámu stroje.

Pro snímání koncových poloh jednotlivých os jsou voleny indukční přibližovací snímače. Kabley snímačů, elektropohonů a vodiče elektrolytického obvodu jsou vedeny skrze energořetězy. Tímto je zajištěná flexibilní dráha kabelů a vodičů skrze celý kinematický řetězec až ke koncovému členu.

Kabley snímačů a elektropohonů jsou vedeny do rozvaděče, kde je na DIN liště umístěné PLC a průmyslová jednotka PC. PLC řídí pohyby manipulátoru na základě vygenerovaných instrukcí z průmyslového počítače v závislosti na nastavení parametrů v řídicím softwaru.



Obr. 33) Schéma manipulátoru

Osa X a Y

Základním nosným prvkem manipulátoru jsou dva stavebnicové hliníkové profily 40×40 mm, které jsou k rámu stroje připevněny pomocí úhelníků, tudíž lze v případě potřeby seřadit svislou polohu manipulátoru. Na profilech jsou přišroubované přesné frézované hliníkové díly pro uložení kolejnic lineárního vedení.

Pohyb v ose X umožňují lineární vozíky HIWIN MGN12 na kolejnicích z každé strany (princip horní gántry). Na každé kolejnici jsou umístěny dva vozíky. To zajišťuje vyšší únosnost momentu v M_x (značeno podle výrobce).

Ke každému vozíku je připevněn hliníkový díl pro uchycení hlazených vodících tyčí o průměru 16 mm, které tvoří vedení osy X a pohybují se po nich vodorovné saně pro osu Z. Tento díl ve tvaru U tvoří s protistojným zrcadlově obráceným dílem konfiguraci I. K sobě jsou připevněny pomocí dvou šroubů M5, a tím se zároveň upevňují vodící tyče. Tato hliníková „účka“ jsou multifunkční. Díl je využitý pro vložení a přišroubování přírubové trapézové matice $TR12 \times 3$, která zajišťuje spolu s poháněným trapézovým šroubem pohyb v ose X. Ke spodní části jedné dvojice dílů je dále přišroubovaný plech, který míří proti přibližovacímu indukčnímu snímači koncové polohy přichycenému k hliníkovému profilu. Oba protistojné díly slouží k připevnění ložiskové jednotky pro uchycení trapézového šroubu $TR12 \times 3$ osy Y. K hliníkovému páru je nadále připevněn ohýbaný nerezový plech pro uchycení krokového elektromotoru NEMA17 k pohonu trapézového šroubu osy Y. Tento ohýbaný plech a hliníkový pár slouží pro uchycení plechového držáku energořetězu osy X, druhý konec energořetězu je přišroubován k ohýbanému nerezovému plechu přichycenému šrouby do drážky profilu stojky rámu. Z vrchní strany hliníkového U je připevněn energořetěz osy Y. Jeden hliníkový díl je modifikovaný pro zašroubování přibližovacího indukčního snímače LJ12A3 pro snímání koncové polohy osy Y. Na obr. 34 lze vidět výše popsané díly manipulátoru (pohled zezadu).



Obr. 34) Pohled na manipulátor zezadu

Trapézový šrouby TR12 × 3 jsou uloženy v radiálních ložiscích nalisovaných do hliníkových dílů sloužících k připevnění k profilu stojek rámu stroje. Z jedné strany je trapézový šroub vložený do otvoru ložiska a opřený o čelo válcové plochy, na které je umístěná ozubená řemenice HTD3M-20T8. Krouťací moment mezi řemenicí a šroubem je zajištěn perem, proti posunutí je řemenice zajištěna vnějším pojistným kroužkem. Obrobená válcová plocha na druhé straně trapézového šroubu je vložena do kosouhlého ložiska. Za touto válcovou plochou je vyřezaný závit M10 s příčnou drážkou. Šroub s ložisky je předeprnutý pomocí hřídelové KM matice s pojistnou podložkou MB, která slouží k zajištění hřídelové matice proti pootočení.

Dvojice krokových elektromotorů NEMA17, které pohánějí trapézové šrouby osy X, jsou přimontovány k hliníkovému dílu, který je upevněn na profilu rámu. Tento díl je navržen tak, aby ozubený řemen byl co nejbližší rámu, a tak nezvětšoval kolizní prostor s příčným.

Krokový elektromotor pro pohon trapézového šroubu osy Y upevněný na ohýbaném plechu lze posouvat ve svislém směru, a tím napínat ozubený řemen mezi řemenicí upevněnou na hřídeli krokového motoru a řemenicí navlečenou na trapézový šroub. Řemenice je nasunuta na vysoustruženou válcovou plochu a zajištěna pojistným perem proti pootočení. Proti axiálnímu pohybu je řemenice z jedné strany opřena o čelo většího průměru šroubu a z druhé strany zajištěna vnějším pojistným kroužkem. Do válcové plochy s větším průměrem vedle řemenice je vyřezaný závit M10 s příčnou drážkou, na který je našroubovaná hřídelová KM matice zajištěná pojistnou podložkou MB, jež se opírá o vnitřní kroužek dvouřadého kuličkového ložiska s kosouhlým stykem. To je zalisované v ložiskové jednotce, která je přišroubovaná k hliníkovým U dílům. Válcová osoustružená plocha na opačném konci trapézového šroubu je vložena do druhého dvouřadého ložiska s kosouhlým stykem. To je zalisované do ložiskové jednotky, která je přišroubovaná ke dvěma hliníkovým dílům ve tvaru U. Ložiska na obou stranách jsou uspořádána tak, aby tvořila konfiguraci do O. Ložisková jednotka má na jedné straně oválné drážky kvůli tomu, že je připojena ke dvěma dílům, jejichž vzdálenost od sebe se liší v závislosti na utažení spojovacích šroubů. Trapézový šroub je axiálně zajištěn vnějším pojistným kroužkem, o který se opírá vnitřní kroužek kosouhlého ložiska. V kombinaci s hřídelovou maticí na opačné straně dochází k předeprnutí ložisek a šroubu.

Osa Z

Základním prvkem osy Z je nosná hliníková deska s trojúhelníkovými otvory pro odlehčení (1), která slouží jako vodorovné saně manipulátoru. Výsledný tvar připomíná příhradovou konstrukci. K zadní straně dílu 1 jsou přišroubovány dva držáky (2) s lineárním ložiskem pro hlazenou vodící tyč o průměru 16 mm (označení držáku SC16UU). Další díl přišroubovaný k zadní straně dílu 1 je držák trapézové matice (3), k držáku je pěti šrouby přišroubovaná modifikovaná přírubová trapézová matice TR12x3 (4). Kvůli prostorovému uspořádání je část příruby ofrézovaná. Nad držákem trapézové matice (3) je přišroubovaný ohýbaný díl z nerezového plechu (5), který slouží jako držák ergořetězu pro osu Y (6). K boční straně nosné hliníkové desky (1) je u vrchního konce přišroubovaný ohýbaný výpalek z nerezového plechu (7) pro uchycení přibližovacího indukčního snímače koncového polohy (8).

Pod držáky lineárních ložisek (2) je k zadní části dílu 1 přišroubovaný držák (9) krokového elektromotoru NEMA17 (10). Držák krokového motoru (9) má oválné díry, díky kterým lze oddalováním krokového motoru (10) napínat ozubený řemen GT2 (12), který přenáší krouťací moment z ozubené řemenice (11) na hřídeli krokového motoru (10) na poháněnou ozubenou řemenicí (13) připevněnou na trapézovém šroubu TR8 (14). Trapézový šroub (14) je uloženy v hliníkovém válcovém dílu (15), který je vložený do jednořadého ložiska s kosouhlým stykem

7200 B CN 10x30x9 (16) a opírá se o vnitřní kroužek ložiska. Ložisko je zalísováno do ložiskové jednotky (17) z hliníkové slitiny, která je přišroubovaná dvěma šrouby M5 do čela nosné hliníkové desky (1). Trapézový šroub (14) je z vrchní strany uložený v hliníkovém dílu (22), který je vložen do radiálního kuličkového ložiska 608 2RS 8x22x7 (18). Ložisko (18) je zalísováno do ložiskové jednotky (19) z hliníkové slitiny, která je přišroubovaná do vrchního čela nosné hliníkové desky (1) pomocí dvou šroubů M5. Axiální vůle jednořadého ložiska s kosouhlým stykem (16) je vymezena hřídelovou KM1 maticí M12x1 (20) s pojistnou podložkou MB (21), které jsou umístěné na válcovém dílu pro uchycení trapézového šroubu (15).

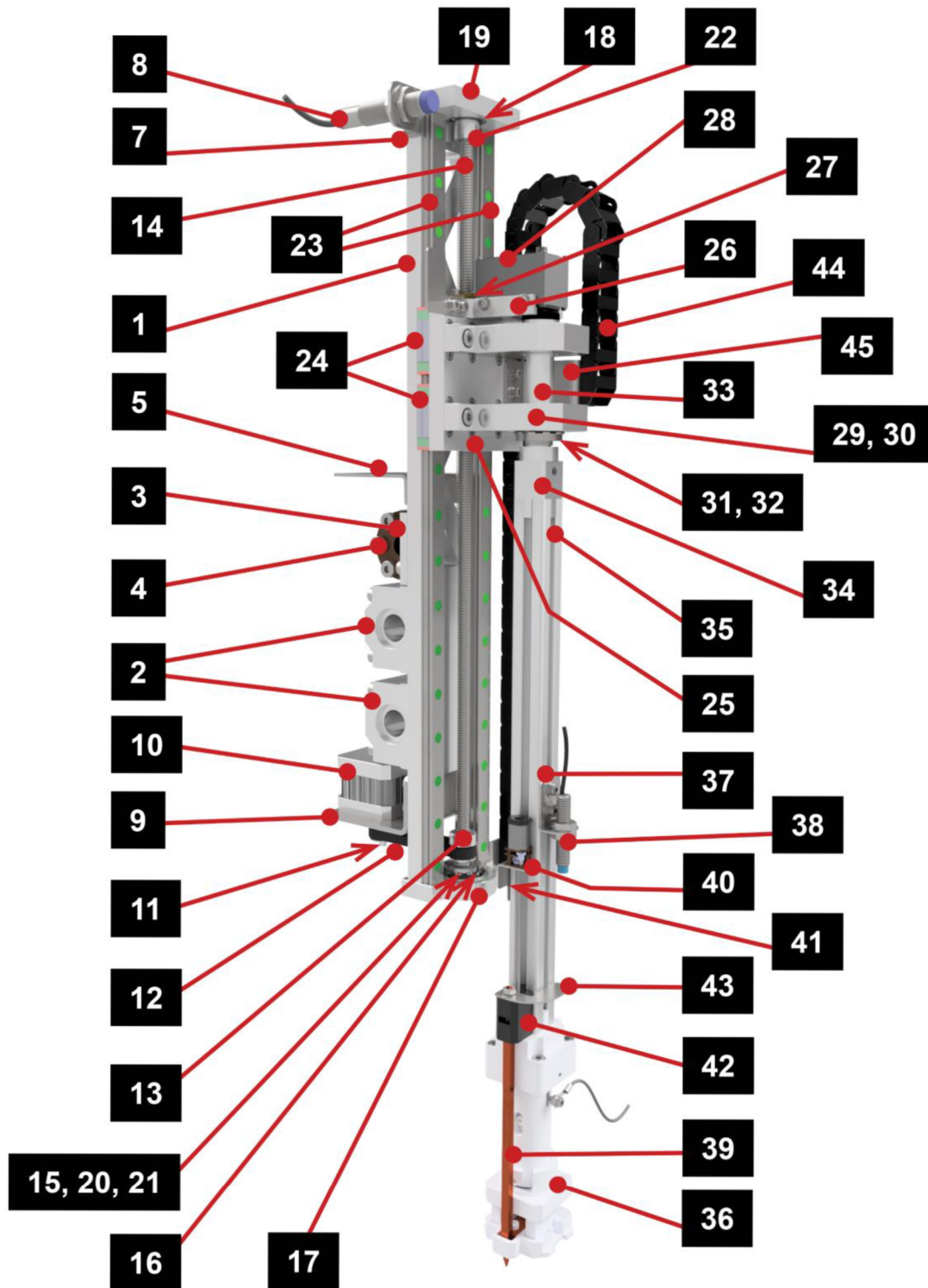
K přední straně nosné hliníkové desky (1) jsou přišroubované dvě lineární kolejnice HIWIN MGN12 (23). V hliníkové desce (1) jsou vyfrézované přesné drážky pro zapuštění lineárního vedení (23), aby byla jejich vzájemná pozice přesně definovaná. K desce (1) jsou kolejnice (23) přišroubovány pomocí šroubů DIN 912 M3 × 12. Otvory pro šrouby jsou zakryté plastovými víčky dodávanými s kolejnicemi (23). Na každé kolejnici jsou umístěné dva lineární vozíky HIWIN MGN12 (24). Na nich leží a je k nim přišroubovaná deska z hliníkové slitiny (25), která slouží společně s vozíky jako svislé saně osy Z. Z vrchní strany desky (25) je přišroubovaný hliníkový držák (26) pro připevnění odlehčené přírubové trapézové matice (27). K dílu 26 je dále připevněn stejnosměrný servomotor (28), sloužící pro pohyb C₀ (rotaci kolem osy Z). Po poháněním trapézovým šroubu (14) se pohybuje pevná trapézová matice (27), čímž je zajištěn pohyb svislých saní po ose Z. Na desce saní (25) jsou přišroubované dvě ložiskové jednotky (29), které jsou osazeny jednořadými kuličkovými ložisky s kosouhlým stykem 7202 B 15 × 35 × 11 (30), pro zachycení axiálních i radiálních sil. Uspořádání ložisek (30) je do O. Dosažení vymezení vůlí je dosaženo pomocí hřídelové KM2 matice M15x1 (31) spolu s pojistnou podložkou MB (32). Ta je našroubována na hřídelové součásti (33), která slouží k přišroubování k přírubě stejnosměrného servomotoru (28), prochází skrze obě ložiska (30) a na spodní části je přišroubovaná spojka (34) pro připojení hliníkového profilu 20 × 20 mm (35). Spojka z hliníkové slitiny (34) je nasazená na hřídeli (33) a přišroubována šroubem. Hliníkový profil (35) je k spojce přitáhnutý pomocí šroubu M5, který je zapuštěný v hliníkové spojce (34) v ose profilu. Hliníkový profil (35) má v osové díře vyřezaný závit. Proti pootočení je profil zajištěný výstupky na spojce (34), které zapadají do drážky profilu (35). Hliníkový profil slouží jako smykadlo a k jeho konci je přišroubovaný držák vzorku (36).

Přes matice vložené v drážce profilu (35) je přišroubovaný držák (37) přibližovacího indukčního snímače (38) pro snímání koncové polohy elektricky vodivého trnu (39). Trn (39) slouží k připojení a odpojení elektrolytického obvodu ke spodní části držáku (37) se vzorkem (anodou). Tímto způsobem je zkonstruován z důvodu případné automatické výměny střední části držáku (36), který slouží jako držák katody. Trn (39) se pohybuje v ose Z a je poháněný mikromotorem se šroubem (40), který je k profilu připojený plechovým držákem (41). Trn má v horní části závit, přes který je maticí M5 přitáhnutý k 3D vytištěnému plastovému kameni (42). Tento kámen (42) zapadá do drážky profilu 20 × 20 mm a je tak zajištěný proti otáčení v ose. Do kvádrové díry v kameni (42) je vložena čtvercová matice našroubovaná na šroubu mikromotoru (40). Tím jsou kámen (42) a zprostředkovaně i elektricky vodivý trn (39) rozpohybovány v ose Z. Ke kameni (42) je stejnou maticí jako trn (39) přišroubovaný i plech (43), který slouží k detekci koncové polohy kamene (42) s trnem (39) pomocí indukčního přibližovacího snímače (38).

Pro flexibilní spojení kabelů mezi nosnou deskou (1) a deskou svislých saní (25) slouží energořetěz (44). Ten je k nosné desce (1) přichycen pomocí držáku z ohýbaného výpalku

z nerezového plechu (45) přišroubovaného k boční straně nosné hliníkové desky (1). K desce svislých saní (25) je energořetěz připojen pomocí držáku z ohýbaného výpalku z nerezového plechu (46).

Na obrázku č. 35 lze vidět osu Z s odkazy na jednotlivé díly, které jsou popsány v textu.



Obr. 35) Díly osy Z

7.2 Výpočet důležitých prvků mechanické konstrukce manipulátoru

Tato kapitola je zaměřená na výpočet nutných parametrů pro klíčové prvky konstrukce. Mezi tyto parametry patří například potřebný moment motoru pro pohyb soustavy, průhyb příčnicku nebo zatížení a životnost ložisek.

7.2.1 Potřebný moment motoru

Při návrhu velikosti motoru se zohledňuje tato hlediska: statické, kinematické, dynamické, a provést kontrolu oteplení. [31]

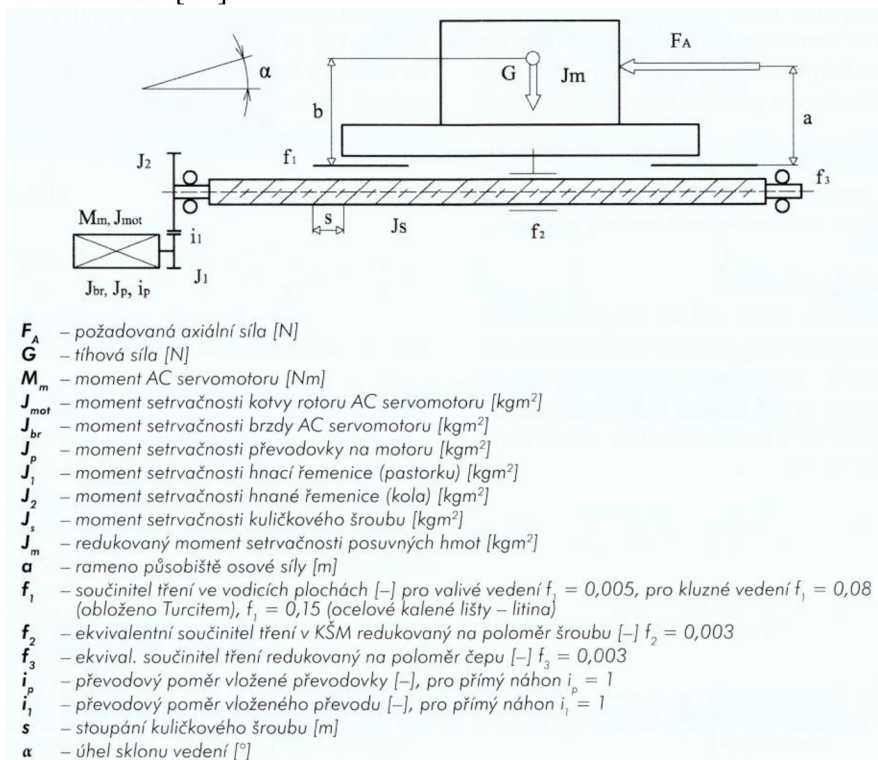
Statické hledisko určuje potřebný moment pro rozpohybování pohybového řetězce, tzn. překonání všech třecích sil, axiální síly a gravitační síly.

Kinematické hledisko řeší pracovní cykly a zda dojde při dané dráze, rychlosti a zrychlení k nadlimitní nebo podlimitní rychlosti rovnoměrného pohybu. U manipulátoru pro elektrolitické leštění na rozdíl od obrábění nezáleží na tom, zdali dosáhneme rovnoměrného pohybu na dráze, či nikoliv. Z toho důvodu toto se toto hledisko zanedbá.

Dynamické hledisko zohledňuje rozpohybování všech hmot, jako jsou řemenice, šroub, ložiska. Zkušební výpočty ukazují, že pro silové aplikace (tj. v případech, kde není nutná dobrá dynamika) vychází moment motoru větší ze statických poměrů. Pokud nám však záleží i na celkovém čase, musíme provést i dynamický výpočet, jelikož moment určený z dynamického hlediska vychází ve většině případů větší.

Hledisko oteplení zohledňuje vývin tepla při přeměně elektrické energie na mechanickou, aby oteplení motoru nepřekročilo mez stanovenou pro danou třídu izolace. Provoz automatizované elektrolitické leštičky bude však nárazový a délka cyklů je velmi krátká. Z toho důvodu toto hledisko bude zanedbáno.

Na obrázku 36 lze vidět výpočtový model posuvové souřadnice s kuličkovým šroubem, pro konstrukci manipulátoru jsou však použity šrouby lichoběžníkové, tzn. šrouby s větším třením, resp. nižší účinností. [31]



Obr. 36) Výpočtový model posuvové souřadnice s kuličkovým šroubem [31]

Statické hledisko

Podle obr. 35 lze určit potřebný moment motoru z hlediska statického (tzn. vyvození požadované axiální síly, překonání gravitační složky při skloněném vedení a pasivních odporů).

Následující rovnice určují výpočet moment motoru: [31]

$$M_m = \frac{F_A \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_1 \cdot \eta_c} + \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_1 \cdot \eta_c} \quad (3)$$

kde:

η_c – celková účinnost posuvové soustavy [–]

Celkovou účinnost η_c můžeme stanovit odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L^j \cdot \eta_p \cdot \eta_1 \quad (4)$$

kde:

η_v – účinnost vedení, kluzné: $\eta_v = 0,8$, valivé: $\eta_v = 0,98$,

η_s – účinnost šroubu/matice podle vzorce (5),

η_L – účinnost jednoho ložiska kuličkového $\eta_L = 0,99$, pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách $\eta_L^j = 0,92$,

η_p – účinnost převodové skříně = 0,9,

η_1 – účinnost vloženého převodu, ozubený řemen: = 0,99. [31]

Účinnost systému šroub/matice lze spočítat podle vzorce (5): [32]

$$\eta_s = \frac{1 - f \cdot \tan \alpha_s}{1 + \frac{f}{\tan \alpha_s}} \quad (5)$$

kde:

η_s – účinnost šroubu/matice

f – dynamický koeficient tření mezi materiálem šroubu a materiálem matice

α_s – úhel sklonu šroubovice závitů

Kroutící moment, který je nutný pro uvedení systému šroub/matice do pohybu, lze spočítat podle následujícího vztahu (6):

$$M_k = \frac{F_A \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (6)$$

kde:

M_k – kroutící moment [Nm]

F_A – axiální síla působící na matici [N]

P – stoupání závitu [mm]

η – účinnost

Na rozdíl od obráběcího stroje není v případě manipulátoru vyžadována žádná přidavná axiální síla, která je u obráběcího stroje nutná pro obráběcí proces. Axiální sílu působící proti uvedení systému do pohybu lze vyvodit ze setrvačné síly od pohybujícího se tělesa $F = m \cdot a$, třecích sil a gravitační síly $F_g = m \cdot g \cdot \sin \alpha$ v případě nakloněného vedení. Tímto do statického hlediska však zavádíme dynamickou sílu, tudíž výsledek nebude čistě z hlediska statického.

Zjednodušená rovnice (6) nepočítá s výkonem pohyblivých orgánů, proto se v praxi při projektování navyšuje potřebný kroutící moment o 20 nebo 30 %, v případě elektromotorů s nízkým záběrným momentem o 50 %. Podstatu tohoto navýšení lze pozorovat ve vztahu celkové účinnosti posuvové soustavy (4). [32]

Při aplikaci převodového poměru, rozepsání složek axiální síly a nahrazení třecích sil kompenzační konstantou dostaneme tento vztah pro moment motoru (7):

$$M_m = \frac{(m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta \cdot i_1} \cdot k \quad (7)$$

kde:

M_m – je moment motoru [Nm]

m – je hmotnost poháněné soustavy [kg]

a – požadované zrychlení poháněné soustavy [ms^{-2}]

g – gravitační zrychlení $g = 9,82 \text{ ms}^{-2}$

α – úhel náklonu vedení [deg]

i_1 – převodový poměr vloženého převodu

k – kompenzační konstanta $k = 1,3 [-]$

Dynamické hledisko

Tvar momentové rovnice, která určuje velikost momentu motoru, je při konstantním momentu setrvačnosti J_{rhm} a momentu zátěže M_{zdrhm} redukovánému na hřídel motoru následující:

$$M_m = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} \quad (8)$$

kde:

ε_m – úhlové zrychlení motoru [rads^{-2}]

$$\varepsilon_m = \varepsilon_s \cdot i_1 \quad (9)$$

kde:

ε_s – úhlové zrychlení šroubu [rads^{-2}]

Úhlové zrychlení šroubu a motoru získáme z lineárního zrychlení saní/stolu:

$$\varepsilon_s = \frac{a \cdot 2000 \cdot \pi}{P} \quad (10)$$

Moment zátěže M_{zdrhm} má dvě složky.

V případě nakloněné posuvové soustavy budou gravitační síly generovat zátěžový moment od přesouvacích hmot M_G :

$$M_G = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot P}{2000 \cdot i_1 \cdot \eta_1} \quad (11)$$

pro $\alpha = \{0^\circ, <90^\circ\}$,

$$M_G = \frac{3 \cdot m \cdot g \cdot b \cdot f_1 \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_1 \cdot L} \quad (12)$$

pro $\alpha = 90^\circ$, kde:

L – délka stolu [m]

Druhou složkou momentu zátěže je moment pasivních odporů M_{GT} :

$$M_{GT} = \frac{m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot P}{2000 \cdot i_1 \cdot \eta_1} \quad (13)$$

Axiální třecí síla ve vedení způsobí v ose šroubu ztrátový moment, nicméně ztráty se zahrnou do navýšení momentu o 30 % pomocí konstanty $k=1,3$.

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru M_{zdrhm} je roven následujícímu:

$$M_{zdrhm} = (M_G + M_{GT}) \cdot k \quad (14)$$

Moment setrvačnosti charakterizuje rozložení hmotnosti tělesa v prostoru. Pohon musí při rozběhu urychlit všechny tyto hmoty. [31]

Pro těleso tyčového tvaru (šroub) je moment setrvačnosti roven (15): [31]

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot b \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^4 \quad (15)$$

kde:

ρ – hustota materiálu [kgm^{-3}]

b – délka šroubu [m]

d – průměr šroubu [m]

Pro těleso tvaru dutého válce (řemenice) je moment setrvačnosti roven (16): [31]

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot b \cdot \left[\left(\frac{D}{2}\right)^4 - \left(\frac{d}{2}\right)^4 \right] \quad (16)$$

kde:

ρ – hustota materiálu [kgm^{-3}]

b – délka válcového tělesa [m]

d – průměr vrtání válcového tělesa [m]

D – vnější průměr válcového tělesa [m]

Podle zákona o zachování energie je nutné redukovat posuvné hmoty do osy šroubu na myšlené rotační hmoty podle vztahu (17): [31]

$$J_m = m \cdot \left(\frac{P}{2000 \cdot \pi}\right)^2 \quad (17)$$

kde:

m – celková přesouvaná hmotnost [kg]

Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru je dán rovnicí (18): [31]

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_1 + \frac{J_2}{i_1^2} + \frac{J_s}{i_1^2} + \frac{J_m}{i_1^2} \quad (18)$$

Určení momentu motorů pro pohyb v ose X:

Pohyb soustavy je zajišťován dvěma krokovými motory, tudíž potřebný moment motoru bude poloviční, avšak s navýšením jedné sady třecích sil pohybové soustavy.

Statické hledisko:

Po upravení vzorce (7) dostáváme vztah (19):

$$M_m = \frac{(m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta \cdot i_1 \cdot 2} \cdot k^2 \quad (19)$$

Po dosazení:

$$M_m = \frac{(8,7 \cdot 2 + 8,7 \cdot 9,82 \cdot \sin 0) \cdot 3}{2000 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 2 \cdot 2} \cdot 1,3^2 = 0,0125 \text{ Nm} \quad (19)$$

Dynamické hledisko:

Po dosazení do výše uvedených vztahů (vizte přílohy Osa_X.py), vychází hodnota momentu motoru dynamického hlediska pro osu X $M_m = 0,0778 \text{ Nm}$.

V konstrukci je zvolen krokový motor NEMA17 17HS4401S s momentem 0,4 Nm, který je dostatečně naddimenzován.

Určení momentu motoru pro pohyb v ose Y:

Pohyb horizontálních saní je zajišťován jedním krokovým motorem, jehož minimální kroutící moment se získá po dosazení do vzorce (7):

$$M_m = \frac{(3,4 \cdot 2 + 3,4 \cdot 9,82 \cdot \sin 0) \cdot 3}{2000 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 2} \cdot 1,3 = 0,00753 \text{ Nm} \quad (7)$$

Dynamické hledisko:

Po dosazení do výše uvedených vztahů (vizte přílohy Osa_Y.py), vychází hodnota momentu motoru dynamického hlediska pro osu X $M_m = 0,0922 \text{ Nm}$.

V konstrukci je zvolen krokový motor NEMA17 17HS4401S s momentem 0,4 Nm, který je dostatečně naddimenzován.

Určení momentu motoru pro pohyb v ose Z:

Pohyb horizontálních saní je zajišťován jedním krokovým motorem, jehož minimální kroutící moment se získá po dosazení do vzorce (7):

$$M_m = \frac{(1,1 \cdot 2 + 1,1 \cdot 9,82 \cdot \sin 90) \cdot 3}{2000 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 1} \cdot 1,3 = 0,0144 \text{ Nm} \quad (7)$$

Dynamické hledisko:

Po dosazení do výše uvedených vztahů (vizte přílohy Osa_Z.py), vychází hodnota momentu motoru dynamického hlediska pro osu X $M_m = 0,0350 \text{ Nm}$.

V konstrukci je zvolen krokový motor NEMA17 17HS3401S s momentem 0,28 Nm, který je dostatečně naddimenzován.

7.2.2 Průhyb lineárního vedení osy Y

Vodící tyče lineárního vedení jsou leštěné trubky o vnějším průměru $D = 16$ mm a vnitřním průměru $d = 7$ mm. Jsou vyrobeny z nerezové oceli s modulem pružnosti v tahu $E = 210$ GPa. Pro výpočet průhybu nosníku nahradíme trubky jednoduchým prutem o dvojnásobném kvadratickém momentu průřezu. Upnutí hlazených tyčí nedovoluje natočení, tudíž je nutné počítat s vetknutím z obou stran. Největší průhyb bude ve středu délky lineárního vedení. Ke statickému zatížení od hmoty osy Z lze přičíst dynamickou sílu, kterou vyvozuje zrychlení (zpomalení) smykadla při vertikálním pohybu. Na obr. 36 lze vidět náhradu problému na 2D prutovou staticky neurčitou úlohu dvakrát vetknutého nosníku zatíženého osamělou silou.

Pro tento speciální případ je pak maximální průhyb roven vztahu (20): [33]

$$w_{max} = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot J} \quad (20)$$

Rozepsáním působící síly, vynásobením průřezu počtem vodících tyčí s daným průřezem a úpravou síly z N na kN získáme vztah (21)

$$w_{max} = \frac{(m_s \cdot a + m_c \cdot g) \cdot l^3}{1000 \cdot 192 \cdot E \cdot 2 \cdot J} \quad (21)$$

kde:

F – je osamělá síla působící na nosník [kN]

l – je délka nosníku [mm]

E – Youngův modul pružnosti [GPa]

J – kvadratický moment průřezu, určí se podle vztahu (21) [mm^4]

m_s – hmotnost smykadla a svislých saní [kg]

m_c – celková hmotnost soustavy osy Z [kg]

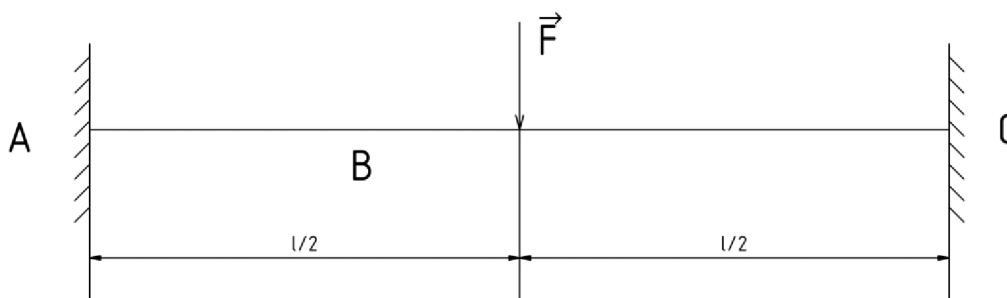
a – zrychlení smykadla a saní [ms^{-2}]

g – tíhové zrychlení [ms^{-2}]

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (16^4 - 7^4) = 3099,1320 \text{ mm}^4 \quad (22)$$

Po dosazení do vztahu (20) získáme hodnotu w_{max} :

$$w_{max} = \frac{(1,1 \cdot 2 + 3,4 \cdot 9,82) \cdot 880^3}{1000 \cdot 192 \cdot 210 \cdot 2 \cdot 3099,1320} = 0,097 \text{ mm} \quad (21)$$



Obr. 37) Nahrazení lineárního vedení nosníkem [33]

7.2.3 Kontrola statických momentů působících na vozík lineárního vedení

V konstrukci jsou použita lineární vedení HIWIN MGN12C, jejichž statická únosnost v tlaku je 4000 N, což odpovídá 400 Kg na jeden vozík. Dynamická únosnost pro tento typ vozíku je 2900 kN. Z hlediska dimenzování je tedy nejkritičtějším parametrem moment působící na vozík. Značení momentů je v souladu s technickou dokumentací pro lineární vedení HIWIN MG (vizte zdroj [46]). Mohou se vyskytnout tři statické momenty M_o , M_x a M_y . Z konstrukčního uspořádání použitých lineárních vedení, která jsou symetricky zdvojená v krajních polohách, plyne, že statický moment M_o bude vznikat pouze od průhybu nosníku. Ze statického hlediska zde nebude působit moment M_y . Bude vypočítán statický moment působením hmoty smykadla na ose Z a moment vznikající působením hmoty v těžišti soustavy osy Z mimo osu vedení osy Y.

Lineární vedení osy X

Statický moment M_o získáme ze vztahu pro oboustranně vetknutý nosník podle obr. 36:

$$M_A = M_C = -\frac{F \cdot l}{8} \quad (23)$$

$$M_A = M_C = -\frac{m \cdot g \cdot l}{8} = -\frac{3,4 \cdot 9,82 \cdot 0,88}{8} = 3,67 \text{ Nm} \quad (24)$$

kde:

M_A – ohybový moment v bodě A [Nm]

M_C – ohybový moment v bodě C [Nm]

F – osamocené síla působící ve středu nosníku [N]

l – délka nosníku [m]

m – hmotnost sestavy osy Z [kg]

g – tíhové zrychlení [ms^{-2}]

Dovolený statický moment pro jeden vozík MGN12C je 26 Nm.

Statický moment M_x vzniká od vyosení soustavy osy Z podle obr. 38.

Velikost celkového statického momentu M_x od hmoty sestavy osy Z získáme z tíhové síly a ramena, na kterém působí podle vztahu (25) a (26) Osu Y nesou čtyři vozíky. Na jeden vozík bude tedy působit čtyřikrát menší moment podle rovnice (27):

$$M_x = G \cdot a \quad (25)$$

$$M_x = m \cdot g \cdot a = 3,4 \cdot 9,82 \cdot 0,036 = 1,2 \text{ Nm} \quad (26)$$

$$M_{x1} = \frac{M_x}{4} = \frac{1,2}{4} = 0,3 \text{ Nm} \quad (27)$$

kde:

G – tíhová síla [N]

a – vzdálenost těžiště od roviny vedení [m]

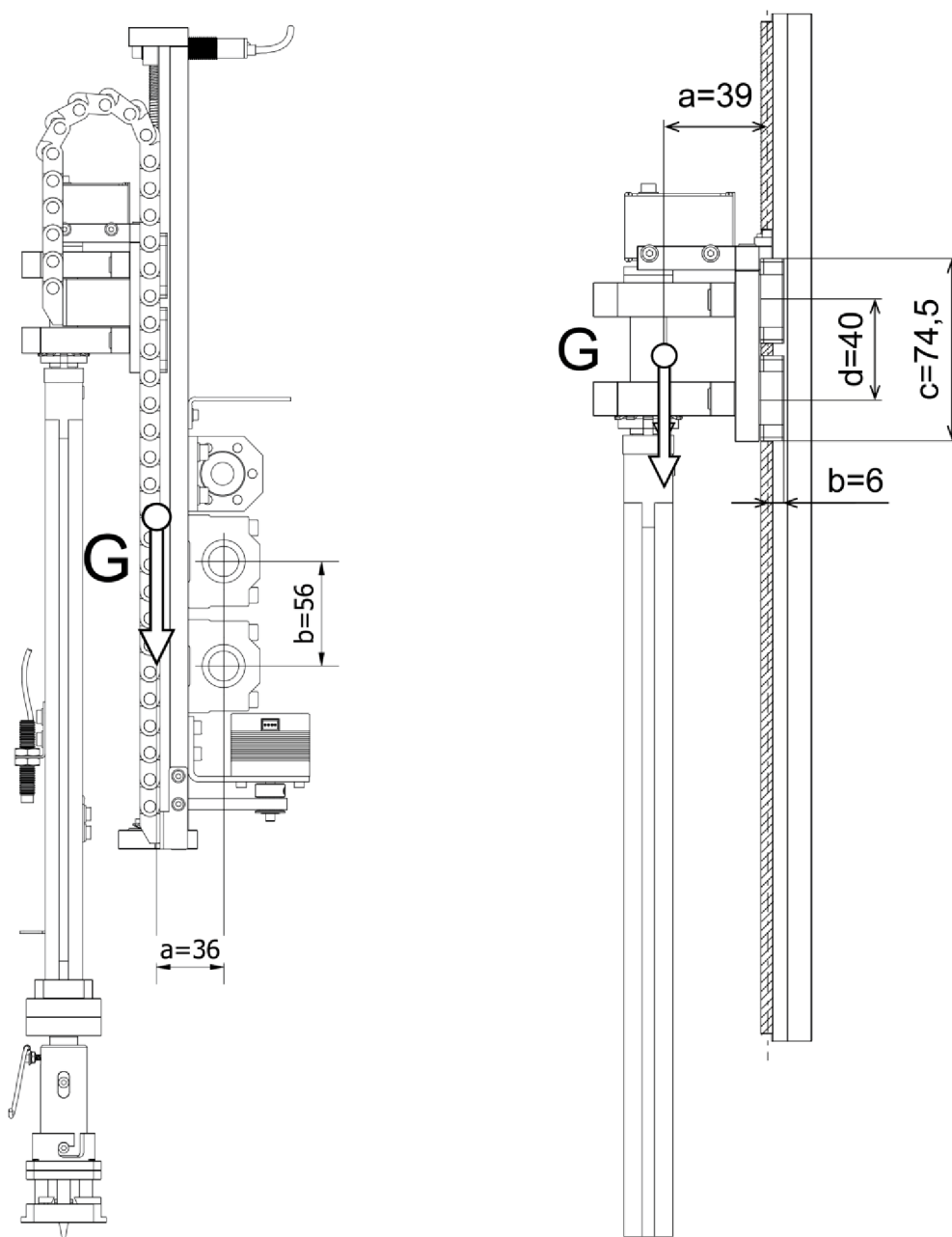
Dovolený statický moment M_x je pro vozík je 14 Nm.

Lineární vedení svislých saní

Na obrázku 39 lze vidět schéma působení tíhové síly v těžišti sestavy smykadla a svislých saní. Moment M_x se získá z tíhové síly a velikosti ramene, na kterém působí podle vztahu (25) a (26). Moment působí na čtyři vozíky, tudíž je moment na jeden vozík čtvrtinový. Po dosazení do rovnice (26) a (27) se získá:

$$M_{x1} = \frac{m \cdot g \cdot a}{4} = \frac{1,1 \cdot 9,82 \cdot 0,039}{4} = 0,1 \text{ Nm}$$

Dovolený statický moment M_x pro jeden vozík je 14 Nm.



Obr. 38) Tíhová síla v těžišti sestavy

Obr. 39) Tíhová síla v těžišti smykadla

7.2.4 Určení trvanlivosti ložisek

Doporučená hodnota požadované trvanlivosti ložisek pro stroje pro krátkodobý nebo přerušovaný provoz L_D je 3000 až 8000 hodin. [34]

Základní výpočtovou trvanlivost ložiska v provozních hodinách lze určit takto: [34]

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (28)$$

kde:

L_{10} – základní výpočtová trvanlivost [10^6 ot]

C – základní dynamická únosnost [kN]

P – ekvivalentní dynamické zatížení ložiska [kN]

a – exponent: pro kuličková ložiska $a=3$ [-]

Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska získáme z rovnice: [34]

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (29)$$

kde:

F_r – radiální zatížení ložiska [kN]

F_a – axiální zatížení ložiska [kN]

X – součinitel dynamického radiálního zatížení [kN]

Y – součinitel dynamického axiálního zatížení [kN]

Koeficienty X a Y jsou závislé od poměru F_a/F_r a lze je najít v tabulce katalogu výrobce. Pro jednořadá kuličková ložiska s kosouhlým stykem ve vyhotovení B ($\alpha = 40^\circ$) platí, že pro $F_a/F_r > 1,14$: [45]

$$P = 0,35 \cdot F_r + 0,57 \cdot F_a \quad (30)$$

Pro radiální ekvivalentní statické zatížení u jednořadých kuličkových ložisek s kosouhlým stykem ve vyhotovení B ($\alpha = 40^\circ$) platí, že: [45]

$$P = 0,5 \cdot F_r + 0,26 \cdot F_a \quad (31)$$

Ložiska na ose X:

Ložiska na ose X jsou radiálně zatěžovaná od předepnutí řemene. Míjivou setrvačnou sílu od pohybujících se horizontálních saní by mělo zachytit lineární vedení. Axiálně jsou ložiska zatěžovaná pouze míjivě setrvačnou silou. Vzhledem k malé dynamice krokového motoru a naddimenzování konstrukce lze ložiska považovat za vyhovující. Předdimenzování konstrukce je důsledkem použití nejmenších dostupných komponent, které jsou i tak výrazně odolnější vzhledem v poměru k nízkým zatížením manipulátoru.

Ložiska na ose Y:

Ložiska na ose Y jsou zatěžována radiálně a axiálně míjivě setrvačnou silou od pohybující se hmoty, která působí na lichoběžníkový šroub. Vzhledem k malé dynamice krokového motoru a naddimenzování konstrukce lze ložiska považovat za vyhovující. Předimenzování konstrukce je důsledkem použití nejmenších dostupných komponent, které jsou i tak výrazně odolnější vzhledem v poměru k nízkým zatížením manipulátoru.

Ložiska na ose Z:

Ložisko lichoběžníkového šroubu

Lichoběžníkový šroub je uložen v hliníkovém dílu, který je zalisován v jednořadém kuličkovém ložisku s kosouhlým stykem. Skrze lichoběžníkový šroub na ložisko axiálně působí tíhová síla od sestavy svislých saní a smykadla. Radiálně na ložisko působí síla předpětí řemene.

Po dosazení do výše uvedených vztahů získáme:

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{0,35 \cdot F_r + \frac{0,57 \cdot m \cdot g}{1000}} \right)^a \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (32)$$

$$L_{10h} = \left(\frac{5}{0,35 \cdot 0,01 + \frac{0,57 \cdot 1,1 \cdot 9,82}{1000}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 1500} = 1,54 \times 10^9 h \quad (32)$$

Hodnota trvanlivosti ložiska je výrazně vyšší, než je požadováno. Toto ložisko je výrazně naddimenzované.

Ložiska rotační osy C₀:

Vzhledem k malému využití ložisek na rotační ose C₀ a malému zatížení v poměru k velikosti ložisek lze prohlásit ložiska za vyhovující.

7.3 Popis provozu navrženého stroje pro elektrolytické leštění

Po převezení stroje do laboratoře se zabrzdí všechna kola a zajistí se tak jeho poloha. K trubce ventilátoru, ke které je přístup z vnějšku stroje, se připojí chemicky odolná hadice pro odsávání par ze stroje a druhý konec hadice se navede k digestoři. Pro chlazení elektrolytu vnějším chladícím okruhem se připojí hadice ke koncovkám na kulových ventilech. Ventil s modrou páčkou pro hadici vedoucí z chlazení a ventil s červenou páčkou pro hadici vedoucí do chlazení. Po připojení hadic lze ventily otevřít, tím se spojí chladicí okruh vedoucí na ultrazvukové lázně s externím chladícím zařízením.

Poté se stroj zapojí do elektřiny a na rozvaděči se stlačí tlačítko pro rozběh ventilátoru. Spuštění ventilátoru je oddělené od spuštění dalších subsystemů stroje, aby byl zajištěn odtah nebezpečných par před tím, než se spustí části systému, které nejsou zabezpečené proti výbuchu. Až se vymění vzduch v pracovním prostoru stroje, je možné zapnout tlačítkem vyšší subsystemy stroje.

Po náběhu průmyslového počítače se na obrazovce spustí aplikace pro ovládání stroje. V aplikaci bude možné zadávat parametry pro specifikaci procesu elektrolytického leštění. Parametry se určí pro jednotlivé pozice v základací paletce, kterou v tuto chvíli může mít obsluha před sebou a může podle ní zapisovat do aplikace. Konkrétně se budou zapisovat parametry, jako materiál vzorku, vzdálenost katody od vzorku, čas leštění, druh elektrolytu, velikost napětí, případně materiál katody (pokud by se využila možnost automatické výměny katod), dále se zadá čas oplachu, druh oplachového média, poté parametry pro ovládání ultrazvukové čističky jak pro elektrolyty, tak pro oplach (vypnuto, zapnuto, výběr módu) a nakonec čas sušení. Do aplikace je nutné zadat, ve kterých pozicích se nachází jednotlivé kapaliny, případně vybrat z dříve uložených profilů. Zadané údaje se zapíší do databáze pro pozdější vyhodnocení. Do databáze se také zapíší parametry naměřené pomocí DAQ měřicího zařízení od National Instruments. Uživatel si může vybrat umístění pro uložení nastavení experimentu jako profil pro budoucí opakování.

Během elektrolytického leštění se zaznamenává průběh napětí, proudu a změna teploty. To zajišťují karty umístěné v šasi kompaktního měřicího zařízení pro sběr dat (DAQ – Data acquisition). Program pro měření zajišťuje programovací prostředí LabView, které ovládá měřicí hardware. LabView, aplikace pro ovládání, vstupy a výstupy do a z PLC jsou navzájem propojeny.

Uživatel po vyplnění potřebných parametrů klikne na ikonu pro vložení vzorků. Aplikace v součinnosti s PLC nejdříve spustí referencování manipulátoru. To vypadá tak, že se nejdříve zreferencuje osa Z, která má koncový snímač v horní poloze, poté manipulátor zajede postupně ke koncovým snímačům na ose X a Y. Když je manipulátor v této pozici – home pozici – povolí PLC otevření dveří, které uživatel odemkne zeleným tlačítkem. To je umístěno na předním panelu stroje na straně dveří. Každé dveře mají vlastní sadu ovládání. Stlačením tlačítka se přestaví bezpečnostní zámek do pozice otevřeno a vypne se odsávání. Laborant poté může otevřít dveře. PLC také nastavilo zámek paletky do polohy pro vložení. Obsluha vloží do stroje paletku, do jejíž pozic dříve založila upnuté vzorky ve spodních částech držáku. Tuto paletku lze vložit pouze jedním směrem, tak aby byly jednotlivé pozice přesně určeny. Po zasunutí paletky do koncové polohy a zavření dveří zmáčkne obsluha tlačítko pro zavření (černé tlačítko vedle tlačítka pro otevření). To spustí podprogram pro zamčení dveří, otočení aretačního zámku paletky a spuštění ventilátoru.

Pokud obsluha již dříve nenaplnila nádoby s kapalinami ve spodní části stroje, učiní tak nyní. Po odemčení plechových dveří může obsluha do jednotlivých pozic naskládat nádoby

s elektrolyty, s oplachem a odpadní nádoby a napojit je hadičkami k subsystému automatické výměny kapalin. Lze využít i možnost manuální výměny kapalin, kdy obsluha do jednotlivých pozic v horní části stroje naskládá kádinky s kapalinami sama. Možnost mezi automatickým plněním nebo manuálním vybere laborant v aplikaci. V případě manuálního plnění dostane uživatel oprávnění pro vstup do prostoru s kapalinami v horní části stroje. Po zmáčknutí tlačítka pro otevření dveří se odemkne bezpečnostní zámek a zastaví ventilátor. Ventilátor se zastaví proto, aby do stroje nenasával aktivně prach z okolí. Po této sekvenci uživatel může posuvné dveře otevřít. Po naskládání kádinek do jednotlivých pozic dveře zavře a tlačítkem pro zamčení zablokuje, poté se spustí odsávání. V obou případech plnění musí obsluha ověřit, zdali je ultrazvuková lázeň naplněná, případně ji naplnit vodou nebo jiným médiem pro přenos zvukových vln mezi ultrazvukovým zářiči a kádinkami. V případě manuálního plnění může v této fázi obsluha spustit automatické elektrolytické leštění. V případě automatického plnění uživatel zadá plnění kádinek. Po naplnění kádinek je uživatel vyzván k potvrzení, že stroj může začít automatické elektrolytické leštění.

Po spuštění programu pro elektrolytické leštění najede manipulátor nad první pozici v paletce. Smykadlo s horní částí držáku sjede do pozice, ve které se spojí s dolní částí držáku. Tato pozice je určena zadaným parametrem vzdálenosti katody od vzorku (čím níže smykadlo dojede, tím menší vzdálenost mezi katodou a vzorkem). Poté se spustí mikromotor, který spustí elektricky vodivý kontaktní trn do koncové pozice. Tím se vodivě napojí vzorek na obvod ve stroji. Manipulátor pak vykoná pohyb v osy Y a uvolní tak spodní držák z paletky.

Následně vyjede smykadlo vzhůru a přesune se nad kádinku s odpovídajícím elektrolytem pro první pozici. Těsně nad kádinkou s elektrolytem se zapne programovatelný zdroj napájení na určené napětí, měření pomocí cDAQ, podle parametrů se případně sepne ultrazvuková lázeň a manipulátor ponoří vzorek s katodou do elektrolytu na stanovený čas. V softwaru bude možné také nastavit, že manipulátor nejdříve zajede do oplachu a až poté do elektrolytu, pokud si to bude experiment vyžadovat.

Po stanoveném čase manipulátor vytáhne vzorek nad kádinku do bezpečné pozice pro přesun, vypne se zdroj napájení a manipulátor se přesune nad kádinku s určenou oplachovou kapalinou. Kádinka je v ultrazvukové čističce a zapíná se podle stanovených parametrů. Manipulátor na stanovený čas ponoří držák se vzorkem do oplachu. Dále se oplach opakuje podle nastavení experimentu v dalších kádinkách, které jsou k dispozici.

Po oplachu najede manipulátor ke stanici s odsáváním. Nejprve se zasune do přípravku, který slouží k přidržení spodní části držáku a pohybem smykadla vzhůru se spodní část oddálí od horní části až do krajní pozice. Poté manipulátor najede nad pružný plunžr vysavače a pohybem dolů plunžr zatlačí, a tím odkryje odsávací otvory v bocích odsávacího boxu. Tímto se oplachová kapalina, která ulpěla na držáku, odsaje.

Po odsání najede manipulátor nad zásobník sušení a komplementárním pohybem k vytažení spodní části z paletky spodní část do příslušné pozice zásobníku založí. Na vzorek míří tryska foukající horký vzduch z dálkově ovládatelného dmyhadla.

Manipulátor vykoná další sekvenci s dalším vzorkem a založí spodní část držáku do vedlejší pozice v zásobníku sušení. Poté zopakuje další sekvenci a obsadí poslední slot zásobníku. Následně přejede k prvnímu vzorku, vytáhne ho ze zásobníku a založí na původní pozici v zakládací paletce. Pokud zadaná délka sušení je delší než součet časů vykonání předchozích sekvencí, počká manipulátor, než čas sušení pro danou pozici uplyne, a až poté držák vyjme a založí do paletky. Dále manipulátor vykoná další sekvenci a založí vzorek s držákem do uvolněné pozice v zásobníku. Potom vytáhne druhý vzorek ze zásobníku a založí ho na jeho původní pozici do zakládací paletky. Takto provede manipulátor postupně leštění všech šesti vzorků.

Po vyleštění sady vzorků manipulátor zajede do home-pozice, vypne se dmychadlo horkého vzduchu. Poté je uživatel v případě zapnutého automatického plnění vyzván, zdali si přeje vyměnit procesní kapaliny. Pokud ano, vybere, které kapaliny v daných pozicích chce vyměnit, případně zdali chce vyměnit všechny. Poté obrátí peristaltická čerpadla svůj chod a třicestné ventily nasměrují kapaliny do vypouštěcích nádob. Pokud byla vybrána možnost manuálního plnění, nejdříve proběhne odebrání paletky se vzorky a následně je obsluha vyzvána pro otevření dveří pro vstup do prostoru s kapalinami.

Po ukončení procesu je obsluha vyzvána, aby odebrala paletku se vzorky ze stroje. Po odsouhlasení stroj povolí odemykání dveří. Obdobně jako u zakládání se po stisknutí tlačítka „otevřít“ zastaví ventilátor, odemkne paletka a odblokují dveře. Po otevření posuvných dveří obsluha odebere paletku se vzorky. V případě opakování experimentu může založit další paletku, zavřít dveře a stisknout tlačítko pro zamknutí.

Nakonec je laborant vyzván v aplikaci, zdali chce opakovat stejný experiment, zadat nový nebo ukončit provoz.

Pokud obsluha zvolí ukončení, manipulátor se znovu zreferencuje. Uživatel je vyzván k potvrzení, že nádoby v pracovním prostoru jsou prázdné, a po potvrzení se všechna zařízení až na ventilátor odpojí od napájení. Dveře zůstávají ve vypnutém stavu zamčené. Ventilátor se zastaví tlačítkem na rozvaděči.

Poté se stroj vypojí z elektřiny, odpojí se odsávací hadice, zavřou kulové ventily a odpojí se hadice externího chladičského okruhu. Nakonec lze stroj odbrzdit a odjet s ním na místo skladování.

8 NÁVRH APLIKACE PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROCESU V SYSTÉMOVÉM PROSTŘEDÍ LABVIEW

LabVIEW je grafický programovací jazyk, který je široce využíván napříč průmyslem, akademickou sférou a výzkumnými laboratořemi. Je to uznávaný standard sloužící jako nástroj pro získávání dat a jako software pro ovládání přístrojů. LabVIEW je multiplatformní softwarový nástroj, který je určen pro tvorbu flexibilní přístrojové techniky a analýzu dat. Systémy virtuálních přístrojů se vyznačují vysokou flexibilitou a z toho plynoucí nízkou cenou hardwaru i vývoje oproti jednocelové laboratorní technice. Pojem virtuální přístroj je používán proto, že vzhled a ovládání aplikace často imituje vzhled a ovládání reálných měřicích přístrojů.

Na rozšíření LabVIEW se podílí největší měrou právě jeho univerzalita a to, že může běžet na jakémkoliv počítači. Lze vytvořit program pro měření prakticky čehokoliv od teploty, přes tlak, sílu, změnu polohy, napětí až po pH. LabVIEW propojuje jednoduchým způsobem osobní počítač s měřicí technikou, a navíc dokáže naměřená data okamžitě analyzovat, zobrazit a případně je odeslat kamkoliv na světě. Po naměření a analýze dat je další logický krok řízení na základě výsledků (systém řízení se zpětnou vazbou), což LabVIEW umožňuje, a navíc dokáže přímo komunikovat s programovatelným logickým kontrolérem (PLC).

Program vytvořený v LabVIEW se nazývá VI (virtuál instrument) a skládá se ze tří základních částí. Z předního panelu (front panel), blokového diagramu (block diagram) a ikony programu.

Přední panel je interaktivní uživatelské prostředí programu, imituje přední panel reálných měřicích přístrojů. Přední panel může obsahovat knoflíky, tlačítka, grafy a mnoho dalších ovládacích prvků (slouží jako vstupní parametry programu) a indikátorů (slouží jako výstupy programu). Lze zadat data užitím myši a klávesnice a poté zobrazit výsledek na obrazovce.

Blokový diagram slouží jako zdrojový kód programu (VI) a je vytvořený v grafickém programovacím jazyce G vývojového prostředí LabVIEW. Blokový diagram je však vykonávaný program. Jednotlivé komponenty blokového diagramu jsou nízkourovňové VI, zabudované funkce, konstanty a řídicí struktury programu. Komponenty se propojují „dráty“, jejichž struktura určuje tok dat mezi komponenty. Všechny prvky předního panelu jsou spojeny s odpovídajícími prvky v blokovém diagramu, takže můžou data téct od uživatele do programu a z programu k uživateli.

Každý program (VI) lze využít jako podprogram v blokovém diagramu jiného VI. Vnořenému VI se říká subVI. Každé subVI musí mít ikonu s definovanými konektory. Ikona je ilustrační zobrazení subVI, které slouží jako prvek v jiném VI. Konektory subVI slouží k „zadrátování“ subVI s ostatními prvky v blokovém diagramu nadřazeného VI. Konektory definují vstupy a výstupy daného podprogramu (subVI). [35]

8.1 Návrh aplikace

Při procesu elektrolytického leštění nás zajímá měření především napětí a proudu tekoucího elektrolytickým obvodem. Dále je důležité snímat pro budoucí opakovatelnost teplotu elektrolytu a průběh oteplování během procesu.

8.1.1 Hardware pro měření

Pro měření veličin byla vybrána tato zařízení:

Kompaktní zařízení pro sběr dat cDAQ-9174

Tato jednotka slouží jako nosná konstrukce pro čtyři měřicí karty (jedna pozice zůstane prázdná). K počítači je připojena přes USB a je napájena devítivoltovým zdrojem stejnosměrného napětí. Kompaktní DAQ cDAQ-9174 je navrženo pro malé, přenositelné snímačové systémy. Poskytuje jednoduchost zapojení pomocí USB plug-and-play pro měření snímačů a elektrických veličin. Dále řídí takt, synchronizaci a přenos dat mezi I/O moduly a externím hostitelským počítačem. U šasi lze kombinovat C Series I/O moduly, a tak vytvořit mix analogových I/O, digitálních I/O a čítacích nebo časovacích měření. Zařízení cDAQ-9174 má čtyři 32-bitové univerzální čítače/časovače, takže je možné spustit až sedm hardwarem taktovaných operací zároveň se třemi nezávislými frekvencemi pro analogový vstup. [36]

Modul pro měření napětí NI-9242

Tato měřicí karta má čtyři kanály pro měření napětí. Lze měřit stejnosměrné napětí kanálu vůči kanálu pro neutrální vodič. Kartou lze také měřit třífázové střídavé napětí. Vzorkování karty je padesát tisíc vzorků za sekundu na kanál (50 kS/s/ch), rozlišení je 24-bitové. Maximální měřitelné napětí je 250 V_{rms} mezi L-N a 400 V_{rms} mezi L-L. Karta má široké využití pro měření aplikací s vysokým napětím, jako je měření fázoru, měření jalového výkonu, monitorování kvality proudu, měření transformátorů a testování motorů. Pomocí karty lze takové provádět analýzy přechodových jevů a harmonických složek s vysokofrekvenčním vzorkováním. [37]

Modul pro měření proudu NI-9227

Tato měřicí karta pro měření proudu má čtyři kanály s frekvencí vzorkování 50 kS/s na kanál, 24-bitovou přesností a maximálním proudem 5 Arms. Karta je navržena pro měření například spotřeby elektrického proudu a elektrické energie s vysokou přesností. Kartou lze měřit také kvalitativní faktory, jako je míra šumu, frekvence a harmonické složky. [38]

Modul pro měření teploty NI-9219

Tato měřicí karta je navržena pro víceúčelové testování, má čtyři měřicí kanály s vzorkovací frekvencí 100 S/s/ s maximálním napětím ± 60 V na jeden kanál. Pomocí karty NI-9219 lze měřit signály ze senzorů, jako jsou tenzometry, odporové teploměry RTD, termočlánky, snímače síly a další napájené snímače. Stejně tak je možné s kartou provádět čtvrtinové-, poloviční- a plno-můstkové měření proudu se zabudovaným napět'ovým a proudovým buzením. Každý kanál je individuálně volitelný, takže lze provádět různá měření na každém kanálu.[39]

8.1.2 Popis programu pro měření

Aplikace pro měření napětí, proudu a teploty se skládá ze dvou částí, z předního panelu a blokového diagramu a je vytvořena ve vývojovém prostředí LabVIEW 2020

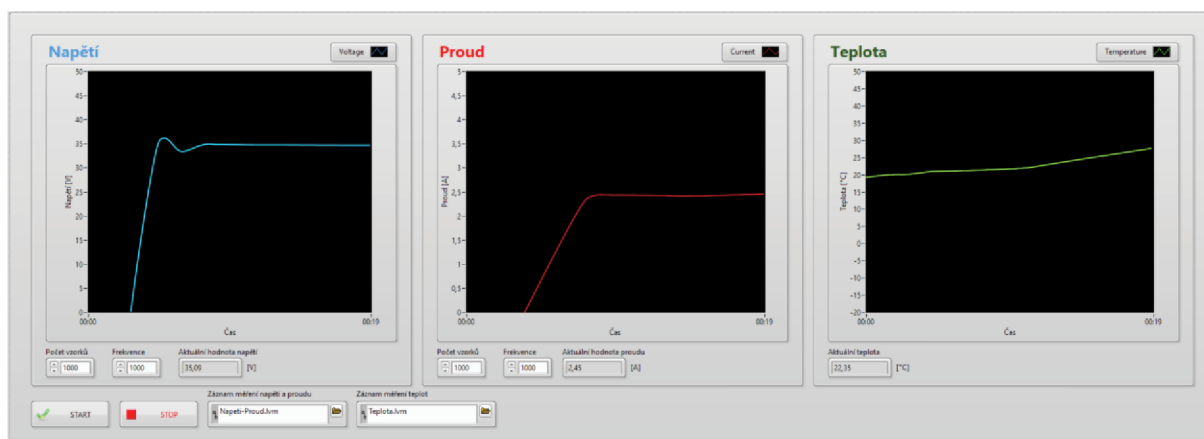
Přední panel

Na předním panelu (obr. 40) lze vidět tři grafy pro zobrazení napětí, proudu a teploty. Po rozběhnutí programu (run) lze měnit počet vzorků a frekvence vzorkování u napětí a proudu. U teploty je vzorkování a frekvence dáno defaultně. Dále si uživatel může pojmenovat soubory pro uložení měření napětí a proudu a záznam měření teplot. Po měření se k názvu přidá přípona s datem a časem, aby bylo možné provádět jednoduše několik měření za sebou bez nutnosti pokaždé zadávat nový název souboru.

Po stlačení tlačítka START při spuštěném programu začne samotné měření. Grafy jsou naprogramované tak, aby ukazovaly uplynulý čas od začátku měření. Osa X má zapnuté automatické škálování, takže se na grafu ukazuje postupně celý průběh měřené veličiny. Na ose Y jsou hodnoty napětí, proudu a teploty. Tato osa má zakázané automatické škálování, takže lze vidět v měřítku měřené hodnoty veličin.

Pod každým grafem je numerický indikátor aktuální hodnoty, takže lze v každém okamžiku vidět přesnou hodnotu měřené veličiny.

Pro ukončení měření zmáčkne obsluha tlačítko STOP a naměřené hodnoty se uloží do textového souboru s koncovkou *.lvm V souboru je pod hlavičkou měření v prvním sloupci zaznamenán relativní čas od začátku měření a v dalších sloupcích je napětí a proud, případně teplota v souboru se záznamem teploty.



Obr. 40) Ilustrační záznam předního panelu aplikace měření v LabVIEW

Blokový diagram

V blokovém diagramu (obr. 41) lze vidět vnitřní program pro ovládání předního panelu. START tlačítko je umístěné v tzv. event structure. Tato struktura čeká, než se stane nějaká událost, po této události změní booleovskou hodnotu na TRUE. Event structure je propojený s dalším rámečkem, který se jmenuje flat sequence structure. Cokoliv umístěné v tomto rámečku se provede až tehdy, až je přivedena hodnota TRUE. Tudíž vše v tomto rámečku čeká, až obsluha zmáčkne START tlačítko.

Po této události se jednou vykoná vyčištění všech grafů. Jinak by se současné hodnoty začaly vykreslovat za dříve vykreslené hodnoty. Dále funkce Get date/Time in seconds vrátí aktuální čas v sekundách, který uplynul od univerzálního času v LabVIEW (12:00, Pátek, 1. ledna 1904). Dále jsou tu další notificační funkce, které slouží pro sdílení tlačítka stop mezi více cykly/smyčkami while (while loop).

V blokovém diagramu jsou dva rámečky while loop. Jeden pro cyklické opakování získávání dat z DAQ zařízení, vykreslování a zapisování hodnot napětí a proudu. Druhý vykonává stejné funkce pro teplotu. Dva cykly while je nutné použít z důvodu různých taktů jednotlivých modulů. Měřicí karty pro napětí a proud vzorkují s frekvencí až padesát tisíc vzorků za sekundu. Karta pro měření teploty však vzorkuje pouze sto vzorků za sekundu.

V jednotlivých cyklech while jsou umístěné expresní funkce DAQ Assistant, které slouží pro získávání dat z měřicích modulů. Pro napětí a proud je sběr dat nastavený na kontinuální sběr. U teploty je získávání dat nastavené na možnost „na vyžádání“ (on demand). U napětí a proudu jsou k této expresní funkci zadrátovány ovládací prvky pro určení počtu vzorků a frekvence vzorkování. Výstup datového kanálu z DAQ Assistantu se rozděluje na tři větve: na zobrazování aktuální hodnoty měřené veličiny v numerickém indikátoru, na větev mířící do expresní funkce Write To Measurement File pro zápis naměřených hodnot a na třetí větev, která vede do bloku pro zobrazení relativního času v sekundách v grafu. Skrze tento blok pokračuje až do výše zmíněného grafu pro zobrazení měřených veličin. Vstup do expresní funkce Write To Measurement File je cesta a název souboru pro uložení měřených hodnot, kterou může uživatel změnit v předním panelu.

Rychlost vykonávání smyček while je omezena funkcí „Wait (ms)“. Kdyby tato funkce v cyklu nebyla, vykonával by se cyklus nejrychleji, jak to dovolí procesor a alokoval by si tak veškerý výkon počítače.

Nakonec je celý program zastavený tlačítkem STOP, které je napojeno na zastavení cyklu pro měření napětí a proudu, zprostředkovaně přes notificační kanál na zastavení cyklu pro měření teploty a po zastavení cyklů se zastaví běh celého programu.

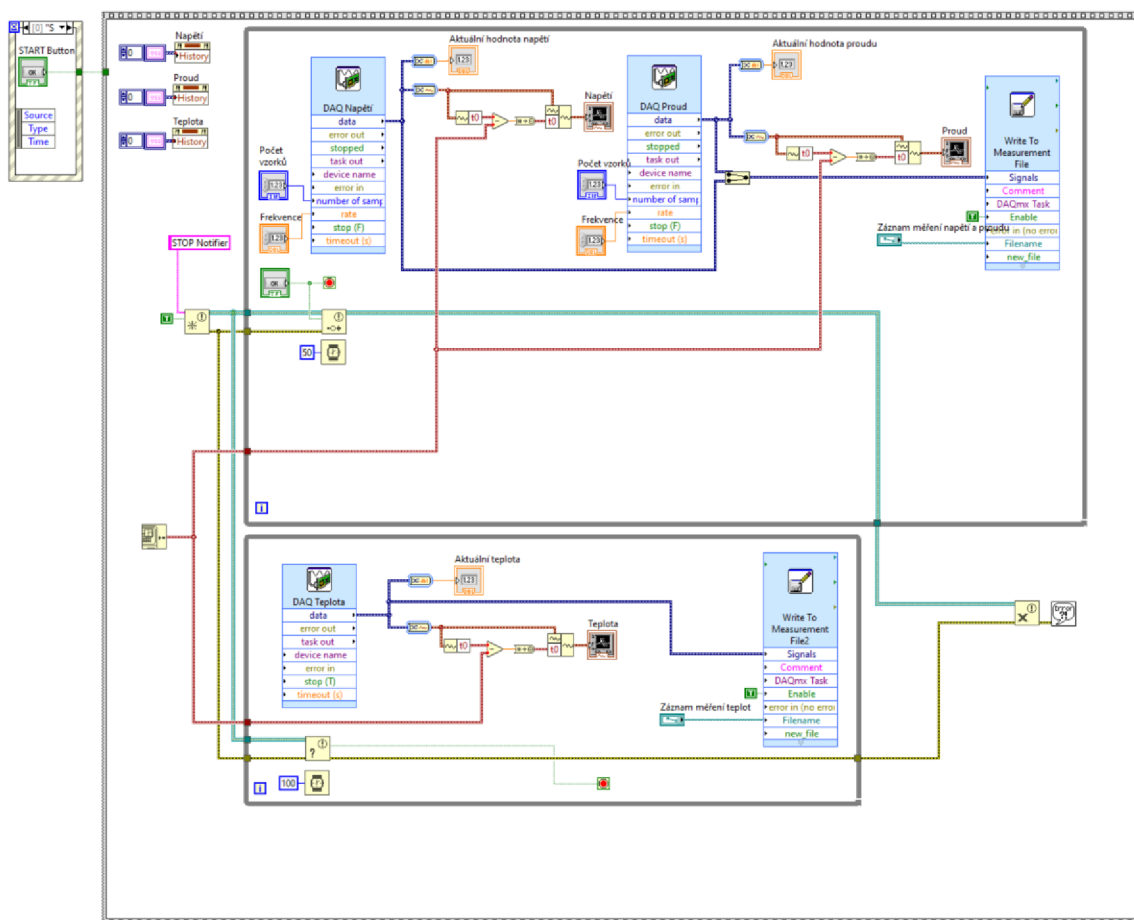
Automatické měření

Výše popsaná aplikace je navržena pro poloautomatické měření. Obsluha před spuštěním procesu spustí měření v LabView, které z počátku měří teplotu a nulové hodnoty napětí a proudu. Následně by obsluha zapnula automatický proces elektrolytického leštění a po ukončení leštění vzorku by měření stopnula.

V případě automatického provozu stroje a leštění několika vzorků na jedno vložení do stroje, jak bylo popsáno v kapitole 7.3, by bylo nutné program upravit. Měření by se nespouštělo tlačítkem start, ale triggerovací funkcí. Buď by start měření bylo navázáno na příkaz pro zapnutí

programovatelného zdroje napájení pro elektrolytické leštění, nebo by měření probíhalo po celou dobu procesu a zapisování do souboru by bylo zapnuto zabudovanou funkcí Start Analog Edge, která čeká na skokovou změnu analogového signálu (například napětí nebo proudu). Jelikož by řízení procesu probíhalo z nadřazené externí aplikace, bylo by vhodnější vyřadit zobrazování měřených dat do grafů. Tím by se výrazně zrychlila rychlost vykonávání subprogramu v cyklech while, takže by se zvýšil počet zapsaných hodnot měření ve výsledném souboru. Z tohoto souboru by nadřazený software mohl pak automaticky vygenerovat průběh měření. Naměřené hodnoty by případně mohly být posílány do databáze pro to navržené.

Aplikace měření ve vývojovém prostředí LabVIEW pro automatický provoz stroje se vytvoří na míru po fyzickém dokončení celého stroje včetně elektroinstalace a vytvoření nadřazeného řídicího softwaru.



Obr. 41) Návrh programu pro měření napětí, proudu a teploty v LabVIEW

9 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V diplomové práci byl vytvořen koncept pro automatizované laboratorní zařízení pro elektrolytické leštění metalografických vzorků určených pro pozorování v elektronovém mikroskopu. Zařízení bylo navrženo jako komplexní jednoúčelový stroj, kde bylo řešeno vše od rámu přes krytování, layout technologie, konstrukce manipulátoru, držáku vzorku, zakládací paletky, odsávání stroje, automatické výměny kapaliny, mimostrojní okruh pro chlazení média určeného pro chlazení elektrolytu až po bezpečnostní prvky a softwarové řízení stroje. Toto rozpětí práce neumožnilo detailnější popis navrhovaných dílů.

Pro hlubší pochopení koncepce je nezbytné prozkoumat přiložený trojrozměrný model stroje, kde jsou řešeny všechny detaily, pro které nebyl prostor v textu práce.

Stroj nebyl kvůli jeho komplexnosti do termínu odevzdání dokončen, protože je nutné nejdříve dokončit práci elektroprojektanta, programátor PLC, programátora uživatelské aplikace, bezpečnostní technika a stroj následně nechat vyrobit a smontovat. Všechny tyto úkoly nebylo v silách autora dokončit dříve, tudíž nebylo možné porovnat kvalitu povrchu vzorku vyleštěného komerčním zařízením a kvalitu povrchu vzorku vyleštěného navrženým zařízením.

Stroj byl navrhován na základě požadavku na nízkou pořizovací a výrobní cenu jeho komponentů. Z toho důvodu byly pro pohon zvoleny krokové motory, které fungují i bez zpětné vazby. Nízký kroutící moment motorů vedl při konstrukci k návrhu převodů do pomala. To ve spojení s maximálními otáčkami krokových motorů někde kolem 1500 otáček za minutu způsobuje nízké posuvové rychlosti manipulátoru. Bylo by vhodné na základě vypočtených potřebných dynamických momentů pro rozběh změnit převody do rychla, případně krokové motory nahradit synchronními servomotory s vyšším kroutícím momentem a s převodem do rychla.

Navrhování jakéhokoliv zařízení, přístroje nebo stroje je iterační proces, který vede od teoretického návrhu přes realizaci prototypu zpět k přepracování teoretického návrhu. Pro odhalení některých chyb návrhu je proto nutná fyzická realizace stroje. Například koncepce míchání elektrolytu pomocí ultrazvukové čističky a vliv na výslednou kvalitu povrchu je zatím neověřena. Proto je stroj navrhován modulárně, aby bylo možné případně ultrazvukovou čističku nahradit magnetickou míchačkou a následně porovnat kvalitu povrchu. U některých dílů je potřeba provést návrh až na základě fyzicky dodaných komponentů, protože k nim neexistuje dostupná dokumentace nebo 3D model. Dále se budou například některé díry vrtat až při montáži a budou zaneseny do 3D modelu a dokumentace ex post. Z tohoto důvodu by v určitých ohledech byla tato práce kvalitnější, pokud by před odevzdáním došlo k výrobě a odzkoušení stroje.

10 ZÁVĚR

Práce měla za úkol navrhnout zařízení pro automatický proces elektrolytického leštění pro přípravu vzorků pro elektronový mikroskop. Tohoto zlepšení si žádá technologický pokrok v oboru materiálového inženýrství, kde současné metalografické postupy jsou navrženy spíše pro pozorování v optickém mikroskopu, které však již pro analýzu moderních materiálů nestačí.

K vyřešení tohoto problému bylo nutné se nejdříve zabývat obecně přehledem současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky. Z rešerše vyšlo, že současná technologie pro elektrolytické leštění se štěpí na dvě větve. Na větev průmyslových strojů a linek pro elektrolytické leštění v sériové výrobě a na laboratorní metalografické přístroje. V textu je pak porovnáván přístup návrhu mezi průmyslovými a laboratorními přístroji. V další kapitole se práce snaží analyzovat problém automatizace procesu elektrolytického leštění per partes, aby bylo možné v návrhu dosáhnout ideální kombinace průmyslového přístupu k problému a laboratorního přístroje pro přípravu metalografického vzorku s vysokou kvalitou povrchu.

Výsledkem tohoto zkoumání jsou tři návrhové varianty komplexního stroje pro elektrolytické leštění. Všechny varianty mají společnou mobilní nosnou konstrukci stroje, která odděluje obsluhu od pracovního prostoru pomocí krytování a posuvných dveří s bezpečnostními zámky. Varianty se liší přístupem k manipulaci se vzorkem. V první variantě je ve stroji šestiosé robotické rameno, které vložené vzorky přesouvá mezi jednotlivými stanicemi procesu, v druhé variantě jsou vzorky přemisťované pomocí čtyřosého robotu SCARA a ve třetí variantě tok materiálu napříč procesem zajišťuje čtyřosý manipulátor.

Vítězná varianta byla vybrána pomocí multikriteriální metody výběru, pro kterou byly blíže specifikována a popsána výběrová kritéria. Každé kritérium mělo váhu od jedné do deseti a každému variantnímu návrhu se pro dané kritérium přidělila hodnota od jedné do deseti v závislosti, jak dobře dané kritérium splňuje. V některých případech je tato metoda lehce neintuitivní, například nejnižší cena byla obodována známkou 10, protože náš cíl je nejnižší cena, tudíž tu platí nepřímá úměra (čím nižší cena, tím vyšší známka). Jako nejlepší z tohoto srovnání vyšel na míru navržený a vyrobený manipulátor.

Další kapitola se pak zabývala podrobným popisem návrhu vítězné varianty. Návrh byl zpracovaný ve 3D modeláři a výsledkem je detailní model stroje. Ten je spolu s výrobními výkresy přílohou této práce.

Výsledný navržený stroj je umístěný na kolečkách kvůli požadavkům mobility. Jeho prostor je odvětráván pomocí chemicky odolného radiálního ventilátoru s motorem do výbušného prostředí. Rám stroje je vyroben z profilů hliníkového stavebnicového systému. Jako krytování jsou použity plechové dílce, které jsou přichyceny do drážky profilu a pomocí vodivého svorníku elektricky spojeny s kóstrou rámu, aby byl stroj chráněn proti statickému náboji a obsluha pro případ probíjení. Vstup do stroje je možný pouze skrze posuvné dveře, které jsou blokovány bezpečnostním zámekem. Obsluha do stroje vzorky vkládá v základací paletce, ve které může mít až šest vzorků. Návrh řeší automatickou výměnu procesních kapalin (elektrolyt a oplachové kapaliny), ale je možné použít stroj i s manuálním doplňováním kapalin do stroje. Dále je v návrhu rozpracováno chlazení elektrolytu, který by byl ochlazován prostřednictvím kapaliny v ultrazvukové lázni. Tato kapalina by mohla proudit skrze externí chlazení a byla by napojena skrze kulové ventily na vnitřní okruh ve stroji. Rozvaděč s průmyslovým počítačem, DAQ zařízením pro sběr dat a s PLC je umístěn ve spodní části stroje, do kterého je přístup přes

dvoukřídle plechové dveře se zámkem. Provoz stroje je ovládaný pomocí periférií průmyslového počítače, které jsou umístěné na otočném ramenu vně stroje. Manipulátor vzorků se pohybuje v kartézských souřadnicích XYZ a je možné otáčet držákem vzorků kolem osy Z (rotace C_0).

V další kapitole byly klíčové prvky (motory, příčnick, lineární osy a ložiska) tohoto stroje podrobeny analýze a byly provedeny technické výpočty ověřující funkčnost a bezpečnost stroje.

Dále je v práci podrobný popis zamýšleného provozu stroje od zapojení, přes vkládání vzorků až po nastínění funkcí softwaru (počítačové aplikace) pro ovládání stroje, zadávání parametrů, komunikace s databází.

Nakonec se práce zabývá návrhem jednoduché aplikace pro měření veličin procesu elektrolytického leštění, jako je napětí, proud v elektrolytickém obvodu a teplota elektrolytu ve vývojovém prostředí LabVIEW společnosti National Instruments. Program v LabVIEW komunikuje s fyzickým zařízením pro získávání dat CompactDAQ cDAQ-9174.

Pro dokončení stroje je nutná jeho fyzická výroba a montáž. Práce se zaměřovala především na návrh hardwaru stroje. Je nezbytné, aby dále elektro-projektant navrhl kabeláž, rozvaděč, nadimenzoval centrální zdroj, vybral drivery motoru, navrhl všechny nutné bezpečnostní elektrické prvky a vše další potřebné. Poté je nutné, aby programátor PLC vytvořil řízení stroje, které bude propojené s měřicí aplikací v LabVIEW a s nadřazenou aplikací s uživatelským rozhraním, kterou vytvoří programátor. Bezpečnostní technik by měl provést analýzu rizik a ošetřit fungování stroje, tak aby byl stroj bezpečný pro obsluhu a splňoval všechny nutné legislativní nároky. V ideálním případě by tyto činnosti měly probíhat synergicky v jednom týmu, který je vedený projektovým manažerem. Rozsah této práce nedovoluje popis a řešení všech těchto problémů. Do určeného termínu pro odevzdání nebylo zařízení dokončeno, tudíž nebylo možné splnit závěrečný cíl této práce, a to, že: „Vzorky připravené pomocí nově vyvinuté elektrolytické leštičky budou přímo porovnány se vzorky připravenými pomocí klasického komerčního elektrolytického leštění. Kvalita povrchu vzorků bude hodnocena za pomoci pokročilé rastrovací elektronové mikroskopie.“ Poté, co bude stroj vyroben a zprovozněn, bude toto porovnání kvality povrchu vzorku provedeno.

Tato diplomová práce vznikla na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., v rámci projektu se zněním: „Národní centrum kompetence: Centrum elektronové a fotonové optiky (agentura TAČR).“ Myšlenkově tato práce navazuje na dříve vyvinuté zařízení pro poloautomatické leptání a leštění metalografických vzorků (popsáno v kapitole 3.2.3), ze kterého vznikly dva funkční vzorky („Výsledek „**Funkční vzorek**“ realizoval původní výsledky výzkumu a vývoje, které byly uskutečněny autorem nebo týmem, jehož byl autor členem. Jedná se o obdobu prototypu, pouze s tím rozdílem, že za vývojem či výrobou **funkčního vzorku** bezprostředně nenásleduje multá série či sériová nebo hromadná výroba.“[44]).

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] VOORT, George F Vander. *Metallography: principles and practice*. 4. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. ISBN 978-0-87170-672-0.
- [3] *LabView user manual*. In: NATIONAL INSTRUMENTS CORP [online]. Austin, Texas, USA: National Instruments Corporation, 2020, 2003 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- [4] YANG, G., B. WANG, K. TAWFIQ, H. WEI, S. ZHOU a G. CHEN. *Electropolishing of surfaces: theory and applications*. *Surface Engineering* [online]. 2016, 33(2), 149-166 [cit. 2020-11-05]. ISSN 0267-0844. Dostupné z: doi:10.1080/02670844.2016.1198452
- [5] GEELS, Kay. *Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis and hardness testing*. 1. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007. ASTM manual series. ISBN 978-0-8031-4265-7.
- [6] HAN, Wei a Fengzhou FANG. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2019, **139**, 1-3 [cit. 2021-04-23]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001
- [7] TYAGI, Pawan, Tobias GOULET a Christopher RISO. ELECTROPOLISHING OF ADDITIVELY MANUFACTURED HIGH CARBON GRADE 316 STAINLESS STEEL. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, August 2018, **2020**(3-4), 1-2 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: doi:10.31224/osf.io/5dn49
- [8] VOLKA, Karel, Marcela TKADLECOVÁ a Kamil ZÁRUBA. *Příklady z analytické chemie pro bakaláře*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0610-9.
- [9] KOPELIOVICH, Dmitri. Electropolishing. *SubsTech, Substances & Technologies: Knowledge source on Materials Engineering* [online]. 2007, 14.12.2013 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electropolishing>
- [10] Surface Finishing using Dry Electro-polishing Machines. In: *Kemet* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.kemet.co.uk/products/dry-electro-polishing>
- [11] What is Dry Electropolishing? How Does Dry Electropolishing Work? In: *BestTechnology: Precision cleaning, passivation & finishing systems* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/what-is-dry-electropolishing>
- [12] GILLESPIE, LaRoux K. Electropolishing Automation. In: *SME* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.sme.org/technologies/articles/2012/electropolishing-automation>
- [13] QETCH 1000 (Kristall 680) - automatická elektrolytická leštička. *Metalco: Material testing* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/elektrolyticke-lesticky/qetch-1000--kristall-680/>
- [14] LectroPol. *Struers: Ensuring Certainty* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Electrolytic-Preparation/Electrolytic-equipment/Lectro-Pol>
- [15] QETCH 100 M: Electrolytic polishing & etching machine. *QATM: Quality Assured* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/electrolytic-polisher-etcher/qetch-100-m/function-features/>

- [16] QETCH 1000: Electrolytic polishing & etching machine. *QATM: Quality Assured* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/electrolytic-polisher-etcher/kristall-680/function-features/>
- [17] Electrolytic Polishing and Etching Machine: ELOPREP 102. *Kemet* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.kemet.co.uk/products/metallurgy/eloprep>
- [18] Electropolishing Equipment and Electropolisher Machines for Stainless Steel. *Best-Technology: Precision cleaning, passivation & finishing systems* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/>
- [19] DPF-2 Electropolishing Machine. *Shanghai Metallographic Equipment Co., Ltd* [online]. c2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://www.sh-test.cc/product_116_DPF2ElectropolishingMachine.html
- [20] ELECTRO-P. *EchoLAB* [online]. c2018 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.echo-lab.it/product/electro-p/>
- [21] Polisecc C25. *Presi* [online]. c2019 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.presi.com/en/product/polisecc-c25/>
- [22] ELOPREP - Model 102 - Electrolytic Polishing & Etching System. *Environmental Expert* [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.environmental-expert.com/products/eloprep-model-102-electrolytic-polishing-etching-system-668191>
- [23] BUEHLER. *ElectroMet: Polisher-Etchers* [online]. U.S.A.: BUEHLER, 2016 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://www.bergeng.com/mm5/downloads/buehler/ElectroMet-4.pdf>
- [24] BUEHLER LTD. *Operation and Maintenance Instructions: Electromet 4* [online]. U.S.A.: BUEHLER, 1988 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: https://www.ncnr.nist.gov/equipment/msnew/ncnr/manual/polisher-etcher_buehler_electromet.pdf
- [25] *Metals handbook: Metallography And Microstructures*. 9. Metals Park: American Society for Metals, 1985, s. 59-65. ISBN 08-717-0007-7.
- [26] ECHLIN, Patrick. *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Boston: Springer, 2009, s. 135. ISBN 978-0-387-85730-5.
- [27] Roboty SCARA: Správná volba pro vaši aplikaci. *FANUC* [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/scara-series/selection-support>
- [28] SOUKOPOVÁ, Jana. Vícekriteriální metody hodnocení. *Veřejné zakázky a veřejné projekty a jejich hodnocení* [online]. Brno, 2006, s. 7–8 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: Vícekriteriální metody hodnocení
- [29] Hliníkové profily – Systém 40 – N8. *ASKMT* [online]. c2011–2020 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.askmt.com/stranka-hlinikove-profilu-system-40-n-8-89>
- [30] KUBIŠOVÁ, Andrea. *Operační výzkum*. Jihlava: Vysoká škola polytechnická Jihlava, 2014, s. 44. ISBN isbn978-80-87035-83-2.
- [31] Posuvové soustavy lineární. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 3. Praha: MM publishing, 2014, s. 219–225. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [32] *Zásady pro návrh trapézových šroubů* [online]. In: MATIS. Brno, 2013, s. 1–4 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.matis.cz/cs/produkt/zasady-pro-navrh-tr-sroubu-vykon-m-k>

- [33] LINHART, Lukáš. *PŘÍKLADY ŘEŠENÍ NOSNÍKŮ STATICKY NEURČITÝCH* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54932. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [34] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 7. Brno: VUTIUM, 2010, s. 625. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [35] TRAVIS, Jeffrey a Jim KRING. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun, Third Edition*. 3. Crawfordsville: Prentice Hall, 2006. ISBN 978-0-13-185672-1.
- [36] CDAQ-9174: CompactDAQ Chassis. *National Instruments* [online]. c2021 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/details/product-item.781157-01.html>
- [37] NI-9242: C Series Voltage Input Module. *National Instruments* [online]. c2021 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/details/product-item.783107-01.html>
- [38] NI-9227: C Series Current Input Module. *National Instruments* [online]. c2021 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/details/product-item.781099-01.html>
- [39] NI-9219: C Series Universal Analog Input Module. *National Instruments* [online]. c2021 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/details/product-item.779781-01.html>
- [40] SEM Specimen Stubs – Short Pin. *Agara scientific* [online]. c20201 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.agarscientific.com/sem-specimen-stubs-2-1>
- [41] Complete Automation of the Electropolishing Process. *Technic* [online]. c2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.technic.com/equipment/automated-systems/cell-manufacturing/single-piece-mp500>
- [42] Revolutionary Technology for Cost-Efficient, High-Quality Electronic Component Finishing. *Technic* [online]. c2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.technic.com/equipment/process/electroplating>
- [43] Advanced Equipment for Medical Device Manufacturers. *Technic* [online]. c2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.technic.com/applications/medical/equipment-medical-device-manufacturing>
- [44] Definice druhů výsledků. *VVI RADA PRO VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE: Úřad vlády České republiky* [online]. c2015 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.vyzkum.cz/storage/att/2DB911A3086BC7D47A5B5F462DC9F041/Druh%20v%C3%BDsledku.pdf>
- [45] Valivé ložiska KINEX. *ELOTECHNIK* [online]. Žamberk [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://www.elotechnik.cz/files/products_files/k/katalog_loziska_kinex_elotechnik_zamberk.pdf
- [46] Katalogový list - MGN. *HIWIN* [online]. Brno [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/download/862e4a5da13e72e0a8f1a1dd029b352e>

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

12.1 Seznam tabulek

Tab 1) Parametry zařízení QETCH 1000 [13]

Tab 2) Parametry zařízení Struers LectroPol-5 [14]

Tab 3) Tabulka srovnání laboratorních přístrojů dalších výrobců [14] až [24]

Tab 4) Tabulka vybraných elektrolytů [25]

Tab 5) Kritéria, hodnota vah a bodové ohodnocení variant

12.2 Seznam obrázků

Obr. 1) a) sestava pro elektrolytické leštění, b) distribuce elektrického potenciálu, c) profil povrchu před leštěním, d) profil povrchu po leštění. [5][7]

Obr. 2) Závislost proudové hustoty na napětí materiálu v elektrolytickém obvodu [2]

Obr. 3) a) Suchý elektrolyt, b) Drsnost povrchu před suchým elektrolytickým leštěním, c) Drsnost povrchu po suchém elektrolytickém leštění. [11]

Obr. 4) QETCH 1000 (Kristall 680) – laboratorní elektrolytická leštička [13]

Obr. 5) Struers LectroPol-5 – laboratorní elektrolytická leštička pro metalografii [14]

Obr. 6) a), b) Příklad poloautomatické linky pro elektrolytické leštění [42]

Obr. 7) a), b), c) Ukázka rotačního elektropolišingu stroje Technic MP500 [41]

Obr. 8) Technic Medi1500 [43]

Obr. 9) DLYte 10 000 – robotizovaná buňka průmyslového elektrolytického leštění [10]

Obr. 10) Prototyp experimentálního zařízení pro elektrolytické leštění, vlevo 3D model aparátu, vpravo realizovaný prototyp

Obr. 11) Nosič vzorku pro SEM [40]

Obr. 12) Fotografie typických metalografických vzorků pro SEM

Obr. 13) Orientace vzorku a katody a) vzorek nahoře, katoda dole, b) vzorek dole, katoda nahoře, c) vzorek a katoda vertikálně orientovány

Obr. 14) Laboratorní aparatura pro elektrochemické leštění [13]

Obr. 15) Varianta 1 – šestiosý robot

Obr. 16) Varianta 2 se SCARA robotem

Obr. 17) Varianta 3 s čtyřosým manipulátorem

Obr. 18) Průřezy použitých hliníkových profilů pro konstrukci rámu

Obr. 19) Spojení profilů centrální spojkou

Obr. 20) Spojení profilů úhelníkem

Obr. 21) a) Rámová konstrukce z hliníkového stavebnicového systému, b) krycí prvky rámu

Obr. 22) Pohled na spodní část s policí a na plechové dveře se zámkem

- Obr. 23) Detail na vodící lištu posuvných dveří
- Obr. 24) Detail bezpečnostního zámku dveří
- Obr. 25) Layout dílčích technologií na operační ploše
- Obr. 26) Zakládací paletka a aretační slot
- Obr. 27) Izolovaná podsestava odsávání
- Obr. 28) Vysavač k sušení vzorků
- Obr. 29) Ultrazvukové čističky s hadičkovým terminálem a upevnění lázní ve stroji
- Obr. 30) Podsestava pro sušení horkým vzduchem
- Obr. 31) Konzole pro periferie PC
- Obr. 32) Držák vzorku a katody
- Obr. 33) Schéma manipulátoru
- Obr. 34) Pohled na manipulátor zezadu
- Obr. 35) Díly osy Z
- Obr. 36) Výpočtový model posuvové souřadnice s kuličkovým šroubem [31]
- Obr. 37) Nahrazení lineárního vedení nosníkem [33]
- Obr. 38) Tíhová síla v těžišti sestavy
- Obr. 39) Tíhová síla v těžišti smykadla
- Obr. 40) Ilustrační záznam předního panelu aplikace měření v LabVIEW
- Obr. 41) Návrh programu pro měření napětí, proudu a teploty v LabVIEW
- Obr. 42) Výsledný návrh zařízení

12.3 Seznam rovnic

- (1) Hmotnost vzorku
- (2) Výpočet ohodnocení variant
- (3) Výpočet momentu motoru
- (4) Celková účinnost
- (5) Účinnost systému šroub/matice
- (6) Kroutící moment nutný pro uvedení systému šroub/matice do pohybu
- (7) Odvozený vztah pro moment motoru
- (8) Momentová rovnice
- (9) Úhlové zrychlení motoru
- (10) Úhlové zrychlení šroubu
- (11) Zátěžový moment od přesouvacích hmot M_G pro $\alpha = \{0^\circ, <90^\circ\}$
- (12) Zátěžový moment od přesouvacích hmot M_G pro $\alpha = 90^\circ$
- (13) Moment pasivních odporů M_{GT}
- (14) Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru $M_{zdřhm}$
- (15) Moment setrvačnosti pro těleso tyčového tvaru

- (16) Moment setrvačnosti dutého válce
- (17) Redukce posuvné hmoty do osy šrouby na myšlené rotační hmoty
- (18) Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru
- (19) Upravení vzorce (7)
- (20) Maximální průhyb
- (21) Úprava rovnice (20)
- (22) Kvadratický moment průřezu
- (23) Statický moment M_o
- (24) Upravená rovnice (23)
- (25) Velikost celkového statického momentu M_x
- (26) Upravený vztah (25)
- (27) Velikost statického momentu M_{x1} pro jeden vozík
- (28) Základní výpočtovou trvanlivost ložiska v provozních hodinách
- (29) Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
- (30) Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska pro jednořadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem ve vyhotovení B
- (31) Radiální ekvivalentní statické zatížení u jednořadých kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem ve vyhotovení B
- (32) Úprava rovnice (28)

13 SEZNAM PŘÍLOH

1. Soubor s externími přílohami 2021_DP_Cermak_Jan_152430.zip
 - a. 3D_CAD_INVENTOR.zip
 - b. VÝKRESOVÝ DOKUMENTACE
 - c. OBRAZOVÁ DOKUMENTACE
 - d. Chemická odolnost plastů.xlsx
 - e. Osa_X.py
 - f. Osa_Y.py
 - g. Osa_Z.py
 - h. Návod pro spuštění 3D modelu.txt

2. Vyrenderovaný obrázek výsledného návrhu Obr. 42)

PŘÍLOHY



Obr. 42) Výsledný návrh zařízení