

UNIVERZITA PALACKÉHO
V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

RIGORÓZNÍ PRÁCE

Ladislav Stanke

2014

**UNIVERZITA PALACKÉHO
V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Katedra experimentální fyziky



RIGORÓZNÍ PRÁCE

**Metodika broušení optických elementů
na CNC strojích Zeeko IRP-800G**

Autor:	Mgr. et Mgr. Ladislav Stanke
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Termín odevzdání práce:	

*Co slyším, to zapomenu. Co vidím, si
pamatuji. Co si vyzkouším, tomu
rozumím.*

Konfucius

*Věnováno mým trpělivým rodičům
a mé milé přítelkyni Lucii.*

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem rigorózní práci „Metodika broušení optických elementů na CNC strojích Zeeko IRP-800G” vypracoval sám, s využitím materiálů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci 9. 6. 2014

.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval RNDr. Petru Schováňkovi za umožnění práce s moderním CNC centrem Zeeko IRP-800G, bez čehož by tato práce vůbec nemohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Miroslavu Pechovi, Ph.D., za pomoc při vyhodnocování získaných výsledků. Můj dík rovněž patří Mgr. Petru Vaňkovi za přátelské rady z oblasti CAD. Dále děkuji Ing. Martinu Kittlerovi (FZÚ AV ČR) a Pimu Messelinkovi, M.Sc. (Zeeko Ltd). Neméně důležité poděkování patří Mgr. Jiřímu Dočkalovi ze společnosti TOPMES, měřicí stroje, v.o.s. za zprostředkování měření vyrobených elementů na moderním CMM stroji LK Nikon a RNDr. Heleně Hiklové za data z měření na profilometru Taylor Hobson Talysurf. Za podporu mé práce děkuji projektu OPVK Výzkum a vývoj femtosekundových laserových systémů a pokročilých optických technologií (Reg. č. projektu: CZ.1.07/2.3.00/20.0091), projektu IGA: Koherenční a nelineární optika – vybrané kapitoly V (Reg. č. projektu: IGA_PrF_2014_005), dále ELI Beamlines a samozřejmě také Společné laboratoři optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR.



Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Mgr. et Mgr. Ladislav Stanke
Název práce:	Metodika broušení optických elementů na CNC strojích Zeeko IRP-800G
Typ práce:	Rigorózní
Pracoviště:	SLO UP a FZÚ AV ČR
Konzultant práce:	RNDr. Petr Schovánek
Rok obhajoby práce:	2014

Abstrakt: Již delší dobu se ve strojírenství využívá CNC obráběcích center. Nastolený trend přechází i do optické výroby. Víceosá CNC centra se používají pro zefektivnění výroby, zejména pak asfér a jinak složitých tvarů. V práci bude prezentováno CNC centrum Zeeko IRP-800G. Čtenář je seznámen s CNC stroji a jejich využitím v optické výrobě, zejména pak pro účely broušení optických skel. Jsou představeny dva modelové příklady optických elementů pro broušení na CNC centru Zeeko IRP-800G. Na nich bude ukázána implementace procesu broušení tvrdým nástrojem s vázaným diamantovým abrazivem. Během něj bude neustále kontrolována kvalita vyrobených povrchů. Cílem předložené práce je po procesu implementace stanovit metodiku broušení optických elementů tvrdým nástrojem na CNC Zeeko IRP-800G a vyslovit názor o povrchové kvalitě vyráběných elementů.

Klíčová slova:	Broušení, CAD, CAM, CMM, CNC, optická výroba, Zeeko;
Počet stran:	75
Počet příloh:	2
Jazyk:	český

Bibliographical identification:

Author's first name and surname: Mgr. et Mgr. Ladislav Stanke
Title: Methodology for CNC grinding of optical elements on Zeeko IRP-800G
Type of thesis: Rigorous
Department: Joint Laboratory of Optics of Palacky University and Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic
Consultant: RNDr. Petr Schovánek
Year of presentation: 2014

Abstract: For a long period of time CNC machining centers have been used in engineering. This trend also influenced the optical industry. Multiaxis CNC centres are used for making the fabrication process more effective, typically in cases of aspherical or freeform surface manufacturing. In this thesis the Zeeko IRP-800G will be presented. The reader will be familiarized with CNC machines and their use in optical fabrication, specifically for optical glass grinding. Two optical elements for grinding on the Zeeko IRP-800G are presented, and implementation of diamond cup wheel grinding on the IRP-800G will be demonstrated on these elements. Continuous control of the surface quality will be ensured. The aim of the thesis is to define methodology for grinding on the Zeeko IRP-800G and to determine the quality of the ground surfaces.

Keywords: CAD, CAM, CMM, CNC, grinding, optical fabrication, Zeeko;
Number of pages: 75
Number of appendices: 2
Language: Czech

Obsah

Úvod	11
1 Teorie	12
1.1 CNC stroje obecně	12
1.2 CNC stroje společnosti Zeeko	15
1.2.1 Zeeko IRP-800G	16
1.2.2 Příslušenství a spotřební materiál pro Zeeko IRP-800G	20
1.2.3 Software dodávaný pro práci s CNC obráběcím centrem IRP-800G	25
1.3 Stručný přehled současné technologie broušení skla	28
1.3.1 Broušení	28
1.3.2 Grolishing	34
1.4 Příklady optických elementů k broušení CNC strojem Zeeko IRP-800G	36
1.4.1 Sférické zrcadlo	36
1.4.2 Asférické zrcadlo	37
1.4.3 Mikrogeometrie povrchu - vybrané parametry	38
1.5 Zařízení použitá pro kontrolu obráběných optických povrchů	41
1.5.1 3D měřicí sonda Renishaw RMP600	41
1.5.2 LK Nikon LKV 20.12.10	43
1.5.3 Taylor Hobson Form Talysurf Series 2	45
2 Broušení na CNC stroji Zeeko IRP-800G	47
2.1 Implementace a odladění procesu broušení	48
2.1.1 Sférické zrcadlo	48
2.1.2 Asférické zrcadlo	52
2.2 Metodika broušení optických elementů	56
2.2.1 Příprava CNC programu	56
2.2.2 Vlastní broušení a in situ kontrola povrchu	57
2.2.3 Výstupní kontrola	59
3 Zhodnocení úrovně kvality optických povrchů vybroušených na CNC obráběcím centru Zeeko IRP-800G	60
3.1 Sférické zrcadlo	60
3.2 Asférické zrcadlo	63
Závěr	69

Přílohy	70
A: Výkres sférického zrcadla	70
B: Výkres asférického zrcadla	71
Seznam použitých a doporučených zdrojů	72
Fotopříloha	74
Rejstřík	75

Úvod

V moderním strojírenství jsou, díky trvalému rozvoji výpočetní techniky a jejího zlevňování, zaváděna do výrobního procesu ve stále širším rozsahu zařízení, jakými jsou především CNC obráběcí centra. Taková obráběcí centra, která se stala nutností z důvodu udržení konkurenceschopnosti, jsou nyní nedílnou součástí moderních průmyslových závodů většiny strojírenských odvětví, včetně optického. Předložená rigorózní práce představuje potenciál využití CNC strojů nesoucích označení Zeeko IRP-800G, včetně jejich nezbytného příslušenství a pomocných doplňků. Zabývá se implementací procesu broušení tvrdým nástrojem do stroje Zeeko IRP-800G a stanovuje metodiku broušení optických elementů pomocí tohoto zařízení. Nutno zdůraznit, že broušení tvrdým nástrojem je inovace, která nebyla na IRP-800G dosud aplikována, a je tedy významným přínosem k technologii broušení.

V první kapitole této práce je stručně shrnuta historie CNC strojů a jejich použití na obecné úrovni. Je zde také představena společnost Zeeko Ltd se svým obráběcím centrem IRP-800G. Rovněž je uveden příklad základního příslušenství a softwaru nutného k broušení skla na obráběcím centru, včetně popisu různých procesů broušení skla. Poté jsou přiblíženy vlastnosti vzorků, elementů použitých pro výrobu na CNC stroji Zeeko, a na konci této kapitoly jsou uvedeny přístroje pro zajištění dostatečně přesných metrologických postupů použitelných na vyrobené elementy.

Následující prakticky zaměřená kapitola se věnuje samotné implementaci procesu broušení a taktéž popisu metodiky pro broušení optických elementů. Třetí kapitola je věnována výstupní kontrole vyhrubovaných elementů pomocí přesných kontaktních 3D sond. Závěrem je detailněji diskutována dosažená kvalita vyrobených optických elementů.

Cílem této práce je popis technologie broušení spolu s rozбором metodiky broušení optických elementů na obráběcím centru Zeeko IRP-800G a zejména hodnocení kvality povrchu vzorků, které byly během zkušební fáze centra Zeeko IRP-800G vyrobeny. Z testování použité technologie lze posoudit, jaké jsou nutné podmínky pro její úspěšné použití v praxi.

1 Teorie

Na následujících stránkách budou velmi stručně popsány základní znaky CNC obráběcích strojů. Dále bude představena společnost Zeeko Ltd a její CNC obráběcí centrum IRP¹-800G. Nebude chybět popis příslušenství nutného k broušení skla na zmíněném obráběcím centru. Nedílnou součástí tohoto centra je také specializovaný software, se kterým bude čtenář rovněž seznámen. Následuje přehled procesů používaných k broušení skla. Dále jsou představeny dva typy zrcadel pro výrobu na zařízení IRP-800G. Důležitým elementem výrobního procesu je také metrologie, a proto nechybí ani stručný přehled použitých měřicích přístrojů.

1.1 CNC stroje obecně

Na začátku padesátých let byly v USA vyvinuty první NC stroje [1]. Tato zkratka znamená Numerical Control, tedy číslicové řízení. Řízení takových strojů neprobíhalo pomocí šablon, křivkových kotoučů, či kontaktních kolíků, nýbrž kombinací čísel a písmen, které obsahují potřebnou informaci. Typickým znakem těchto zařízení bylo, že se neprogramovaly přímo, ale s využitím děrných pásek. Celý postup obrábění součásti a jeho jednotlivé kroky musely být vypracovány předem. Na programovacím oddělení daného pracoviště pak došlo k jejich vyděrování na pásku. Čtečka NC stroje pak do řídicího systému postupně načítala řídicí instrukce po jednotlivých krocích. Každý krok představuje tzv. větu neboli blok programu. Instrukce může obsahovat údaje o řízení pohybů nebo signály pro vyvolání technologických funkcí, což může být například signál pro roztočení a zastavení vřetena. Po vykonání každého z kroků se přečte další věta a původní údaje jsou zapomenuty. Postup probíhá tak dlouho, dokud není přečtena informace o konci programu. V případě výroby dalšího identického kusu se páska jednoduše převinula zpět, respektive nastavila na počátek v případě nekonečné děrné pásky. Pokud byla nutná změna programu, nebylo možné tento zásah provést přímo ve stroji a na programovacím pracovišti musel být vyrobena páska nová.

Další vývoj přišel v sedmdesátých letech s uvedením tzv. CNC strojů [1]. CNC, tedy zkráceně Computerized Numerical Control, znamená číslicové řízení počítačem. Na rozdíl od NC strojů jsou CNC stroje vybaveny volně programovatelným mikropočítačem, který obstarává řízení stroje. Vlastnosti počítačového řídicího systému jsou

¹IRP - Intelligent Robotic Polisher

dány programem, kterým se řídí činnost mikropočítače v jednotlivých režimech – řízení je tedy softwarové. Obrábění na CNC nepředstavuje nový výrobní postup, nýbrž pouze jiný druh programového řízení realizovaného souhrou mezi hardwarem počítače a provozním softwarem. Typickými znaky a výbavou CNC stroje jsou obrazovka pro zobrazení programu a dalších provozních údajů, klávesnice pro zadávání programu, respektive změnu provozních parametrů, a oproti NC strojům také programovatelná paměť umožňující uložit technologické programy. Vše bývá velmi často doprovázeno grafickou simulací používanou pro kontrolu výrobního postupu před vlastním obráběním. Díky vysoké pružnosti se užití CNC zařízení při přechodu na jinou výrobu vyplatí u složitějších dílů již při kusové výrobě.

CNC stroje v současnosti pokrývají široký rozsah různých technologií obrábění, tváření a řezání materiálu (např. vodním paprskem, plamenem, laserem) [2]. CNC obráběcí centrum je jeden stroj obsahující rozličné technologie výroby. Na jednom stroji je tedy možné provést více technologických operací. Vznikají také jednoúčelové specializované stroje, CNC automaty pro hromadnou a sériovou výrobu, stroje s víceosým řízením, CNC měřicí stroje a další, které se přizpůsobují požadavkům zákazníka. Tyto automatizované stroje, doplněné manipulačními prostředky, prostředky kontroly kvality a případně dalšími moduly, tvoří pružné výrobní linky. Jsou vhodné pro výrobu menších sérií podobných výrobků či technologií, které se vyrábějí současně. Jsou na rozdíl od tvrdých linek snadno přeprogramovatelné na jiný typ výrobků. Tento proces se nazývá výroba integrovaná počítačem – CIM².

Stroje jsou tedy „pružné“ [2], lze je rychle přizpůsobit jiné (obdobné) výrobě a pracují v automatizovaném cyklu, který je zajištěn číslicovým řízením. Stroje CNC se uplatňují ve všech oblastech strojírenské výroby (obráběcí, tvářecí, montážní, měřicí), jejich představiteli bývají typicky soustruhy a frézky. Program řídící tyto stroje má několik logicky rozdělených informačních kategorií:

- Geometrické – popisují dráhy nástroje, které jsou dány rozměry obráběné součásti, způsoby jejího obrábění a popisují příjezd a odjezd nástroje k obrobku a od něj. Jde tedy o popis drah nástroje v kartézských souřadnicích, kdy pro tvorbu programu potřebujeme rozměry z výrobního výkresu. V programu je uveden popis v osách X, Z u soustruhu, v osách X, Y, Z u frézky a v osách H, C, B, A, X, Y a Z u zařízení Zeeko IRP-800G.
- Technologické – stanovují technologii obrábění z hlediska rezných podmínek. Mohou to být např. otáčky, rezná rychlost, posuv, případně hloubka třísky.
- Pomocné – jsou to informace a povely pro specifické pomocné funkce stroje, např. zapnutí čerpadla chladicí kapaliny, zapnutí skenovací 3D sondy apod.

²angl. zkratka pro Computer- integrated manufacturing

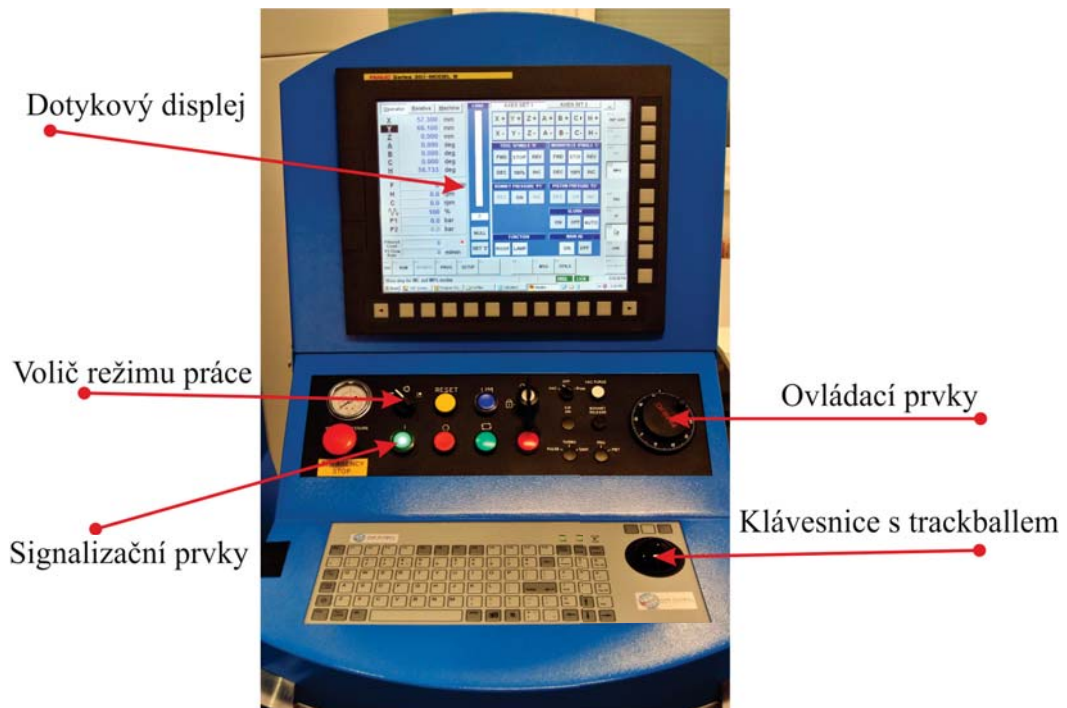
Typické CNC zařízení má tyto prvky [2]:

- Počítač – jedná se o průmyslový počítač s nahraným řídicím systémem, který je součástí stroje. Z hlediska obsluhy je dán obrazovkou a ovládacím panelem. Pomocí ovládacího panelu lze provádět potřebné příkazy nutné při ruční obsluze, pro seřizování CNC obráběcího stroje a pro práce v dalších režimech stroje. Též umožňuje pomocí příslušného softwaru řídicího systému vytvářet požadovaný CNC program. Program je rovněž možné vytvořit mimo stroj a do jeho řídicího systému ho nahrát. Program se ukládá v paměti a pro vlastní práci se vyvolá příkazem.
- Řídicí obvody – v těchto obvodech se logické signály převádějí na silnoproudé elektrické signály, kterými se přímo ovládají jednotlivé části stroje – motory vřetene a posuvů, ventily atd.
 - Řídí stroj pomocnými funkcemi, např. otáčky vřetene.
 - Řídí dráhu nástroje pohybovými funkcemi, které popisují geometrii pohybu ve všech osách, kterými je CNC vybaveno.
- Interpolátor – řeší dráhu nástroje podle zadané geometrie a výpočty délkových a rádiusových korekcí nástroje. Vypočítává ekvidistantu pohybu bodu výměny nástroje, která je vzdálena o vypočítané korekce od požadovaného geometrického obrysu. Zaručuje geometrickou přesnost výrobku.
- Porovnávací obvod – stroj musí být vybaven zpětnou vazbou³, která přenáší informace o dosažených geometrických hodnotách suportů v souřadných osách, v jednotlivých bodech dráhy pohybu. Tyto souřadnice se porovnávají s hodnotami, které jsou zadány programem a upraveny v interpolátoru. Pokud je zjištěn rozdíl, pohony posuvů dostanou povel k dosažení požadovaných hodnot souřadnic.
- Řídicí panel – dělí se dle významu na několik částí:
 - vstup dat – část alfanumerická, pomocí níž se ručně zapisuje např. program, data o nástrojích, o seřízení stroje, strojní konstanty apod.;
 - ovládání stroje – část speciální, pomocí které se pohybuje nástrojem nebo obrobkem, spouští se otáčky vřetene, ovlivňuje se ručně velikost posuvů, otáček apod.;
 - volba režimu práce – lze volit ruční režim, automatický režim atd.;
 - aktivace paměti – vyvolání jednotlivých druhů pamětí;

³Až na výjimky u jednoduchých CNC strojů určených primárně pro základní výcvik obsluhy.

- aktivace testů – vyvolání testů programů a testů stroje, simulací programů;
- obrazovka – slouží ke kontrole prováděných činností;
- přenosný panel – je spojen kabelem s řídicím panelem a slouží k ovládání základních pohybových funkcí stroje tak jako základní část klávesnice. Umožňuje při seřizování a ovládání stroje přejít obsluze do míst, která poskytují dokonalejší vizuální kontrolu.

Výše uvedené znaky CNC zařízení jsou uvedeny jako obecný příklad, jejich realizace se může stroj od stroje lišit. Na obr. 1 je ukázán řídicí panel CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G.



Obr. 1 Řídicí panel CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G.

1.2 CNC stroje společnosti Zeeko

Zeeko Ltd [3, 4] je britskou společností založenou v prosinci roku 2000. Firma Zeeko vstoupila do světa optických technologií jako výrobce zařízení pro korektivní leštění, nicméně její dnešní portfolio je rozšířeno taktéž o přístroje nutné k zajištění kvalitní metrologie při výrobě velmi přesných optických elementů. Jedná se zejména o skenovací CMM⁴, SAP⁵, stitching interferometry a integrované optické testovací věže

⁴angl. zkratka pro Coordinate-measuring machine – třísouřadnicový měřicí stroj CNC

⁵angl. zkratka pro Swing-arm profilometer – speciální druh profilometru

vybavené interferometrem. Tyto věže bývají umísťovány přímo nad lešticím zařízením a jsou s ním elektronicky propojeny.

Zeeko do roku 2012 dodalo zákazníkům po celém světě přes 70 zařízení. Další objednávky toto číslo brzy zvětší na 100 zařízení. Mezi zákazníky patří významné optické společnosti, jako např. Zeiss, Nikon, Thales Optics, Schott Glass, Sony a mnoho dalších včetně konzorcia ESO⁶ a NASA⁷.

1.2.1 Zeeko IRP-800G

Zeeko IRP-800G (viz obr. 2) je sedmiosé [3] CNC zařízení schopné hrubování a jemného broušení nejrůznějších tvarů na širokém spektru materiálů. Zařízení je 1900 mm široké, 2600 mm hluboké, 2800 mm vysoké a 8 tun těžké. Je na něm možné obrábět elementy obecného tvaru do rozměru 800 mm × 800 mm nebo rotačně symetrické elementy až do průměru 1000 mm. Ve specifických případech poloměrů křivosti sférických zrcadel až do průměru 1200 mm.

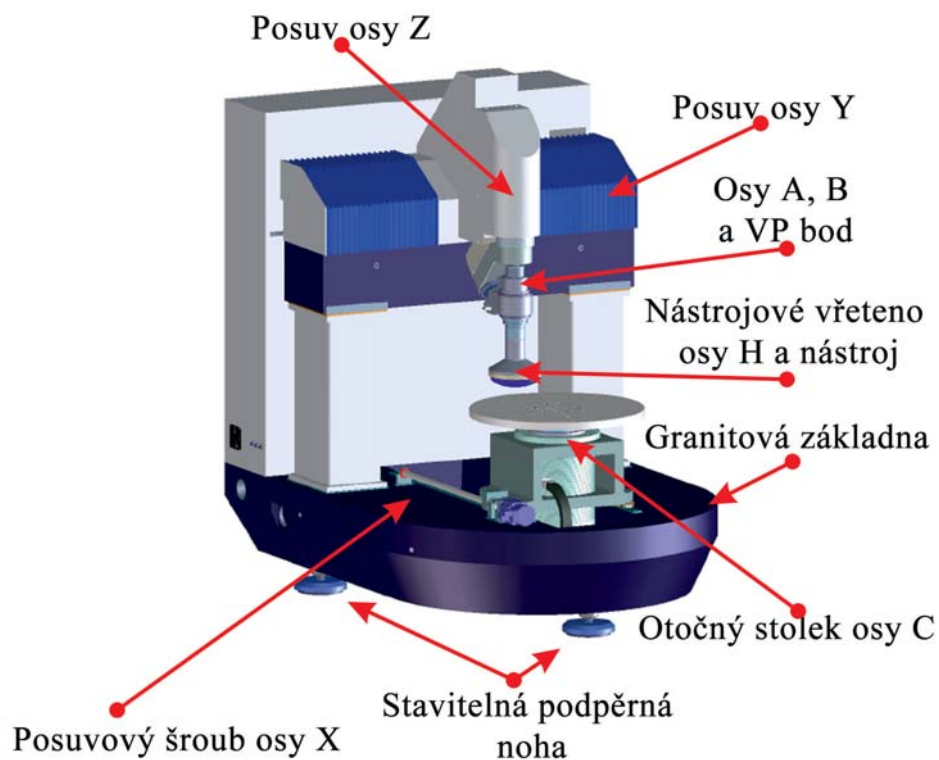


Obr. 2 Reálný snímek CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G a detail jeho nástrojové hlavy.

⁶European Southern Observatory – Evropská jižní observatoř

⁷National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a kosmonautiku

Základna zařízení společně s portálovou konstrukcí (viz obr. 3) je vytvořena z precizně odlité a opracované epoxy-granitové kompozitní struktury [3], která zajišťuje jednak vynikající termální stabilitu a jednak výborně tlumí vibrace. Do odlitku jsou vloženy nerezové části pro upevnění mechanických součástí os X a Y a také jsou zde umístěna transportní oka. Dále jsou zde připevněny nerezové vložky se závity, ke kterým jsou připojeny celky s elektronikou a nástrojovou hlavou. Rovněž jsou v odlitku zavedeny cesty pro elektrickou a elektronickou kabeláž, rozvod vzduchu a chladicí kapaliny.



Obr. 3 Schematický popis CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G
(převzato a upraveno z [3]).

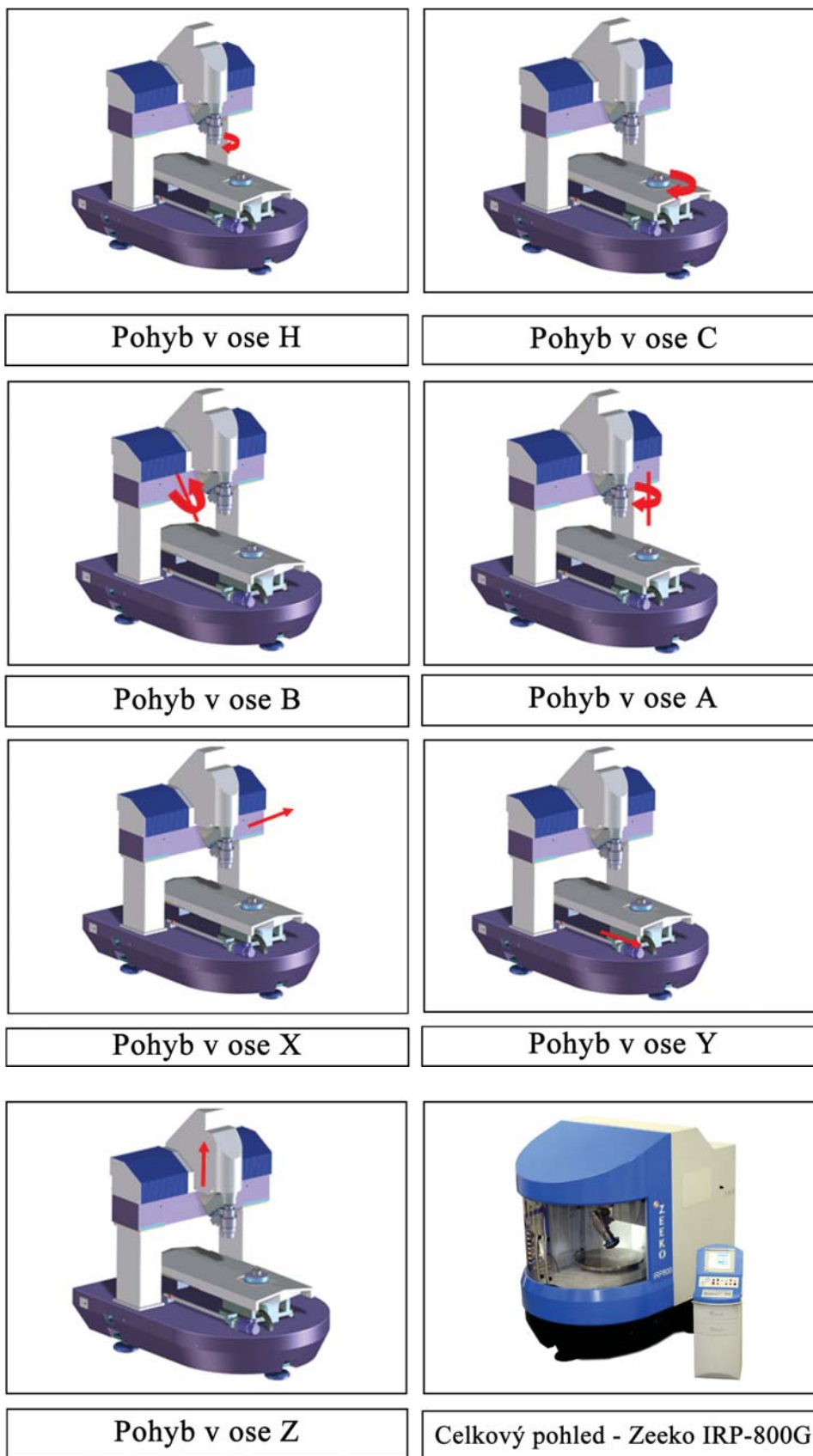
Dle obr. 4 je rozmístění jednotlivých os následující [3]. X je lineární osa, jejíž mechanické součásti jsou umístěny horizontálně do polygranitové portálové konstrukce. Y je lineární osa, jejíž mechanické součásti jsou umístěny horizontálně do polygranitové základny a kolmo k mechanice osy X . Z je lineární osa, jejíž mechanické součásti jsou umístěny vertikálně k mechanice osy X a je kolmá na mechaniky obou os X a Y . C je rotační osa na jejímž rotačním stolku je umístěn obrobek. Osy A , B a H jsou rotační osy, jejichž mechaniky jsou rozmístěny v takovém uspořádání, aby sférický

nástroj uchycený v mechanice osy H rotoval kolem bodu v prostoru, který se nazývá „virtual pivot point“. Mechanický uzel obsahující tyto tři osy se připojuje k mechanice osy Z .

Osa H je reprezentována zařízením, kterým je možné tlakovat bonnet pro dosažení specifické kontaktní plochy mezi ním a obráběným povrchem.

CNC centrum Zeeko je vybaveno řídicím systémem FANUC⁸ Multi-Axis Controller, 30i Series CNC.

⁸angl. zkratka pro Factory automation numerical control.



Obr. 4 Jednotlivé osy CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G a jeho celkový vzhled (převzato a upraveno z [3]).

1.2.2 Příslušenství a spotřební materiál pro Zeeko IRP-800G

K plnému využití potenciálu CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G je nutná celá paleta nejrůznějšího příslušenství a spotřebního materiálu. Nejdůležitější z nich budou představeny na následujících několika stranách.

1.2.2.1 Nástroje a zařízení k zajištění provozu IRP-800G a jeho kalibraci

Naprosto nedílnou součástí obráběcího centra Zeeko IRP-800G je jednotka pro zajištění recirkulace a čištění abrazivní kapaliny⁹ [3] (viz obr. 5). Tato jednotka jednak zajišťuje stálou recirkulaci kapaliny uvnitř CNC centra a jednak z ní vestavěnou centrifugou odstraňuje materiál odebraný z povrchu obrobku pro zajištění stabilních podmínek obrábění. Kapalínou je v případě broušení voda, doplněná aditivem v podobě lubrikantu pro zabránění šíření záprasků ve skle.



Obr. 5 Jednotka pro zajištění recirkulace a čištění abrazivní kapaliny.

Dalším důležitým dílcem celé soustavy je pak chladič ložisek osy vřetene na obr. 6, jehož účel je zřejmý.

⁹angl. Slurry Unit



Obr. 6 Chladič ložisek osy vřetene.

Velice důležitou součástí výrobního procesu je zajištění kvalitní kalibrace celého zařízení. K tomuto účelu je k zařízení dodávána kalibrační kulička a digitální úchylkoměr (viz obr. 7).



Obr. 7 Kalibrační kulička a digitální úchylkoměr.

1.2.2.2 Tvrdé obráběcí nástroje

Řezná hrana brusných nástrojů je formována diamantovými zrny v kovové vazbě [5]. Diamant disponuje všemi pozitivními vlastnostmi požadovanými u řezného nástroje, čímž jsou ospravedlněny vysoké náklady na jeho výrobu a pořízení. Vyznačuje se vysokou tvrdostí vysokou teplotní odolností a dobrou tepelnou vodivostí. Nástroje z něj vyrobené mají dlouhou životnost, jsou schopné dosahovat velkých úběrů materiálu s vysokou mírou tvarové opakovatelnosti při dobré povrchové kvalitě.

Použité diamanty mohou být monokrystalické nebo polykrystalické. Monokrystalické se používají pro vysoké tlaky a velké úběry materiálu a polykrystalické naopak pro nízké tlaky a malé úběry materiálu.

Při výběru správného nástroje jsou důležité parametry, jako je tvar zrn a jejich velikost, koncentrace diamantů a typ vazby. Rozeznávají se tři formy tvaru zrn: blokové, kulaté a ostré. Ostrá zrna se vylamují velmi snadno a zajišťují samobroušení nástroje během obrábění. Na druhé straně bloková zrna jsou velmi pevná.

Velikost zrn zásadním způsobem ovlivňuje dosažitelné úběry materiálu a kvalitu povrchu. Popis velikosti zajišťuje standard FEPA¹⁰ [5], založený na nominální velikosti zrn v mikrometrech. Americký systém je založený na velikosti síta¹¹ při třídění diamantů. Větší zrna vedou k rychlejším úběrům a delší životnosti nástroje, ale také k vyšší povrchové drsnosti. Závěrem je nutné říci, že je výhodné zvolit co největší přípustnou drsnost, která je zároveň dostatečně nízká, aby splnila požadavky kladené na povrchovou texturu obrobku. Hledá se tedy optimum mezi rychlostí úběru a požadavkem na kvalitu povrchu.

Tab. 1 Standardní velikosti diamantových zrn (převzato a upraveno z [5])

Mezinárodní standard velikosti zrn			Velikosti jemných zrn	
FEPA	U.S.	Jmenovitá velikost síta [μm]	Označení dle výrobce Winter	Velikost zrn [μm]
D601	30/35	600/500	D25	32-52
D501	35/40	500/425	D20B	30-40
D251	60/70	250/212	D20A	25-30
D213	70/80	212/180	D15	10-25
D181	80/100	180/150	D15C	20-25
D151	100/120	150/125	D15B	15-20
D126	120/140	125/106	D15A	10-15
D107	140/170	106/90	D7	5-10
D91	170/200	90/75	D3	2-5
D76	200/230	75/63		
D64	230/270	63/53		
D54	270/325	53/45		
D46	325/400	45/38		

¹⁰angl. zkratka pro Federation of European Producers of Abrasives

¹¹angl. mesh

Koncentrace je mírou zastoupení diamantu v abrazivní vrstvě. Koncentrace 100 odpovídá 25% podílu diamantu nebo také 4,4 karátu¹² na 1cm³objemu vrstvy. Existují empirické hodnoty pro vhodnou volbu koncentrace odpovídající účelu použití. V zásadě platí, že pro malé kontaktní plochy mezi nástrojem a obrobkem se volí vysoké koncentrace a naopak.

Typ vazby významným způsobem ovlivňuje pevnost diamantového nástroje [5], obrysovou přesnost, použitelné řezné rychlosti a teplotu v interakční zóně. V optické výrobě se většinou používají diamanty v kovové vazbě. Na rozdíl od ostatních typů vazeb umožňuje dosahovat velkých úběřů, vysokého stupně obrysové přesnosti a dlouhé životnosti nástroje. Pryskyřičná vazba se používá spíše k dokončovacím pracím na vybraných aplikacích.

Správnou volbou výše zmíněných parametrů je možné zajistit kontinuální používání nástroje, neboť se jeho řezná hrana bude udržovat efektem samobroušení. Proto by měl být vybrán nástroj, který vykazuje korektní míru opotřebení, oproti tomu s menší mírou.

Používané frézovací nástroje mají tvar hrnku. Pracovní hranou je kruhový sintrovaný prstenec o šířce 2 mm až 6 mm, který může být připájený nebo připojený přímo ke kovovému tělu. Tyto nástroje se v kombinaci s CNC používají k hrubování sfér různých poloměrů nebo ploch různých tvarů. Jejich klasifikaci, spolu se seznamem standardních rozměrů a geometrií, je možné nalézt v normě DIN ISO 58741.

Pro hrubé broušení se budou v CNC centru Zeeko IRP-800G používat frézovací nástroje s vázaným diamantovým zrnem od výrobce Dr. Müller Diamantmetall AG [6] (viz obr. 8).

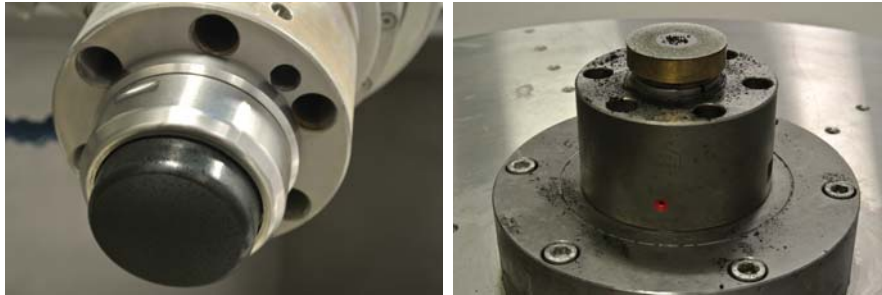


Obr. 8 Frézovací nástroj s vázaným diamantovým zrnem.

¹²1 karát = 0,2 g

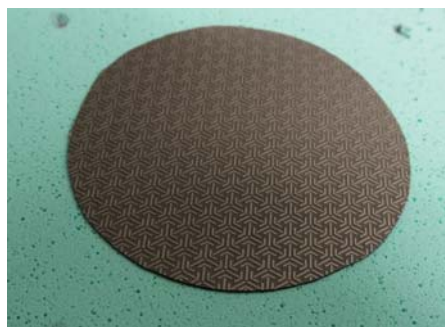
1.2.2.3 Membránové obráběcí nástroje (bonnety) a diamantová abrazivní plátna

K tzv. grolishingu¹³ [3, 7, 8] se budou využívat membránové obráběcí nástroje (z angličtiny tzv. bonnety, viz obr. 9), na které se nalepují diamantová abrazivní plátna. Na rozdíl od fréz je nutné každý nástroj vyrobit zvlášť z jednotlivých částí, které se k bonnetu nalepují lepidlem. K dosažení dobré adheze je nejprve nutné bonnet zdrsňit¹⁴. K tomu slouží specializovaný nástroj¹⁵ zobrazený v pravé části obr. 9.



Obr. 9 Membránový obráběcí nástroj - bonnet (vlevo) a přípravek pro jeho zdrsnění.

Na řádně zdrsňený bonnet je poté možné nalepit polyuretanovou podložku a na ni pak diamantové plátno s požadovanou zrnitostí. Na obr. 10 je uveden příklad diamantového plátna KGS Telum[®] [9], které je charakteristické svým hexagonálním uspořádáním.



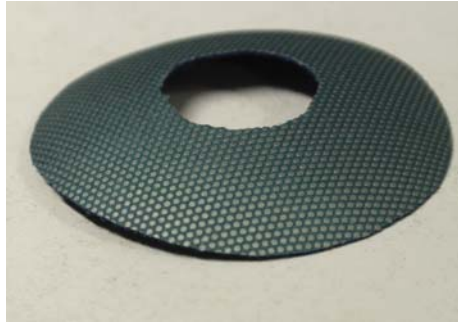
Obr. 10 Diamantové abrazivní plátno KGS Telum[®] a polyuretanová podložka (nazelenalá).

Na obr. 11 je příklad pro bonnet již zformovaného abrazivního plátna KGS Flexis[®], které se vyznačuje jiným typem struktury nalepených diamantů než je u KGS Telum[®].

¹³Vysvětlen podrobněji v 1.3.2.

¹⁴angl. dressing

¹⁵angl. dressing tool



Obr. 11 Vytvarované diamantové plátno KGS Flexis®.

Na bonnety se nejprve lepí vrstva polyuretanu a na ten pak tvarově přizpůsobené diamantové plátno. Výsledkem je membránový nástroj s požadovanou zrnitostí (viz obr. 12), kterým je možné uskutečňovat proces tzv. grolishingu. Oproti pevným nástrojům nabízí další stupeň volnosti, a tím je tlak v bonnetu.



Obr. 12 Bonnet s přilepeným diamantovým plátnem upevněný v nástrojové hlavě CNC centra Zeeko IRP-800G.

1.2.3 Software dodávaný pro práci s CNC obráběcím centrem IRP-800G

Společnost Zeeko vytvořila softwarovou sadu, která je standardní pro celou jejich paletu CNC strojů. Tato sada by měla zákazníkům umožnit rutinní výrobu ultra přesných povrchů jak u osových, tak mimoosových optických elementů.

K obráběcímu centru Zeeko IRP-800G jsou tedy kromě množství hardwaru dodávány i specializované programy [3] Zeeko TPGTM a Metrology ToolkitTM. Zmíněný software a jeho použití bude ukázáno v následujícím textu. Oba programy využívají tzv. NURBS¹⁶.

¹⁶angl. zkratka pro Non-uniform Rational B-Splines

1.2.3.1 Zeeko TPGTM

Zeeko TPGTM [3] se skládá ze dvou důležitých modulů:

- Surface designer, který slouží k definici povrchů pomocí rovnic, CAD souborů nebo matic a převádí je do formátu NURBS.
- Tool path generator, který produkuje rastrové, spirální nebo adaptivně spirální a pseudonáhodné trajektorie nástroje na površích, které se dají definovat pomocí NURBS.

Surface designer [3] je editor povrchů nabízející tři základní způsoby definice optických elementů:

- Analytické – pro jednoduché tvary, jako např. sféry, cylindry, elipsoidy, toroidy, včetně jejich mimoosových částí v kombinaci s polynomiálním vyjádřením ve tvaru $z = P(x, y)$.
- Numerické – pole XYZ nebo oblak bodů odvozených z numerického řešení systému parciálních diferenciálních rovnic popisujících funkci optického komponentu.
- Pomocí CAD souboru obsahujícího informace o jednoduchých nebo b-splinech.

V tomto editoru mohou být povrchy geometricky manipulovány – nakláněny, ořezávány apod. Je tedy možné vytvářet i ohraničené plochy, např. hexagonální.

Různé reprezentace povrchu jsou automaticky konvertovány do formátu NURBS [3]. NURBS jsou matematické objekty nabízející řadu výhod. NURBS totiž zjednodušují popis složitých povrchů svázáním 2D U/V virtuálního prostoru, ve kterém mohou být jednoznačně a účinně popsány trajektorie nástroje a odchylky povrchu, s 3D $X/Y/Z$ ortonormálním kartézským prostorem použitým k popisu skutečného optického povrchu nebo segmentu. NURBS povrchy třetího a vyšších stupňů mají spojité první a druhé derivace, vyznačují se hladkou mapou normálových vektorů a garantují proto hladkou trajektorii středu nástroje. NURBS mohou být přímo nahrány do CNC kontroléru Fanuc. Trajektorie nástroje jsou pak definovány pomocí U/V souřadnic virtuálního prostoru. Kontrolér je schopen spojitě vypočítávat aktuální povrchové souřadnice namísto interpolace mezi diskrétními $X/Y/Z$ body. To vede k mnohem přesnějšímu nastavování poloh a plynulejším zrychlením a zpomalením při změně úběru.

Tvorba trajektorie nástroje probíhá automaticky v modulu Tool Path Generator [3] a může být modifikována skrze grafické uživatelské rozhraní pomocí různých parametrů. Jsou zde 4 hlavní typy trajektorie, kterou software umí generovat: rastrová, spirální, adaptivně spirální a náhodná. Každá z nich může být upravena pomocí parametrů, jako je rozteč drah, bodová rozteč, převis nástroje při dosažení okraje elementu,

a naopak možnost setrvání středu nástroje v centru obrobku při vykonávání spirálního pohybu. Trajektorie nástroje mohou být kombinovány přes několik následujících chodů nástroje pro zabránění vzniku povrchových vzorů s nežádoucími prostorovými frekvencemi. Trajektorie mohou být uzavřeny uvnitř různých tvarů tvořících hranici elementu.

1.2.3.2 Metrology Toolkit™

Metrology Toolkit [3] zaznamenává, formátuje a zpracovává metrologická data z široké palety různých metrologických systémů. Měření jsou reprezentována tzv. chybovými mapami¹⁷ spřaženými s NURBS daného objektu přesně reprezentujícími odchylky od povrchu ve vztahu k nastavením CNC.

Celkový čas požadovaný k výrobě velmi přesných povrchů silně závisí na konvergenci parametrů zadaných do CNC s parametry naměřenými pomocí různých metrologických postupů. Klíčovým faktorem je korektní interpretace metrologických dat, kvantitativní přesnost a opakovatelnost metrologických postupů a zejména správný geometrický vztah mezi metrologickými daty a daty pro obráběcí nástroj.

Je možné narazit na řadu specifických problémů, které doprovázejí různá metrologická zařízení a formáty. V případě používání interferometrů a senzorů vlnoplochy může docházet k následujícím problémům:

- nejednoznačnost výšky vztažené k povrchu nebo reflektované vlnoploše,
- znaménková dvojnásobnost v rovině XY (invertovaný nebo zrcadlený obraz),
- nejednoznačnost zvětšení a orientace interferometrických dat,
- geometrické zkreslení v rovině XY v případě interferometrických dat,
- omezení při měření sklonu, které způsobuje, že některé plochy jsou nerozlišitelné.

V případě použití profilometrů a CMM jsou to zejména tyto obtíže:

- přesné a spolehlivé nastavení bodů naměřených ve 3D,
- kompenzace termálních vlivů během měření,
- kompenzace mechanických a geometrických problémů, jako je např. náklon nebo decentrace v případě využívání rotačního stolku během měření profilometrem.

Tyto problémy se stávají zásadnějšími v případě asférických povrchů a naprosto extrémními v případě nesymetrických povrchů (včetně mimoosových). Další komplikace

¹⁷angl. Error Maps

nastávají, pokud data CAD modelu musejí být v soulase se souřadnicovými systémem stroje. Spojování nebo sešívání v prostorové nebo prostorové frekvenční doméně mezi různými metrologickými zařízeními zavádí další problémy s udržení integrity napříč množinami spojených dat. Tato evidentní potřeba standardizace vedla k postupnému vzniku softwaru, který tyto potíže řešil. Metrology Toolkit byl vytvořen, aby řešil problémy kompatibility s různými definičními metodami, kompatibility mezi různými měřicími přístroji, kompatibility širokého spektra obráběcích nástrojů a zároveň umožňoval korektně formátovat a zpracovávat naměřené množiny dat.

1.3 Stručný přehled současné technologie broušení skla

Novátorské přístupy optických designérů bývaly velmi často limitovány schopností výrobců vyrobit a změřit vlastnosti elementů obsažených v optickém návrhu [10]. Častokrát docházelo k tomu, že návrh splňující zadaná kritéria existoval pouze teoreticky, vzhledem k tomu, že navržené elementy nebylo možné fyzicky vyrobit. Inovace technologických postupů neustále rozšiřuje možnosti návrhu pokročilých optických komponent. Další vývoj v tomto odvětví byl taktéž spjat se zdokonalováním možností metrologických postupů. V případě této práce budou využity poslední poznatky jak z oblasti CNC obrábění, tak metrologie.

Následuje základní nomenklatura obrábění skla vyjma jeho leštění, které nebude prováděno na stejném kuse Zeeko IRP-800G. Důvodem je omezení kontaminace lešticího stroje hrubými kousky abraziva a zbytky skla po procesu broušení.

1.3.1 Broušení

Broušení patří dle normy DIN ISO 6580 mezi výrobní procesy s geometricky nedefinovanou řeznou hranou [5]. Sklo je odebíráno nástrojem, který je složen z mnoha nepravidelně distribuovaných zrnových hran. Kontakt mezi řeznou hranou a obrobkem je nekonstantní. Řezná hrana nástroje je formována vázanými zrny. Zrna mohou být přírodní nebo syntetická abraziva. Každé zrno obsahuje množství řezných hran. V praxi se pro broušení v optice používá také termín frézování.

Nejčastěji používaným abrazivem je diamant. Mezi ostatní abraziva patří karbid křemíku a korund. Korundová abraziva ovšem provázejí problémy s rychlým opotřebením a dalšími souvisejícími problémy, jakým je například tvarová nepravidelnost a nedostatečná povrchová kvalita.

Broušení je možné klasifikovat z několika možných hledisek. V prezentovaném případě zejména dle cílového tvaru (broušení rovin, sfér, nebo asfér) a požadavků na

drsnost (hrubování a jemné broušení).

V současnosti se přechází od časově náročného broušení volnými abrazivy k používání nástrojů s abrazivy vázanými [5]. Takové nástroje jsou ve srovnatelném čase schopné odebrat mnohem větší množství materiálu.

Jednotlivá zrna se tlakem nástroje na obrobek při jejich současném relativním pohybu chovají jako klíny [5]. Ty na povrchu vytvářejí řadu mikrotrhlin. Amorfni a křehký charakter minerálních skel podporuje šíření trhlin a formaci zlomů, na rozdíl od kovů, které mají z tohoto hlediska odlišné chování. „Vytrhávání“ částic skla způsobuje, že se povrch stává matným a je nutné ho udělat znovu průhledným v nadcházející lešticí operaci.

Špatná volba parametrů procesu může způsobit vznik nežádoucích záprasků v povrchu [5]. Trhliny mohou být nanejvýš tak hluboké, aby je bylo možné úplně odstranit nadcházejícím procesem lapování nebo leštění. Hodnocení broušených povrchů je relativně složité. Je totiž ovlivněno mnoha parametry, jakými jsou např. rychlosti otáček, rychlosti posuvu, tlak působící na brusný nástroj, velikost zrn, chladicí médium a materiál obrobku. Je vyžadována znalost a zkušenost pro stanovení vhodného množství extra materiálu a volby možných parametrů procesu. Další vliv na broušení má také chemie tohoto procesu. Jejím vlivem se ovšem tato práce zabývat nebude.

Chladivo podporuje uvolňování nepatrných částic. Drsnost broušeného povrchu je závislá na řezné rychlosti, velikosti zrn, tlaku působícím na brusný nástroj a opracovávaném materiálu.

Řezný pohyb je výsledkem rotačního pohybu nástroje a rotačního nebo translačního pohybu obrobku. Pohyb nástroje bývá v mnoha případech ještě modifikován definovaným přísuvem. CNC brusná zařízení jsou většinou vybavena několika osami dovolujícími generovat komplikované kontury.

Běžně obrobek vykonává ještě dodatečný rotační pohyb. To umožňuje použití lepších kinematických podmínek zejména při broušení sférických povrchů. Řezná rychlost je pro rovinné povrchy (schéma viz obr. 13) dána vztahem [5]

$$v_c = d_t \cdot \pi \cdot n_w, \quad (1)$$

kde n_w je rychlost otáčení obrobku, průměr nástroje je roven polovině průměru obrobku, tedy $d_t = 1/2d_w$ a objem odebraného materiálu je pak

$$V = \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \cdot a_e, \quad (2)$$

kde d_w je průměr obrobku a a_e je přísuv. Z toho vychází množství odstraněného materiálu za jednotku času

$$Q_w = v_f \cdot a_e \cdot b_w, \quad (3)$$

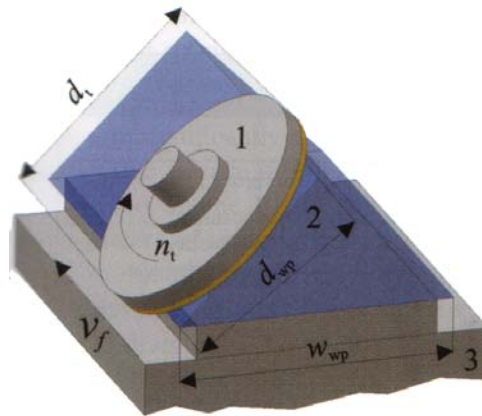
kde v_f posuv obrobku. Výsledný úběr je stanoven jako

$$A_r = \frac{\Delta V}{t_s}. \quad (4)$$

Úběr závisí na typu skla, velikosti zrn, kvalitě diamantového nástroje a řezné rychlosti. Typické hodnoty úběru se pohybují v intervalu 0,3 až 1 cm³ · min⁻¹. Konkrétní hodnoty pak závisejí na mnoha okolnostech. V souvislosti s obráběním skla se velmi často mluví o tzv. Prestonově vztahu udávajícím úběr [6] při tlaku p působícím na obrobek a relativní rychlosti v

$$\frac{dz}{dt} = -k_p p v, \quad (5)$$

kde z je tloušťka vrstvy a k_p Prestonův koeficient. Tlak je přímo dán silou působící na obrobek, zatímco rychlost je sumou několika dílčích rychlostí při obrábění.



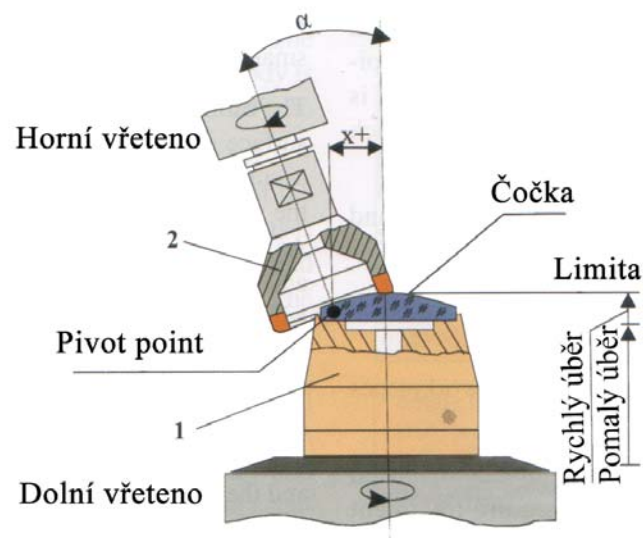
Obr. 13 Schématické znázornění broušení rovin hrncovou frézou (převzato a upraveno z [5]).

Broušení je většinou několikastupňovým procesem [5], jehož cílem je dosáhnout finálního tvaru rychle a přesně. Za tímto účelem je využíváno nástrojů s vázanými diamanty o různých velikostech zrna. Velká se používají pro předbroušení k dosažení co největšího úběru materiálu. Typické velikosti pro CNC broušení jsou D76, D64 a D46 (viz tab. 1). Úběry materiálu určují efektivnost procesu, nicméně je třeba kontrolovat hloubku mikrotrhlin. Jak se tvar obrobku přibližuje požadovanému, zmenšuje se velikost použitých zrn.

Během jemného broušení již není důležité množství odebraného materiálu. Úkolem tohoto procesu je vytvořit povrch připravený k leštění. Proto se používají nástroje D20, D15 a D10.

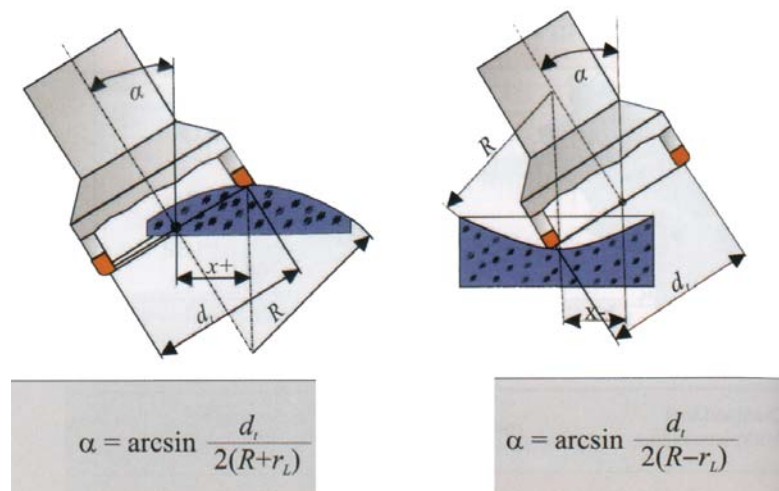
Broušení je velice komplexní proces závisející na mnoha faktorech [5]. Mnohé aplikace vyžadují individuální přístup k volbě vhodných parametrů.

V případě prezentované práce se bude řešit zejména tvarové broušení sfér a asfér. Pro tuto operaci se budou používat hrncové frézy z 1.2.2.2. Metodě broušení sfér se někdy také říká generování křivky. Je založena na nastavení úhlu α mezi obrobkem a nástrojem. Obě osy se protínají v centru požadovaného poloměru. Hrnková fréza přejíždí svým efektivním průměrem D_w přes vrchol obrobku. Práce s hrncovými frézami je velmi flexibilní a dovoluje generování odlišných rádiusů jediným nástrojem. Obrobek se otáčí kolem své vlastní osy. Rotační osa nástroje se protíná s osou obrobku. Obr. 16 znázorňuje tento vztah. Rádus je odvozen ze sklonu mezi těmito osami. Podmínky jsou tedy reprezentovány úhlem α a průměrem nástroje. Úběr bývá realizován skrze rotační osu obrobku nebo může být složen z pohybů ve více osách.



Obr. 14 Schématické znázornění broušení sférických čoček hrncovou frézou (převzato a upraveno z [5]).

Kontaktní čára nástroje se musí protínat s osou obrobku, aby se dosáhlo kompletního sférického povrchu. V opačném případě nebude střed opracován korektně. Obr. 15 ukazuje vztahy pro výpočet úhlu α pro dosažení požadovaného konvexního nebo konkávního tvaru.



Obr. 15 Schématické znázornění broušení konvexních a konkávních čoček pomocí hrncových fréz a vztahy pro výpočet náklonu nástroje (převzato a upraveno z [5]).

Tvarové broušení hrncovými frézami je typicky prvním krokem v produkci čoček [5]. Sférické broušení má tyto základní charakteristiky a výhody – velký úběr materiálu, jemné broušení pro povrchy připravené k leštění, vysoká míra opakovatelnosti.

Tvarové broušení hrncovými frézami může být použito jak při předbroušení, tak při jemném broušení. K dispozici jsou různé velikosti diamantových zrn od 10 μm do 250 μm . Pro předbroušení se používají zrnitosti D76 až D46 a pro jemné broušení D20 až D10. Charakteristiky jako chybu centrování, velikost, tloušťku, rovnoběžnost a povrchový tvar je nutné sledovat, neboť následující leštění může kompenzovat pouze malé odchylky tvaru.

Poměr mezi efektivním povrchem nástroje a obráběným povrchem je velmi malý. To limituje dosažitelnou tvarovou přesnost. Chyby v koncentricitě vřetene nástroje a obrobku mají také negativní vliv. Jak dochází k opotřebení nástroje, tak se mění efektivní průměr nástroje, a tím i radius. Z toho vyplývá nutnost neustálých korekcí. Následující parametry mají kritickou důležitost při jemném broušení hrncovitým nástrojem: přesný chod vřeten, stabilita stroje, nastavení úhlu α , přesné nastavení nástrojového vřetene kompenzující opotřebení nástroje, variabilní nastavení otáček nástroje a obrobku.

Automatizace CNC zařízení umožňujících broušení optiky může často vyžadovat CAM¹⁸ řešení pro přípravu produkce [5]. To je zejména nutné pro přesné výpočty simultánních pohybů několika os při výrobě složitě tvarovaných komponent. Např. v případě Zeeko IRP-800G se využívá software představený v 1.2.3. Výhoda použití moderního software je zejména ve správě CNC stroje, obráběcího nástroje a materiálových dat. Také umožňuje simulovat a optimalizovat proces, což pomáhá omezit

¹⁸angl. zkratka pro Computer-aided manufacturing – počítačová podpora obrábění (používání softwaru pro programování CNC zařízení)

množství chyb. Počítačové programy mohou být tedy považovány za důležité nástroje při plánování procesu výroby, identifikaci možných chyb a systematizaci hromadné výroby.

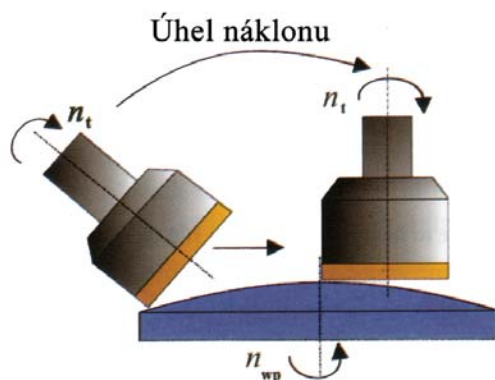
Moderní CNC stroje jsou často víceřetenové. To umožňuje provést kompletní broušení jedné strany elementu při jednom nastavení stroje. Je možné automaticky provést proces předbroušení, jemného broušení, vytvoření faset apod. Taktéž bývají k dispozici integrované taktilní senzory pro in situ kontrolu povrchu optického elementu. Většina postupů při broušení se provádí s využitím hrncových fréz. Typický postup při broušení je třístupňový:

1. Broušení s velkým úběrem.
2. Broušení se zmenšeným úběrem – lepší kvalita povrchu, méně štěrbin.
3. Broušení bez úběru¹⁹ – malá korekce chyb, které vznikají vinou elastických vlastností CNC stroje a obráběcího nástroje.

CNC stroje taktéž umožňují zefektivnit výrobu asférických elementů. Výroba asférických elementů je rozsáhlý a komplexní proces. Asféra je broušena nástrojem s kovově vázaným diamantem v několika krocích, které obsahují předbroušení a jemné broušení. Výsledkem je povrch připravený k leštění. Vysoce přesné CNC stroje jsou schopné současného pohybu v několika osách. Iterativním procesem je možné získat požadovaný tvar. Proces většinou zahrnuje i testování na externím měřicím zařízení pro sledování aktuálního stavu povrchu. Taková kontrola se může provádět například taktilními sondami zmiňovanými v 1.5.

Rádus sférické čočky je determinován úhlem náklonu nástroje α . Broušení asfér neprobíhá takto jednoduše. Navzdory tomu, že se používají totožné nástroje, jejich kontakt s obrobkem je pouze bodový nebo čárový. Obr. 16 ilustruje pohyb nástroje, který následuje konturu asféry za současného naklánění hlavy pro dosažení konstantní stopy nástroje. Povrchu požadovaného tvaru a drsnosti se většinou dosáhne až po několika přejezdech nástroje.

¹⁹angl. spark out



Obr. 16 Schématické znázornění postupu při broušení asférických elementů (převzato a upraveno z [5]).

Broušení asfér používá stejné diamantové nástroje s kovovou vazbou, ale používají se jiné zrnitosti než při broušení sfér. CNC centra pro broušení asfér musí pracovat v nejvyšší možné přesnosti pro udržení kontury povrchu při pohybu v nejméně třech osách.

Tvorba povrchu začíná předbroušením sféry, která nejlépe aproximuje danou asféru. Kontura asféry je tvořena v dalším kroku okrajem nástroje.

Tvar hrncové frézy je relevantní pro výslednou kontaktní plochu mezi nástrojem a obrobkem. Kontaktní plocha má tvar luku, popřípadě fazole a kontinuálně se mění vlivem opotřebování nástroje. Tato změna musí být měřena a následně strojově kompenzována.

1.3.2 Grolishing

Zeeko-Grolish [3, 8, 9] process nebo jednoduše grolishing²⁰, je dalším vývojovým stupněm leštícího procesu označovaného jako Zeeko-Classic²¹. Pomocí grolishingu je možné dosahovat daleko agresivnějšího opracování materiálu než při leštění. Úběry materiálu jsou srovnatelné s těmi, které se dosahují při procesu jemného broušení. Aktuálně existuje několik variant grolishingu [9]. V zásadě se používají polyuretanové nebo kovové podložky připevněné k bonnetu (viz 1.2.2.3) a používané s agresivním abrazivním médiem, jakým může být např. diamantová pasta pro dosažení velkých úběrů materiálu. Dále je možné používat diamanty ve formě pelet vázaných na oheb-

²⁰ Aktuálně nemá český ekvivalent, proto se bude používat původního označení, které dal procesu výrobce.

²¹ Tato technologie je patentována společností Zeeko.

nou plastovou folii. Tyto je možné připevnit ke standardnímu klobouku. Zeeko rovněž vyrábí speciální bonnety pro připevnění kovově vázaných diamantových pelet.

Grolishing je možné nasadit pro vytvoření tvaru, který by jinak vyžadoval jemného broušení. Proces se tedy nachází mezi hrubováním a leštěním. Grolishingu se používá k odstranění podpovrchových poškození, odstranění povrchových středních ($1 - 50$) mm^{-1} prostorových frekvencí, tvorbě asfér a obecných tvarů.

Na rozdíl od tvrdých nástrojů se membránové nástroje snadno přizpůsobují tvarům asférických povrchů. Na druhé straně je nutné zmínit, že se tím také zmenšuje efektivní úběr materiálu.

Běžně je při broušení asfér v kontaktu s povrchem pouze okraj hrncové frézy. To sice minimalizuje chyby tvaru, nicméně také zavádí jisté nežádoucí prvky z oblasti středních prostorových frekvencí. Prvky s prostorovou frekvencí větší než 1 mm^{-1} mohou být efektivně odstraněny leštěním. Prvky z oblasti $0,5 \text{ mm}^{-1}$ až $0,02 \text{ mm}^{-1}$ jsou ale viditelné i po 160 hodinách leštění [8]. Pro odstranění těchto nežádoucích prvků by bylo vhodné užití prostorového filtru. Tento prostorový filtr by měl být tvrdý nebo polotvrdý nástroj vhodný pro překlenutí vyšších prostorových frekvencí a zároveň malý pro zabránění vzniku chyb v asféricitě povrchu. Nástroj by měl pokrýt střední prostorové frekvence a nesoulad jeho povrchu s opracovávaným asférickým povrchem by neměl zanést nové chyby v tomto frekvenčním pásmu. To vedlo společnost Zeeko k návrhu několika odlišných variant nástrojů pro provádění grolishingu [9]. Grolishing tedy není názvem pro jedinou konkrétní techniku používající stále stejný typ nástroje, ale je souhrnným názvem pro více různých přístupů využívajících odlišné nástroje k dosažení podobných cílů. V prezentované práci bude ke grolishingu používán nástroj prezentovaný v 1.2.2.3.

1.4 Příklady optických elementů k broušení CNC strojem Zeeko IRP-800G

Během práce na CNC obráběcím centru Zeeko IRP-800G budou vyrobeny dva typy zrcadel, které se na SLO UP a FZÚ AV ČR již v minulosti vyráběly. Jedná se jednak o hexagonální sférický element segmentovaného zrcadla pro nezobrazovací FD teleskop observatoře Pierre Auger a jednak o asférický element korekčního prstence stejného teleskopu. FD teleskop je největší komorou Schmidtova typu.

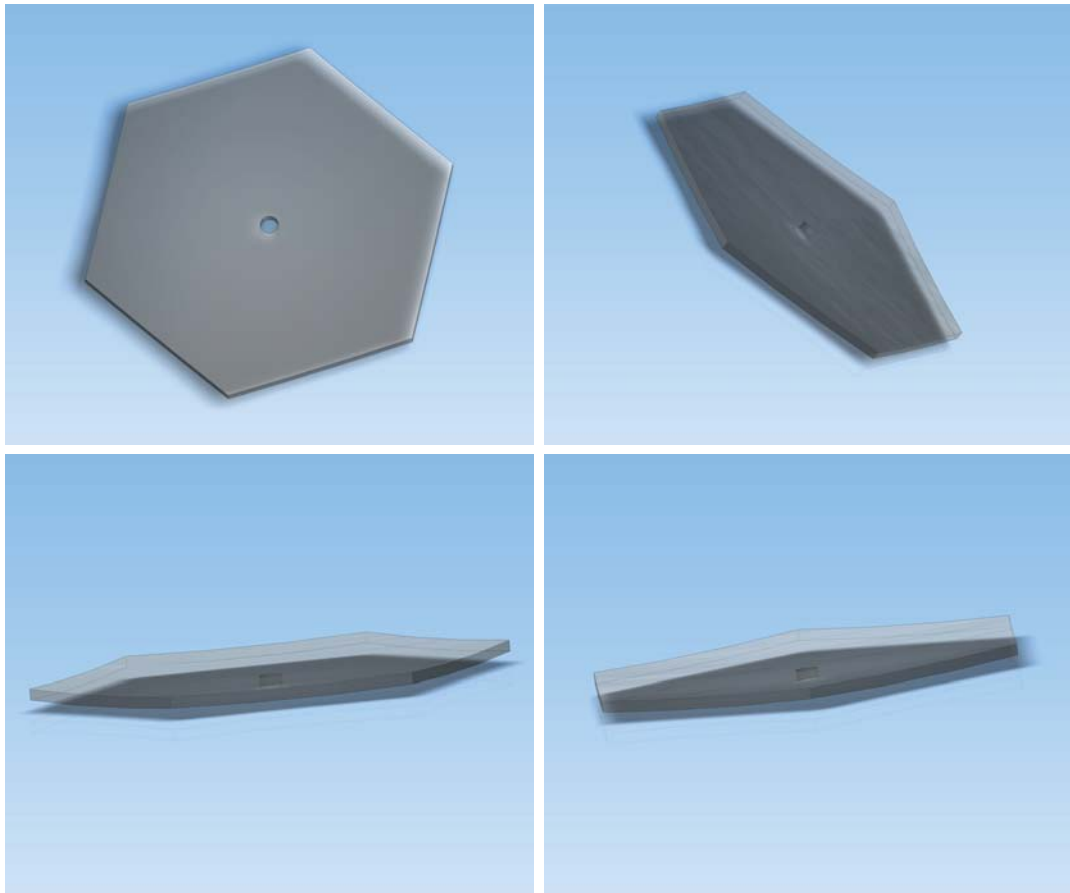
Výkresy k oběma elementům jsou v příloze A (sférické zrcadlo) a B (asférické zrcadlo) této práce. Níže následuje výňatek ze zadání tendru na nákup CNC centra s popisem těchto zrcadel. Test prezentovaný v předložené práci předcházel výrobě kontrolních kusů pro potvrzení plnění kritérií tendru, a tudíž získané výsledky vyrobených kusů nemusí být lepší než ty zadané v tendru.

1.4.1 Sférické zrcadlo

Jedná se o broušený polotovar konkávního zrcadla ultralehkého typu. Vzorek bude vyroben z výlisků. Materiálem, ze kterého bude výlisek vyroben bude technické sklo SIMAX (typ PYREX). Výlisek bude ořezán do tvaru šestiúhelníku o průměru opsané kružnice 623 mm. Tloušťka výlisku bude 15 mm s tolerancí 2 mm a klínovitostí do 1 mm, povrchy výlisků budou neopracovány. Rádus přední plochy se může od požadované hodnoty 3400 mm lišit v rozmezí hodnot 3000 až 4500 mm. Na výliscích je přípustný výskyt lokálních odchylek od rádiusu výlisku. Zadní plocha výlisku může vykazovat povrchově vystupující nepravidelné síťování vzniklé vtlačněním skloviny do prasklin v lisovací formě. Tyto nerovnosti vystupují nad plochu až do výšky 0,2 mm a jsou široké až 0,2 mm. Kvalita sférického zrcadla bude považována za vyhovující, pokud odchylka od kulové plochy nepřesáhne maximální povolenou hodnotu $Wdq = 60''$ a ostatní parametry budou v souladu s výkresovou dokumentací.

Na obr. 17 je 3D render tohoto vzorku, který byl vytvořen v programu *Autodesk® Inventor®* Professional²² 2014.

²²Profesionální verze parametrického, adaptivního 3D modeláře – softwarové CAD aplikace společnosti Autodesk. Inventor je v současnosti světově nejrozšířenější strojírenská 3D CAD aplikace.

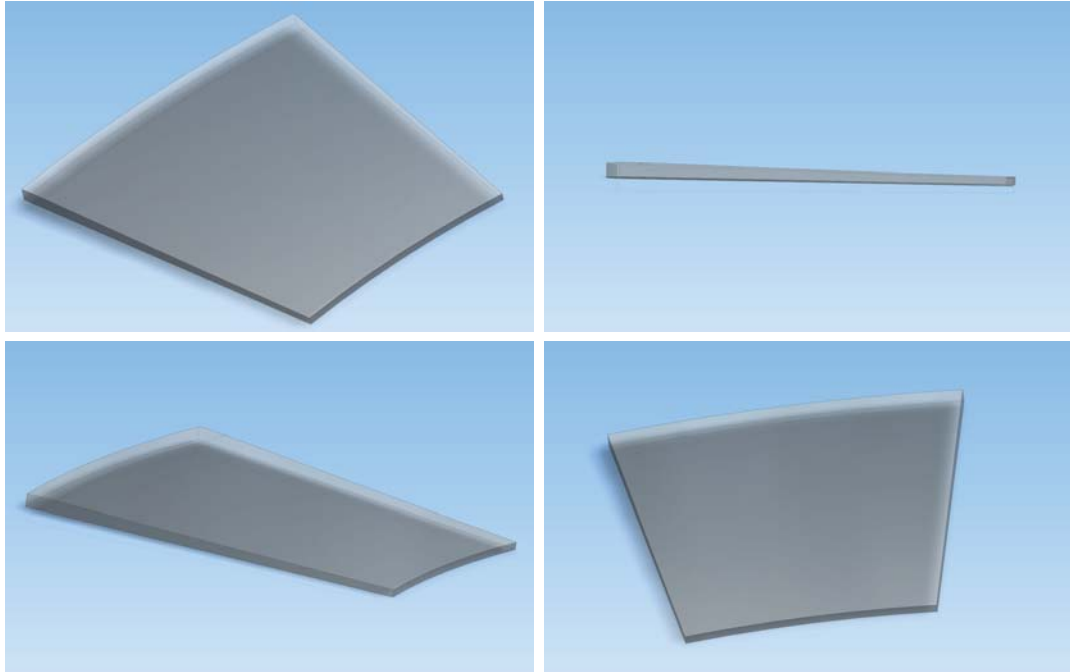


Obr. 17 3D render sférického zrcadla vytvořený v programu Autodesk® Inventor® Professional 2014.

1.4.2 Asférické zrcadlo

Jedná se o oboustranně broušený tenký segment korekčního prstence s jednou plochou rovinnou a druhou plochou obecného tvaru. Segment tvoří 1/24 prstence s vnějším průměrem 2200 mm a vnitřním průměrem 1700 mm. Tento vzorek bude vyroben z optického skla BK-7. Kvalita vzorku bude hodnocena jako vyhovující pokud povolená odchylka tvaru nepřekročí maximální hodnotu $Wdq = 100''$ a ostatní parametry budou v souladu s výkresovou dokumentací.

Analogicky s předchozím příkladem následuje 3D render tohoto vzorku, který byl vytvořen v programu Autodesk® Inventor® Professional (viz obr. 18).



Obr. 18 3D render asférického zrcadla vytvořený v programu Autodesk® Inventor® Professional 2014.

1.4.3 Mikrogeometrie povrchu - vybrané parametry

Pro správné pochopení výkresových požadavků na kvalitu povrchu budou ve stručnosti uvedeny některé parametry používané k definování mikrogeometrie povrchu.

Obecný povrch se skládá ze tří základních komponent [12] – tvaru plochy, vlnitosti a drsnosti. Při jeho hodnocení se postupuje následovně. Nejprve dochází k fitování tvaru, respektive odstranění náklonu. Následuje filtrování, při kterém je oddělena vlnitost a drsnost. A v posledním kroku dochází k parametrizaci povrchu a analýze nejistot.

Parametry [12, 13] je možné rozdělit na parametry profilu (2D) a parametry oblasti (3D), respektive na R -parametry a S -parametry. Dále je možné parametry rozdělit na amplitudové (např. Ra – průměrná aritmetická úchylka výšky profilu a Rq – průměrná kvadratická úchylka výšky profilu), plošné (např. Std – směr textury povrchu), objemové, hybridní (např. Sdq – kvadratický sklon povrchu) a funkční (např. Sci – index udržení kapaliny v jádře).

Pro charakterizaci kvality povrchu se v této práci, dle normy ČSN EN ISO 4287, používají dva výškové parametry a jeden tvarový parametr:

- Ra – průměrná aritmetická úchylka výšky profilu, definovaná vztahem

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (6)$$

- Rq - průměrná kvadratická úchylka výšky profilu, definována vztahem

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (7)$$

- Wdq - průměrný kvadratický sklon profilu, definován vztahem

$$Wdq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{d}{dx} Z(x) \right)^2 dx}, \quad (8)$$

kde l ve vztazích označuje základní délku a $Z(x)$ hodnotu pořadnic (výšky posuzovaného profilu).

Zejména v případě rovinných ploch je možné využívat popisu povrchu pomocí tzv. peak-to-valley, zkráceně PV. Tato hodnota popisuje rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou naměřeného profilu po odečtení nominálního tvaru (např. tedy roviny, sféry apod.). Jelikož nejsou jasně stanoveny normy pro výpočet PV, je běžné, že různí experimentátoři získávají odlišné výsledky PV při měření stejného optického elementu. Pro charakterizaci asférických elementů je nejvhodnější charakteristikou tzv. slope error (hodnota odchylky úhlu sklonu plochy) [14]. Mohou totiž nastat případy, kdy je optický element vyroben v rámci specifikací PV, ale přesto jeho kvalita není dostatečná. Z tohoto důvodu se při výrobě asfér definuje právě slope error. Paradoxní je, že definici slope error není možné najít v žádných běžně používaných normách (ISO 10110 a MIL-PRF-13830). Slope error lze měřit např. pomocí kontaktních profiometrů, Shackova-Hartmannova senzoru, Fizeau interferometru apod. Slope error lze z fázové matice ve tvaru

A	B	C
D	E	F
G	H	I

spočítat pomocí vztahů [14]:

$$\text{Slope X} = \frac{F - D}{2} \quad (9)$$

a

$$\text{Slope Y} = \frac{B - H}{2}. \quad (10)$$

Kdy výslednou velikost odchylky úhlu sklonu profilu, tedy slope error vyjadřuje vztah

$$\text{Slope Magnitude} = \sqrt{\text{Slope X}^2 + \text{Slope Y}^2}. \quad (11)$$

Ve výkresové dokumentaci jsou pro sférické a asférické zrcadlo stanoveny tyto hodnoty parametrů:

Sférické zrcadlo	
Rq	250 nm
Wdq	60“

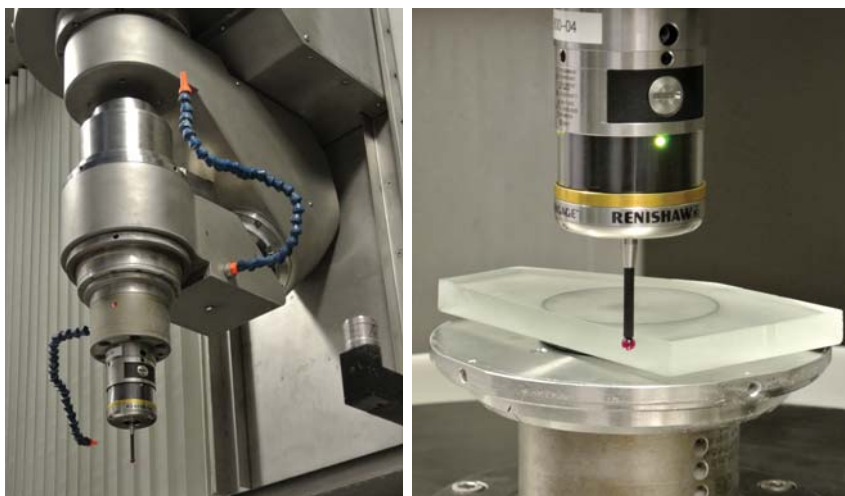
Asférické zrcadlo	
Rq	200 nm
Wdq	100“

1.5 Zařízení použitá pro kontrolu obráběných optických povrchů

Pro výstupní kontrolu vybroušených optických elementů bude v rámci testování procesu využíváno hned několik přístrojů. Společným znakem všech je, že využívají kontaktního měření. V rámci požadavků na přesnost broušených povrchů jsou kontaktní metody naprosto dostačující a není nutné přecházet k přesnějším optickým, např. interferometrickým metodám.

1.5.1 3D měřicí sonda Renishaw RMP600

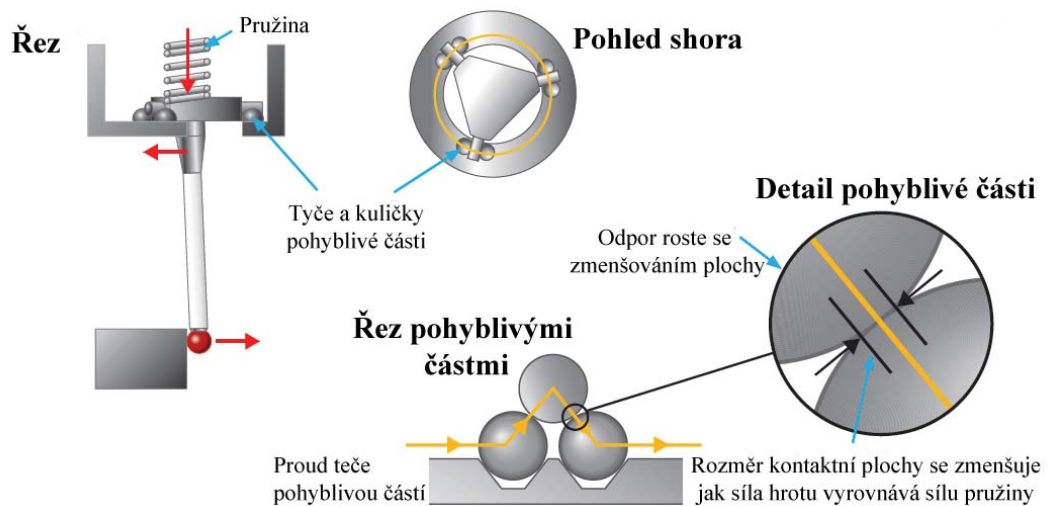
Sonda Renishaw RMP600 (viz obr. 19) je součástí dodávky CNC stroje Zeeko IRP-800G. Tato sonda je integrovatelná do obráběcí hlavy CNC, a je tedy možné s ní měřit in situ ihned po dokončení každého kroku broušení a provádět tak následné korekce procesu.



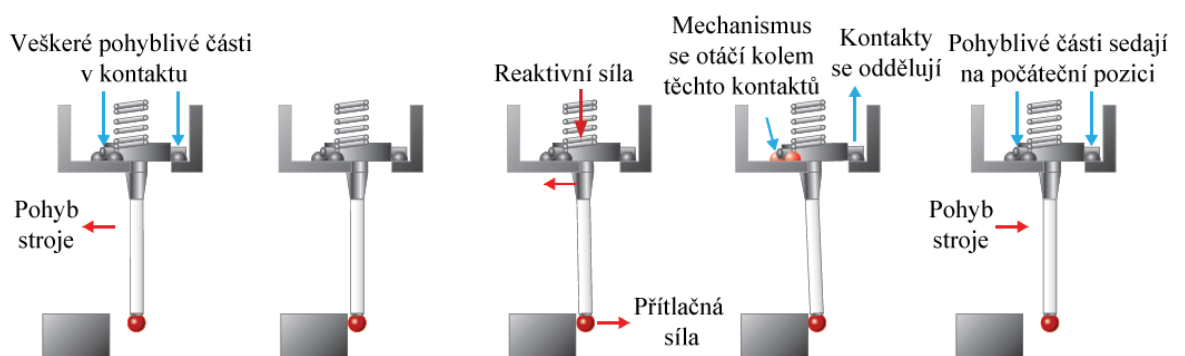
Obr. 19 3D měřicí sonda Renishaw RMP600 upnutá v nástrojové hlavě CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G a její detail.

Renishaw RMP600 je bezdrátová měřicí sonda disponující patentovanou technologií Rengage™ [15]. Kinematická rezistivní sonda vybavená zmíněnou technologií funguje následujícím způsobem. Základem jsou tři ekvidistantně umístěné tyče ležící na šesti koulích z karbidu wolframu poskytujících šest kontaktních bodů (viz obr. 20). Skrze tyto kontakty je uzavřen elektrický obvod. Mechanismus je pružinový, což umožňuje náklon mechanismu při kontaktu s objektem a zároveň sondě umožňuje dostat se na původní pozici s přesností na 1 μm , pokud není v kontaktu s objektem.

Tlakem způsobeným pružinami se vytvoří kontaktní plocha, skrze kterou teče proud. Při dotyku objektu hrotem (viz obr. 21) se tyče s kuličkami začnou rozpojovat, což sníží rozměr kontaktní plochy a v konečném důsledku rovněž zvýší elektrický odpor. Po dosažení specifikované prahové úrovně je pak sonda spuštěna. Kritickými elementy tohoto principu jsou opakovatelnost elektrického spouštění a znovuusazování do původní polohy.



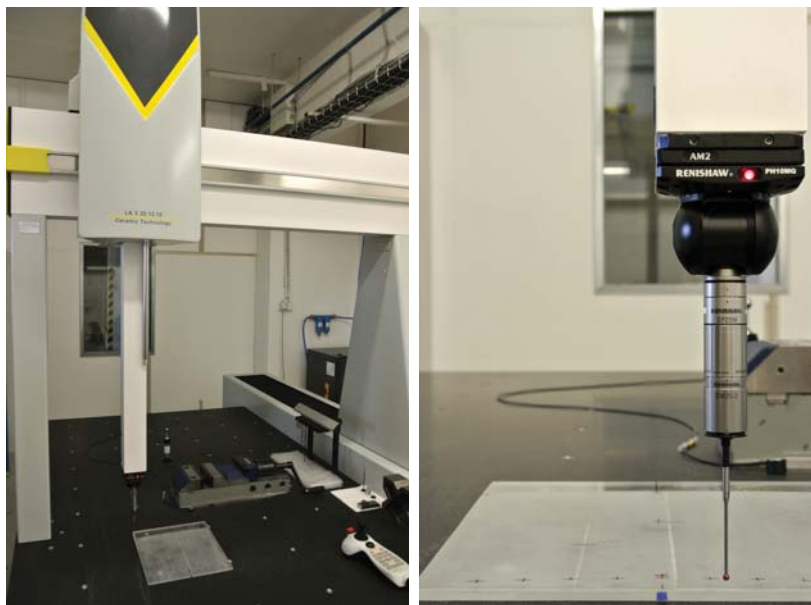
Obr. 20 Schematické znázornění sondy Renishaw RMP600 objasňující princip její funkce (převzato a upraveno z [15]).



Obr. 21 Schematické znázornění jednoho měřicího cyklu sondy Renishaw RMP600 (převzato a upraveno z [15]).

1.5.2 LK Nikon LKV 20.12.10

LK Nikon LKV 20.12.10 (viz obr. 22) je samostatný měřicí stroj z kategorie tzv. CMM²³, což je druh CNC kontrolního stroje.



Obr. 22 CMM LK Nikon LKV 20.12.10 a detail jeho sondy Renishaw SM-25M.

CMM je zařízení používané ve výrobních procesech pro měření přesných geometrických vlastností testovaných objektů [16]. Obecně jsou to zařízení pro testování konformity dílu nebo sestavy s předem stanovenými výrobními požadavky. Stroj může být manuálně řízen operátorem nebo pomocí předem naprogramovaného počítače. Měření jsou definována sondou propojenou k třetí pohybové ose stroje. Sondy mohou být mechanické i optické. Základním principem je zjišťování souřadnice X , Y a Z jednotlivých bodů měřeného objektu. Souřadnice bodů jsou zjišťovány pomocí sondy, která je naváděna manuálně operátorem nebo automaticky pomocí počítače – způsobem DCC²⁴ [16]. CMM je možné pomocí DCC naprogramovat tak, aby opakovaně měřil totožné díly. Osy typického tříosého CMM jsou navzájem kolmé v trojrozměrném kartézském souřadnicovém systému. Každá osa má systém měřítek. Stroj využívá X , Y , Z souřadnice každého z těchto bodů pro určení přesné polohy v prostoru. Postup měření je možné popsat tak [16], že v první části se definují body měřicího zařízení v prostoru, pak se provede výběr způsobu měření, výběr vhodných měřicích prostředků (sondy a jejího doteku) a nakonec se stanoví průběh měření, aby bylo co nejpřesnější a zároveň nejefektivnější. Druhá část se týká testovaného vzorku, kdy dochází k jeho upnutí

²³angl. zkratka pro Coordinate-measuring machine – Souřadnicový měřicí stroj

²⁴angl. zkratka pro Direct Computer Control

k měřicímu stolu CMM zařízení, vlastní realizaci měření jednotlivých bodů na dané součásti a také ukládání informací pro určení vlastní polohy bodů zkoumaného vzorku. V poslední části se zpracují uložené informace, zejména se provede jejich interpretace, vyhodnocení naměřených hodnot a další využití získaných informací.

Stejně jako samotné Zeeko IRP-800G i CMM zařízení LK Nikon LKV 20.12.10 je vybaveno měřicí sondou společnosti Renishaw. Nicméně sonda Renishaw SM-25M (viz obr. 22) nepracuje na totožném principu jako v předchozím případě jmenovaná RMP600 [15]. Tím, že SMP-25M využívá naprosto jiného principu (viz obr. 23), tak je s ní možné, na rozdíl od RMP600, provádět nejen pokleповé skenování, ale přímo také spojité skenování objektu. Sonda je založena na tzv. systému optické metrologie, který se skládá ze zdroje infračerveného záření a světlocitlivých pozičních detektorů. Na pohybové části sondy je pak umístěn pár konkávních zrcadel. Tato zrcadla se pohybují simultánně s pohybem dotekového hrotu. Úhel odrazu paprsků odražených zrcadly, měřených na pozičních senzorech, lze převést na délkové jednotky.



Obr. 23 Schématické znázornění sondy Renishaw SMP-25 s červenými šipkami vyznačenou trajektorií infračerveného paprsku dopadajícího na poziční senzory

(převzato a upraveno z [15]).

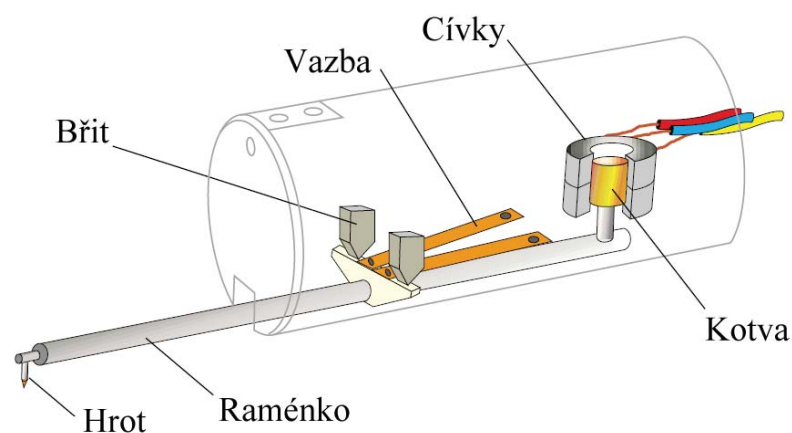
1.5.3 Taylor Hobson Form Talysurf Series 2

Talysurf (viz obr. 24) patří do kategorie mechanických indukčních profilometrů. Ve srovnání s předchozími dvěma přístroji je mnohem prostorově úspornější.



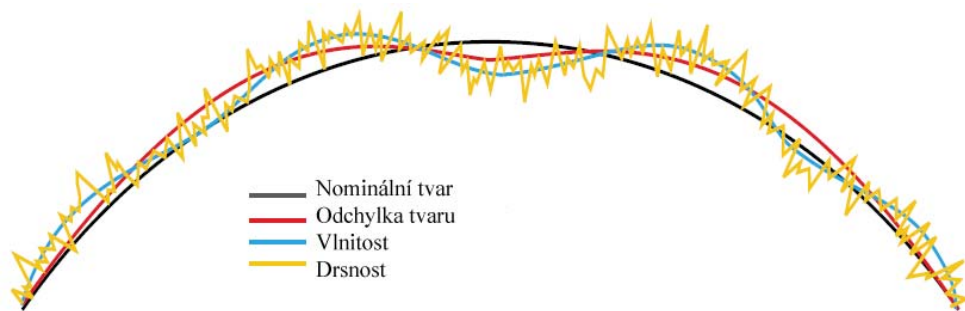
Obr. 24 Profilometr Taylor Hobson Form Talysurf Series 2.

Princip indukčního profilometru je prostý. Hrot na pákovém rameni je tažen po povrchu měřeného objektu. Vertikální pohyb raménka je následně pomocí indukce cívky převeden z mechanického pohybu na elektrický signál [17], který může být dále zpracován pomocí počítače. Pro větší názornost je možné na obr. 25 vidět řez profilometrem Talysurf.



Obr. 25 Řez profilometrem Talysurf (převzato a upraveno z [17]).

Talysurf umožňuje simultánně měřit rozměr, tvar i texturu povrchu [17]. Zakřivení, sklon, drsnost i vlnitost je možné měřit a vyhodnocovat na základě jednoho přejezdu měřicího nástroje po zkoumaném povrchu. Rozměrem se rozumí rádius, vzdálenost a úhel, tyto pojmy jsou používány pro definici funkčního tvaru povrchu. Tvar je odchylkou od nominální podoby povrchu, přičemž se nebere v úvahu drsnost a vlnitost. Vlnitost je periodickou charakteristikou povrchu vznikající nedokonalou funkcí obráběcího stroje, např. jeho vibracemi. Na rozdíl od drsnosti má větší horizontální vlnovou délku – základní periodu vlnitosti. Drsnost vzniká působením geometrie řezného nástroje a řezných podmínek obecně. Vztah mezi těmito charakteristikami je ilustrován na obr. 26.



Obr. 26 Příklad jednotlivých charakteristik měřených profilometrem Taylor Hobson

(převzato a upraveno z [16]).

2 Broušení na CNC stroji Zeeko IRP-800G

Tato kapitola má za úkol nastínit postup implementace procesu tvarového broušení tvrdým nástrojem do obráběcího centra Zeeko IRP-800G. Následuje popis metodiky broušení optických elementů na tomto obráběcím centru. Postup broušení bude ukázán na optických elementech navržených v podkapitole 1.5.

Z literatury [1] pro CNC obrábění kovů je možné se dočíst, že pro zpracování výrobního postupu je nutné mít následující podklady:

- Výkres součásti – detailní výkres musí obsahovat všechny potřebné údaje o obrobku. Geometrický tvar obrobku je definován rozměrovými údaji a rozměrovými tolerancemi. Požadované kvality povrchu se dosahuje vhodně zvolenými reznými podmínkami (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu apod.) a vhodnou posloupností jednotlivých kroků. Úchyly tvaru a polohy jsou dány přesností upínacích prostředků a přesností vlastního stroje.
- Údaje o stroji – velikost pracovního prostoru omezuje velikost opracovávaného obrobku. Výkon hlavního pohonu určuje výkon obrábění, to znamená, že velikostí tohoto výkonu jsou omezeny maximální posuvy a hloubky řezu při zvolené rychlosti během hrubování. Přesnost obrábění stroje závislá na konstrukci stroje, počtu provozních hodin a způsobu prováděných prací (hlazení/hrubování), má vliv na dosažitelnou kvalitu povrchu obrobku, jakož i na rozměrové tolerance a úchyly tvaru a polohy.
- Údaje o polotovaru – tvar, velikost a kvalita povrchu polotovaru mají vliv na upínání obrobku. Kvalita povrchu předepsaná na výkrese ovlivňuje kromě jiného tvar, materiál a užití nástrojů.
- Upínací prostředky – při zpracování výrobního postupu musí být známy upínací prostředky, které jsou k dispozici, aby se zaručilo co nejbezpečnější a nejpresnější upnutí obrobku a nástroje, jakož i optimální obrobení s ohledem na tvar polotovaru, případně obrobku.
- Údaje o nástrojích – na základě tvaru obrobku, materiálu obrobku a požadované kvality jeho povrchu je třeba zvolit nástroje vhodné geometrie a optimálního materiálu.
- Řezné podmínky – optimální rezné podmínky (řezná rychlost, posuv a hloubka řezu) jsou uvedeny v tabulkách výrobců nástrojů. Je také třeba vzít v úvahu charakteristické parametry CNC stroje, např. přesnost vedení a výkon pohonu.

Většina těchto údajů bývá součástí výrobního know-how a jejich detailní popis by pomohl snadno reprodukovat dosažené jedinečné výsledky, což nemusí být žádoucí pro zachování konkurenční výhody, a proto bývají takové informace součástí průmyslového tajemství.

2.1 Implementace a odladění procesu broušení

Před zavedením standardizované metodiky pro broušení optických elementů byla ve spolupráci se zaměstnanci společnosti Zeeko Ltd provedena testovací implementace procesu broušení tvrdým nástrojem do CNC centra IRP-800G. Test měl podobu výroby zrcadel představených již v podkapitole 1.4.

2.1.1 Sférické zrcadlo

Sférické zrcadlo popsané v 1.4.1 bylo postupně vyráběno v následujících krocích. V prvním kroku byl broušen sférický povrch specifikovaný svým poloměrem a jakostí. Další krok představoval vybroušení obvodového tvaru – šestiúhelníku. Broušení samotného šestiúhelníku se skládá z několika dalších dílčích kroků, které budou blíže popsány v dalším textu. Nakonec byly vytvářeny ochranné fazety.

Před samotným broušením musel být výlisek skla přilepen hrubárenským voskem k duralovému držáku pro zajištění co nejpevnějšího usazení za současného dosažení minimalizace deformace způsobené pnutím (viz obr. 27).



Obr. 27 Skleněný výlisek přilepený na duralovém držáku umístěný uvnitř obráběcího centra IRP800G.

2.1.1.1 Broušení profilu povrchu – sféry

Okraje výlisku jsou vyšší než zbytek jeho plochy, tudíž v prvním kroku je tato okrajová nespojitost odstraněna pohybem hlavy obráběcího stroje po spirální trajektorii. Spirálním pohybem je zároveň vytvářen tvar budoucí sféry na výlisku.

V dalším kroku je již možné přistoupit k rastrování celého povrchu výlisku pro postupné vytváření sférického tvaru. Jelikož plocha vykazovala jistou klínovitost, reálný úběr by nebyl ve všech místech plochy stejný, a proto byla plocha rozdělena na dvě poloviny opracované samostatně s rozdílným celkovým úběrem v krocích po 0,6 mm. Na pravé polovině plochy byl celkový úběr 800 μm a na levé 400 μm . Cílem postupu bylo plochu zarovnat, tj. odstranit klínovitost.

Po odstranění klínovitosti bylo možné přistoupit k finalizaci povrchu plochy, opět s krokem 0,6 mm. Tato finalizace byla rozdělena do dvou samostatných dílčích kroků. První dílčí krok s hrubým rastrováním a druhý s jemným rastrováním. Doba prvního dílčího kroku byla 33 hodin s celkovým úběrem 1100 μm a druhého 42 hodin s celkovým úběrem 200 μm .

2.1.1.2 Broušení šestiúhelníkového obvodového tvaru – kontury a ochranných fazet

Ke konturování se využívá měkkého obráběcího nástroje tvořeného gumovým bubnem, na nějž je nasunuto abrazivní plátno s diamantovými peletami (viz obr. 28). Společnost KGS Diamond vyrábí tato plátna v zrnitostech od 60 do 3000. Vzhledem k použití měkkého nástroje je celý proces zařaditelný do kategorie grolishing, avšak s tím rozdílem, že místo bonnetu používaného k obrábění optických povrchů je ke konturování elementů použit právě gumový buben.

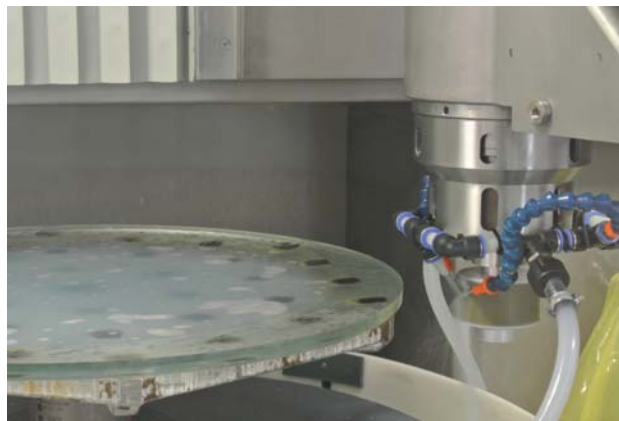
Při konturování se nejprve na hrubo vytvoří každá strana šestiúhelníku zvlášť a teprve poté se nástroj jemně pohybuje kolem celého obvodu skla. Hrubý úběr probíhal v krocích po 0,25 mm a jemný úběr po 0,1 mm. Proces byl optimalizován na minimalizaci výrobního času. Na obr. 29 je vidět, jak nástroj najíždí do prvního kontaktu se skleněným výliskem.

V první iteraci celého procesu konturování se však nepodařilo jednotlivé strany hexagonu vybrousit v požadované kvalitě. Na obr. 30 jsou zobrazeny jednotlivé strany šestiúhelníku, z nichž je jasně vidět jejich postupné zakulacování, které je patrně způsobeno tepelnou degradací nástroje, zejména pryžového bubnu. Během obrábění předposlední strany došlo k rozlepení abrazivního plátna a nástroj musel být vyměněn. Tepelná degradace byla způsobena dlouhým kontaktním časem mezi nástrojem a obrobkem. Obr. 31 ukazuje rozdíl mezi plátnem právě rozlepeným z nástroje a plátnem novým. Stav napovídá tomu, že kdyby nedošlo k rozlepení plátna, pak by pravděpodobně bylo možné pokračovat v procesu, neboť diamantové pelety nebyly příliš

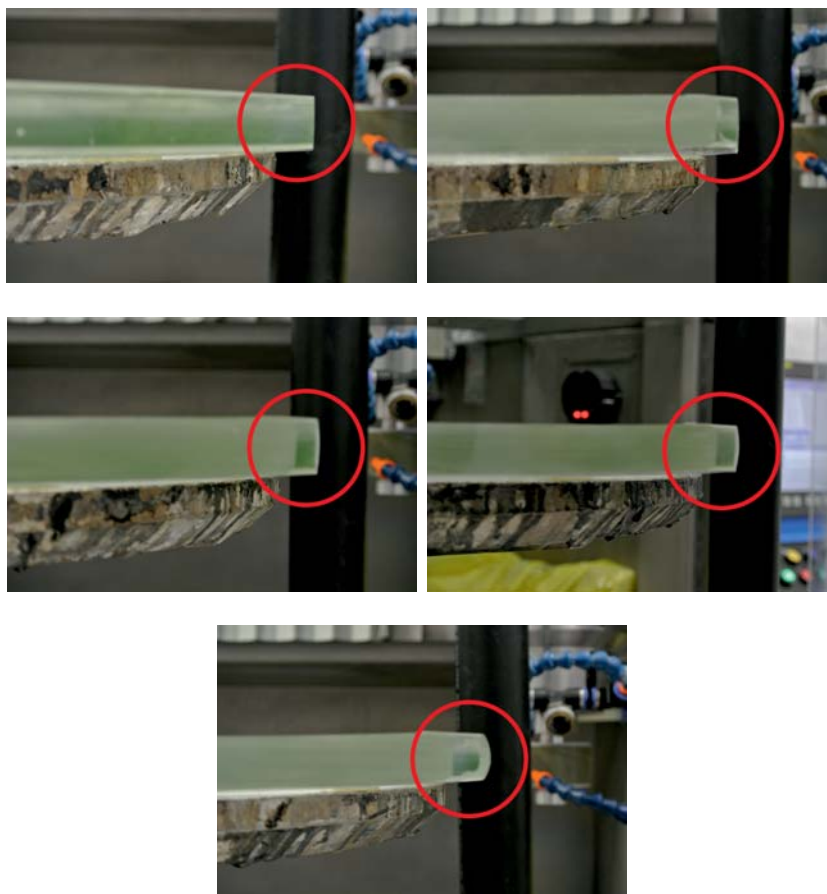
degradovány.



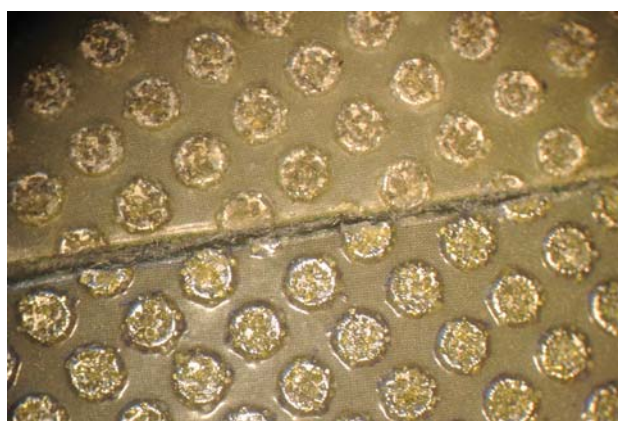
Obr. 28 Speciální nástroj pro obvodové konturování – gumový buben s nasunutým abrazivním plátnem, na jehož povrchu jsou diamantové pelety (KGS Flexis® zrnitost 60).



Obr. 29 Nástroj z obr. 28 umístěný do nástrojové hlavy obráběcího centra IRP800G najíždí do prvního kontaktu s obrobkem – skleněným výliskem.



Obr. 30 Degradace kvality tvaru jednotlivých stran hexagonu (zvýrazněno červeně) způsobená defektem nástroje. Šestá strana chybí z důvodu totální destrukce nástroje.



Obr. 31 Srovnání částí pásů abrazivních plátěn na snímku z mikroskopu. V horní polovině snímku plátno po utržení z bubnu, v dolní polovině plátno nové, lze pozorovat stav opotřebení pelet.

Po výměně nástroje následovala korekce jednotlivých stran, která měla za úkol jejich zarovnání. Použité programy byly upraveny tak, aby se poměr mezi časem kontaktu a bez kontaktu zvětšil ve prospěch chlazení nástroje pomalejšími přejezdy do

pracovních poloh. Dále se také přistoupilo k používání celé plochy nástroje, nikoliv jeho části, pro zajištění rovnoměrného namáhání nástroje. Úběry byly rozděleny do dvou samostatných procesů opět s krokem po 0,25 mm. Mezi těmito procesy byla zařazena in situ kontrola vybroušených stran šestiúhelníku.

Ve výrobním postupu je pak na posledním místě výroba ochranných fazet, která probíhala následujícím způsobem. Nejdříve byl vypočten náklon nástroje, pak byla stanovena konečná výška pro správný rozměr fazety. V programu bylo nastaveno ofazetování všech horních stran, kterého bylo dosaženo kombinovaným pohybem po kružnici a postupným otáčením obrobku. Následně byl vytvořen sklon bočních stran o velikosti 5°. Analogickým postupem jako pro horní fazety bylo dosaženo i spodních fazet. Celkový úběr při tvorbě fazet byl 700 μm , ten byl následován tzv. spark-outem.

2.1.2 Asférické zrcadlo

Asférické zrcadlo popsané v 1.4.2 bylo vyráběno v několika krocích. V prvním kroku byl broušen asférický povrch matematicky definovaný polynomem šestého stupně a jakostí povrchu. Další krok představovalo vybroušení obvodového tvaru – lichoběžníku. Ochranné fazety byly vytvořeny v závěrečném kroku.

Před samotným broušením povrchu asféry je nutné dobře upevnit obráběné sklo, aby byla zajištěna jeho stabilní fixace po celou dobu obrábění. Vzhledem k rozměrům zadní plochy a kvalitě jejího povrchu nebylo možné aplikovat běžně používanou techniku upnutí vakuovým držákem s využitím gumového o-kroužku. Namísto této běžně používané techniky bylo přistoupeno k výrobě náhradního řešení, které spočívalo v podložení skla papírovými obdélníky a následném utěsnění jeho okrajů elektrikařskou izolační páskou. Zmíněné řešení umožňuje kvalitnější upevnění vakuem, navzdory tomu, že papír absorboval vodu. Dále bylo sklo z boků zajištěno pomocí excentrů. Příklad zajištění vzorku excentrickými držáky je na obr. 32.



Obr. 32 Příklad upevnění vzorku pomocí excentrických držáků.

2.1.2.1 Broušení profilu povrchu – asféry

Povrch asféry (anuloidu) je popsán polynomem šestého stupně. Tolerance tvaru povrchu součásti je určena veličinami $R_q = 0,2 \mu\text{m}$ a $Wdq = 100''$ na referenční délce 1 mm.



Obr. 33 Asférické zrcadlo upevněné vakuem a utěsněné elektrickářskou páskou v momentě rastrování asférického povrchu hrncovou frézou.

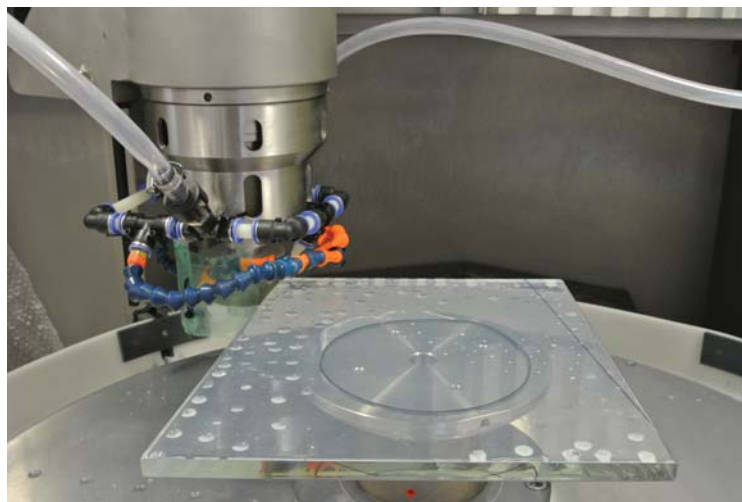
Povrch asféry bude vytvářen postupným rastrováním pomocí hrncové frézy, viz obr. 33. Aby se předešlo přílišnému zvlnění povrchu, je nutné stanovit vhodnou velikost rastrovacího kroku. Zvolená velikost rastrovacího kroku teoreticky závisí pouze

na průměru diamantového nástroje a sklonu vzhledem k normále povrchu. Při realizaci je nutné ovšem brát v úvahu rovněž plastickou deformaci obrobku a nástroje, vytrhávání materiálu nástroje a obrobku, chvění stroje apod. Nicméně tyto vlastnosti nelze snadno matematicky dopočítat a je tedy snažší proces ověřit experimentálně.

Jelikož se začíná obrábět z planární desky, je první krok obrábění optimalizován na velikost úběru, nikoliv na kvalitu povrchu. S ohledem na parametry obráběného skla a obráběcího centra byl hrubý úběr v jednom kroku procesu stanoven na 0,6 mm. Finalizace povrchu byla provedena s úběrem o krocích s velikostí 0,2 mm, přitom se taktéž zmenšoval rastrovací krok. Hrubý úběr materiálu probíhal v devíti separátních krocích v celkové délce 16 hodin. Finalizace měla být provedena ve dvou krocích o celkové délce 21 hodin. Jelikož teoreticky odhadnutý úběr materiálu neodpovídal naměřenému, byl poslední krok zvětšen o 0,2 mm.

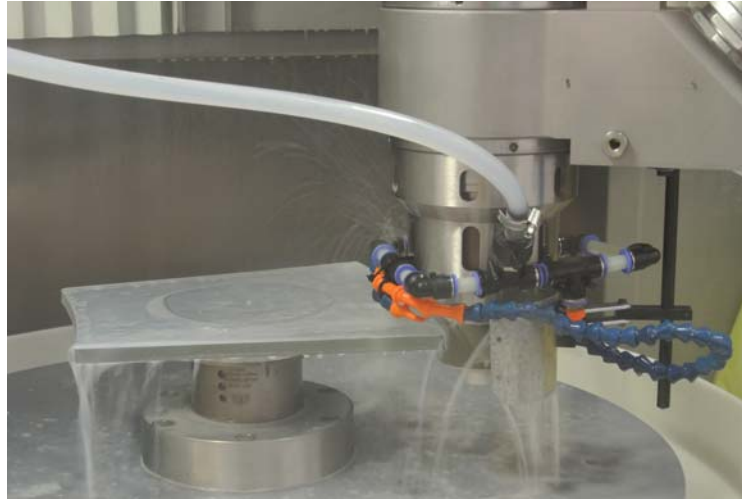
2.1.2.2 Broušení lichoběžníku a ochranných fazet

Pokud se tvar lichoběžníku začíná tvořit z dobře připraveného (nalámaného) kusu skla, není nutné provádět úvodní hrubování a je možné ihned přejít k jemnému broušení. V opačném případě je nejdříve nutné provést hrubování tvaru (viz obr. 34) s následným jemným broušením (viz obr. 35). Postup je takový, že se nejprve vyrobí delší strany a následně strany krátké. Krátké strany mají tvar oblouků. G kód, kterým se řídí CNC stroj, umožňuje přímo nastavit kruhovou interpolaci²⁵, a není tudíž nutné složitě vytvářet vlastní trajektorii tvořenou řadou velmi krátkých rovných úseků.



Obr. 34 Vakuově uchycený kus skla připravený k hrubování obvodových stran, fixem je naznačen úběr materiálu.

²⁵Příkaz G02



Obr. 35 Jemné broušení obvodového tvaru (od hrubého broušení lze odlišit pomocí barvy diamantového plátna).

V posledním kroku byly vytvořeny fazety. Největším problémem, zejména při výrobě velmi malých fazet, může být náklon skla a případná degradace nástroje. Náklon skla je detekován integrovanou kontaktní sondou Renishaw RMP600. Fazeta je vyrobena ve dvou krocích – hrubé a jemné broušení s využitím dvou různých zrnitostí pláten KGS Flexis. Celkový úběr při výrobě fazet byl pak 300 μm . Finální podoba je zobrazena na obr. 36.



Obr. 36 Finální tvar lichoběžníku (vlevo) a detail fazety.

2.2 Metodika broušení optických elementů

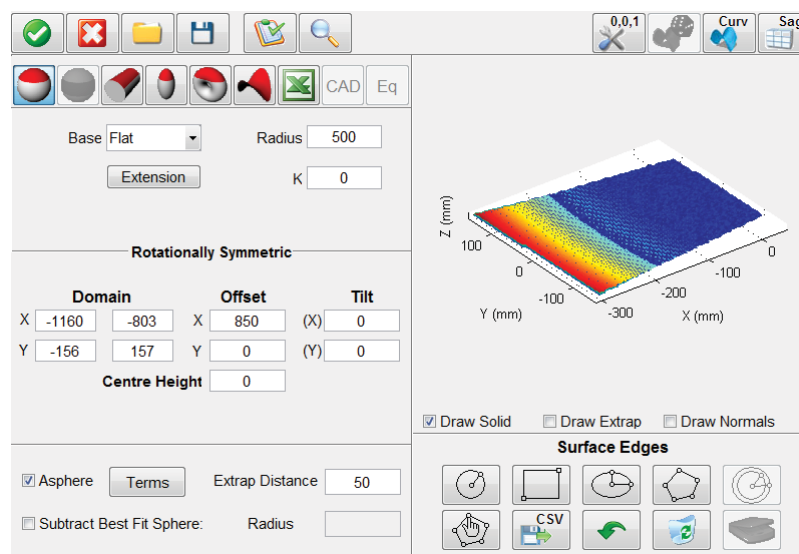
Na dalších stránkách bude představen co možná nejuniverzálnější postup pro broušení optických elementů na CNC stroji Zeeko IRP-800G. Postup je následující:

- Příprava CNC programu.
- Vlastní broušení a in situ kontrola procesu pomocí kontaktní sondy.
- Výstupní kontrola vyrobených kusů pomocí CMM, popřípadě profilometru a jiných měřicích metod.

2.2.1 Příprava CNC programu

Příprava CNC programu probíhá zejména v programovacím prostředí Zeeko TPG, který byl prezentován v odstavci 1.2.3.1. Nicméně trajektorie pro vytváření obvodových kontur a ochranných fazet je zatím nutné připravovat bez použití CAM softwaru. Příprava CNC programů se uskutečňuje s pomocí odděleného počítače nepřipojeného k obráběcímu centru.

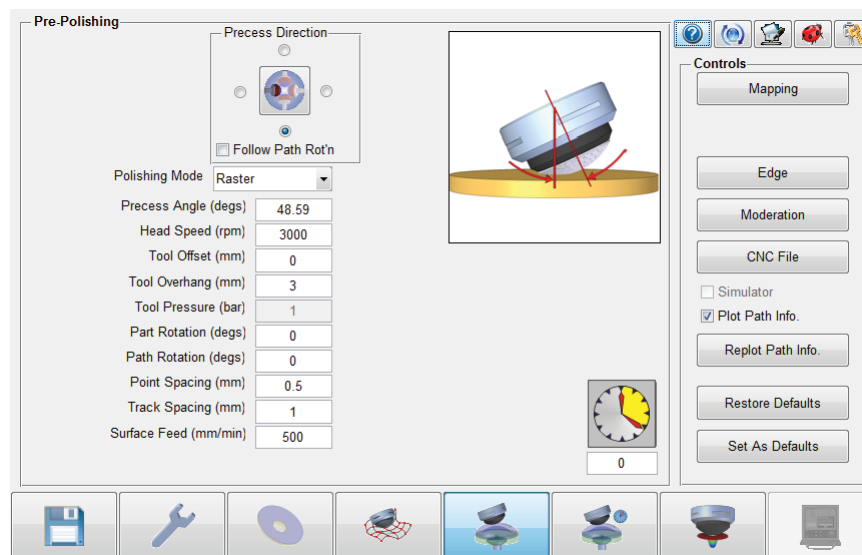
Základem jakéhokoliv návrhu je výkres nebo v ideálním případě přímo 3D model. Použitá verze softwaru TPG nedisponovala možností přímého importu souboru s příponou .step²⁶, tudíž nebylo možné využít již vytvořených 3D modelů, které by se pouze nahrály do softwaru společnosti Zeeko. Je tedy nutné optický element ručně překreslit do rozhraní „Surface designer“ v programu TPG (viz obr. 37).



Obr. 37 Zeeko TPG, rozhraní Surface designer.

²⁶Typ souboru pro ukládání CAD modelů.

Nákres samotného elementu představuje jen zlomek informací nutných k zahájení obráběcího procesu. Nedílnou součástí těchto informací jsou rovněž brusné podmínky. Do těchto podmínek se řadí: tvar trajektorie nástroje, úhel náklonu obráběcí hlavy, rychlost vřetene, rychlosti posuvu a přísuvu, velikost rastrování apod. Pro správné vytvoření CNC souboru je nutné veškeré tyto podmínky zadat do programu Zeeko TPG (viz obr. 38).



Obr. 38 Zeeko TPG, obrazovka pro zadání brusných podmínek.

V případě komplikovaných trajektorií, např. při výrobě obvodových kontur nebo ochranných fazet, kdy je třeba provádět komplexnější pohyby než jen pohyb po řádcích, je nutné program připravit ručně mimo prostředí Zeeko TPG zapisováním G-kódu po jednotlivých příkazových krocích.

Připravený program je pak přenesen do terminálu obráběcího centra na USB flash paměti.

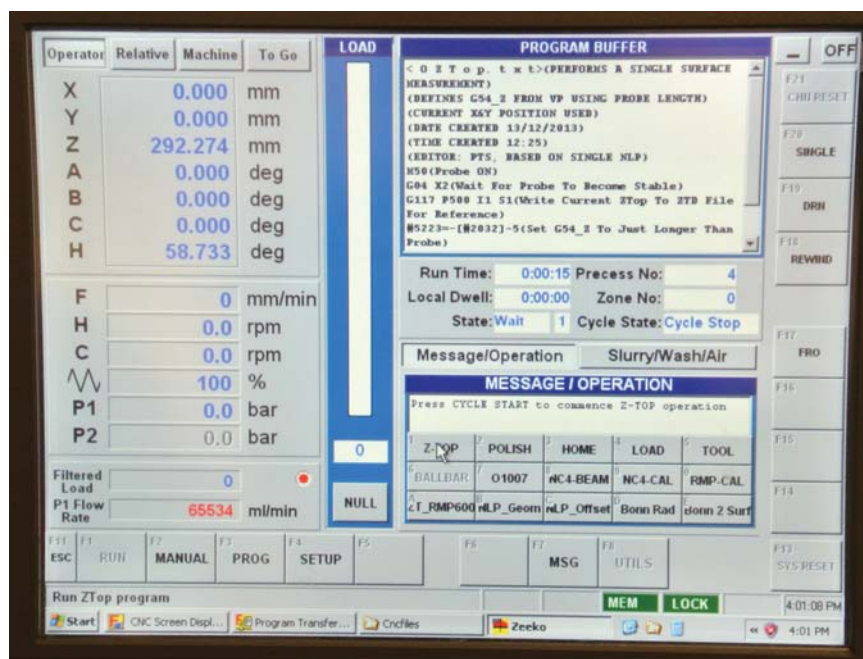
2.2.2 Vlastní broušení a in situ kontrola povrchu

Pro výrobu optických elementů, respektive pro zajištění jejich přesného a kvalitního broušení a leštění, je naprosto podstatné co nejdokonalejší upnutí obrobku. Upnutí musí být velmi tuhé, aby nedošlo k uvolnění skla během obrábění. Na druhé straně však nesmí upínání způsobovat příliš velké pnutí uvnitř skla. V zásadě se dají použít dva hlavní postupy. První vyžaduje přidání dalšího materiálu mezi držák obrobku CNC centra a obrobek. Typicky se používá například hrubárenského vosku, kterým se sklo přilepí k duralovému talíři. Druhý postup žádný další materiál nevyžaduje, neboť je sklo uchyceno vakuem. Toto řešení vyžaduje, aby prostor mezi obrobkem

a držákem byl velmi dobře utěsněn. Toho se dosahuje použitím např. gumových okroužků. Výhodou je velmi rychlá montáž i demontáž ve srovnání s lepením obrobku. Na druhé straně, pokud by se objevily netěsnosti ve vakuovém systému, tak by obrobek nebyl uchycen dostatečně pevně jako ten, který bude přilepen hrubárenským voskem.

V případě, že je již zajištěno náležité upnutí obrobku, lze přejít k dalšímu kroku, kdy je obrobek vhodně zorientován pomocí úchylkoměru nebo pomocí integrovatelné sondy Renishaw RMP600.

Následujícím důležitým krokem je umístění přírodních trubice chladicího média do polohy, ve které bude docházet k co nejefektivnějšímu chlazení nástroje a dostatečnému odplavování brusných úlomků. Chlazení je velmi důležitým prvkem celého procesu a od úrovně jeho provedení se bude také odvozovat kvalita získaného povrchu.



Obr. 39 Dotykový displej terminálu CNC centra Zeeko IRP-800, na kterém se spouští obráběcí proces stiskem tlačítka „polish“.

Jakmile je dosaženo zorientování obrobku a trubice s chlazením jsou ve správných polohách, je možné spustit CNC program stiskem tlačítka „polish“ na terminálu CNC stroje (viz obr. 39). Při prvním spuštění programu je velmi výhodné program spouštět s nižší rychlostí chodu pro zabránění vzniku kolize s obrobkem, například v důsledku chybného naprogramování. Popřípadě je možné první krok rastrování provést v nenulové výšce nad povrchem obrobku pro kontrolu správného sledování nastavené trajektorie obráběcí hlavy.

Samotný proces broušení trvá řádově hodiny až desítky hodin v závislosti na velikosti úběru a ploše obrobku.

Po provedení úběru většinou následuje kontrola povrchu pomocí integrovatelné sondy Renishaw RMP600. Naměřená data jsou přenesena do programu Zeeko Metrology Toolkit. Zde, po zjištění aktuálního dosaženého úběru, je připraven další chod úběru materiálu z obrobku.

K dosažení povrchu dle výkresových specifikací může být nutné provést více chodů se specifickým krokem úběru v každém jednotlivém kroku, jehož velikost závisí na mnoha faktorech. V ideálním případě je proveden také test úběru na malém vzorku skla ještě před vlastním obráběním velkého kusu.

2.2.3 Výstupní kontrola

Po dokončení obráběcího procesu je vhodné provádět výstupní kontrolu kvality povrchu na externích zařízeních, a to z hlediska kontroly tvaru i z hlediska kontroly drsnosti. Pro kontrolu tvaru postačují stroje z kategorie CMM, zatímco pro kontrolu drsnosti povrchu se používají např. kontaktní profilometry.

Jelikož mají broušené optické elementy velmi často tvar polygonu, tak se pomocí CMM většinou skenuje v polárních souřadnicích. Zabrání se tím nutnosti komplikovaně programovat různé délky řádků.

Při měřeních tvaru je nutné brát v úvahu, že se budou vyskytovat odchylky mezi měřeními upnutých a uvolněných elementů.

Skenování pomocí profilometru umožní následně přesně stanovit drsnost povrchu Ra a Rq . Rovněž je skenování profilometrem vhodné pro analýzu lokálních diskontinuit, které leží mimo rozlišovací schopnosti CMM. Zpravidla se provádí několik měření, vždy alespoň v délce 5 mm, pro kterou je dle norem možné stanovit drsnost povrchu.

Dále je možné při výstupní kontrole využívat mikroskopů a dalších optických, či kontaktních zařízení v závislosti na přísnosti výrobních požadavků.

Dle velikosti zadaných výrobních tolerancí se stanoví vhodná vlastní metodologie výstupní kontroly.

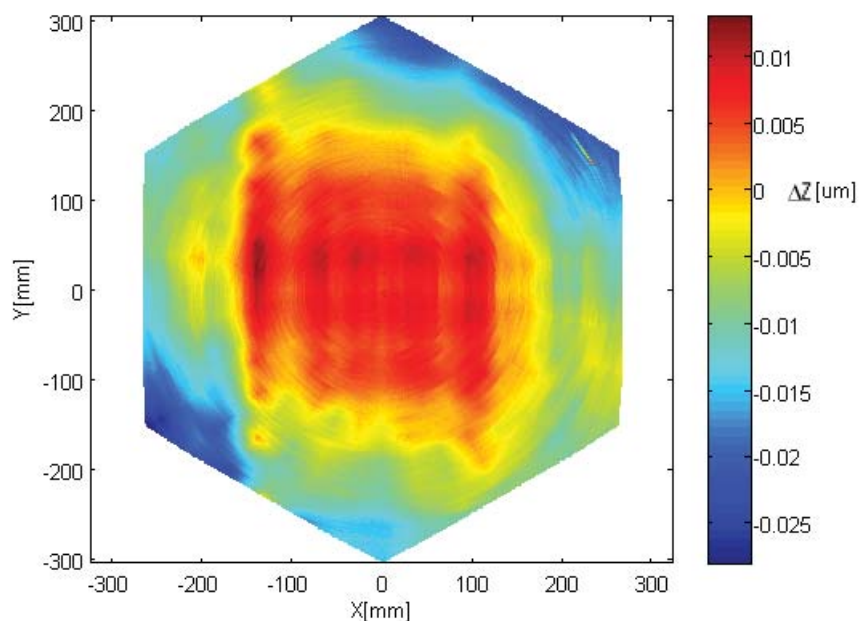
3 Zhodnocení úrovně kvality optických povrchů vybroušených na CNC obráběcím centru Zeeko IRP-800G

V této kapitole jsou porovnány výsledky dosažené broušením optických elementů na CNC stroji Zeeko IRP-800G s těmi, které jsou obsaženy ve výkresové dokumentaci. Pro kontrolu obou vzorků byla používána zařízení uvedená v podkapitole 1.5.

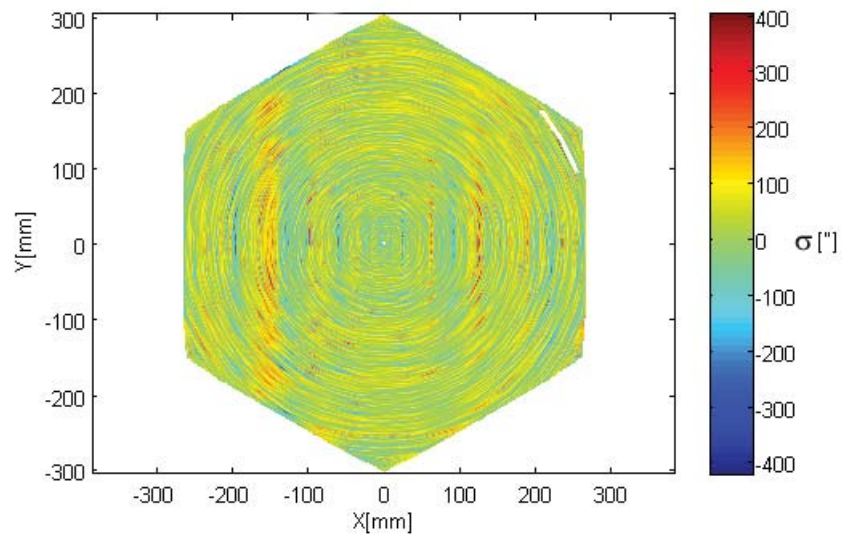
Vzorky budou hodnoceny z hlediska tvaru jejich povrchů pomocí CMM stroje i z hlediska drsnosti využitím kontaktního profilometru.

3.1 Sférické zrcadlo

Nejprve byl skenován povrch sférického zrcadla pomocí CMM zařízení pro získání odchylky od nominálního tvaru (viz obr. 40). V grafu je vynesena odchylka ΔZ od nominálního tvaru v jednotkách μm . Pomocí specializovaného programu vytvořeného v prostředí MATLAB byla rovněž stanovena odchylka úhlu sklonu plochy σ (viz obr. 41). Na tomto grafu je vynesena odchylka úhlu sklonu plochy (slope error) v úhlových vteřinách.

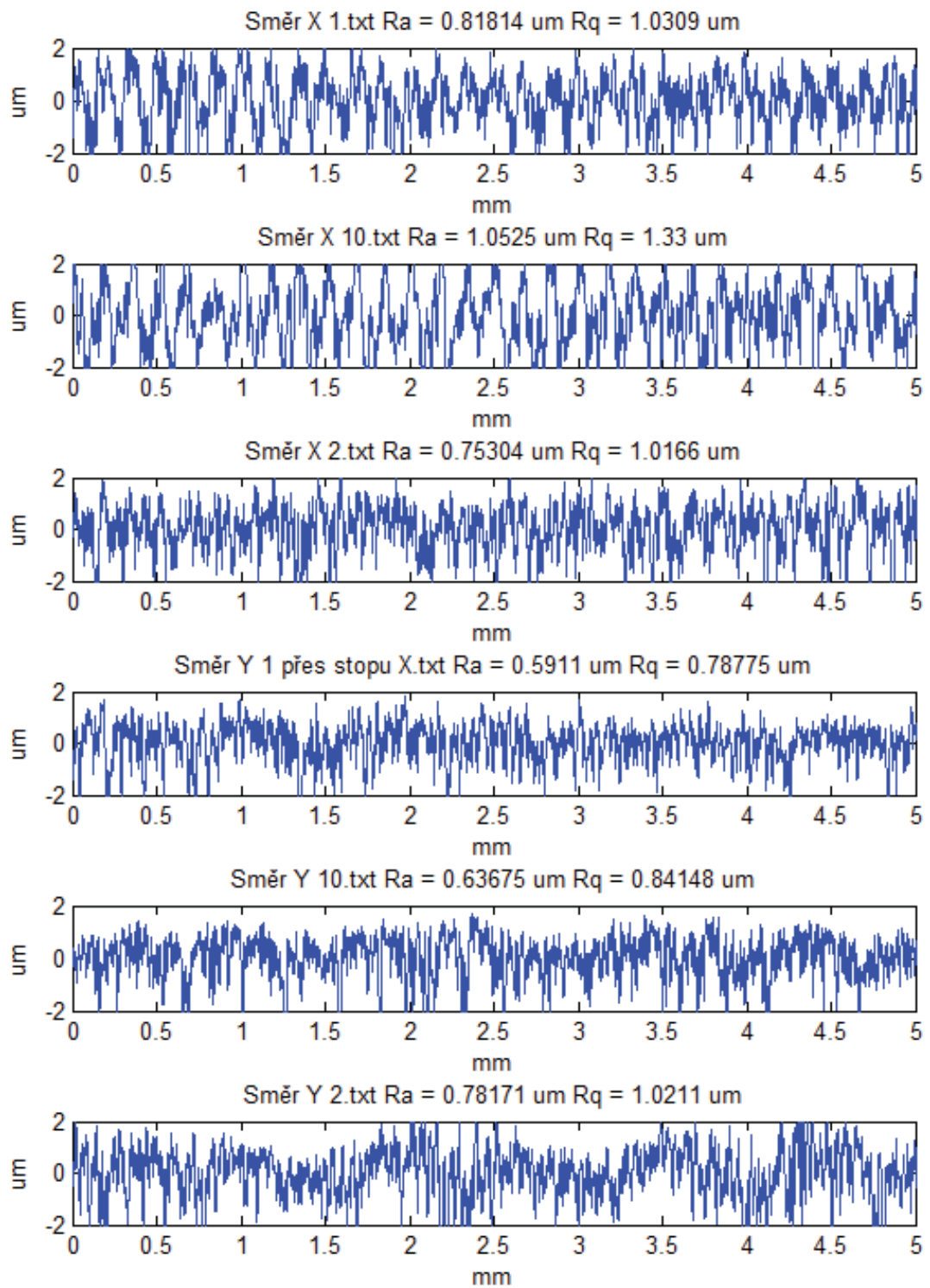


Obr. 40 Sférické zrcadlo – odchylka od nominálního tvaru.



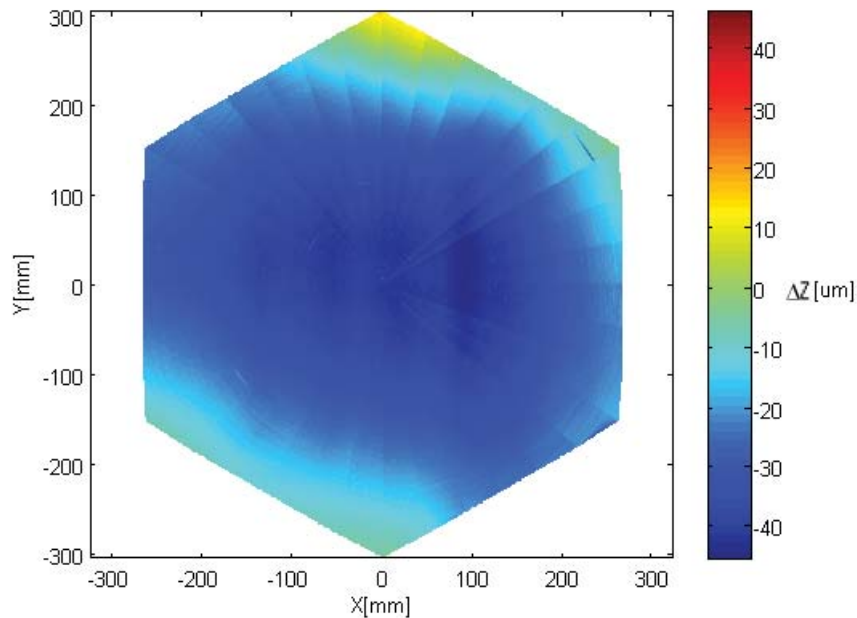
Obr. 41 Sférické zrcadlo – odchylka úhlu sklonu plochy.

V dalším kroku bylo provedeno měření drsnosti profilometrem Taylor Hobson Talysurf. Skenování bylo provedeno celkem na šesti separátních stopách (třech horizontálních a třech vertikálních), přičemž každá stopa měla délku 5 mm, což umožňuje výpočet parametrů Ra a Rq , které jsou na obr. 42 rovněž u každé měřené stopy uvedeny.



Obr. 42 Sférické zrcadlo - drsnost povrchu.

Taktéž byl proveden test spočívající ve zjištění rozdílu odchylek od nominálního tvaru při měření na přilepeném a na uvolněném zrcadle (viz obr. 43). Z grafu je patrné, že tento rozdíl může činit až několik desítek mikrometrů. Z toho vyplývá, že by se muselo, v ideálním případě během obrábění, provádět kontrolní měření vždy na uvolněném skle, což není příliš praktické z důvodů nutnosti neustálého odlepování a nalepování skla hrubárenským voskem. Ze zmíněného důvodu byl již pro další budoucí test broušení navržen a vyroben speciální držák umožňující vakuově uchytit skleněný výlisek pro výrobu hexagonálního sférického zrcadla. Předběžné testy ukazují, že by se díky tomuto přípravku mohl rozdíl odchylek od nominálního tvaru při měření na upnutém a na uvolněném zrcadle značně snížit.

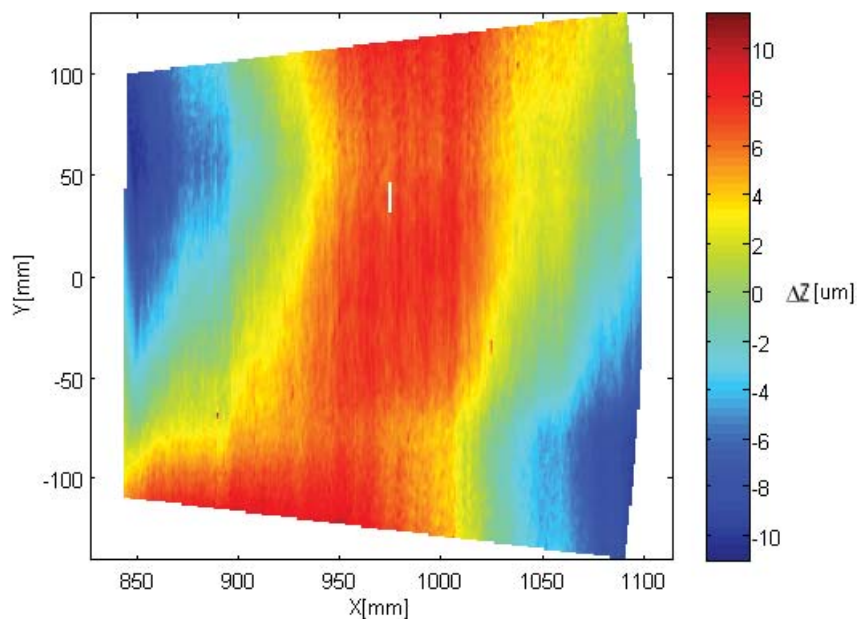


Obr. 43 Rozdíl odchylky od nominálního tvaru u přilepeného a uvolněného zrcadla.

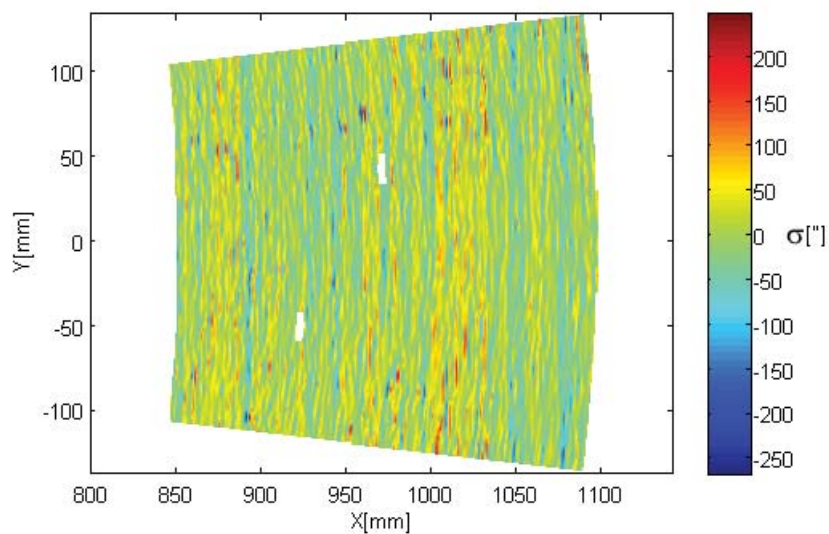
Z předložených výsledků je zřejmé, že nebylo dosaženo výkresových parametrů. Drsnost povrchu je překročena téměř pětikrát. Odchylka úhlu sklonu plochy může v extrémním případě růst až ke 400“.

3.2 Asférické zrcadlo

Analogicky k případu sférického zrcadla byly provedeny totožné testy i na asférickém skle. Na obr. 44 a obr. 45 jsou zobrazeny odchylky od nominálního tvaru ΔZ , respektive odchylky úhlu sklonu profilu σ .

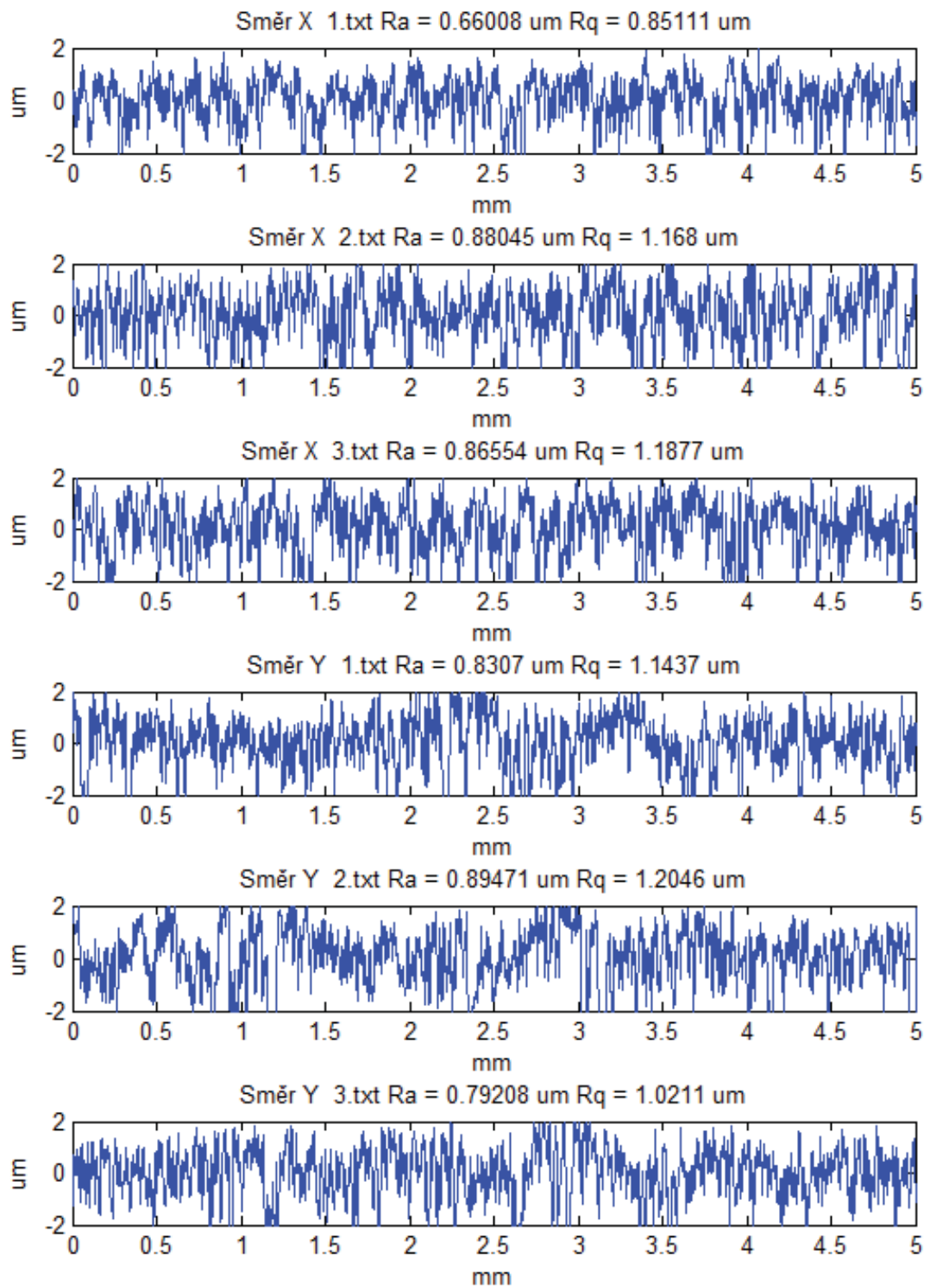


Obr. 44 Asférické zrcadlo – odchylka od nominálního tvaru.



Obr. 45 Asférické zrcadlo – odchylka úhlu sklonu plochy.

Stejně jako v případě sférického zrcadla byla v dalším kroku měřena drsnost profilometrem Taylor Hobson Talysurf. Skenování bylo opět provedeno celkem na šesti stopách (třech horizontálních a třech vertikálních), přičemž každá stopa měla délku 5 mm, což umožňuje výpočet parametrů Ra a Rq , které jsou na obr. 46 rovněž u každé měřené stopy uvedeny.

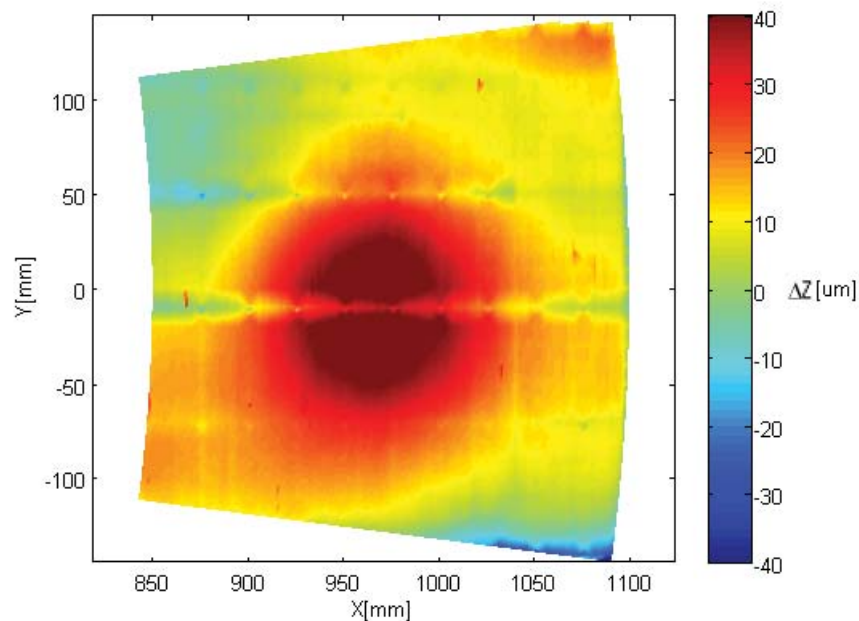


Obr. 46 Asférické zrcadlo – drsnost povrchu.

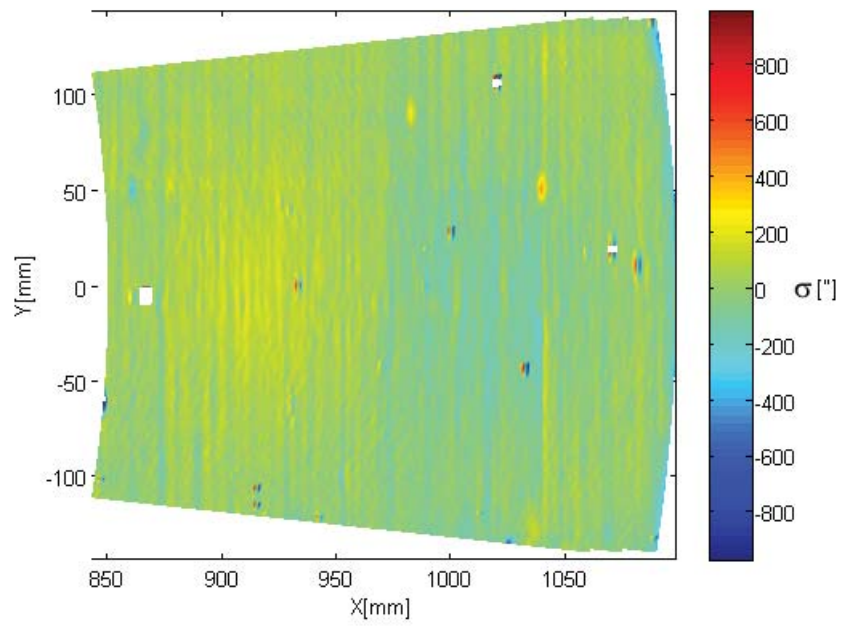
Stejně jako v případě sférického zrcadla, ani u asférického zrcadla nebylo dosaženo výkresových parametrů. Hodnota drsnosti je místy překročena až šestinásobně, zatímco odchylka úhlu sklonu plochy může v extrémním případě přesahovat až 200“.

Pro srovnání následuje stejná řada grafů prezentující kvalitu povrchu, které je možné dosáhnout, pokud se za proces broušení tvrdým nástrojem zařadí ještě tzv. grolishing (viz obr. 48 a obr. 49). Zejména zvýšení kvality drsnosti je markantní (čtenář může srovnat obr. 49 a obr. 46).

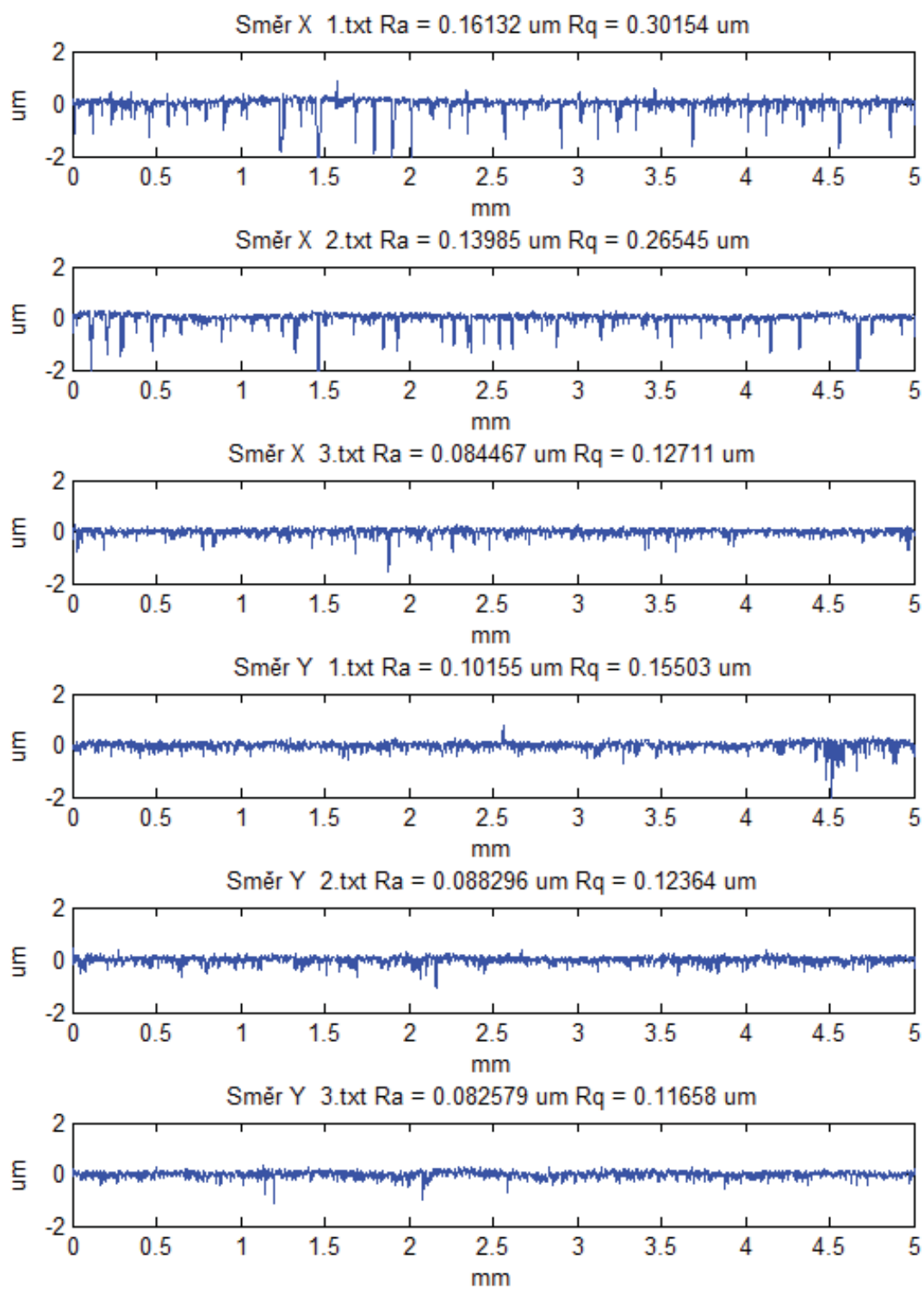
Je evidentní, že oproti asférickému zrcadlu zpracovanému pouze tvrdým nástrojem, vykazuje zrcadlo dokončené grolishingem místy až desetkrát jemnější drsnosti povrchu. Stejně tak i odchylka úhlu sklonu plochy se na větší části zrcadla pohybuje do hodnoty 200“. Lokálně může tato odchylka ovšem dosáhnout až k 800“.



Obr. 47 Asférické zrcadlo – odchylka od nominálního tvaru u zrcadla dokončeného grolishingem.



*Obr. 48 Asférické zrcadlo – odchylka úhlu sklonu plochy u zrcadla dokončeného
grolishingem.*



Obr. 49 Asférické zrcadlo – drsnost povrchu u zrcadla dokončeného grolishingem.

Závěr

V předložené práci jsou v obecné rovině představena CNC obráběcí centra. Pozornost je věnována především konkrétnímu příkladu CNC zařízení Zeeko IRP-800G navrženému speciálně pro účely optické výroby. V textu je dále zmíněno nezbytné hardwarové i softwarové vybavení nutné pro zahájení broušení na tomto CNC centru. Text je doplněn o stručnou teorii obrábění skel. Tato teoretická část se rovněž věnuje popisu optických elementů, které byly na IRP-800G broušeny. V jejím závěru jsou popsána také zařízení určená ke kontrole kvality povrchu vyrobených optických elementů.

Prakticky zaměřená část práce je věnována analýze postupu broušení sférického hexagonálního a asférického lichoběžníkového optického elementu. Provedené zkoušky procesu broušení umožňují zvolit nejvhodnější technologické postupy pro broušení optických povrchů, ale také obvodových kontur a ochranných fazet. Z hlediska uživatele zařízení je významný rozbor a shrnutí metodiky broušení, pomocí níž lze zvolit nejvýhodnější využití stroje pro vysoce kvalitní broušení optických elementů.

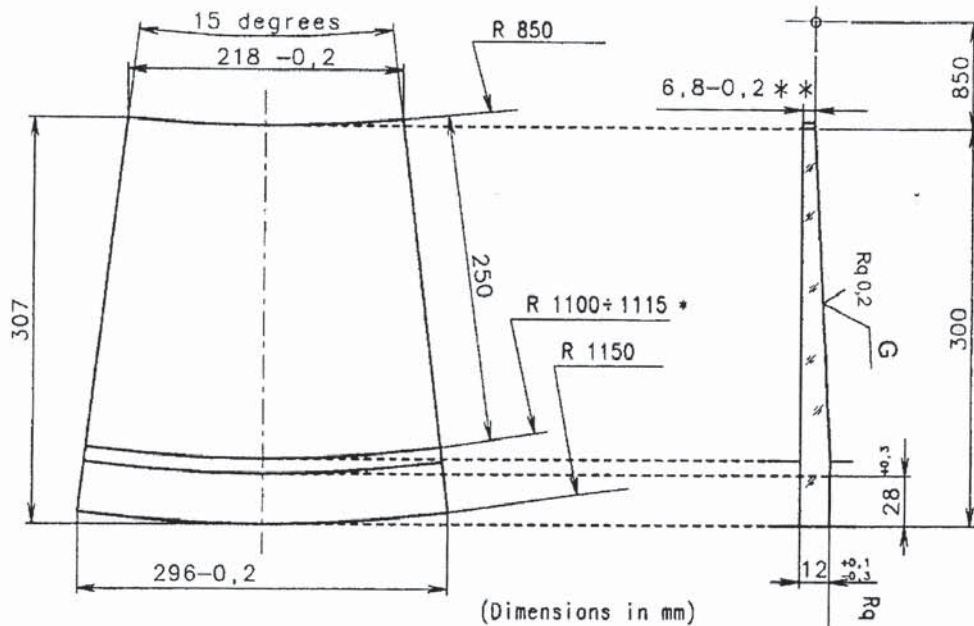
Stroje Zeeko řady IRP (Intelligent Robotic Polisher) nebyly původně zamýšleny pro účely broušení, nýbrž zejména pro korektivní leštění a tzv. grolishing. Implementace technologického postupu broušení tvrdým nástrojem s vázaným diamantem tedy představuje inovaci rozšiřující výrobní možnosti a využití strojů řady IRP, kterou se významně zvyšuje jejich užitná hodnota.

Poslední třetí kapitola shrnuje výsledky analýzy kvality povrchu dosažené během zkoušek navrženého technologického postupu. I když při prvním běhu obrábění pomocí tvrdého nástroje nebylo dosaženo předpokládaných parametrů podle výkresové dokumentace, bylo získáno mnoho cenných praktických poznatků a zkušeností. Zejména bylo zjištěno, že kombinace obrábění tvrdým nástrojem a dokončování grolishingem představuje možnost dokonalejšího broušení optických elementů než samostatné používání tvrdých nástrojů.

Ukázalo se, že používání tvrdých nástrojů je výhodné z hlediska nízkého opotřebení nástroje za současného dosažení velkých úběrů. Kromě toho grolishing umožňuje získat optický povrch s nižší drsností než dovoluje samotné obrábění tvrdými nástroji. Taktéž je v práci zdůrazněna nutnost vylepšení fixace velkých zrcadel pomocí vakuového uchycení.

Informace a praktické zkušenosti získané během testování CNC centra Zeeko IRP-800G budou dále využívány pro další vývoj technologických postupů určených k výrobě přesných a vysoce kvalitních optických elementů.

B: Výkres asférického zrcadla



(Dimensions in mm)

$$a = 1,048385 \times 10^{-5}$$

$$b = -7,8157 \times 10^{-12}$$

$$c = -1,8455 \times 10^{-18}$$

Formula of the aspheric surface

$$z = ay^2 + by^4 + cy^6$$

Reference length: $1 \pm 0,05$
max. = 100"

PROTECTIVE CHAMFERS: 0,3

NOTES: *THIS RANGE OF VALUES IS CALCULATED FOR PART WITH PHARIPHERY THICKNES $6,8^{-0,2}$
**TILT ANGLE OF THE ASPHERIC SURFACE TO THE EDGE OF THE PART o 1 arc min

Left surface		Material data		Right surface	
R = ∞ UNCONTROLLED SURFACE- MACHINED ONLY IF WILL BE NECESSARY		Glass type BK-7 SCHOTT B270 SCHOTT nd = 1,5229 ve = 58,3 ± 0,6 p = 2,55 gcm ⁻³ α(20°C, 300°C) = 9,4 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹		Asphere 3/ Wdq=100 ^μ 5/ Rq = 0,2 μm	
INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	SLO UP a FzÚ AVČR Olomouc	
ZN.MAT.		T.O.			
ROZM.-POLOT.				HMOTNOST kg	MÉR.
POM. ZAR.				ČSN	TR.C.
VYPR. R. POOPIS	NORM.REF.			POZ.	POČET KS.
PŘEZK.					
TECHNOL.	SCHVÁLIL			STARÝ V.	Č.V.
NÁZEV	ASPHERICAL TESTING SEGMENT - GRINDED			O-04-12-14	
				List 0	List

Seznam použitých a doporučených zdrojů

- [1] FRISCHHERZ, A., PIEGLER, H., PRAGAČ, J.: Technologie zpracování kovů 2, Odborné znalosti. 4. vydání, SNTL, 2001.
- [2] ŠTULPA, M.: CNC obráběcí stroje a jejich programování, 1. vydání, BEN – technická literatura, 2006.
- [3] Response from Zeeko to the Invitation to Tender, Part C – The guaranteed technical parameters. [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <https://zakazky.upol.cz>
- [4] Zeeko company profile for journalists. [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.lati.org.uk>
- [5] BLIEDTNER, J., GRAFE, G., HECTOR, R.: Optical Technology. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2011.
- [6] PRESTON, F. W. *J. Soc. Glass Technol.*, **11**, 247 (1927).
- [7] Propagační materiály společnosti Dr. Müller Diamantmetall AG. [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.muedia.de/>
- [8] YU, G., WALKER, D., LI, H.: Implementing a grolishing process in Zeeko IRP machines. *Applied optics* **51** (27), 6637–6640, 2012.
- [9] WALKER, D. D., BALDWIN, A., EVANS, R., FREEMAN, R., HAMIDI, S., SHORE, P., TONNELIER, X., WEI, S., WILLIAMS, C., YU, G.: A Quantitative Comparison of Three Grolising Techniques for the PrecessionsTM Process. *Proc. of SPIE* **6671**, Optical Manufacturing and Testing VII, 2007.
- [10] Propagační materiály společnosti KGS Diamond. [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.kgsdiamond.com/>
- [11] BASS, M., MAHAJAN, V. N., STRYLAND, E. VAN: Handbook of Optics, Volume II, Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry, Third edition, McGraw-Hill, 2010.
- [12] ŠPERKA, P.: Struktura povrchu vybraných strojních součástí. Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. [online]. [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz>
- [13] KARÁSEK, J.: Metrologie a montáž, přednáška č. 10: Geometrické vlastnosti povrchu. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci. [online]. [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://www.techno-mat.cz/>
- [14] KUMLER, J. J., CALDWELL, J. B.: Measuring surface slope error on precision aspheres. *Proc. of SPIE* **6671**, Optical Manufacturing and Testing VII, 2007.
- [15] Technické brožury a propagační materiály společnosti Renishaw. [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/>
- [16] DOLÁK, D.: Rešerše souřadnicových měřicích strojů CMM a měřicích ramen CMMs. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2010.

- [17] Technické brožury a propagační materiály společnosti Taylor Hobson. [online]. [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.taylor-hobson.com/>
- [18] DILLINGER, J., DOBLER, H. - D., DOLL, W., ECHERICH, W., GÜNTER, W., HEINZLER, M., IGNATOWITZ, E., OESTERLE, S., RIEBLER, L., STEPHAN, A., VETTER, R.: Moderní strojírenství pro školu i praxi. Europa- Sobotáles, Praha, 2007.

Fotopříloha:



Foto 1 Dramatické stěhování stroje Zeeko do budovy SLO UP a FZÚ AV ČR.

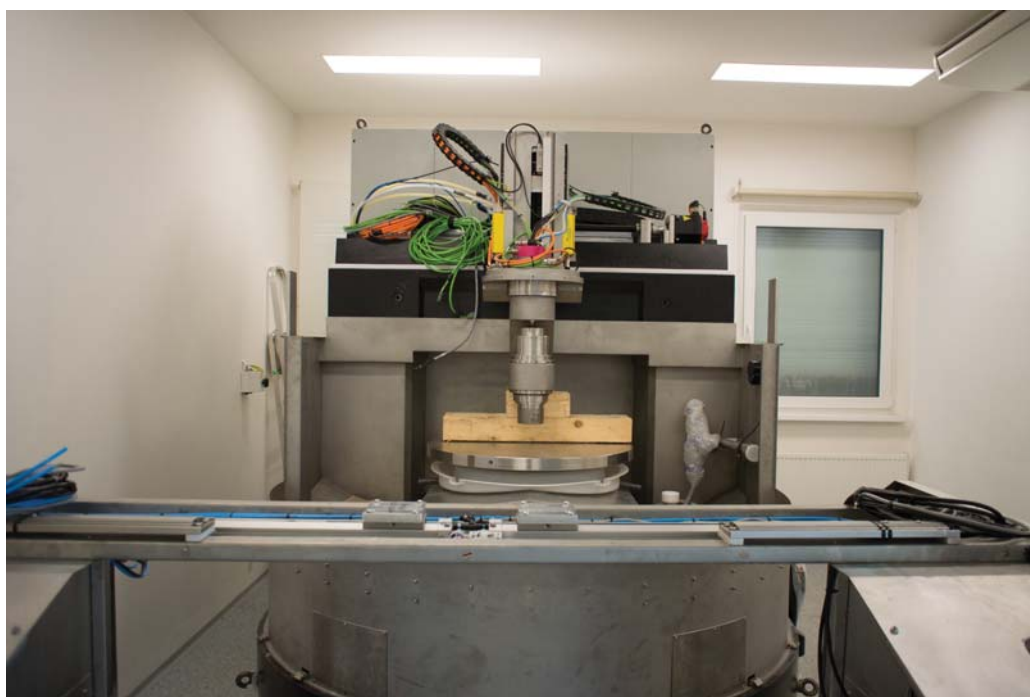


Foto 2 Stroj pomalu získává svou podobu uvnitř laboratoře.

Rejstřík

CAM, 32

CIM, 13

CMM, 43

CNC, 12

FEPA, 22

Flexis[®], 24

grolishing, 24, 34

IRP-800G, 16

NC, 12

profilometr, 45

Slurry Unit, 20

spark out, 33

Telum[®], 24